



DESENVOLVIMENTO DAS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D: SLS E FDM (MATERIAIS DE ENGENHARIA)

ARTUR JOSÉ AZEVEDO BARROS E CASTRO

outubro de 2023

DESENVOLVIMENTO DAS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D: SLS E FDM (MATERIAIS DE ENGENHARIA)

Artur José Azevedo Barros e Castro

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

DESENVOLVIMENTO DAS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D: SLS E FDM (MATERIAIS DE ENGENHARIA)

Artur José Azevedo Barros e Castro

1161228

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto e coorientação do Mestre João Manuel Pinho Ribeiro.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização desta dissertação. Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família por todo o seu apoio incondicional ao longo dos anos. Sem a sua constante motivação e encorajamento, não teria sido possível chegar até aqui.

Também gostaria de agradecer à minha namorada Francisca, por me dar amor, apoio e compreensão durante todo este processo de escrita. A sua paciência e ajuda foram essenciais para que eu me pudesse concentrar e alcançar os meus objetivos.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Arnaldo Pinto, e ao meu co-orientador, João Pinho, pela sua orientação, conselhos e críticas construtivas. A experiência e conhecimento de ambos foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Gostaria de destacar também o apoio e colaboração do orientador da Simoldes Plásticos, João Queirós. A sua contribuição foi essencial para a realização desta dissertação.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas da Simoldes Plásticos que colaboraram comigo. Sem o seu apoio e dedicação, não teria sido possível chegar a este ponto.

Mais uma vez, muito obrigado a todos os que fizeram parte desta jornada e contribuíram para que pudesse alcançar este importante marco na minha carreira académica.

página propositadamente em branco

RESUMO

A presente dissertação oferece uma revisão bibliográfica sobre um tema que começa a ganhar terreno na atualidade, o fabrico aditivo, mais conhecido como impressão 3D. Sendo um assunto cada vez mais discutido não só em ambientes industriais, mas também agora mais centralizado no consumidor comum é de extrema importância fazer uma breve apresentação ao tema, como é que este se insere na sociedade, o seu papel face aos métodos tradicionais e qual o rumo que o mesmo levará daqui para a frente.

Sendo o Fabrico Aditivo um tema a emergir, serão também expostos todos os processos de fabrico associados, o seu funcionamento, a classe de materiais utilizados e os pontos fortes e pontos fracos de cada um.

Irá ser dada especial atenção aos dois processos que serão abordados mais ao pormenor no decorrer do trabalho, *Fused Deposition Modeling* e *Selective Laser Sintering*, onde irão ser explicados pormenorizadamente os seus funcionamentos, o conjunto de materiais mais utilizados e as suas características e os defeitos que eventualmente se pode observar em cada tecnologia.

Assim, foi feita uma breve explicação dos principais parâmetros e da sua influência e por fim, serão realizados ensaios mecânicos de tração, flexão e dureza como método comparativo entre materiais para determinar as suas possíveis aplicações na indústria em questão.

Escolhido o material que melhor se adequava às condições impostas pelo ambiente industrial da empresa acolhedora, foi analisado o processo de injeção de plásticos e foi desenvolvido um molde capaz de alojar postigos impressos em 3D.

O passo seguinte envolveu, em primeiro lugar, a realização de injeções utilizando diferentes materiais sobre os postigos impressos e observar o seu comportamento face às condições de temperatura e pressão do processo, e em seguida a otimização do ciclo de injeção.

PALAVRAS-CHAVE

Fabrico Aditivo (FA); *Fused Deposition Modeling* (FDM); *Selective Laser Sintering* (SLS); Ensaios Mecânicos; Sobreinjeção

página propositadamente em branco

ABSTRACT

This dissertation provides a literature review on a topic that is gaining ground in contemporary times, additive manufacturing, better known as 3D printing. As a subject that is increasingly discussed not only in industrial settings but now also more focused on the general consumer, it is of utmost importance to give a brief introduction to the topic, explaining how it fits into society, its role compared to traditional methods, and the direction it will take in the future.

Since Additive Manufacturing is an emerging topic, all associated manufacturing processes, their functioning, the class of materials used, and the strengths and weaknesses of each will also be exposed.

Special attention will be given to the two processes that will be examined in more detail throughout the work, Fused Deposition Modeling and Selective Laser Sintering, where their workings, the set of most commonly used materials and their characteristics, and the defects that may eventually be observed in each technology will be explained in detail.

Furthermore, a brief explanation of the main parameters and their influence has been provided, and finally, in order to verify the data provided by manufacturers, mechanical tests of tension, flexion, and hardness will be carried out as a comparative method among materials to determine their possible applications in the relevant industry.

Once the material that best suited the conditions imposed by the industrial environment of the hosting company was chosen, the plastic injection process was analyzed, and a mold capable of accommodating 3D printed inserts was developed.

The next step involved, first and foremost, conducting injections using different materials on the 3D printed inserts and observing their behavior in relation to the temperature and pressure conditions of the process, followed by the optimization of the injection cycle.

KEYWORDS

Additive Manufacturing; Fused Deposition Modeling (FDM); Selective Laser Sintering (SLS); Mechanical Testing; Overmolding

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Contextualização.....	23
1.2. Objetivos.....	23
1.3. Metodologia.....	24
1.4. Estrutura do relatório	25
1.5. Caracterização da empresa acolhedora	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Fabrico aditivo	27
2.1.1. Contextualização	27
2.1.2. Principais aplicações.....	28
2.1.3. Futuro do fabrico aditivo	29
2.2. Processos de fabrico aditivo	30
2.2.1. <i>Material Extrusion</i>	31
2.2.2. <i>Vat Polymerization</i>	31
2.2.3. <i>Powder Bed Fusion</i>	32
2.2.4. <i>Material Jetting</i>	33
2.2.5. <i>Binder Jetting</i>	34
2.2.6. <i>Direct Energy Deposition</i>	34
2.2.7. <i>Sheet Lamination</i>	35
2.3. <i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>	36
2.3.1. Funcionamento.....	36
2.3.2. Materiais mais comuns.....	37
2.3.3. Principais defeitos	40
2.3.4. Pós-processamento	48
2.3.5. Sustentabilidade e Impacto ambiental.....	52
2.4. <i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	54
2.4.1. Funcionamento.....	55
2.4.2. Materiais mais comuns.....	55
2.4.3. Principais Defeitos	56
2.5. Parâmetros de Impressão.....	58
2.5.1. Orientação de impressão.....	58
2.5.2. <i>Layer Height</i>	58
2.5.3. Diâmetro do <i>nozzle</i>	59
2.5.4. Temperatura de extrusão	60
2.5.5. Temperatura da plataforma de impressão.....	60

2.5.6. Velocidade de impressão.....	60
2.5.7. <i>Infill density</i>	61
2.5.8. <i>Infill pattern</i>	61
2.5.9. <i>Raster angle</i>	62
2.5.10. <i>Raster width</i>	63
2.5.11. Refresh rate.....	63
2.6. Vantagens e Desvantagens face à Manufatura Tradicional (MT)	64
2.7. Ensaios Mecânicos	65
2.7.1. Ensaio de Tração.....	66
2.7.2. Ensaio de Flexão	67
2.7.3. Ensaio de Dureza	68
2.8. Injeção de Plásticos.....	68
2.8.1. Ciclo de Injeção.....	69
2.8.2. Materiais Plásticos.....	70
2.8.3. Projeto de Molde.....	71
2.8.4. Aplicações e Tendências	74
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	77
3.1. Seleção de materiais	77
3.2. Especificações das impressoras utilizadas	79
3.3. <i>Softwares</i> de <i>slicing</i>	84
3.4. Parâmetros de impressão	86
3.5. Preparação dos provetes	88
3.5.1. Descrição do Design dos Provetes	89
3.5.2. Etapas de preparação	90
3.5.3. Pós processamento.....	91
3.6. Ensaios realizados	92
3.6.1. Ensaio de tração	92
3.6.2. Ensaio de flexão.....	95
3.6.3. Ensaio de dureza.....	97
3.7. Impressão do postigo para o molde.....	98
3.8. Injeção sobre o postigo impresso	100
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1. Parâmetros de impressão	103
4.2. Ensaios de tração	105
4.3. Ensaios de flexão	109
4.4. Ensaios de dureza	113
4.5. Sobreinjeção	115
5. CONCLUSÃO	119
5.1. Conclusões finais.....	119
5.1.1. Parâmetros de impressão	119

5.1.2. Ensaios de tração	119
5.1.3. Ensaios de flexão	120
5.1.4. Ensaios de dureza	121
5.1.5. Sobreinjeção	121
5.2. Limitações e trabalhos futuros	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÊNDICE A - DIMENSÕES DOS PROVETES PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO	135
APÊNDICE A - DIMENSÕES DOS PROVETES PARA O ENSAIO DE FLEXÃO	138
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PLA	141
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ABS	142
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC/ABS	143
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PETG	144
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PPJET	145
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE 60 A	146
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 95 A	147
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE N-ASA	148
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ALFAOHM	149
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA	150
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PAHT CF15	151
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC CF 152	152
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ULTEM AM9085F	153

APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 H	154
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 V	155
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE TOUGH 1500	156
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PLA	157
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ABS	158
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC/ABS	159
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PETG	160
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PPJET	161
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 60 A.....	162
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 95 A.....	163
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE N-ASA.....	164
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ALFAOHM	165
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA	166
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PAHT CF15	167
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC CF 168	168
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ULTEM AM9085F	169
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 H	170

APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 V	171
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE TOUGH 1500	172
ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAIS	173

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das percentagens de vendas da Simoldes Plásticos [1]	26
Figura 2 - Distribuição da utilização do FA por área (Adaptado) [9].....	28
Figura 3 - Esquema representativo da categoria <i>Material Extrusion</i> [16].	31
Figura 4 - Esquema representativo da categoria <i>Vat Polymerization</i> [16].	32
Figura 5 - Esquema representativo da categoria <i>Powder Bed Fusion</i> [16].	32
Figura 6 - Esquema representativo da categoria <i>Material Jetting</i> [16].	33
Figura 7 - Esquema representativo da categoria <i>Binder Jetting</i> [16].....	34
Figura 8 -Esquema representativo da categoria <i>Direct Energy Deposition</i> [16].	35
Figura 9 -Esquema representativo da categoria <i>Sheet Lamination</i> [16].....	35
Figura 10 - Esquema representativo dos principais componentes de uma impressora FDM (Adaptado) [37]	37
Figura 11 -Tipos de impressoras FDM existentes (Adaptado) [38].....	37
Figura 12 -Principais materiais utilizados em FDM (Adaptado) [43].	38
Figura 13 - Exemplo prático de uma primeira camada falhada [61].....	40
Figura 14 -Exemplo prático de <i>under extrusion</i> [62].....	41
Figura 15 - Exemplo prático de <i>over extrusion</i> [64].	42
Figura 16 - Exemplo prático de <i>stringing</i> ou <i>oozing</i> [66].	43
Figura 17 - Exemplo prático de sobreaquecimento [68].	44
Figura 18 - Exemplo prático de separação e divisão de camadas [70].	45
Figura 19 - Exemplo prático de lacunas de material entre o <i>infill</i> e a <i>outline</i> [72].	45
Figura 20 - Esquema representativo de <i>infill overlap</i> [74].	46
Figura 21 - Exemplo prático de <i>warping</i> [75].	46
Figura 22 - Exemplo prático de teste com várias dimensões de pontes sem suportes [77].....	47
Figura 23 -Métodos de pré e pós-processamento que visam melhorar as propriedades dos materiais [81].	49
Figura 24 - Valor médio de resistência à tração de cada grupo (Adaptado) [89].	51
Figura 25 - Representação da importância da fase de conceção de produto para a redução do impacto ambiental [94].	53
Figura 26 -Fluxograma de um processo de tomada de decisões com base na energia consumida [98].	54
Figura 27 - Esquema representativo dos principais componentes de uma impressora SLS (Adaptado) [101].	55
Figura 28 - Comparação das propriedades mecânicas de provetes impressos com provetes injetados. A - módulo de elasticidade; B - resistência à tração; C - alongamento; D - resistência ao impacto; E - resistência à tração por impacto; F - densidade aparente; G - módulo específico; H - resistência à tração específica [109].	59
Figura 29 - Esquema representativo da variação do diâmetro do <i>nozzle</i> mantendo a mesma espessura de camada de contacto [109].	59
Figura 30 - Principais padrões de preenchimento utilizados em impressão [116].....	62
Figura 31 -Esquema exemplo do ângulo de raster entre duas camadas sucessivas [118].	62
Figura 32 - Esquema representativo da influência do <i>raster angle</i> na resistência à tração e no módulo de elasticidade [119].	62

Figura 33 - Estrutura geral de uma peça impressa por FDM [120].	63
Figura 34 - Refresh rates recomendadas para diferentes tipos de poliamidas [122].	64
Figura 35 - Esquema exemplo da carga aplicada no corpo de carga, à esquerda, e do gráfico tensão-deformação resultante, à direita (Adaptado) [127].	66
Figura 36 - Representação esquemática do posicionamento do provete e dos respetivos pontos de contacto [132].	67
Figura 37 - Esquema representativo de uma curva típica Carga aplicada - Flecha de um ensaio de flexão [134].	67
Figura 38 - Esquema de funcionamento do ensaio de dureza Shore A e D e as suas principais diferenças [139].	68
Figura 39 - Representação esquemática de uma máquina de injeção [146].	70
Figura 40 - Representação esquemática de um molde e peça final. (a) Molde fechado. (b) Molde em vista explodida. (c) Peça final antes e após pós-processamento [158].	74
Figura 41 - Impressora Prusa MK3S+ utilizada na empresa.	80
Figura 42 - À esquerda a impressora DeltaWASP 4070 Industrial X e à direita o <i>Bowden</i> suspenso evidenciado.	81
Figura 43 - Impressora miniFactory Ultra com a câmara de filamento aquecida em destaque a cor vermelha.	82
Figura 44 - Impressora Form 2 pertencente à empresa.	83
Figura 45 - Impressora Fuse 1 e duas câmaras de impressão.	83
Figura 46 - Interface do <i>software</i> PrusaSlicer.	84
Figura 47 - Interface do <i>software</i> Simplify3D.	85
Figura 48 - Interface do <i>software</i> Preform no caso da impressora Fuse 1.	86
Figura 49 - Diferentes posicionamentos dos provetes na plataforma de impressão [174].	87
Figura 50 - Na figura superior é possível observar a limitação do <i>software</i> Preform aplicado à impressora Form 2 e em baixo a impressora Fuse 1.	87
Figura 51 - Exemplo de flexibilidade de parâmetros na aba de “Configuração de impressão” do <i>software</i> PrusaSlicer.	88
Figura 52 - Dimensões utilizadas para construção dos provetes a utilizar no ensaio de tração segundo a norma ASTM D638.	89
Figura 53 - Dimensões utilizadas para construção dos provetes a utilizar no ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790.	89
Figura 54 - Interior da câmara de filamento aquecida da impressora miniFactory Ultra.	90
Figura 55 - Form Wash à esquerda e Form Cure à direita.	91
Figura 56 - Fuse Swift onde decorre a limpeza das peças.	92
Figura 57 - Máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-X 10kN utilizada na Universidade de Aveiro.	94
Figura 58 - Distância inicial entre as marcas do extensómetro de um provete.	94
Figura 59 - Provette de PC/ABS a ser ensaiado na máquina de ensaios universal do ISEP.	96
Figura 60 - Instrumento utilizado para os ensaios de dureza Shore D no ISEP.	97
Figura 61 - Medições de leitura de dureza consecutivas.	98
Figura 62 - Molde utilizado para o dimensionamento do postigo a imprimir.	99
Figura 63 - Dimensões do postigo impresso com o formato do logótipo da Simoldes.	99
Figura 64 - Molde original e adaptações realizadas no molde de forma a alocar os novos postigos.	100

Figura 65 - Equipamento KM 150X utilizado para o ensaio de injeção.	101
Figura 66 - Gráfico Tensão-Deformação de um provete à escolha para cada material ensaiado à tração.....	105
Figura 67 - Gráfico de barras relativo à tensão máxima obtida à tração e respetivos desvios padrão.	106
Figura 68 - Gráfico de barras relativo ao módulo de elasticidade à tração e respetivos desvios padrão.	107
Figura 69 - Gráficos Tensão-Deformação dos 5 provetes para os materiais PPJet e Poliamida.	108
Figura 70 - Resultado dos provetes após ensaio de tração.	109
Figura 71 - Gráfico Tensão-Deformação de um provete à escolha para cada material ensaiado à flexão.	110
Figura 72 -Gráfico de barras relativo à tensão máxima à flexão e respetivos desvios padrão.	111
Figura 73 - Gráfico de barras relativo ao módulo de elasticidade à flexão e respetivos desvios padrão.	112
Figura 74 - Resultado dos provetes após ensaio de flexão.....	113
Figura 75 - Resultados obtidos nos ensaios de dureza Shore D.	114
Figura 76 -Postiço impresso em ULTEM 9085F para utilização em sobreinjeção.....	115
Figura 77 - Visão geral dos tempos otimizados para a injeção.	116
Figura 78 - Peças injetadas ainda com o sistema de alimentação acoplado.	116
Figura 79 - Conjunto de peças injetadas em PP PHC31-81.	117
Figura 80 - Estrangulamento verificado no <i>runner</i> e <i>gate</i> do postiço.	117

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais aplicações e benefícios ganhos do FA na indústria automóvel.	29
Tabela 2 - Tabela resumo da categoria Material Extrusion. [14], [16], [17]	31
Tabela 3 - Tabela resumo da categoria Vat Polymerization [14], [16], [20].	32
Tabela 4 - Tabela resumo da categoria Powder Bed Fusion [14], [16], [22], [23].....	33
Tabela 5 - Tabela resumo da categoria Material Jetting [14], [16], [25], [26].	33
Tabela 6 - Tabela resumo da categoria <i>Binder Jetting</i> [14], [16], [26], [28].	34
Tabela 7 - Tabela resumo da categoria <i>Direct Energy Deposition</i> [14], [16], [30], [31].	35
Tabela 8 - Tabela resumo da categoria <i>Sheet Lamination</i> [14], [16], [20], [33].....	35
Tabela 9 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de adesão [61].	41
Tabela 10 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>Under extrusion</i> [63].....	41
Tabela 11 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>Over extrusion</i> [65].....	42
Tabela 12 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>Stringing ou Oozing</i> [67].	43
Tabela 13 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de Sobreaquecimento [69].....	44
Tabela 14 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>Layer separation e splitting</i> [71].	45
Tabela 15 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de presença de lacunas entre o <i>infill</i> e a <i>outline</i> [73].....	46
Tabela 16 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>warping</i> [76].	47
Tabela 17 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de <i>bridging</i> [78].	48
Tabela 18 - Quadro resumo com os principais métodos de colagem e união de peças impressas [88].	50
Tabela 19 - Denominação dos grupos, as suas temperaturas de recozido e respetivos tempos [89].	51
Tabela 20 - Tabela resumo das principais características das Poliamidas mais comuns utilizadas no processo de SLS [104].	56
Tabela 21 - Quadro resumo dos principais defeitos encontrados em SLS [105].	57
Tabela 22 - Tabela resumo dos principais materiais utilizados na indústria automóvel, suas caraterísticas e aplicações [148], [149].	71
Tabela 23 - Tabela resumo dos materiais estudados e das propriedades de impressão fornecidas pelos fabricantes.	77
Tabela 24 - Tabela resumo dos materiais estudados e das propriedades mecânicas fornecidas pelos fabricantes.....	78
Tabela 25 - Especificações técnicas das impressoras 3D selecionadas.....	79
Tabela 26 - Dimensões dos provetes de tração.....	89
Tabela 27 - Dimensões dos provetes e velocidade de ensaio.	89

Tabela 28 - Velocidades utilizadas no ensaios de tração.....	93
Tabela 29 - Equações gerais para os cálculos utilizados no ensaio de tração.	95
Tabela 30 - Equações gerais para os cálculos utilizados no ensaio de flexão.....	96
Tabela 31 - Parâmetros estudados e utilizados para o fabrico de provetes.....	104
Tabela 32 - Velocidades de ensaio para os provetes de PPJet e Poliamida.....	108

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

3D	Três dimensões
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
ASA	Acrilonitrilo-estireno-acrilato
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEAM	Electron Beam Additive Manufacturing
BJ	Binder jetting
CAD	Computer-Aided Design
CEO	Chief Executive Officer
CF	Carbon Fiber
CTO	Chief Technology Officer
CU	Clamping Unit
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop on Demand
EBM	Electron Beam Melting
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno
FA	Fabrico Aditivo
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
HDT	Heat Deflection Temperature
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
KM	Krauss Maffei
LBMD	Laser Based Metal Deposition
LCA	Life Cycle Analysis
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJ	Material Jetting
MSLA	Masked Stereolithography Apparatus
OBJ	Object
P.Porto	Politécnico do Porto
PA	Poliamida
PBT	Polibutileno tereftalato
PC	Policarbonato
PE	Polietileno

PEEK	Polieter-eter-cetona
PEI	Polieterimida
PET	Polibutileno tereftalato
PETG	Politereftalato de etileno glicol
PIU	Plasticating/Injecting Unit
PLA	Ácido polilático
PMMA	Polimetilmetacrilato
POM	Polióxido de metileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano
PVA	Álcool polivinílico
PVC	Policloreto de Vinilo
SLA	Stereolithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
STL	Standard Tessellation Language
TPU	Poliuretano termoplástico
TPV	Elastómero Termoplástico Vulcanizado
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UC	Ultrasonic Consolidation
UV	Ultra Violeta
VOC	Volatile Organic Compounds

Lista de Símbolos

$\bar{h}$	Espessura média do provete de flexão	<i>mm</i>
L_0	Distância inicial entre as marcas do extensómetro	<i>mm</i>
ΔL_0	Aumento da distância entre as marcas do extensómetro	<i>mm</i>
A	Área da secção transversal inicial da amostra	<i>mm</i> ²
b	Largura do provete de flexão	<i>mm</i>
F	Força aplicada	<i>N</i>
h	Espessura do provete de flexão	<i>mm</i>
L	Comprimento da secção mais estreita do provete de tração	<i>mm</i>
l	Comprimento do provete de flexão	<i>mm</i>
L	Distância entre apoios no ensaio de flexão	<i>mm</i>
LO	Comprimento total para o provete de tração	<i>mm</i>
m	Massa	<i>gramas</i>

R	Raio	mm
T	Espessura do provete de tração	mm
t	Tempo	segundos
$Ttemp$	Temperatura	$^{\circ}C$
W	Largura da secção mais estreita do provete de tração	mm
WO	Largura total do provete de tração	mm
ε	Deformação medida	mm/mm
σ	Tensão num determinado ponto	MPa

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os principais elementos que norteiam a dissertação. Estes elementos incluem a contextualização do tema, os objetivos, a metodologia utilizada no trabalho realizado, a estrutura do relatório e a caracterização da empresa acolhedora. A contextualização tem como objetivo situar o leitor no contexto da pesquisa, enquanto os objetivos indicam as intenções e finalidades do estudo. A metodologia descreve os procedimentos utilizados na recolha e análise dos dados. A estrutura do relatório fornece uma visão geral da organização do trabalho, e a caracterização da empresa acolhedora destaca as suas principais características e contribuições para o estudo.

1.1. Contextualização

A Indústria 4.0 representa a mais recente evolução na integração de sistemas de produção inteligentes e tecnologias avançadas de informação. A adoção de novos processos produtivos, otimização dos processos existentes e a integração de novas tecnologias de informação são fundamentais para a competitividade económica nesta nova fase.

Neste contexto, o fabrico aditivo (FA), também conhecido como impressão 3D, é considerado uma parte indispensável da Indústria 4.0. Este método de fabrico baseia-se na deposição de camadas sucessivas de material para criar um objeto físico de acordo com um modelo tridimensional produzido num *software* de desenho.

O FA apresenta vantagens e desvantagens em relação a outras tecnologias de produção. Por exemplo, a capacidade de trabalhar geometrias complexas com alto grau de personalização e minimizar o desperdício de material são vantagens significativas. No entanto, o tempo de impressão é geralmente longo e os volumes de produção são limitados. A indústria automóvel tem utilizado amplamente o FA para produzir protótipos devido à rapidez na construção e ao menor custo de alteração de peças para validação de conceitos.

O estudo dos parâmetros ideais de impressão para cada material, a análise de como as condições de impressão afetam o desempenho do material e a identificação de potenciais aplicações na indústria são de grande importância numa tecnologia inovadora como o FA, especialmente durante os seus primeiros passos na indústria.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar materiais de Engenharia para serem utilizados no FA, através da produção de provetes com as tecnologias de *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Selective Laser Sintering* (SLS). As etapas deste trabalho incluem:

- Selecionar e justificar os materiais de engenharia adequados para o fabrico aditivo, tendo em consideração as tecnologias *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Selective Laser Sintering* (SLS).
- Definir e analisar as especificações das impressoras e os parâmetros de impressão, focando na otimização da qualidade e propriedades das peças impressas.

- Avaliar os parâmetros de impressão ideais e o seu impacto na qualidade e propriedades dos provetes impressos.
- Desenvolver metodologias robustas para a preparação de provetes que sejam representativos das condições de impressão.
- Descrever e aplicar ensaios mecânicos, incluindo tração, flexão e dureza, para avaliar as propriedades dos materiais impressos.
- Explorar e avaliar a técnica de sobreinjeção, analisando o impacto desta técnica nas propriedades finais dos objetos impressos.
- Investigar e implementar a impressão e injeção de postigos, destacando a integração da impressão 3D com técnicas convencionais de fabrico.

1.3. Metodologia

A metodologia de realização desta dissertação sobre FA abrange múltiplas fases que requerem precisão e detalhe. Inicia-se com a apresentação à empresa acolhedora e aos colaboradores envolvidos, estabelecendo de forma clara os objetivos e metas a alcançar, assim como os recursos necessários para a concretização do projeto.

Posteriormente, procede-se a um levantamento junto dos especialistas da empresa relativamente aos materiais atualmente em uso e aqueles planeados para futuras aplicações. Esta fase é crucial para compreender os principais esforços aos quais os protótipos estarão sujeitos, facilitando a escolha dos materiais ideais para o fabrico aditivo. Para complementar esta fase, é essencial a realização de uma visita ao laboratório da empresa, com o intuito de entender os requisitos específicos que as marcas impõem às peças a serem produzidas. Esta etapa permitirá definir procedimentos adequados para a subsequente caracterização dos materiais.

Com os materiais selecionados, segue-se a produção dos provetes, considerando as especificações definidas anteriormente. Deve-se, nesta etapa, enfatizar a importância de definir e otimizar os parâmetros de impressão, tendo em vista a máxima qualidade e performance dos provetes impressos.

Após a produção, os provetes serão submetidos a ensaios mecânicos, entre os quais se destacam a tração, flexão e dureza. A escolha destes ensaios é determinada pelas características intrínsecas do material e pelos requisitos de desempenho das peças.

Uma análise criteriosa dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos será realizada. Esta análise recorrerá a técnicas estatísticas e ferramentas de visualização de dados, como gráficos e tabelas, para interpretar e discutir os dados recolhidos. Esta fase permitirá identificar limitações nos materiais usados e propor alternativas ou melhorias para potenciar o desempenho das peças produzidas.

Por fim, a técnica de sobreinjeção será explorada e avaliada, analisando-se especificamente o impacto desta abordagem nas propriedades finais dos objetos impressos. Simultaneamente, desenvolver-se-á um estudo de sobreinjeção de postigos impressos, visando compreender a integração eficaz da impressão 3D com métodos tradicionais de fabrico.

1.4. Estrutura do relatório

Nesta dissertação optou-se por uma estruturação lógica e sequencial, de forma a facilitar a compreensão e a análise dos conteúdos apresentados.

Inicia-se com a Introdução, onde se oferece uma contextualização do tema em estudo, os objetivos propostos, a metodologia adotada, uma breve apresentação da empresa acolhedora e, por fim, a estrutura do documento.

Segue-se a Revisão Bibliográfica. Neste capítulo, procede-se à análise de conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho, abordando temas como o fabrico aditivo, os diferentes processos associados, vantagens, desvantagens e os métodos de ensaio mecânico relacionados à injeção de plásticos.

No capítulo intitulado Métodos e Aplicação, descreve-se o procedimento adotado no decorrer da investigação. Aqui, discutem-se a seleção de materiais, as especificações das impressoras utilizadas, os *softwares* de *slicing* adotados, os parâmetros de impressão definidos, a preparação dos provetes, os ensaios realizados e os processos de impressão e injeção.

O capítulo de Resultados e Discussão, dedica-se à apresentação e análise dos dados recolhidos. Neste segmento, abordam-se os parâmetros de impressão, os diferentes ensaios mecânicos realizados e os resultados da sobreinjeção.

Por fim, apresentam-se as Conclusões. Aqui, refletem-se as conclusões finais da investigação, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros.

A dissertação termina com as referências bibliográficas, onde se enumeram todas as fontes consultadas e citadas ao longo do trabalho, garantindo a validade e fiabilidade da informação apresentada.

1.5. Caraterização da empresa acolhedora

A SIMOLDES Plásticos, uma empresa portuguesa com mais de seis décadas de experiência no setor de moldes e componentes plásticos, destaca-se como um exemplo de sucesso no mercado global. Fundada em 1959, o grupo é reconhecido pelo seu compromisso com a inovação, qualidade e sustentabilidade, expandindo-se para vários países e consolidando-se como líder no setor.

Presente em Portugal, França, Brasil, México, Polónia e Marrocos, a SIMOLDES demonstra uma notável capacidade de adaptação às exigências dos mercados locais e globais. O grupo conta com uma vasta rede de parceiros e colaboradores que trabalham em conjunto para desenvolver soluções que atendam às necessidades específicas de cada cliente.

A lista de clientes da SIMOLDES Plásticos é impressionante e inclui fabricantes automóveis de renome, como Volkswagen, Porsche, Audi, Renault e Peugeot. A empresa fornece componentes plásticos de alta qualidade, competitivos e inovadores, mantendo-se atenta às tendências e desafios do mercado.

Na Figura 1 pode-se observar a distribuição das percentagens de vendas por marca de construtora automóvel.

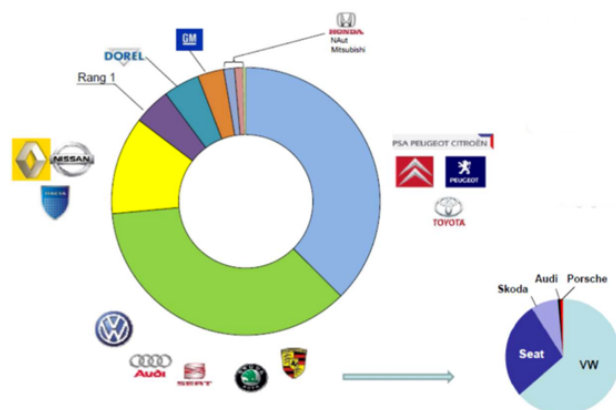


Figura 1 - Distribuição das percentagens de vendas da Simoldes Plásticos [1]

A inovação é um dos pilares fundamentais da SIMOLDES. Através de investimento em pesquisa e desenvolvimento, a empresa procura constantemente encontrar soluções para desafios atuais, como sustentabilidade e adoção de processos produtivos mais limpos e eficientes. A SIMOLDES Plásticos trabalha para reduzir o impacto ambiental das suas atividades e promover a economia circular, utilizando materiais reciclados e recicláveis nos seus produtos sempre que possível.

O sucesso da SIMOLDES Plásticos tem sido reconhecido através de diversos prémios e distinções. Além disso, a empresa participa ativamente em eventos e feiras do setor, partilhando o seu conhecimento e experiência com outros profissionais e contribuindo para o desenvolvimento do mercado de moldes e componentes plásticos [2], [3].

A empresa comprometeu-se a fornecer todo o equipamento necessário para a realização deste trabalho, incluindo equipamentos e materiais para a produção dos provetes necessários para os ensaios a serem realizados. Além disso, permitiu o acesso aos programas específicos de cada máquina para determinar os melhores parâmetros de impressão, fornecendo todas as ferramentas necessárias para o progresso do trabalho e partilhando conhecimentos prévios que contribuíram significativamente para o sucesso do trabalho e aprimoramento da aprendizagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta parte da dissertação é realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre a tecnologia emergente que está a revolucionar a indústria, o fabrico aditivo. Inicia-se com uma contextualização desta tecnologia, explorando as suas principais aplicações e as previsões futuras. Posteriormente, serão analisados os diferentes processos associados, incluindo *Material Extrusion*, *Vat Polymerization*, *Powder Bed Fusion*, entre outros, com foco especial em *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Selective Laser Sintering* (SLS).

Adicionalmente, serão discutidos os parâmetros de impressão e como estes influenciam a qualidade do produto final. É feita uma comparação com a manufatura tradicional, destacando as respetivas vantagens e desvantagens. A revisão bibliográfica também abordará os tipos de ensaios mecânicos mais comuns e em que consistem.

Por fim, é explorado o processo de Injeção de Plásticos, abordando o ciclo de injeção, os materiais plásticos utilizados, a projeção de um molde de injeção e as principais aplicações e tendências atuais da tecnologia.

2.1. Fabrico aditivo

O fabrico aditivo emerge como uma revolução na produção tridimensional, diferenciando-se radicalmente dos métodos convencionais. O seu potencial não reside apenas na precisão, mas também na liberdade de criar estruturas intrincadas, que seriam quase impossíveis pelos métodos tradicionais. Para compreender melhor o impacto e as *nuances* deste método revolucionário, os subcapítulos subsequentes oferecem uma breve contextualização, uma visão sobre as suas principais aplicações com especial ênfase na indústria automóvel e uma reflexão sobre o futuro promissor do fabrico aditivo.

2.1.1. Contextualização

O fabrico aditivo é definido pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) como “Process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies” [4].

Os termos "manufatura aditiva", "prototipagem rápida", "fabrico digital", "fabrico aditivo" e "impressão 3D" são frequentemente utilizados para referir-se ao fabrico aditivo de plásticos [5].

Ao contrário dos processos de fabrico tradicionais, como furação, torneamento, fresagem, corte, etc., o fabrico aditivo segue um conceito oposto. Enquanto esses processos geralmente começam com um bloco de material do qual o material é progressivamente removido até obter a peça final, no fabrico aditivo, o material é depositado camada por camada até formar o objeto desejado com o mínimo de desperdício de material possível.

2.1.2. Principais aplicações

Inicialmente, a utilização do fabrico aditivo tinha como objetivo principal o fabrico de protótipos apenas para fins de visualização, o que exigia materiais, dimensões e desempenho mecânico com requisitos mínimos. Era comumente usado para fins pessoais. No entanto, com o desenvolvimento das tecnologias e o aumento do seu potencial, o uso do fabrico aditivo expandiu-se para o meio industrial. A produção de peças com geometrias complexas e *designs* utilizando diversos materiais, como metais, plásticos e até mesmo materiais comestíveis, auxilia várias áreas e setores, incluindo a indústria automóvel, indústria aeroespacial, saúde e indústria médica, produção de ferramentas, componentes eletrónicos, joalharia, arquitetura e construção civil, entre outros [6]–[8].

De acordo com uma análise realizada pela empresa Aranca em 2017, o setor automóvel, a produção de bens de consumo e o setor médico são as áreas que estão em melhores posições para aproveitar os benefícios que o fabrico aditivo pode proporcionar. Na Figura 2 pode-se observar que a combinação dessas áreas representa quase 60% da utilização do fabrico aditivo em todo o mundo.

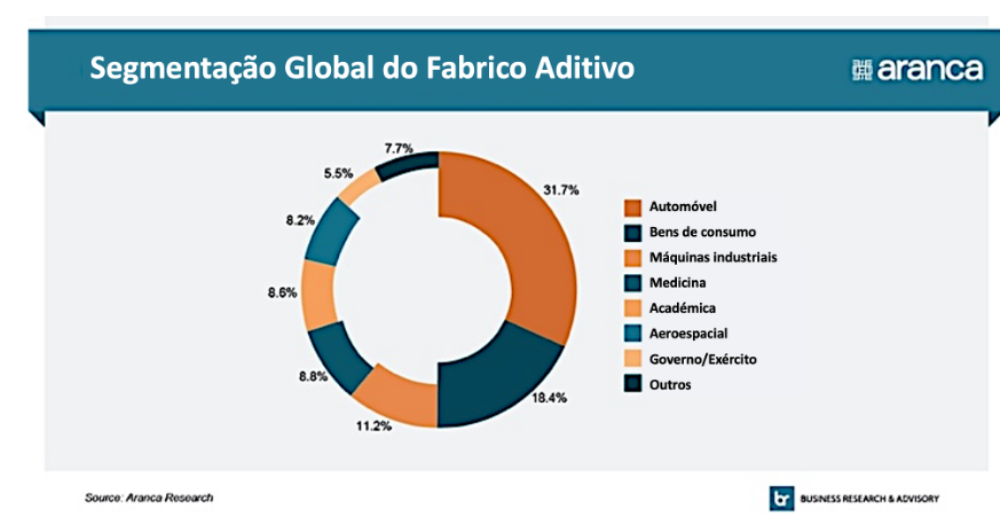


Figura 2 - Distribuição da utilização do FA por área (Adaptado) [9].

Na indústria automóvel, o fabrico aditivo trouxe uma lufada de ar fresco em relação à manufatura tradicional de componentes. Através da incorporação do fabrico aditivo, foi possível desenvolver peças e componentes mais leves, com geometrias complexas e em menos tempo. Além disso, tornou-se mais eficaz produzir peças de substituição e protótipos [10].

Na Tabela 1 pode-se observar as principais aplicações e o contributo da utilização do FA na indústria automóvel.

Tabela 1 - Principais aplicações e benefícios ganhos do FA na indústria automóvel.

Indústria	Aplicações	Benefícios Ganhos
Automóvel	Prototipagem	Ajudar a eliminar peças em excesso
	Manufatura de componentes	Acelerar o tempo de comercialização
	Redução de peso em veículos	Reduzir o custo associado ao desenvolvimento do produto
	Arrefecimento para carros de competição	Reduzir stock
		Possibilidade de alterar a aparência e carros no futuro
		Melhorar a qualidade

2.1.3. Futuro do fabrico aditivo

Em 2023, as tendências e previsões para o futuro da Impressão 3D, segundo especialistas do setor, são as seguintes [11]:

- **Aplicação e foco na indústria:** As empresas que se dedicam a aplicações específicas, especialmente aquelas que enfrentam desafios como a escassez de mão-de-obra e prazos de entrega prolongados, tendem a obter sucesso. A impressão 3D é considerada uma solução para a escassez de mão-de-obra na indústria de manufatura e a necessidade de aumentar a capacidade produtiva.
- **Impressão 3D em grande escala:** A impressão 3D em larga escala, especialmente na indústria robótica, está a tornar-se cada vez mais comum. A utilização de braços robóticos para a impressão, que permite caminhos não planares, possibilita a criação de peças de grandes dimensões com geometrias complexas. Além disso, a impressão 3D com *pellets* em vez de filamentos está a ganhar popularidade devido ao tempo de impressão reduzido e ao menor custo de material.
- **Impressão 3D de metais:** O fabrico aditivo de metais está a ganhar cada vez mais destaque como uma tecnologia de produção. A capacidade de produzir em grandes volumes e as inovações na indústria de impressão 3D de metal estão a impulsionar o crescimento e a otimização.
- **Melhorias contínuas na tecnologia de impressão 3D:** As tecnologias de impressão 3D, como SLS, continuarão a evoluir para produções de níveis mais avançados. A variedade de materiais disponíveis para FDM também continuará a aumentar. Além disso, o *software* será desenvolvido para permitir o aproveitamento máximo da impressão 3D em todas as suas capacidades.
- **Foco em resultados e precisão:** A precisão dimensional terá um papel cada vez mais crucial à medida que a impressão 3D for aplicada em ambientes de fabrico. Existe uma crescente procura por plataformas de produção aditiva personalizadas para a indústria, e a importância de uma implementação que assegure resultados precisos está a aumentar.
- **Desafios na adoção em escala:** Ainda existem desafios na adoção e implementação de aplicações de impressão 3D em grande escala. É crucial desenvolver um sistema completo de *hardware*, *software* e materiais qualificados que possam operar em larga escala.

- **Inovação contínua e crescimento na indústria:** A impressão 3D continuará a revolucionar a forma como as empresas fabricam e adquirem produtos. A tecnologia de impressão 3D está a expandir-se para um número cada vez maior de setores industriais, sobretudo com o desenvolvimento de novos materiais.
- **Personalização em massa:** A personalização em massa está a tornar-se uma grande tendência no fabrico aditivo. Com os avanços tecnológicos, a personalização em massa está a tornar-se mais acessível em várias indústrias.

Estas tendências e previsões para 2023 reforçam as visões dos líderes da indústria entrevistados em 2020, mostrando que a Impressão 3D está a evoluir rapidamente e a tornar-se cada vez mais integrada na manufatura tradicional. A Impressão 3D está a ser vista não só como uma solução para desafios específicos da indústria, mas também como uma forma de inovar e otimizar processos de produção [12].

A impressão 3D em grande escala, especialmente na indústria robótica, está a tornar-se mais comum, corroborando a visão de Naresh Shanker, CTO da Xerox, de que a impressão 3D será totalmente integrada na manufatura tradicional. A impressão 3D de metais também está a ganhar destaque, alinhando-se com a previsão de Vyomesh Joshi, CEO da 3D Systems, de que o desenvolvimento e a ciência dos materiais serão os principais impulsionadores do crescimento das aplicações de impressão 3D.

As melhorias contínuas na tecnologia de impressão 3D, a importância crescente da precisão dimensional e a necessidade de sistemas de *hardware*, *software* e materiais que operem em escala também são tendências que se alinham com as previsões dos líderes da indústria.

A inovação contínua e o crescimento na indústria da impressão 3D, bem como a tendência para a personalização em massa, refletem as expectativas de Josef Průša, CEO e fundador da Prusa Research, e Jos Burger, CEO da Ultimaker, de que a impressão 3D abrirá novas oportunidades de negócio e permitirá a produção de peças personalizadas sob procura para cada cliente.

Em resumo, as tendências e previsões para 2023 indicam que a impressão 3D está a evoluir de acordo com as expectativas dos líderes da indústria, com um foco crescente na integração com a manufatura tradicional, inovação contínua, personalização em massa e resolução de desafios específicos da indústria.

2.2. Processos de fabrico aditivo

Tal como acontece com os métodos de fabrico tradicionais, existe uma diversidade de tecnologias e processos associados ao fabrico aditivo, sendo estes principalmente dependentes dos materiais a utilizar e da aplicação pretendida. De acordo com a norma ASTM 52900:2015, são identificados 12 processos distintos, caracterizados pelas suas especificidades, que se podem classificar em 7 categorias [13], [14]:

- *Material Extrusion* (FDM)
- *Vat Polymerization* (SLA e DLP)
- *Powder Bed Fusion* (SLS, DMLS e SLM)
- *Material Jetting* (MJ)
- *Binder Jetting* (BJ)

- *Direct Energy Deposition* (LENS e LBMD)
- *Sheet Lamination* (LOM, UAM)

2.2.1. Material Extrusion

Incluída na categoria de Extrusão de Material estão os processos nos quais o material, em forma de filamento, é compelido a passar por um orifício de pequenas dimensões, sujeito a elevadas temperaturas, com o objetivo de fundir o material que será depositado na posição predefinida na base de construção do objeto ambicionado. Após a extrusão e deposição, o material arrefece e solidifica, resultando na peça final. É possível observar o princípio de funcionamento desta tecnologia na Figura 3 e as principais características deste tipo de processo são sucintamente apresentadas na Tabela 2 [15].

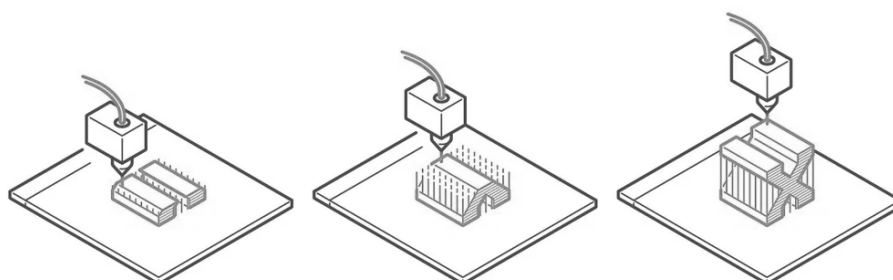


Figura 3 - Esquema representativo da categoria *Material Extrusion* [16].

Tabela 2 - Tabela resumo da categoria *Material Extrusion*. [14], [16], [17]

Tipos de Tecnologia	<i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM) ou também denominada <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF)
Materiais	Filamento Termoplástico
Precisão dimensional	$\pm 0,5$ mm
Pontos fortes	Prototipagem de baixo custo; Aplicações funcionais, onde a carga não é crítica; Disponibilidade em várias cores e tipos de materiais
Pontos fracos	Limitação na precisão dimensional Linhas entre camadas visíveis com exceção se sujeitas a tratamento de pós-processamento Propriedades mecânicas anisotrópicas

Destaca-se neste relatório esta tecnologia juntamente com a tecnologia SLS, sendo ambas objeto de maior detalhe ao longo deste documento. Será apresentada uma explicação sobre o funcionamento das máquinas a serem utilizadas, as suas características e o tipo de aplicações que se pretendem para a empresa a partir destas.

2.2.2. Vat Polymerization

Os processos que empregam uma fonte de radiação ultravioleta (UV) visam curar a resina líquida fotossensível de modo a solidificá-la e conferir-lhe a forma desejada. Após a "impressão", as peças são limpas e novamente expostas à radiação UV para o processo de cura, que visa conferir

resistência à peça. Se necessário, procede-se à remoção dos suportes. Na Figura 4, é possível observar o princípio de funcionamento desta tecnologia e na Tabela 3, são apresentadas de forma sucinta as suas principais características [18], [19].

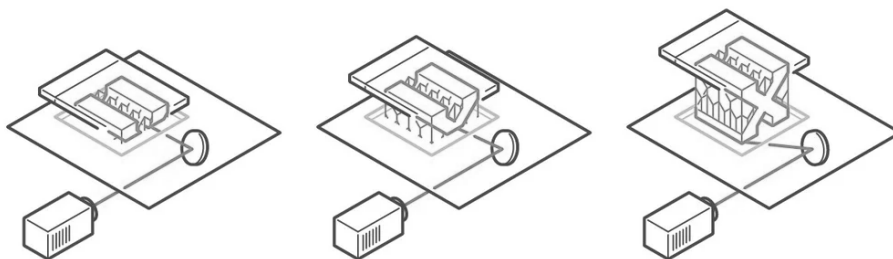


Figura 4 - Esquema representativo da categoria *Vat Polymerization* [16].

Tabela 3 - Tabela resumo da categoria *Vat Polymerization* [14], [16], [20].

Tipos de Tecnologia	<i>Stereolithography (SLA)</i> <i>Masked Stereolithography (MSLA)</i> <i>Direct Light Processing (DLP)</i>
Materiais	Resina Fotossensível
Precisão dimensional	$\pm 0,15$ mm
Pontos fortes	Alta precisão e detalhes complexos Superfície lisa Vasta variedade de materiais
Pontos fracos	Produção de peças quebradiças Degradação das peças quando sujeitas à luz solar Necessária remoção de marcas de suporte

2.2.3. Powder Bed Fusion

Esta categoria de processo recorre comumente a lasers como fonte de energia térmica, promovendo a fusão de partículas de pó que se situam na área de impressão, unindo-as e construindo a peça camada após camada. O princípio de funcionamento desta tecnologia é ilustrado na Figura 5 e as suas principais características são sucintamente expostas na Tabela 4 [21].

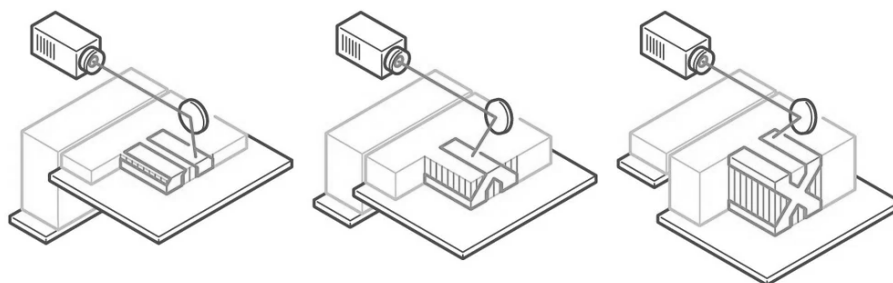


Figura 5 - Esquema representativo da categoria *Powder Bed Fusion* [16].

Tabela 4 - Tabela resumo da categoria Powder Bed Fusion [14], [16], [22], [23].

Tipos de Tecnologia	<i>Stereolithography (Selective Laser Sintering (SLS)</i> <i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i> <i>Selective Laser Melting (SLM)</i> <i>Electron Beam Melting (EBM)</i>
Materiais	Pó termoplástico Pó metálico
Precisão dimensional	$\pm 0,3$ mm
Pontos fortes	Peças funcionais Excelentes propriedades mecânicas Geometrias complexas
Pontos fracos	Elevados custos de máquinas Materiais frequentemente de maior custo Taxas de construção mais lentas

2.2.4. Material Jetting

Este processo assemelha-se ao funcionamento de uma impressora de tinta convencional. No entanto, ao invés de imprimir apenas uma única camada, como nas impressoras habituais, o *Material Jetting* permite a deposição de múltiplas camadas de gotículas de material polimérico fotossensível, as quais serão curadas através de uma fonte de luz UV. O princípio de funcionamento desta tecnologia é ilustrado na Figura 6 e as suas principais características são sucintamente apresentadas na Tabela 5 [24].

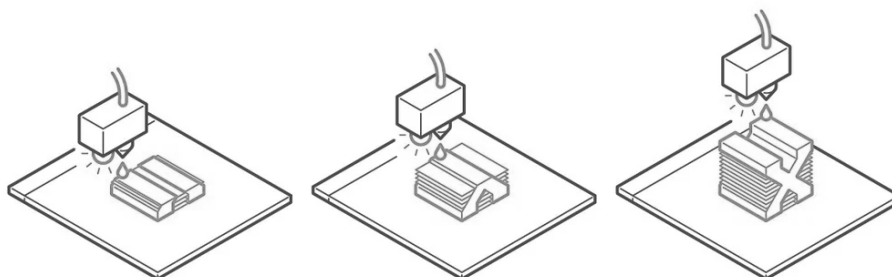
Figura 6 - Esquema representativo da categoria *Material Jetting* [16].

Tabela 5 - Tabela resumo da categoria Material Jetting [14], [16], [25], [26].

Tipos de Tecnologia	<i>Material Jetting (MJ)</i> <i>Drop on Demand (DOD)</i>
Materiais	Resina fotopolimérica
Precisão dimensional	$\pm 0,1$ mm
Pontos fortes	Acabamento superficial texturizado Cores completas Disponibilidade de uso de vários materiais
Pontos fracos	Materiais limitados Não adequado para peças mecânicas exigentes Custo mais elevado em comparação com outras tecnologias de resina para fins visuais

2.2.5. Binder Jetting

Este é um processo que tem muitas semelhanças com o *Powder Bed Fusion*. Contudo, há uma diferença importante: a união das partículas de pó é realizada através de um agente de ligação líquido, que é pulverizado e solidifica juntamente com as partículas de pó. O princípio de funcionamento desta tecnologia pode ser observado na Figura 7, enquanto as suas principais características são descritas de forma resumida na Tabela 6 [27].

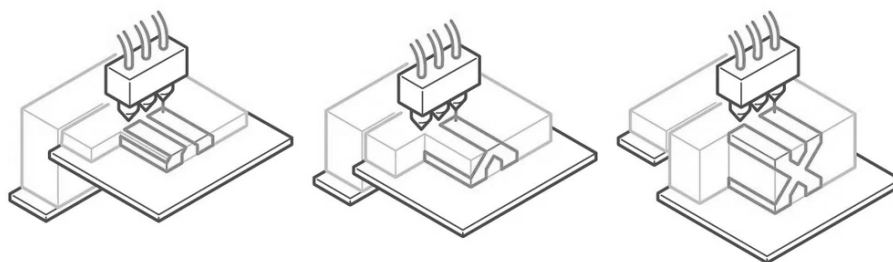


Figura 7 - Esquema representativo da categoria *Binder Jetting* [16].

Tabela 6 - Tabela resumo da categoria *Binder Jetting* [14], [16], [26], [28].

Tipos de Tecnologia	<i>Binder Jetting</i> (BJ)
Materiais	Pó metálico Areia colorida Sílica
Precisão dimensional	$\pm 0,2$ mm (metal) $\pm 0,3$ mm (areia)
Pontos fortes	Produção em grandes quantidades de baixo custo de peças metálicas Prototipagem colorida em acrílico ou areia Recursos de impressão grandes na areia
Pontos fracos	Propriedades inferiores dos materiais para DMLS/SLM Restrição de design provocada pelo pós-processamento Detalhes muito finos não são possíveis de fazer

2.2.6. Direct Energy Deposition

Trata-se de um método de impressão 3D no qual o material é simultaneamente depositado e fundido através de uma potente fonte de energia térmica. Esta fonte de energia pode ser um feixe de elétrons, *laser* ou plasma. O material é fornecido em forma de arame ou pó, de modo que, ao ser expelido do *nozzle*, possa ser imediatamente solidificado pela fonte de energia. Esta tecnologia apresenta uma grande versatilidade, uma vez que, além de permitir a criação de peças através de camadas sucessivas, também possibilita a reparação de peças danificadas. Por esta razão, este método é mais frequentemente empregado para realizar reparações do que para a criação de peças completamente novas. O princípio de funcionamento desta tecnologia pode ser observado na Figura 8, enquanto as suas principais características são apresentadas de forma concisa na Tabela 7 [29].

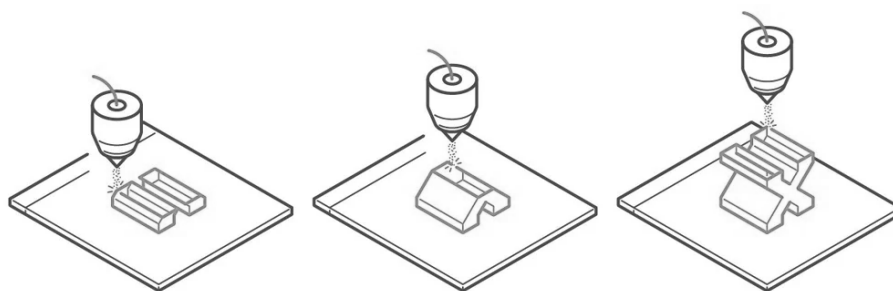


Figura 8 -Esquema representativo da categoria *Direct Energy Deposition* [16].

Tabela 7 - Tabela resumo da categoria *Direct Energy Deposition* [14], [16], [30], [31].

Tipos de Tecnologia	<i>Laser Engineered Net Shaping (LENS)</i> <i>Electron Beam Additive Manufacturing (BEAM)</i>
Materiais	Metais sob a forma de fio ou pó
Precisão dimensional	$\pm 0,1 - 0,5$ mm
Pontos fortes	Raramente necessita de suportes Mistura de metais Possibilidade de trabalhar em 3 dimensões
Pontos fracos	Fraco acabamento superficial, que requiere uma ação de pós-processamento Processo dispendioso

2.2.7. Sheet Lamination

O método de funcionamento baseia-se no acúmulo de várias folhas de materiais extremamente finos. A sua junção é efetuada através de diferentes técnicas, dependendo do material a ser unido, geralmente por meio de calor, soldadura por ultrassons e colagem adesiva. Este processo é comumente aplicado na produção de protótipos não funcionais e económicos, com uma velocidade consideravelmente alta. O princípio de funcionamento desta tecnologia pode ser observado na Figura 9, enquanto as suas principais características são apresentadas de forma resumida na Tabela 8 [32].

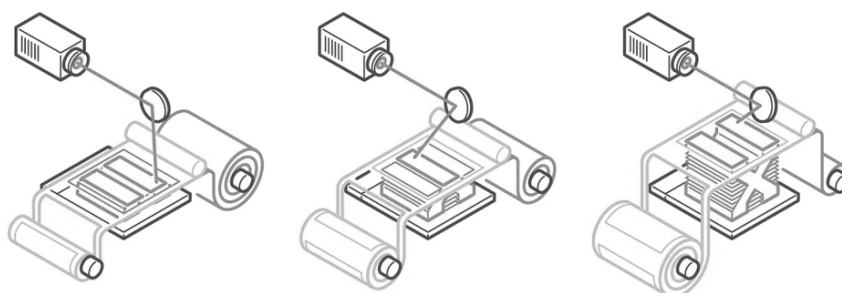


Figura 9 -Esquema representativo da categoria *Sheet Lamination* [16].

Tabela 8 - Tabela resumo da categoria *Sheet Lamination* [14], [16], [20], [33].

Tipos de Tecnologia	Laminated Object Manufacturing (LOM) Ultrasonic Consolidation (UC)
Materiais	Papel (em forma de folhas) Polímeros (em forma de folhas) Metais (em forma de folhas)

Tabela 8 - Tabela resumo da categoria *Sheet Lamination* [14], [16], [20], [33].

Precisão dimensional	$\pm 0,1$ mm
Pontos fortes	Baixo custo Possibilidade de produções rápidas Impressões com compósitos
Pontos fracos	Baixa precisão Maior desperdício Requer trabalho de pós-processamento

2.3. Fused Deposition Modeling (FDM)

Neste subcapítulo, proceder-se-á ao estudo mais detalhado do processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), uma das tecnologias mais utilizadas na indústria do fabrico aditivo. Abordar-se-á a operacionalização do processo, elucidando os materiais mais comuns e examinar-se-ão os principais defeitos possíveis e as suas soluções. Posteriormente, discutir-se-ão os procedimentos de pós-processamento, as principais aplicações do FDM em várias indústrias e o seu impacto ambiental, destacando também esforços para minimizar desperdícios e promover a reciclagem. Este subcapítulo promete uma visão abrangente do FDM e do seu papel na transformação da produção e criação de objetos.

2.3.1. Funcionamento

Para obter uma compreensão mais detalhada do funcionamento deste processo, é importante reforçar um dos processos utilizados ao longo do desenvolvimento do trabalho. *Fused Deposition Modeling* é o processo de extrusão mais comum no mundo do fabrico aditivo. O princípio de funcionamento da FDM envolve as seguintes etapas:

- 1) **Desenho do Modelo 3D:** O primeiro passo no processo FDM é construir um modelo 3D utilizando software CAD (*Computer-Aided Design*). O *design* é então convertido num formato que a impressora 3D consegue entender, normalmente STL (*Standard Tessellation Language*) ou OBJ (*Object*).
- 2) **Slicing do Modelo:** O modelo 3D é então "fatiado" em várias camadas finas por um software de *slicing*. Este software também gera as instruções necessárias (G-code) para a impressora 3D seguir. O processo de fatiamento determina a resolução da impressão, com camadas mais finas a levar a uma maior resolução (mas tempos de impressão mais longos).
- 3) **Carregamento do Filamento:** O material do filamento é carregado na impressora 3D. Este filamento está normalmente numa bobina e é alimentado para a cabeça de extrusão da impressora.
- 4) **Aquecimento do Filamento:** A cabeça de extrusão da impressora 3D aquece o filamento através de umas resistências até um estado semi-líquido.
- 5) **Extrusão do Filamento:** O filamento aquecido é então extrudido (ou depositado) camada por camada na plataforma de construção de acordo com as instruções do *G-code*. Geralmente, a cabeça de extrusão move-se ao longo dos eixos X e Z para permitir a criação de camadas subsequentes, enquanto a plataforma de construção move-se ao longo do eixo Y.

- 6) Arrefecimento e Solidificação: Depois de uma camada ser depositada, arrefece rapidamente e solidifica. A próxima camada é então depositada em cima desta, e este processo é repetido até que todo o objeto seja impresso.
- 7) Remoção do Objeto Impresso: Uma vez concluído o processo de impressão, o objeto impresso é removido da plataforma de construção. Dependendo da complexidade do design, pode ser necessário algum processamento adicional (como remoção de estruturas de suporte ou alisamento das superfícies) [34]–[36].

A Figura 10 ilustra os principais componentes de uma impressora FDM, que foram mencionados anteriormente na descrição do princípio de funcionamento.

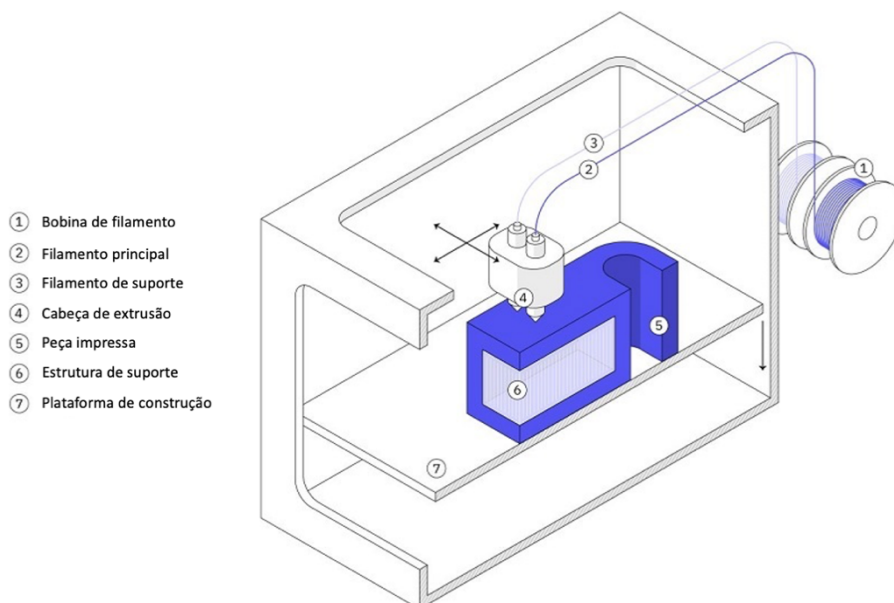


Figura 10 - Esquema representativo dos principais componentes de uma impressora FDM (Adaptado) [37]

Presentemente, identificam-se 4 categorias de impressoras FDM, nomeadamente, as cartesianas, polares, deltas e de braços robóticos, tal como ilustrado na Figura 11.

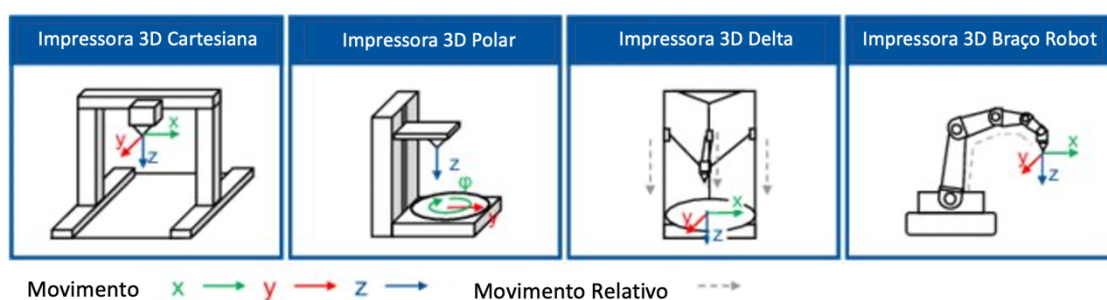


Figura 11 -Tipos de impressoras FDM existentes (Adaptado) [38].

2.3.2. Materiais mais comuns

Com a popularidade crescente do fabrico aditivo, assiste-se a um aumento na procura por novos materiais com propriedades diversas. Ao decidir-se sobre o material a utilizar, é fundamental ter em consideração a aplicação da peça a produzir, a função e o design do produto. Isto deve-se ao

facto de, na maioria das vezes, os *designers* e os engenheiros ambicionarem a conceção de um protótipo que utilize um material com características semelhantes às do produto final [39], [40].

A maioria dos consumidores prefere a utilização de termoplásticos, dado que estes têm a capacidade de suportar múltiplos ciclos de fusão e solidificação. Isto permite que o processo seja reversível, o que facilita a reciclagem e reutilização do material sem alterações significativas nas suas propriedades [41].

É relevante mencionar que a escolha do material implica diferentes parâmetros de impressão. Mesmo quando se trata do mesmo material, pequenas variações nos requisitos podem ocorrer se os fornecedores forem diferentes [42].

Na Figura 12, é possível observar algumas diferenças e características dos materiais mais utilizados.

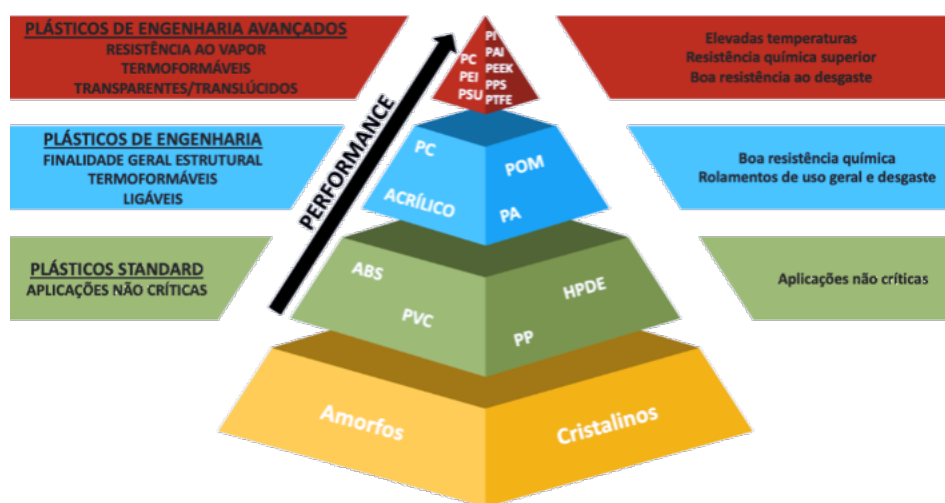


Figura 12 -Principais materiais utilizados em FDM (Adaptado) [43].

– Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)/Acrilonitrilo-estireno-acrilato (ASA)

O ASA e o ABS possuem características bastante similares, sendo o ASA considerado o sucessor do ABS. Ambos são materiais poliméricos e amorfos, apresentando elevada dureza, boa resistência ao impacto, à água e a químicos. No entanto, ambos libertam odores desagradáveis durante o seu processamento, provenientes dos químicos constituintes.

O ASA apresenta algumas vantagens, é um material resistente à radiação UV e tem um coeficiente de expansão térmica inferior ao do ABS, tornando-o mais fácil de imprimir, apesar de ambos serem considerados de difícil impressão.

No que diz respeito ao pós-processamento, ambos permitem suavizar as suas superfícies, reduzindo assim o efeito de escada através da imersão em vapores de acetona [44], [45].

– Ácido polilático (PLA)

Este é o termoplástico mais empregue no fabrico aditivo. A sua utilização e procura têm vindo a crescer, dado que este material é biodegradável, consome menos energia e temperatura para ser processado. Exibe boa resistência à tração, baixa ductilidade e menor probabilidade de deformação em comparação com o ABS. Contudo, é um material frágil, com baixa resistência a altas temperaturas e de difícil pós-processamento [46]–[48].

– Politereftalato de etileno glicol (PETG)

O PETG, que é um tipo de PET ao qual se adicionou glicol, destaca-se pela sua transparência significativa. Pode ser utilizado para impressões rápidas devido à sua capacidade de ser impresso a temperaturas baixas com velocidades consideráveis. Apresenta uma resistência satisfatória contra a humidade e agentes químicos, o que o torna adequado para o uso na indústria alimentar e em situações que necessitem de resistência à água [49].

– **Polieter-eter-cetona (PEEK)/ Polietierimida (PEI)**

Tanto o PEEK como o PEI são termoplásticos que integram a categoria de plásticos de engenharia avançada. O PEEK destaca-se pela sua excecional resistência a altas temperaturas, propriedades mecânicas excelentes e estabilidade química notável. É categorizado como um biomaterial, tornando-se assim num candidato viável para a reparação de ossos e desenvolvimento de próteses para o corpo humano [50].

O PEI é frequentemente utilizado na indústria de transportes graças ao seu bom equilíbrio entre peso e resistência mecânica. Requer temperaturas elevadas tanto para a sua extrusão quanto para a plataforma de construção. No mercado, é conhecido como ULTEM AM9085F. Graças à sua baixa densidade e propriedades de toxicidade reduzida, é apto para uso em cabines de aeronaves [51].

– **Poliamida (Nylon)**

Este material é a escolha apropriada quando se necessita de peças com maior flexibilidade e durabilidade. Apresenta notável resistência ao impacto e elevada tenacidade, contudo, é bastante suscetível à humidade, o que pode degradar as suas propriedades. Apesar de a sua impressão ser complexa, é ideal para a produção de peças mecânicas devido à sua resistência significativa ao desgaste [52].

– **Policarbonato (PC)**

O uso deste termoplástico, que possui boas características mecânicas, resistência ao estiramento, robustez e longevidade, é bastante limitado devido às complicações associadas à sua impressão. A sua extrusão requer uma grande quantidade de energia, contudo, os componentes produzidos com este material têm a vantagem de serem resistentes a altas temperaturas, terem boa união entre camadas e uma superfície de alta qualidade [53].

– **Poliuretano termoplástico (TPU)**

Este tipo de material enquadra-se na gama dos materiais flexíveis, podendo ter analogias com as borrachas, uma vez que não se fragmentam quando dobrados. Contamos com materiais de diferentes patamares de flexibilidade e, habitualmente, à medida que a flexibilidade se intensifica, a impressão torna-se um desafio acrescido. É fundamental monitorizar a velocidade de impressão, dado que estes materiais exigem velocidades significativamente baixas.

Destacam-se pela robustez ao impacto, alta resistência ao desgaste e possuem uma extraordinária capacidade de amortecimento de vibrações. No entanto, um dos inconvenientes destes materiais é a sua não adequação a ambientes com elevadas temperaturas [54], [55].

– **Álcool polivinílico (PVA)/Poliestireno de alto impacto (HIPS)**

Na maior parte das situações, a orientação de uma peça para processamento sem suporte é inviável, por isso, estes dois materiais, PVA e HIPS, são considerados exclusivamente como materiais de suporte solúveis. No que diz respeito ao PVA, após a peça estar completamente

fabricada, geralmente em PLA, esta é imersa num banho de água, fazendo com que o material de suporte se dissolva e desapareça. No caso do HIPS, normalmente usado com ABS, a dissolução ocorre em limoneno. Por norma, estes materiais têm um custo superior ao dos próprios filamentos.

A utilização deste tipo de filamentos apesar de permitir um melhor acabamento das superfícies em contacto com o suporte também aumenta consideravelmente o tempo de impressão [56], [57].

Compósitos

Estes filamentos são constituídos por uma matriz plástica e um composto secundário (reforço) em forma de pó, normalmente associados a elementos como fibra de carbono, kevlar e fibra de vidro, comuns na indústria. Os materiais compostos, quando enriquecidos com estes reforços, geralmente apresentam melhores propriedades mecânicas do que os filamentos não modificados.

As fibras de reforço são empregues com a finalidade de aprimorar algumas características do filamento original, como a resistência global, a resistência térmica, a rigidez, a durabilidade e a relação resistência/peso.

Em contrapartida a impressão de filamentos de materiais compósitos é mais difícil e exige condições extra de processamento [58]–[60].

2.3.3. Principais defeitos

Apesar de haver uma grande quantidade de falhas associadas às tecnologias de FDM, de seguida irão ser apresentados os defeitos mais relevantes, as possíveis causas dessas irregularidades e as estratégias adequadas para resolvê-las.

– Má adesão à plataforma de impressão

A primeira camada de uma impressão desempenha um papel crucial no sucesso da mesma. Caso a primeira camada não adira corretamente à plataforma de impressão, pode levar a uma variedade de problemas, como deformação, deslocamento e falha total na impressão.

Na Figura 13, é apresentado um exemplo de uma primeira camada de impressão que não se fixou corretamente à plataforma de impressão e na Tabela 9, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

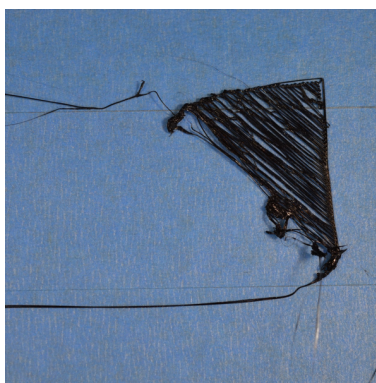


Figura 13 - Exemplo prático de uma primeira camada falhada [61].

Tabela 9 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de adesão [61].

Causa	Solução
Plataforma de impressão não nivelada	Nivelar e garantir que a plataforma de impressão está plana
<i>Nozzle</i> encontra-se demasiado longe da plataforma de impressão	Garantir distância suficiente, de forma ao filamento ser extrudido ligeiramente esmagado contra a plataforma
Velocidade de impressão demasiado alta	Imprimir a primeira camada a uma velocidade mais lenta de forma a garantir a adesão do plástico à plataforma
Parâmetros de temperatura e arrefecimento	Definir a temperatura adequada da plataforma de impressão consoante o material; desativar ou diminuir a potência da ventoinha nas primeiras camadas
Superfície da plataforma de impressão	Certificar que o material da plataforma de impressão (ULTEM 100 PEI ou vidro temperado) é adequado ao material que se vai imprimir e limpar a mesma com água ou álcool de forma a não possuir poeiras, gorduras ou óleos

– *Under extrusion*

Numa impressora 3D convencional, não há qualquer *feedback* acerca da quantidade de plástico que realmente sai do *nozzle*. Assim sendo, pode ocorrer que a quantidade de plástico que sai do *nozzle* seja inferior àquela que o software prevê, um fenómeno também conhecido por sub-extrusão. Caso isto ocorra, pode-se começar a notar lacunas entre as extrusões adjacentes de cada camada.

Na Figura 14 é apresentado um exemplo prático de *under extrusion* onde se pode observar notoriamente falhas de material entre camadas e na Tabela 10, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

Figura 14 -Exemplo prático de *under extrusion* [62].Tabela 10 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *Under extrusion* [63].

Causa	Solução
Diâmetro do filamento inadequado	Confirmar o diâmetro do filamento
Presença de resíduos no <i>nozzle</i>	Utilizar uma agulha para remover resíduos internos; imprimir com um filamento especial de limpeza.

Tabela 10 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *Under extrusion* [63].

Causa	Solução
Caudal de plástico extrudido demasiado baixo	Garantir que o caudal de material está definido para as capacidades da impressora e aumentar se necessário; também relacionado com o diâmetro de filamento
Temperatura do <i>nozzle</i> insuficiente	Se a temperatura não for suficiente o material pode não derreter totalmente e provocar uma extrusão irregular

– *Over extrusion*

Da mesma forma que existe uma sub-extrusão, também é possível ocorrer uma sobre-extrusão na impressão 3d. O que acontece é a extrusão excessiva de plástico que não é expectável pelo software de *Slicing*. Desta forma este defeito pode afetar as dimensões externas da peça.

Na Figura 14 é apresentado um exemplo prático de *over extrusion* onde se pode observar notoriamente excesso de material entre camadas e na Tabela 11, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

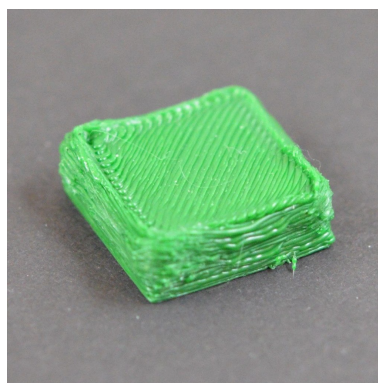


Figura 15 - Exemplo prático de *over extrusion* [64].

Tabela 11 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *Over extrusion* [65].

Causa	Solução
Diâmetro do filamento inadequado	Confirmar o diâmetro do filamento
Caudal de plástico extrudido demasiado alto	Garantir que o caudal de material é o mais adequado e diminuir se necessário, para não acontecer as camadas superiores possuírem dimensões maiores do que as camadas inferiores
Tamanho do <i>nozzle</i> inadequado	Diminuir o tamanho do <i>nozzle</i> se for necessário incorporar detalhes mais complexos ou aumentar o tamanho do mesmo para impressões mais rápidas e com geometrias mais simples

– *Stringing ou Oozing*

É caracterizado pela formação de "cordas" ou "teias" finas de filamento plástico entre duas zonas distintas do objeto que está a ser impresso. Geralmente isso acontece quando o *nozzle* se move de um ponto para o outro durante a impressão. Enquanto se move, uma pequena quantidade de filamento plástico derretido pode escorrer ou gotejar do *nozzle*, formando essas "cordas".

Na Figura 16 é apresentado um exemplo prático de *stringing* ou *oozing* onde se pode observar plástico derretido a unir dois pontos consecutivos e na Tabela 12, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

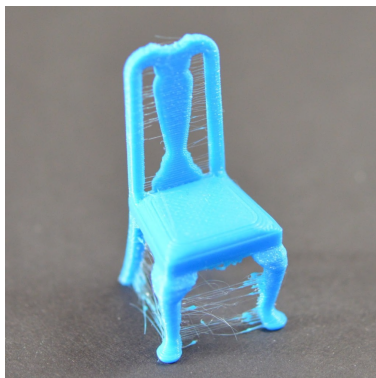


Figura 16 - Exemplo prático de *stringing* ou *oozing* [66].

Tabela 12 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *Stringing* ou *Oozing* [67].

Causa	Solução
Configurações de retração ¹ não estão a ser utilizadas	Ativar as configurações de retração de forma a aliviar a pressão do material fundido para ele não gotejar enquanto viaja no vazio
Velocidade de retração ou distância de retração demasiado baixas	Partir de uma velocidade de retração e uma distância de retração tabelada e ajustar até encontrar o ponto ideal
Temperatura de impressão elevada	Reduzir a temperatura vai ajudar pois vai haver extrusão de uma quantidade inferior de material, reduzindo assim a probabilidade de <i>stringing</i> ou <i>oozing</i>
Uso de filamento que absorveu humidade	Guardar o filamento numa caixa e protegê-lo do ar envolvente de maneira à humidade não criar bolhas quando o material é aquecido

– Sobreaquecimento

O sobreaquecimento na impressão 3D ocorre quando o equilíbrio entre a temperatura e o arrefecimento não é atingido. O plástico, ao sair do *nozzle* a temperaturas entre 190 e 310 °C, dependendo do material, precisa de arrefecer rapidamente para manter a forma desejada. Se não arrefecer suficientemente rápido, a qualidade da impressão pode ser comprometida, resultando em peças imprecisas e mal definidas.

Na Figura 17 é apresentado um exemplo prático de sobreaquecimento onde se pode observar plástico derretido que não foi capaz de arrefecer rapidamente e manter a sua forma e na Tabela 13, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

¹ Retração é um parâmetro na impressão 3D que previne defeitos como *Stringing* e *Oozing*, puxando o filamento para trás durante movimentos não impressos. Este processo alivia a pressão no filamento derretido, impedindo a extrusão excessiva e evita a formação de “cordas” e “teias”.

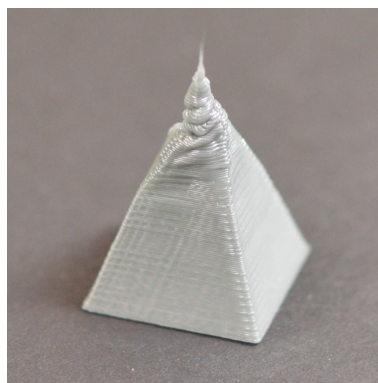


Figura 17 - Exemplo prático de sobre aquecimento [68].

Tabela 13 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de Sobre aquecimento [69].

Causa	Solução
Arrefecimento insuficiente	Aumentar gradualmente a velocidade da ventoinha até chegar à velocidade ideal sem comprometer a aderência à plataforma e entre camadas
Temperatura de extrusão demasiado alta	Reduzir a temperatura de extrusão progressivamente de forma ao modelo impresso solidificar rapidamente e manter a sua forma
Velocidade de impressão demasiado elevada	Diminuir a velocidade de impressão para que haja tempo suficiente para a camada anterior solidificar e não deformar posteriormente a camada que está a ser impressa
Imprimir apenas uma peça	Se mais nenhuma solução funcionar, ao imprimir duas peças na mesma impressão, mas separadas dará tempo ao filamento da camada anterior solidificar

– *Layer separation e splitting*

A separação² e divisão³ de camadas na impressão 3D, também conhecida como delaminação de camadas, é um defeito comum que pode afetar a qualidade e a resistência do objeto impresso. Este problema ocorre quando as camadas do material impresso não aderem corretamente umas às outras durante o processo de impressão, fazendo com que se separem ou dividam.

Na Figura 18 é apresentado um exemplo prático de *Layer separation e splitting* onde se pode observar no lado direito do cubo a má adesão entre camadas e do lado esquerdo uma divisão. Na Tabela 14, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

² Camadas separadas é um termo geralmente usado para descrever uma situação em que as camadas de um objeto impresso se separam umas das outras.

³ Camadas divididas utiliza-se para descrever uma forma específica de separação de camadas, onde as camadas se separam ao longo do eixo z.

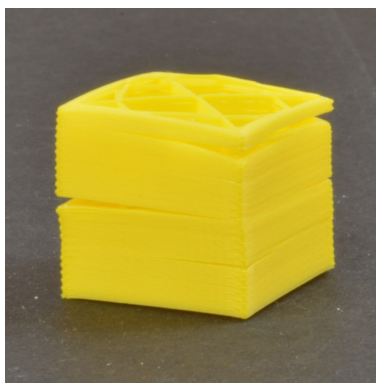


Figura 18 - Exemplo prático de separação e divisão de camadas [70].

Tabela 14 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *Layer separation* e *splitting* [71].

Causa	Solução
Altura de camada elevada	Reduzir a altura de camada para aumentar a área de superfície de contacto entre camadas
Temperatura de impressão demasiado baixa	Aumentar a temperatura de impressão de acordo com o material já que o plástico se liga mais facilmente a temperaturas mais elevadas
Caudal de plástico extrudido demasiado baixo	Mesmo se a impressora não estiver a sofrer de Under extrusion é sensato aumentar o caudal de plástico extrudido para garantir uma adesão apropriada
Velocidade de impressão elevada	Diminuir a velocidade de impressão de forma a permitir que haja tempo suficiente para a nova camada aderir à camada antiga

– Lacunas entre o *infill* e *outline*

As lacunas entre o perímetro exterior/interior da camada (*outline*) e o preenchimento (*infill*) constituem um defeito generalizado na impressão 3D, que afeta tanto a aparência como a funcionalidade do objeto impresso. Trata-se de um problema que exige atenção cuidada durante o processo de impressão, dado que pode ter implicações significativas na qualidade do produto final.

Na Figura 19 é apresentado um exemplo prático onde se pode observar vazios de material entre a *outline* e o próprio *infill*. Na Tabela 15, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

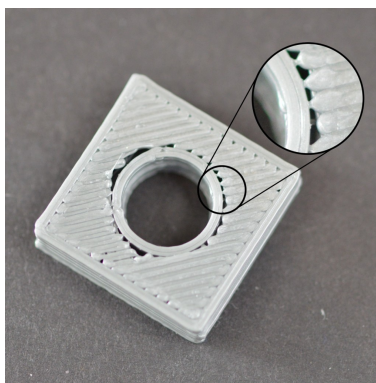


Figura 19 - Exemplo prático de lacunas de material entre o *infill* e a *outline* [72].

Tabela 15 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de presença de lacunas entre o *infill* e a *outline* [73].

Causa	Solução
Configuração incorreta do parâmetro de sobreposição de <i>infill</i> (<i>infill overlap</i>), apresentado na Figura 20, que resulta na deposição de pouco material entre o <i>infill</i> e o <i>outline</i> aquando da sua solidificação	Aceder ao <i>software</i> de <i>Slicing</i> e aumentar o valor de percentagem de sobreposição de forma a melhorar a ligação entre camadas e evitar lacunas de material
Velocidade de impressão elevada, especialmente quando o <i>infill</i> é impresso a mais velocidade do que a <i>outline</i>	Diminuir a velocidade de impressão do <i>infill</i> para que seja possível este ter tempo suficiente para se ligar à <i>outline</i> sem contrair

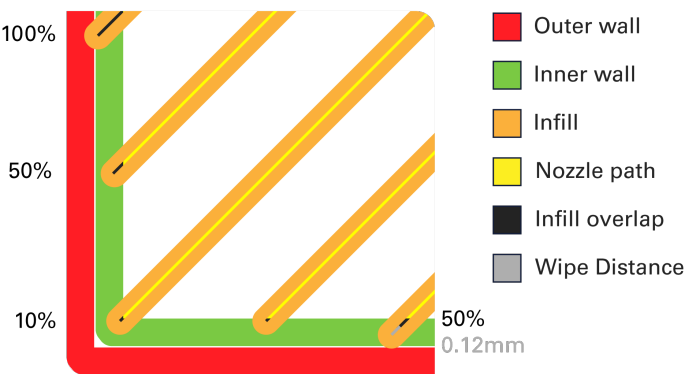


Figura 20 - Esquema representativo de *infill overlap* [74].

– **Warping**

O *warping* ocorre quando diferentes partes de um objeto impresso arrefecem a ritmos diferentes. À medida que o material arrefece, este contrai-se e essa contração desigual pode fazer com que as bordas do objeto se encurvem ou torçam. Isso resulta numa deformação do objeto, afetando a sua aparência e, possivelmente, a sua funcionalidade.

Na Figura 21 é apresentado um exemplo prático de *warping* onde se pode observar a má adesão do plástico nas primeiras camadas de impressão e consequentemente as arestas nas extremidades levantadas. Na Tabela 13, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

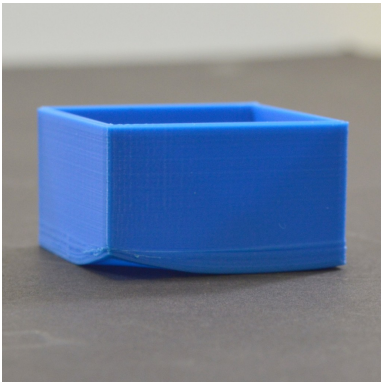


Figura 21 - Exemplo prático de *warping* [75].

Tabela 16 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *warping* [76].

Causa	Solução
Plataforma de impressão possui uma temperatura desigual	Garantir a utilização de uma plataforma de impressão aquecida, realizar um pré-aquecimento de forma à temperatura estar estável aquando do momento de impressão e para que não haja uma discrepância muito grande da temperatura da plataforma para a temperatura a partir do qual o material em uso se torna flexível
Arrefecimento demasiado rápido nas primeiras camadas	Desativar ou diminuir a velocidade da ventoinha de arrefecimento durante a deposição das primeiras camadas
Superfície da plataforma de impressão suave (vidro temperado)	Utilizar adesivos como fita adesiva de pintor, cola de <i>stick</i> , laca em <i>spray</i>
Configurações do software <i>Slicer</i> desajustadas	Diminuir a velocidade de impressão e de acordo com isso diminuir a temperatura de extrusão de material uma vez que com uma taxa de fluxo de material mais lento não é necessária tanta temperatura para manter o material no estado ideal de impressão

– **Bridging**

Bridging refere-se à criação de uma extensão horizontal ou “ponte” entre dois pontos num determinado Z numa impressão 3D. O plástico é extrudido através do espaço entre esses pontos e posteriormente arrefecido rapidamente para formar uma ligação sólida.

Ao imprimir pontes curtas sem suportes, pode-se poupar tanto material como tempo de impressão. Os suportes podem adicionar complexidade à impressão e requerer material adicional. Também é necessário um pós-processamento uma vez que estes suportes precisam de ser removidos.

Na Figura 22 é apresentado um modelo exemplo impresso que visa testar as diferentes distâncias a partir do qual o *bridging* começa a ter problemas. Na Tabela 15, identificam-se várias causas e respetivas soluções para este defeito, já anteriormente exploradas por utilizadores.

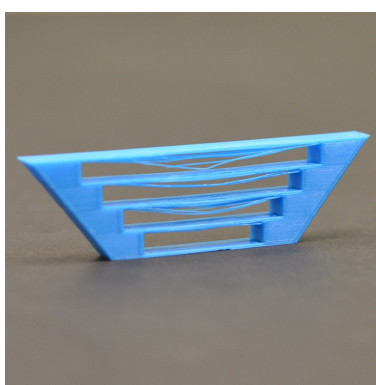


Figura 22 - Exemplo prático de teste com várias dimensões de pontes sem suportes [77].

Tabela 17 - Tabela resumo das principais causas e possíveis soluções para evitar problemas de *bridging* [78].

Causa	Solução
Temperatura de impressão demasiado alta	Diminuir a temperatura de impressão ao máximo possível sem causar sub-extrusão, de forma ao filamento não ceder devido a não ter tempo para solidificar
Taxa de fluxo de material demasiado alta	Diminuir a taxa de fluxo de material de forma a evitar extrudir demasiado material que vai ter dificuldades em arrefecer rapidamente e estará sobre o efeito da gravidade
Velocidade de impressão demasiado alta	Decrescer a velocidade de impressão em pequenos degraus até se observar a melhor condição de impressão
Arrefecimento insuficiente	Aumentar a velocidade de arrefecimento com o objetivo de evitar que o filamento extrudido esteja tempo a mais sobre o efeito da gravidade
Necessidade de suportes	Quando se está perante pontes muito longas é sugerida a utilização de suportes e desta forma todas as soluções apresentadas anteriormente possuem um papel muito pequeno neste defeito

2.3.4. Pós-processamento

O pós-processamento é uma etapa crítica que pode influenciar significativamente as propriedades finais da peça impressa. Técnicas como remoção de suportes, lixagem, polimento, colagem, tratamento químico e tratamento térmico têm métodos únicos de aplicação e efeitos nas propriedades do material. Compreender essas técnicas e seu impacto nas peças é essencial para otimizar a funcionalidade e estética dos objetos impressos em 3D da categoria FDM [79].

É importante referir que a utilização de suportes contribui para um aumento significativo no tempo de impressão, aumenta a rugosidade superficial, aumenta a quantidade de material utilizado e eleva o custo de impressão [80].

De seguida irão ser apresentados os principais tipos de processos usados na indústria automóvel que podem ser utilizados no pós-processamento e de que forma é que estes processos alteram a peça física ou a nível da melhoria das suas propriedades ou a nível de aparência.

É importante realçar que não existem apenas os processos a seguir apresentados, como mostra a Figura 23, no entanto estes são os mais utilizados no meio industrial automóvel.

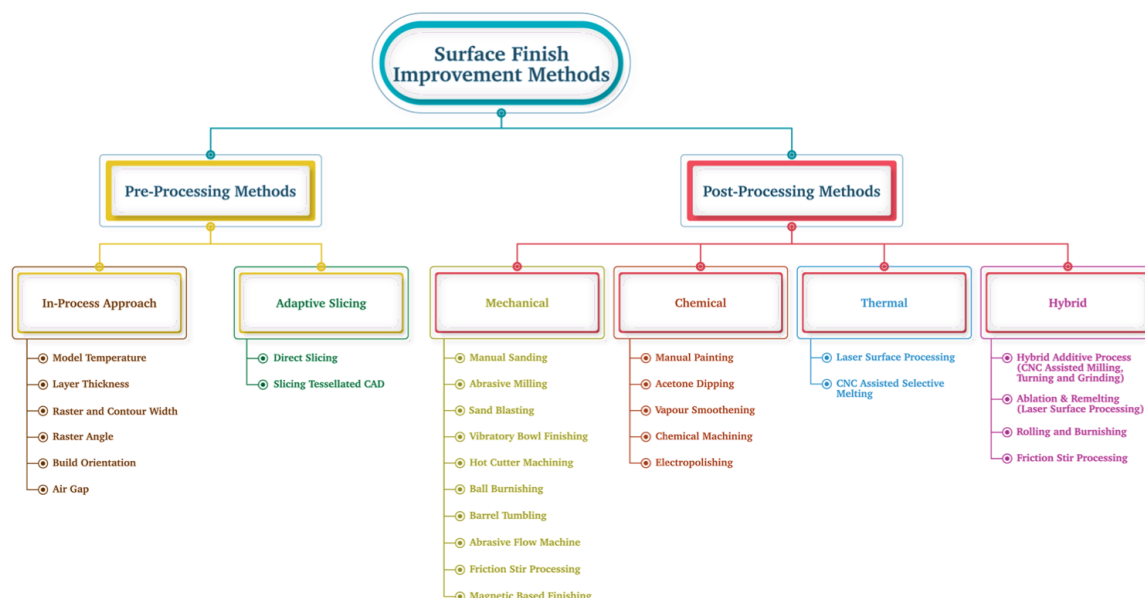


Figura 23 -Métodos de pré e pós-processamento que visam melhorar as propriedades dos materiais [81].

Remoção de suportes

Ao imprimir geometrias complexas que incluam saliências ou pontes, são frequentemente necessárias estruturas de suporte para evitar que o material ceda durante o processo de impressão. Após a impressão estar completa, estas estruturas de suporte devem ser removidas.

Atualmente existem dois tipos de materiais de suporte, os suportes solúveis que são feitos de materiais que se dissolvem num solvente específico, com base em água. São fáceis de remover, mas podem exigir materiais específicos compatíveis com o material de impressão principal [82].

Os suportes removíveis são projetados para serem removidos manualmente, separando-os da impressão. São normalmente feitos do mesmo material que o objeto impresso e requerem manuseamento cuidadoso para evitar danificar a impressão [82].

A remoção de suportes na generalidade também acarreta alguns desafios dos quais tem de se ter em conta o risco de danificar as peças, o consumo de tempo que estes processos detêm e as preocupações ambientais que levantam no que toca à utilização de solventes e resíduos provenientes de suportes “sólidos” [83], [84].

– Lixagem

Após retirado o suporte, a etapa de pós-processamento mais habitual para as peças FDM é a lixagem (manual ou mecânica) e posteriormente polimento. A utilização manual de diferentes granulações de lixas na superfície das peças contribui para a remoção de marcas, eliminação de material em excesso e obtenção de uma textura de superfície mais homogênea onde não sejam visíveis as camadas de material [85], [86].

– Polimento

Após lixagem é geralmente realizado o polimento, este processo manual utiliza um pano ou lenço de papel embebido em acetona para melhorar a rugosidade das superfícies. Este processo requer menos tempo quando comparado com os processos de tratamento químico.

Apesar de serem dois processos que podem levar algum tempo, a lixagem e o polimento são também uma das formas de pós-processamento mais económicas e simples [87].

– Colagem

A colagem é uma técnica versátil e essencial no pós-processamento de peças impressas em 3D. A seleção do método e material de colagem adequados depende das necessidades específicas do projeto, incluindo o tipo de material impresso, a aplicação pretendida e os requisitos de resistência e durabilidade.

Na Tabela 18 é apresentado um quadro resumo com os principais métodos de colagem e o funcionamento dos mesmos.

Tabela 18 - Quadro resumo com os principais métodos de colagem e união de peças impressas [88].

Método	Descrição
Adesivo (Epóxi)	Usa epóxi de duas partes, com viscosidade variável. Após aplicação, as secções coladas são fixas ou presas enquanto o epóxi cura
Adesivo (Cianoacrilato)	Conhecido como supercola, é usado para reparações rápidas e aplicações de baixa resistência. Seca em poucos minutos
Solvente	A colagem por solvente derrete quimicamente o plástico nas superfícies a serem unidas. Pode ser pincelado ou injetado numa junta pré-acoplada
Soldadura Plástica com Ar Quente	Semelhante à soldadura de metais, mas utilizando um jato de ar quente e filamento de material FDM. Produz ligações mais fortes
Soldadura por Ponto Ultrassónico	Utiliza ondas sonoras para derreter áreas localizadas da junta. Pode ser utilizado em prototipagem de baixo volume
Fixadores (Mecânicos)	Uma alternativa eficaz à colagem, com várias abordagens e opções de hardware para unir peças FDM

– Tratamento térmico

Um dos desafios enfrentados na impressão FDM é a formação de tensões internas e vazios entre os filamentos, o que pode comprometer a resistência e a qualidade das peças impressas. Uma solução promissora para esse desafio é o tratamento térmico, uma técnica que tem sido explorada para melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à temperatura das peças.

Um estudo experimental detalhado investigou o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas e na resistência à temperatura das peças impressas em 3D com PLA. As peças foram primeiro impressas, presentes na Tabela 19 e em seguida sujeitas a um recozido a diferentes temperaturas e durante diferentes períodos, dados esses presentes na Figura 24. Foram realizados testes de tração e testes de temperatura de deflexão térmica (HDT) para avaliar as melhorias.

Os resultados do estudo sugerem que o tratamento térmico pode melhorar significativamente as propriedades de tração e a resistência à temperatura das peças impressas em 3D. O recozido resultou em melhorias na resistência à tração de até 26%, como se pode comprovar através da Figura 24 e também aumentou a resistência à temperatura [89].

Tabela 19 - Denominação dos grupos, as suas temperaturas de recozido e respetivos tempos [89].

Temperatura de recozido °C	Tempo (min)	Denominação do grupo
90	60	1A
	120	1B
	240	1C
100	60	2A
	120	2B
	240	2C
120	60	3A
	120	3B
	240	3C
Temperatura ambiente	-	1

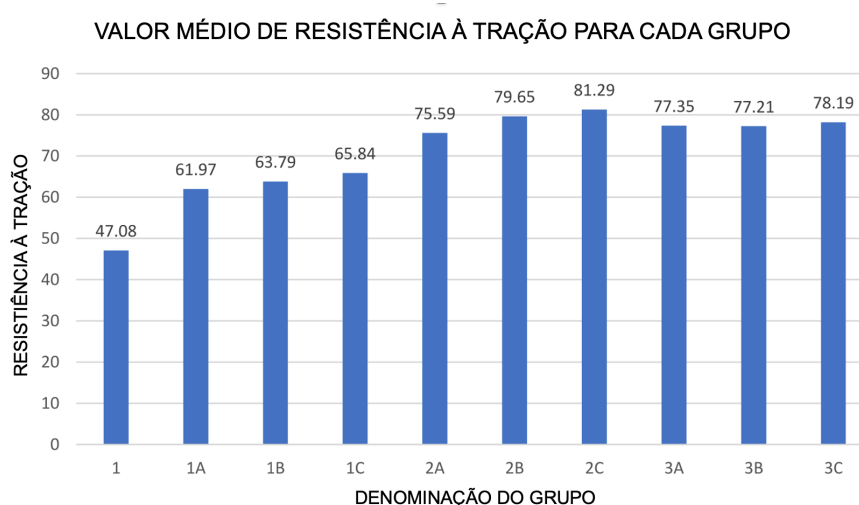


Figura 24 - Valor médio de resistência à tração de cada grupo (Adaptado) [89].

– Tratamento químico

A etapa final de uma peça impressa passa pelo tratamento químico. Este tratamento tem como principais objetivos a melhoria do acabamento superficial, o aumento da resistência mecânica, impermeabilização e alteração das propriedades óticas, como transparência ou a cor da peça.

Em seguida irão ser apresentados os principais tipos de tratamentos químicos, no que é que consistem e as vantagens e desvantagens de cada um perante o utilizador e a peça impressa.

1) Vapour Smoothing

Esta técnica é comumente aplicada aquando da utilização de filamento ABS. O objeto impresso é exposto a vapores de acetona num ambiente fechado. Os vapores reagem com a camada exterior do objeto, levando ao seu amolecimento. Este processo funde as linhas da camada e suaviza a camada exterior do objeto, conferindo-lhe um aspeto brilhante.

Esta técnica apesar de ser rápida, simples e de baixo custo, necessita de uma área bem ventilada e pode afetar a precisão dimensional do objeto [90], [91].

2) *Priming e Painting*

A aplicação do primário só pode ser realizada após a peça ter sido lixada e/ou polida. Após a primeira camada de primário, lixa-se novamente a peça e procede-se com uma segunda camada de primário. Após a aplicação do primário, permite-se que o modelo seque e, em seguida, pode-se proceder à pintura. A pintura pode ser feita com um pincel ou utilizando *sprays*.

Esta técnica pode ser aplicada a todos os tipos de materiais, permite pintar a peça com várias cores e dar às superfícies um acabamento suave, no entanto, é um processo demorado e dispendioso devido ao equipamento necessário [90].

3) *Electroplating*

Eletrodeposição consiste essencialmente na transferência de um revestimento metálico de um metal para outro (ou uma peça com uma superfície condutora). A eletrodeposição é possível graças a um processo químico denominado eletrólise onde o ânodo é feito do metal que se pretende usar como revestimento, e a peça a ser revestida atua como cátodo.

O ABS pode ser facilmente e prontamente eletrodepositado, no entanto, como é um plástico, necessita de ser previamente lixado e aplicada uma tinta condutora antes de sofrer a eletrodeposição.

Apesar ser um processo que não só aumenta a resistência geral da peça, mas também melhora a estética, a textura e as propriedades superficiais [90].

2.3.5. Sustentabilidade e Impacto ambiental

A sustentabilidade, entendida como a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades, é uma preocupação crescente em diversos setores da sociedade [92]. No contexto da impressão 3D FDM, esta preocupação manifesta-se em várias dimensões, das quais se salientam *Design + Eco Design*; *Life Cycle Analysis (LCA)*; *Use of Raw Materials*, *Recycling and Reuse of Raw Materials*; *Energy Used During Manufacturing*; *Particles and Volatile Organic Compounds Release* [93].

– *Design + Eco Design*

A impressão 3D oferece uma flexibilidade de *design* sem paralelo, permitindo a criação de geometrias complexas que seriam desafiantes através de métodos de fabrico tradicionais. Esta liberdade de *design* pode conduzir a uma poupança de material e redução de resíduos. Além disso, os princípios do *eco design* podem ser integrados no processo de *design*, garantindo que os produtos são criados tendo em mente um impacto ambiental mínimo.

Na Figura 25, é possível observar que a etapa de conceção do produto é a mais relevante no que diz respeito ao impacto ambiental no ciclo de vida do produto. Além disso, é nesta fase que os custos associados à implementação de medidas para a redução desse impacto são menores e também onde existe uma maior oportunidade para a implementação de medidas [94].

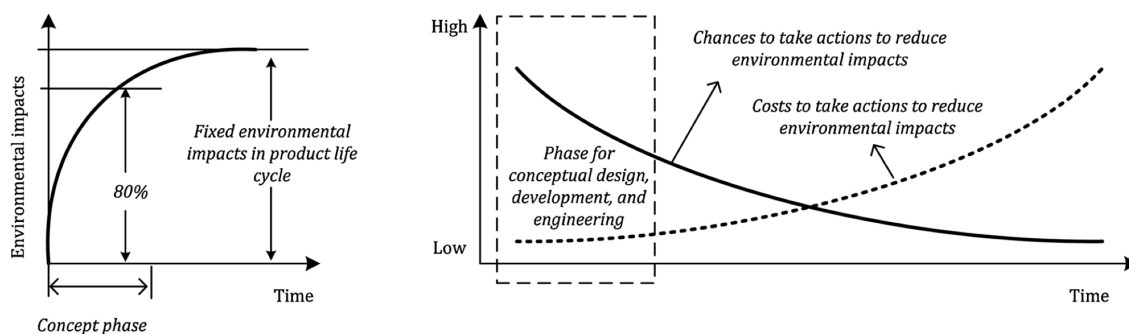


Figura 25 - Representação da importância da fase de concepção de produto para a redução do impacto ambiental [94].

– **Life Cycle Analysis**

A análise do ciclo de vida é um método utilizado para avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas da vida de um produto, desde a extração de matéria-prima até à sua disposição. Quando aplicada à impressão 3D, o LCA pode ajudar a compreender a pegada ambiental dos objetos impressos. Estudos preliminares sugerem que, embora a impressão 3D possa reduzir o desperdício nas fases de design e produção, o consumo de energia durante o processo de impressão pode ser significativo [95].

– **Recycling and Reuse of Raw Materials**

Uma das principais vantagens da impressão 3D é o potencial para reciclar e reutilizar materiais. Bobinas de filamento usadas ou impressões falhadas podem ser trituradas e novamente extrudidas num novo filamento, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas. Algumas empresas estão até a explorar o uso de plásticos reciclados como fonte para filamento de impressão 3D, promovendo ainda mais uma economia circular [96].

– **Energy Used During Manufacturing**

Embora a impressão 3D possa ser mais eficiente em termos energéticos do que alguns métodos de fabrico tradicionais, especialmente para produções curtas e protótipos, é essencial notar que o consumo de energia pode variar amplamente com base no tamanho, eficiência e utilização da impressora. A otimização das configurações de impressão e a utilização de máquinas energeticamente eficientes podem ajudar a mitigar este impacto [97], [98].

Na Figura 26 é apresentada uma metodologia generalizada para uma otimização do produto com base na qualidade, energia total consumida e impacto ambiental.

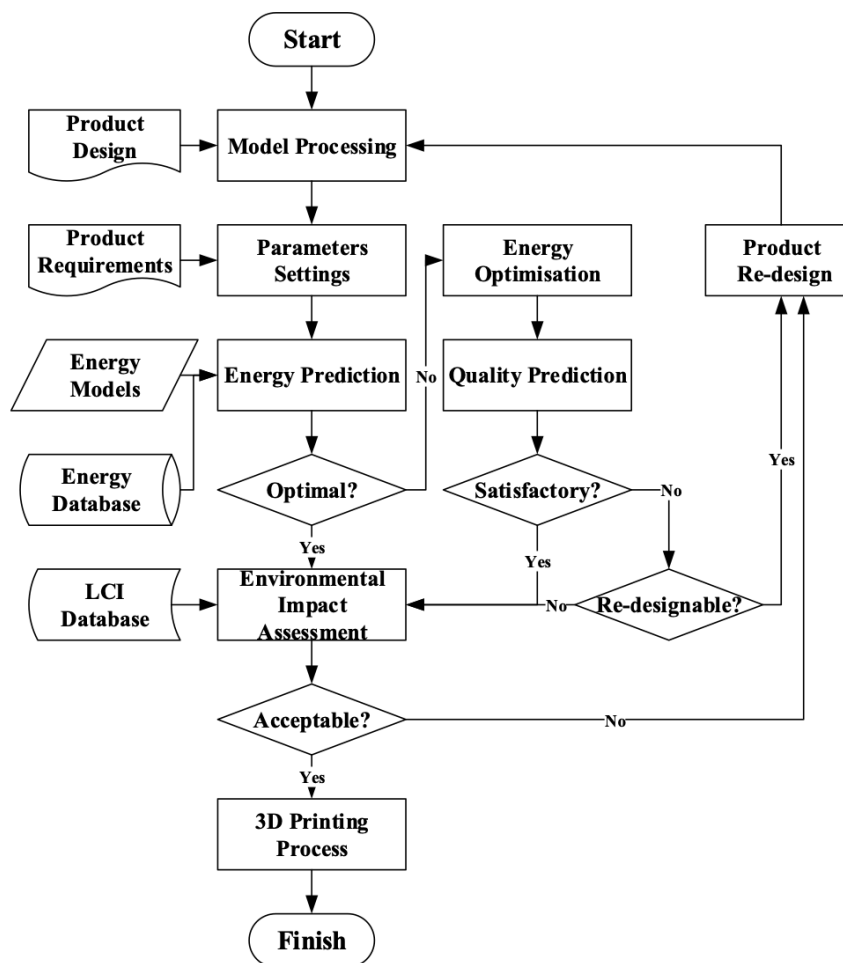


Figura 26 -Fluxograma de um processo de tomada de decisões com base na energia consumida [98].

– *Particles and Volatile Organic Compounds Release (VOC's)*

As impressoras 3D podem libertar partículas ultrafinas e VOC's durante o processo de impressão, o que pode ter implicações potenciais para a saúde e o ambiente. Uma ventilação adequada, seleção de materiais e sistemas avançados de filtração podem ajudar a reduzir estas emissões, garantindo um ambiente de impressão mais seguro e minimizando o dano ambiental [99], [100].

2.4. *Selective Laser Sintering (SLS)*

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS), em português, é uma técnica emergente no domínio do fabrico aditivo. Este método utiliza um laser para sinterizar pós de material, camada a camada, formando peças tridimensionais. Ao longo desta dissertação, serão abordados temas centrais relacionados com o SLS, nomeadamente o seu funcionamento, os materiais mais comuns utilizados e os principais defeitos associados ao processo. Cada um destes tópicos será explorado em detalhe nos subcapítulos subsequentes, proporcionando uma visão mais detalhada sobre esta inovadora tecnologia.

2.4.1. Funcionamento

O processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é o segundo processo em destaque neste relatório e tem sido amplamente adotado por engenheiros ao longo das décadas. A sua popularidade deve-se, em grande parte, ao custo reduzido por peça, à elevada produtividade e à versatilidade dos materiais desenvolvidos, que se adequam a uma vasta gama de aplicações em diferentes setores. Antes de se avançar para as etapas de impressão, tal como em FDM, é imperativa a construção ou desenho do modelo digital, seguido pelo *slicing* (fatiamento) do mesmo, de forma a gerar o *G-code* que guiará a impressora durante o processo de sinterização. O princípio de funcionamento de SLS é um processo meticuloso e bem orquestrado que se desenrola da seguinte forma [101], [102]:

- O material, sob a forma de pó, é espalhado numa fina camada no topo da plataforma dentro da câmara de impressão pelo *recoater*;
- O equipamento pré-aquece o material até perto da temperatura de fusão do material;
- O *laser* faz o *scan* do modelo 3D e aquece o material até à sua temperatura de fusão;
- As partículas são unidas mecanicamente para criar uma peça sólida;
- O material que não foi fundido desempenha a função de suporte, eliminando a necessidade de estruturas de suporte dedicadas;
- A plataforma desce então uma camada e o processo repete-se a cada camada até a peça estar completa;
- Após impressão, é imperativo deixar a câmara de impressão arrefecer sem retirar as peças, garantindo assim as melhores propriedades mecânicas;
- Com as peças completamente arrefecidas, segue-se a etapa de separação das mesmas do pó excedente, que pode ser reciclado e reutilizado em impressões futuras.

Na Figura 27 é possível observar os principais componentes de uma impressora SLS, referidos anteriormente durante o princípio de funcionamento deste processo.

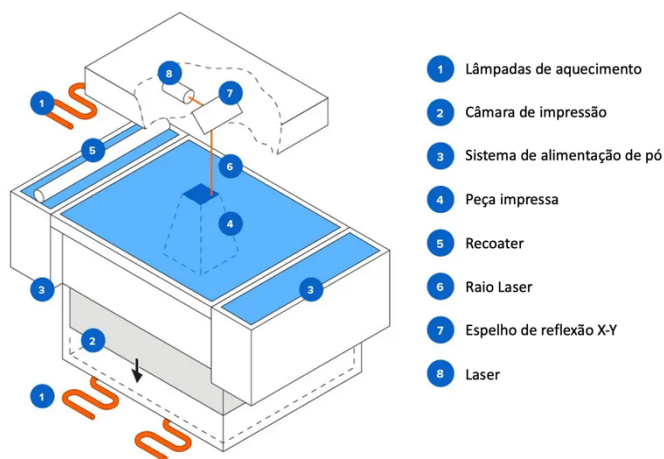


Figura 27 - Esquema representativo dos principais componentes de uma impressora SLS (Adaptado) [101].

2.4.2. Materiais mais comuns

A escolha do material é crucial para determinar as propriedades finais do objeto impresso. O processo de SLS permite a utilização de uma variedade de materiais termoplásticos que, quando expostos a um laser, fundem-se camada a camada para formar um objeto sólido. Estes materiais

são escolhidos com base nas suas propriedades mecânicas, térmicas e estéticas, bem como na sua capacidade de serem sinterizados com precisão. Entre os materiais mais comuns utilizados neste método de impressão, destacam-se a poliamida e o TPU.

O material mais comum utilizado para SLS é a poliamida, um termoplástico de engenharia adequado tanto para prototipagem funcional como para produção de uso final. As peças de poliamida produzidas através de SLS são fortes, rígidas, duráveis e resistentes a vários fatores ambientais. Existem diferentes variantes de poliamida disponíveis, adaptadas para aplicações específicas. Por exemplo, o Pó de Nylon 12 e o Pó de Nylon 11 são pós de componente único, enquanto o Pó de Nylon 12 GF é preenchido com fibras de vidro, e o Pó de Nylon 11 CF é reforçado com fibra de carbono.

As impressoras 3D SLS também podem produzir peças flexíveis em TPU, ideais para várias aplicações, como *wearables*, almofadas e ortóteses [103].

Na Tabela 20 pode-se observar as principais diferenças e o que caracteriza cada material mais utilizado no fabrico em SLS.

Tabela 20 - Tabela resumo das principais características das Poliamidas mais comuns utilizadas no processo de SLS [104].

Material	Características
Poliamida 12	+ Boas propriedades mecânicas + Boa resistência química - Superfície mate e rugosa
Poliamida 11	+ Comportamento totalmente isotrópico + Alta elasticidade
Poliamida reforçada com fibras de vidro	+ Alta rigidez + Alta resistência ao desgaste e temperatura - Comportamento anisotrópico
Poliamida reforçada com fibras de carbono	+ Excelente rigidez + Alta relação peso-resistência - Altamente anisotrópico

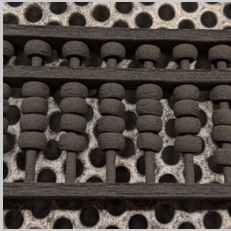
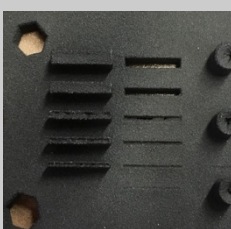
2.4.3. Principais Defeitos

Como qualquer outra tecnologia, a SLS não está isenta de desafios. Mesmo com uma compreensão clara do seu funcionamento e dos materiais frequentemente utilizados, é crucial reconhecer que o processo SLS pode apresentar defeitos específicos.

Estes defeitos podem ser resultado de uma variedade de fatores, desde a preparação inicial do pó, passando pelas configurações do equipamento, até às condições pós-processamento. A presença destes defeitos não só compromete a estética da peça final, mas também pode afetar a sua funcionalidade e integridade estrutural.

A Tabela 21 que se segue apresenta e detalha os principais defeitos em SLS.

Tabela 21 - Quadro resumo dos principais defeitos encontrados em SLS [105].

Defeito	Imagem representativa	Breve explicação	Principais causas	Soluções
Peças frágeis		Peças impressas são mais frágeis do que o esperado	Contaminação ótica	Inspecionar as superfícies óticas e limpar se necessário
Delaminação		Camadas da impressão se desprendem parcial ou totalmente das camadas anteriores	Potência do laser insuficiente	Limpar as superfícies óticas.
Warping		Peças impressas têm curvaturas ou deformações	Câmara de construção não arrefeceu adequadamente	Esperar que as peças impressas arrefeçam abaixo de 45°C antes de removê-las da câmara de impressão
Acabamento pobre em superfícies verticais		Superfícies verticais têm acabamento áspero ou manchado	Uso excessivo de pó reciclado	Aumente a percentagem de pó virgem em relação ao pó reciclado e descartar o pó degradado
Pitting		Ocorrem orifícios na superfície superior das peças, geralmente em áreas com pequena secção transversal	Temperatura da plataforma de impressão demasiado alta	Inspecionar o sensor infravermelho e o alojamento do sensor infravermelho para qualquer acumulação de lauro lactam ⁴
Melting		O pó é aquecido acima da sua temperatura de fusão	Falhas no aquecimento ou no sensor infravermelho	Limpar o vidro do sensor infravermelho Verificar o anel O-ring do sensor infravermelho

⁴ Lauro lactam é um composto de cor branca sob a forma de pó que se forma como resultado da sinterização do nylon.

Tabela 21 - Quadro resumo dos principais defeitos encontrados em SLS [105].

Defeito	Imagem representativa	Breve explicação	Principais causas	Soluções
Hard caking		O pó é fundido num bloco rígido, dificultando a separação das peças	Temperatura da plataforma de impressão demasiado alta	Inspecionar o sensor infravermelho e o alojamento do sensor infravermelho para qualquer acumulação de lauro lactam

2.5. Parâmetros de Impressão

Na produção de objetos através de FDM e SLS, diversos parâmetros e condições afetam as características e a simplicidade do processo. A adequação destes parâmetros é essencial, tendo em conta o material e sua composição, a geometria do objeto, a máquina utilizada e as restrições dos softwares de *slicing* específicos de cada fabricante. Tais condições podem determinar, entre outros aspetos, a forma final do objeto, a sua estrutura interna, a qualidade das superfícies e a resistência mecânica, dependendo das solicitações a que os objetos serão submetidos.

2.5.1. Orientação de impressão

A orientação de impressão refere-se à forma como o objeto é posicionado num determinado ângulo em relação ao eixo horizontal da plataforma de impressão, sendo influenciada principalmente pelo tipo de material e pelas dimensões do objeto a imprimir. Esta orientação tem impacto não só na qualidade da impressão, manifestada em termos de rugosidade e irregularidades superficiais, mas também na disposição das camadas. Além disso, afeta as propriedades mecânicas do componente impresso, uma vez que, nas tecnologias FDM e SLS, diferentes orientações resultam em variações no comportamento mecânico e nos custos de fabrico das peças. Este é o único parâmetro partilhado por ambas as tecnologias [106], [107].

2.5.2. Layer Height

A *layer height* refere-se à espessura de cada camada que a impressora deposita. Camadas mais finas resultam numa melhor resolução no eixo Z, e consequentemente melhor adesão entre camadas e melhores propriedades mecânicas, enquanto camadas mais espessas reduzem o tempo total de impressão. Por exemplo, um modelo com 100 mm de altura impresso com uma altura de camada de 0,1 mm terá um total de 1.000 camadas. Se a altura da camada for de 0,4 mm, o modelo terá apenas 250 camadas, reduzindo significativamente o tempo de impressão.

A relação entre a *layer height* e o diâmetro do *nozzle* é essencial. Embora possam ser ajustados de forma quase independente, a altura da camada é parcialmente determinada pelo tamanho do *nozzle*. Em termos práticos, a *layer height* é frequentemente cerca de 50% do diâmetro do *nozzle* [108].

2.5.3. Diâmetro do *nozzle*

O diâmetro do *nozzle* é outro parâmetro vital. A maioria das impressoras 3D vem equipada com um bocal padrão de 0,4 mm. No entanto, existem bocais de diferentes diâmetros, desde 0,1 mm para detalhes mais finos até 2 mm para impressões mais rápidas. O diâmetro do *nozzle* influencia a resolução nos eixos X e Y, influencia as propriedades mecânicas da peça final e pode-se concluir que um *nozzle* mais pequeno ainda permite detalhes mais precisos, enquanto um *nozzle* mais largo permite velocidades de impressão mais rápidas.

O diâmetro do *nozzle* também tem influência nas propriedades mecânicas da peça final como se pode observar na Figura 28, em que foi feito um estudo comparativo entre provetes de PLA e provetes injetados, sendo a linha representada a vermelho pelo número 1 os valores de referência para cada propriedade [109].

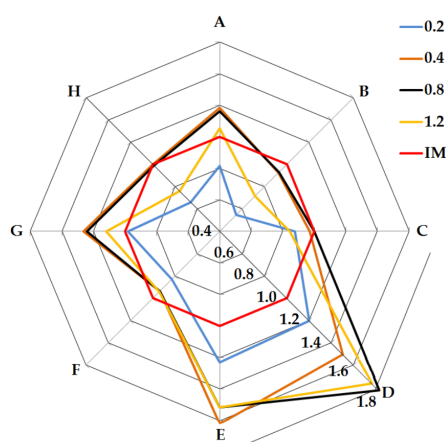


Figura 28 - Comparação das propriedades mecânicas de provetes impressos com provetes injetados. A - módulo de elasticidade; B - resistência à tração; C - alongamento; D - resistência ao impacto; E - resistência à tração por impacto; F - densidade aparente; G - módulo específico; H - resistência à tração específica [109].

Na Figura 29 pode-se observar a influência que o diâmetro do *nozzle* tem na resolução das camadas e consequentemente da peça final.

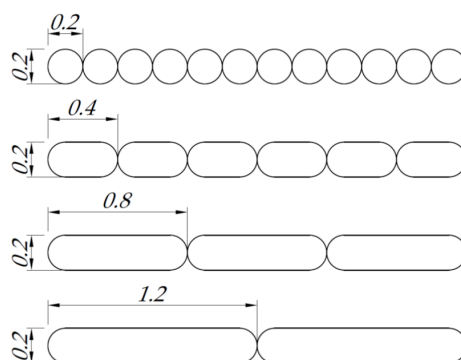


Figura 29 - Esquema representativo da variação do diâmetro do *nozzle* mantendo a mesma espessura de camada de contacto [109].

2.5.4. Temperatura de extrusão

A temperatura de extrusão, frequentemente designada como temperatura de impressão e a sua influência na qualidade e propriedades mecânicas de peças impressas é um dos parâmetros de processo mais estudados.

Esta temperatura desempenha um papel crucial na precisão dimensional das peças impressas já que temperaturas muito elevadas aumentam a fluidez do filamento, permitindo que este se expanda de forma mais livre, resultando em maiores desvios dimensionais. Por outro lado, temperaturas excessivamente baixas podem causar defeitos de sub-extrusão, como a delaminação de camadas sucessivas, comprometendo assim a resistência à tração da peça. Além disso, a seleção de temperaturas de impressão demasiado altas pode conduzir a efeitos negativos de sobre-extrusão.

Estes efeitos manifestam-se através da formação de vazios causados por filamentos com viscosidade demasiado baixa, resultando em bolhas devido ao fluxo instável proveniente do *nozzle*, bem como na formação de camadas pendentes⁵, *stringing* ou *oozing*. Estes problemas, por sua vez, também reduzem a resistência à tração das peças impressas [110].

2.5.5. Temperatura da plataforma de impressão

A temperatura da plataforma de impressão é um fator determinante na adesão da primeira camada do objeto impresso. A sua regulação adequada é essencial para garantir que a peça impressa não se descole durante o processo de impressão. Uma temperatura demasiado alta pode causar deformações na peça, enquanto uma temperatura demasiado baixa pode resultar numa má adesão, levando a peça a descolar-se. Além disso, a escolha de uma temperatura adequada para a plataforma de impressão pode variar dependendo do material utilizado. A seleção imprópria da temperatura pode levar a defeitos na impressão, como *warping*. É, portanto, crucial monitorizar e ajustar a temperatura para garantir a qualidade e a precisão das peças impressas [111].

2.5.6. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão geralmente refere-se à quantidade de material que é depositado no objeto ao longo do tempo.

No estudo analisado, avaliou-se o impacto dos parâmetros de processamento nas variações dimensionais Y e Z, bem como na resistência à tração e no tempo de construção. Verificou-se que a velocidades de impressão mais reduzidas, os desvios dimensionais são menores, especialmente com temperaturas de extrusão mais elevadas. Em contraste, a resistência à tração máxima e o tempo mínimo de construção são alcançados a velocidades de impressão mais altas. Esta maior resistência à tração a velocidades elevadas pode ser atribuída ao intervalo de tempo mais curto entre a formação de camadas sucessivas, o que promove uma ligação mais forte entre elas.

⁵ Camadas pendentes refere-se à deformação ou descida de uma camada de material impresso, especialmente em áreas de sobreposição ou pontes, onde o material impresso não tem suporte imediato por baixo. Em inglês também conhecido como *sagging* ou *drooping*.

Adicionalmente, a *raster width* aumenta a temperaturas de extrusão mais baixas e diminui à medida que a temperatura de extrusão se eleva [112].

2.5.7. Infill density

A densidade de preenchimento (*infill density*) refere-se à quantidade de material utilizado no interior de um objeto impresso. Não abrange as camadas exteriores (*outer layers*), mas concentra-se na estrutura interna. A densidade de preenchimento pode variar de 0% (oco) a 100% (sólido) e pode ter diversas formas, tamanhos e padrões. A escolha da densidade de preenchimento pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas, o peso e o tempo de impressão da peça.

Observou-se que um aumento na densidade de preenchimento potencia a resistência à tração e compressiva dos materiais. Peças com densidade de preenchimento elevada demonstram maior ligação entre camadas e resistência à deformação devido a menores espaços vazios. Por outro lado, uma menor densidade acelera o processo de construção e utiliza menos material bruto. A meso-estrutura, que se forma com menor densidade de preenchimento, influencia a resistência do componente, atuando como propagador de fissuras sob carga de tração e absorvendo cargas em compressão. A geometria desta meso-estrutura é determinada pela densidade e padrão de preenchimento. Adicionalmente, a resistência aumentada implica um acréscimo no peso e tempo de impressão da amostra [113].

2.5.8. Infill pattern

Este parâmetro refere-se à forma e estrutura do material de preenchimento no interior do objeto impresso. Diferentes padrões de preenchimento possuem diferentes resistências e podem influenciar a integridade estrutural do objeto impresso [114].

Estudos realizados mostram que peças impressas com um ângulo de deposição de 90° e padrão retilíneo evidenciam um aumento das propriedades mecânicas à medida que a densidade do preenchimento cresce.

O padrão de preenchimento tem um impacto mínimo na rigidez. A máxima resistência à tração e tensão limite elástico é obtida com o padrão triangular, enquanto o módulo máximo de elasticidade é alcançado pelo padrão retilíneo. A variação dos padrões de *infill* altera a resistência à tração em menos de 5%, sendo esta principalmente determinada pela densidade de preenchimento. Peças com padrão hexagonal são mais rígidas e possuem uma maior resistência à tração do que as retilíneas [115].

Na Figura 30 pode-se observar os padrões retilíneo e triangular referidos anteriormente, assim como os padrões mais comuns utilizados em impressão 3D.

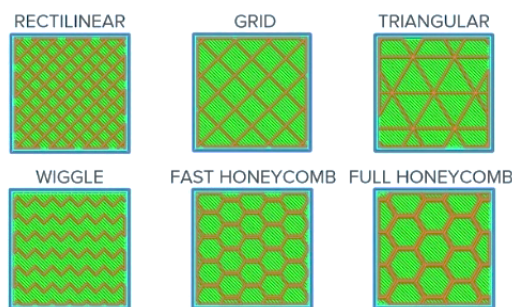


Figura 30 - Principais padrões de preenchimento utilizados em impressão [116].

2.5.9. Raster angle

O ângulo de *raster* refere-se ao ângulo da trajetória do *nozzle* em relação ao eixo X da plataforma de construção. Os ângulos de *raster* típicos permitidos variam entre 0 e 90° ou de 0° a -90°, em incrementos de 15°. Por exemplo, uma seleção de 45° irá criar uma trajetória do *nozzle* inclinada a 45° em relação ao eixo X na primeira camada inferior. Em cada camada subsequente, a direção da trajetória da ferramenta irá alternar diferindo sempre 90° como se pode observar na Figura 31 [117].

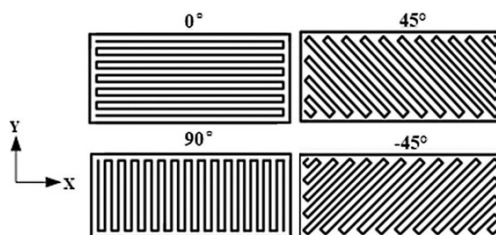


Figura 31 -Esquema exemplo do ângulo de raster entre duas camadas sucessivas [118].

Observou-se que um aumento do *raster angle* resultou numa diminuição do módulo de elasticidade das amostras examinadas. Assim, as amostras a 90° apresentaram o módulo elástico mais baixo. A Figura 32 ilustra a dependência da resistência à tração e do módulo de elasticidade com o *raster angle*. Os resultados obtidos confirmaram que a resistência à tração diminuiu progressivamente com o aumento do ângulo de *raster*. Adicionalmente, ao considerar o padrão de preenchimento, verificou-se que o padrão de 0° exibiu o maior valor de tensão residual, seguido pelo padrão de 90°. O valor mínimo de tensão residual foi observado no padrão de $\pm 45^\circ$ [119].

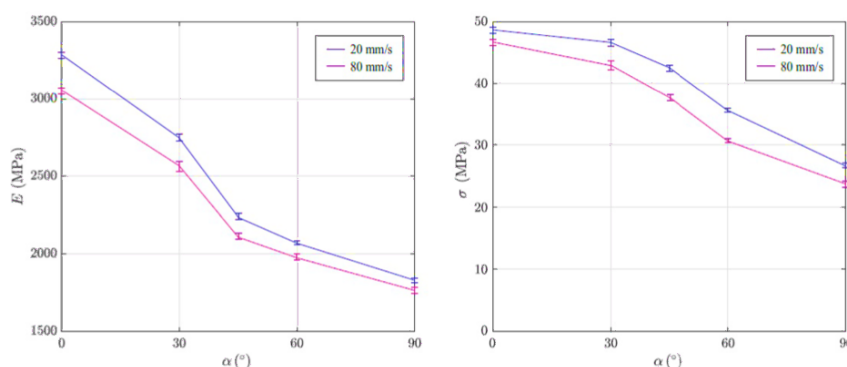


Figura 32 - Esquema representativo da influência do *raster angle* na resistência à tração e no módulo de elasticidade [119].

2.5.10. *Raster width*

A largura do *raster* refere-se à largura da camada depositada do padrão durante a impressão 3D, muitas vezes associada erradamente a *layer height*, como se pode observar na Figura 33. Esta dimensão é crucial para determinar a precisão e a qualidade do objeto impresso. No entanto, é importante notar que variações na queda de pressão podem influenciar a largura do *raster*, comprometendo assim a qualidade da peça impressa. Estas variações podem resultar em inconsistências na peça final, tornando-a menos fiável ou esteticamente desagradável.

Além disso, a presença de vazios pode atuar como um concentrador de tensões entre as camadas, devido ao qual uma fissura pode ser facilmente iniciada e propagada, resultando em última instância numa menor resistência à tração. O tempo de impressão é um fator crítico a considerar no processo, uma forma de otimizar este tempo é através da incorporação de diferentes tecnologias de impressão ou modificando a largura do raster das peças a serem impressas. Ao ajustar a largura do raster, é possível acelerar o processo de impressão, sem comprometer significativamente a qualidade do produto final [120], [121].

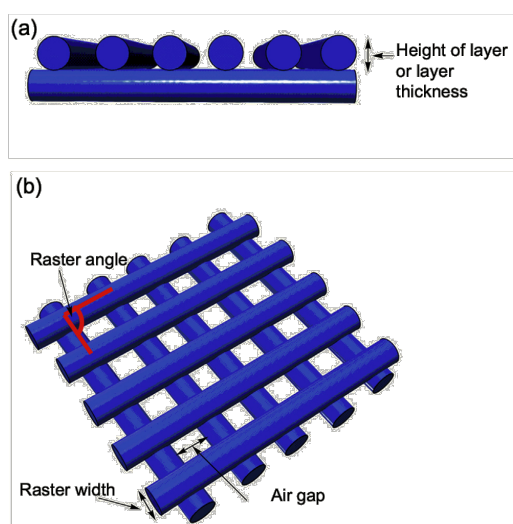


Figura 33 - Estrutura geral de uma peça impressa por FDM [120].

2.5.11. *Refresh rate*

Na era contemporânea da impressão 3D, a sinterização seletiva a laser (SLS) emerge como uma técnica revolucionária. Uma característica distintiva desta técnica é a *refresh rate*, que se refere à percentagem de pó novo e não utilizado que é misturado com pó reciclado de impressões anteriores. Por exemplo, uma impressão realizada inteiramente com pó novo apresenta uma *refresh rate* de 100%, enquanto uma impressão feita exclusivamente com pó reciclado tem uma taxa de 0%.

A capacidade de reciclar pó não sinterizado contribui significativamente para a criação de um ecossistema mais sustentável e economicamente eficiente. No entanto, é imperativo considerar que, embora a reciclagem de pó usado possa reduzir o desperdício e os custos, a utilização excessiva de pó reciclado pode comprometer as propriedades do material. Assim, torna-se crucial determinar a taxa de atualização adequada, tendo em conta diversos fatores, como a densidade de empacotamento da câmara de impressão [122].

Na Figura 34 pode-se observar a *refresh rate* recomendável para o fabricante FormLabs com base no material a utilizar.

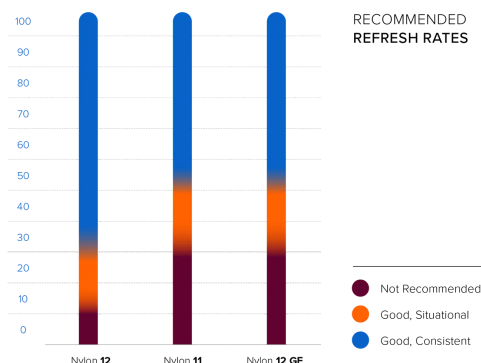


Figura 34 - Refresh rates recomendadas para diferentes tipos de poliamidas [122]

2.6. Vantagens e Desvantagens face à Manufatura Tradicional (MT)

Nos últimos 50 anos, o fabrico aditivo tem experienciado uma proliferação notável, integrando-se ao setor de manufatura em desenvolvimento como uma técnica de prototipagem rápida. Mais conhecida pelo termo popular "impressão 3D", esta tecnologia revolucionária permite a criação de formas complexas, construindo peças camada por camada. Esta abordagem contrasta com as técnicas de manufatura tradicional (subtrativa e formativa), onde o material é frequentemente removido ou moldado.

O FA é verdadeiramente inovador, abrindo novas oportunidades e possibilidades para empresas que procuram melhorar a eficiência na manufatura. Simplifica os métodos tradicionais e tem o potencial de se tornar prática padrão ou comum na indústria na próxima década, para além disso é uma ferramenta poderosa para reduzir a complexidade na cadeia de abastecimento. Existem cinco benefícios-chave que o FA tem em comparação com a MT:

- **Custo:** O FA pode ser mais rentável em certas aplicações, especialmente quando a personalização é uma prioridade
- **Velocidade:** A capacidade de produzir protótipos rapidamente é uma das principais vantagens da MA.
- **Qualidade:** O FA pode criar produtos que se adaptam perfeitamente às necessidades específicas de um indivíduo, como próteses e implantes personalizados.
- **Inovação/transformação:** O FA permite uma maior liberdade de design, abrindo portas para inovações que não seriam possíveis com métodos tradicionais.
- **Impacto:** O FA tem o potencial de revolucionar a forma como os produtos são fabricados e distribuídos, levando a uma produção mais localizada e sustentável.

O impacto económico de uma estratégia de manufatura pode determinar as áreas de sucesso ou avanço que as empresas devem seguir. O FA proporcionou a oportunidade de simplificação da cadeia de abastecimento e foi implementada com sucesso para produção de "unidade única e muito baixo volume" em vários setores. No entanto, o FA ainda é um investimento consideravelmente caro em comparação com as máquinas de manufatura tradicional.

A precisão na manufatura e a padronização de produtos dependem dos padrões e procedimentos de Garantia de Qualidade e Controlo de Qualidade. A vasta capacidade do FA resulta em requisitos e padrões de qualidade multifacetados. Por esta razão, a manufatura subtrativa continua a dominar o FA em termos de qualidade, precisão e fiabilidade. Os engenheiros estão interessados em usar uma abordagem computacional para o planeamento de construção de FA. Para produzir uma simulação representativa completa, os investigadores afirmam que mais de 130 variáveis precisam ser consideradas.

A liberdade de design oferecida pelo FA tem as suas vantagens e desvantagens. Existe um ceticismo em relação à falta de diretrizes de design fundamentais para a maioria das tecnologias de FA, e a capacidade de produzir geometrias complexas torna desnecessário para o FA seguir os princípios tradicionais de design para manufatura e montagem.

A produção de alto volume tem sido o foco principal das indústrias de manufatura tradicional, com países de baixos salários otimizando a sua capacidade de manufatura. No entanto, o FA oferece oportunidades para eliminar processos de forjamento e soldadura, imprimindo peças completas numa única impressão. A indústria médica, por exemplo, capitalizou nesta região de manufatura para implantes e próteses.

O fabrico aditivo e a manufatura tradicional têm os seus próprios pontos fortes e fracos. Enquanto o FA oferece flexibilidade e design complexo, a MT é dominante em termos de qualidade e fiabilidade. A escolha entre as duas técnicas dependerá das necessidades específicas da indústria e do produto em questão. Desta forma pode-se dizer que uma tecnologia não substitui a outra, pelo contrário, ambas podem coexistir e se complementar, cada uma oferecendo soluções únicas para diferentes desafios [123], [124]

2.7. Ensaios Mecânicos

Os materiais desempenham um papel fundamental em quase todos os aspetos da vida moderna, desde a construção de edifícios e infraestruturas até à produção de dispositivos tecnológicos e veículos. A sua resistência, durabilidade e comportamento sob diferentes condições são determinantes para garantir a segurança, eficiência e longevidade das aplicações em que são utilizados. Neste contexto, os ensaios mecânicos surgem como ferramentas essenciais, permitindo uma análise rigorosa do comportamento dos materiais sob diversos esforços. Especificamente, estes ensaios focam-se na relação entre as forças aplicadas e a deformação resultante, bem como nas tensões máximas que podem conduzir à falha do material [125].

Existem diversos métodos standardizados para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais. Nesta dissertação, será dada especial atenção aos Ensaios de Tração, conforme a norma ASTM D638, aos Ensaios de Flexão em 3 Pontos, de acordo com a norma ASTM D790 e aos Ensaios de Dureza, seguindo a norma ASTM 2240. Através da compreensão mais detalhada destes ensaios, é possível assegurar a seleção e aplicação adequada dos materiais em diversas indústrias, garantindo a sua qualidade e segurança.

2.7.1. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é o ensaio mecânico mais comum para obter as características mecânicas de materiais. Os ensaios de tração, juntamente com os ensaios de compressão e de flexão, fornecem informações fundamentais para caracterizar propriedades dos materiais. As propriedades dos testes de materiais ajudam a selecionar materiais para aplicações de engenharia e estão incluídas nas especificações dos materiais para garantir a qualidade. São utilizados para comparar diferentes e novos materiais ou processos [126].

Este ensaio consiste em fixar as extremidades opostas de uma amostra no quadro de carga de uma máquina de ensaios universal. Posteriormente, aplica-se uma força de tração, levando ao alongamento gradual da amostra até à sua eventual fratura. Durante este processo, monitoriza-se e regista-se a relação entre a força aplicada e a extensão da amostra, proporcionando uma medida quantitativa de como o material se deforma sob a força de tração aplicada.

A metodologia do ensaio de tração é influenciada por várias variáveis. A forma e dimensões da amostra devem estar em conformidade com normas específicas, como as normas ISO ou ASTM. A taxa de deformação, que se situa geralmente entre 10^{-4} – 10^{-1} s^{-1} , é um parâmetro essencial a ser controlado, assim como a velocidade de aplicação da força ou de alongamento e a temperatura de teste.

Os dados obtidos a partir deste ensaio podem ser representados sob a forma de um diagrama de carga-deslocamento, que é frequentemente convertido numa curva de tensão nominal-deformação. A partir desta curva, presente na Figura 35, é possível determinar várias propriedades mecânicas do material. Entre estas propriedades, destacam-se o Módulo de Elasticidade (E), Tensão de Rotura (R_m), Tensão Limite Elástico (R_e), Tensão Limite de Proporcionalidade (R_p) e a Extensão após Rotura (A). Estas propriedades são essenciais para controlo de qualidade na produção, classificação do desempenho de materiais estruturais, avaliação de ligas recém-desenvolvidas e para lidar com os requisitos de resistência estática do design.

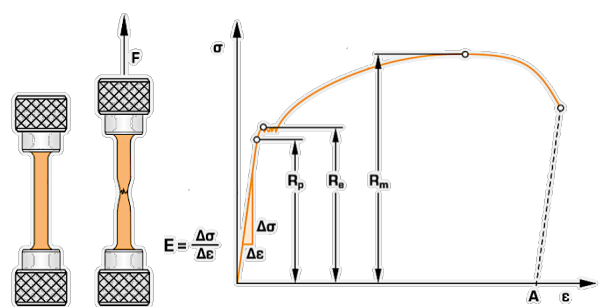


Figura 35 - Esquema exemplo da carga aplicada no corpo de carga, à esquerda, e do gráfico tensão-deformação resultante, à direita (Adaptado) [127].

O princípio básico do ensaio de tração, apesar de simples, pode ter os seus resultados afetados por diversas variáveis. Estas incluem a metodologia, fatores humanos, equipamento e condições ambientais. A determinação correta das propriedades de resistência, além da força máxima necessária para fraturar o provete de teste, e a velocidade de aplicação da força ou de alongamento são essenciais para garantir a precisão dos resultados [128], [129].

2.7.2. Ensaio de Flexão

Nos domínios da engenharia e da ciência dos materiais, os ensaios de flexão são fundamentais para determinar características mecânicas de diversos materiais. Estes ensaios são particularmente relevantes para materiais classificados como frágeis e materiais não convencionais, como os laminados compósitos, devido às dificuldades na caracterização destes durante os ensaios de tração, especialmente devido ao seu comportamento de rutura [130].

O ensaio de flexão, quando comparado ao ensaio de tração, destaca-se não apenas pela sua economicidade, mas também pela natureza distinta dos resultados obtidos. Ao realizar um ensaio de flexão em 3 pontos, representado esquematicamente na Figura 36, posiciona-se o provete horizontalmente sobre dois pontos de contacto a uma distância L . Posteriormente, uma força vertical é aplicada no ponto central da parte superior do provete até à falha deste. Uma observação crítica revela que as deflexões registadas durante este teste são aproximadamente 4 vezes superiores às deformações observadas num ensaio de tração [131].

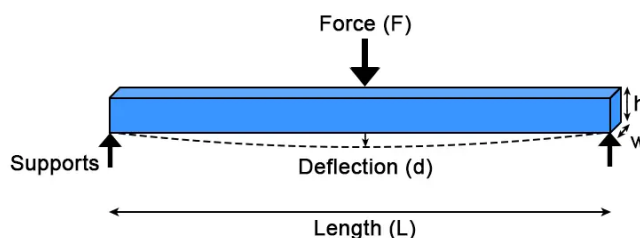


Figura 36 - Representação esquemática do posicionamento do provete e dos respetivos pontos de contacto [132].

Dentro do espectro dos ensaios de flexão, o ensaio em 3 pontos é o mais usual, apesar de o ensaio poder ser realizado em 2 pontos e 4 pontos também. A composição do dispositivo de carga para este ensaio específico inclui dois 2 pontos de contacto paralelamente posicionados e um ponto de contacto superior centralmente posicionado. Este contacto superior é responsável por aplicar a carga no provete [133].

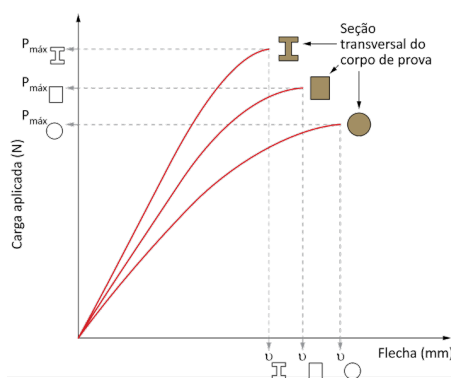


Figura 37 - Esquema representativo de uma curva típica Carga aplicada - Flecha de um ensaio de flexão [134].

Para garantir precisão e conformidade com as normas estabelecidas, os pontos de contacto podem possuir montagens fixas, rotativas ou basculantes. Esta flexibilidade na montagem é essencial, especialmente quando se trabalha com materiais tenazes e elásticos. A disposição e o design dos pontos de contacto podem variar dependendo do tipo de ensaio de flexão (2, 3 ou 4 pontos) e das

especificações ou normas a serem seguidas. A sua função é essencial para garantir que a carga seja aplicada corretamente e que os resultados do ensaio sejam precisos e reproduzíveis.

Os resultados destes ensaios são cruciais para a compreensão das propriedades dos materiais. Os dados mais significativos incluem o Módulo de Rotura à Flexão, Módulo de Elasticidade à Flexão, Módulo de Resiliência à Flexão e Módulo de Tenacidade à Flexão. Estes indicadores são vitais para avaliar a capacidade do material em resistir a forças de flexão e entender o seu comportamento sob diferentes condições de tensão [131].

2.7.3. Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza são técnicas essenciais na engenharia e na indústria, desempenhando um papel crucial na avaliação da resistência dos materiais à penetração ou deformação. Estes ensaios podem ser categorizados como destrutivos, onde o material é inutilizado, ou não destrutivos. O ensaio de dureza, em particular, destaca-se pela sua fácil execução e pelo baixo custo dos equipamentos, sendo amplamente utilizado para controlar a qualidade, verificar as condições de fabrico, os tratamentos térmicos e a uniformidade dos materiais [135].

Dentro dos ensaios de dureza, existem diferentes metodologias, como Brinell, Meyer, Vickers e Rockwell. Por exemplo, enquanto o ensaio Brinell utiliza uma esfera de aço que penetra no material sob uma força aplicada, o ensaio Vickers recorre a um penetrador de diamante em forma de pirâmide. O ensaio Rockwell, por sua vez, é reconhecido pela sua rapidez e precisão [135], [136].

Paralelamente, a dureza Shore, representada na figura x de forma esquemática, surge como uma técnica importante, especialmente na determinação da dureza de indentação de polímeros, elastómeros e borrachas. Esta técnica utiliza durómetros de dois tipos: tipo A, para materiais mais macios, e tipo D, para materiais mais duros. A dureza de indentação, medida através desta técnica, está inversamente relacionada com a penetração e é influenciada por diversos fatores, incluindo a forma do indentador, a força aplicada e a duração da sua aplicação [137], [138].

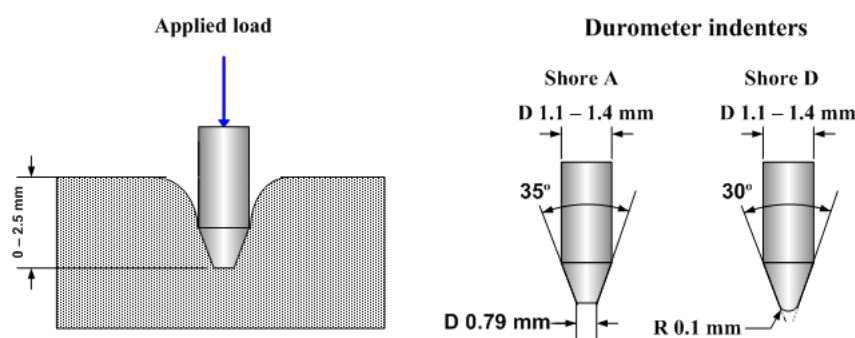


Figura 38 - Esquema de funcionamento do ensaio de dureza Shore A e D e as suas principais diferenças [139]

2.8. Injeção de Plásticos

A injeção de plásticos é um processo fundamental na produção em massa de peças a partir de termoplásticos. Esta técnica, que se baseia no aquecimento do material plástico até se transformar numa massa viscosa que é posteriormente introduzida num molde fechado, tem-se destacado pela sua eficácia económica e capacidade de produzir peças com geometria complexa. A simplicidade

do conceito, que envolve a fusão do plástico, o seu fluxo para o molde, o arrefecimento e a subsequente ejeção, contrasta com a complexidade inerente à prática deste método. Esta complexidade advém, em parte, do comportamento multifacetado das massas plásticas e da capacidade do processo de abranger produtos intrincados.

No sector automóvel, a injeção assume um papel preponderante, sendo responsável pela produção de uma vasta gama de componentes, desde painéis de carroçaria a componentes do motor. Materiais como HDPE, PP, PET, Nylon, PBT e PC são frequentemente escolhidos para este fim, dada a sua adaptabilidade ao processo. A automatização do método garante uma produção altamente repetível e precisa, permitindo a obtenção de peças finalizadas em tempos de ciclo reduzidos e com mínimas operações pós-injeção.

Contudo, é importante salientar que, apesar das inúmeras vantagens associadas à injeção, existem desafios associados, nomeadamente os custos elevados das máquinas e dos moldes, geralmente fabricados em aço P20. Ainda assim, a capacidade de integrar diferentes funções numa única peça e a possibilidade de produzir peças com tolerâncias apertadas numa única etapa solidificam a moldagem por injeção como um pilar na indústria de processamento de plásticos [140]–[142].

2.8.1. Ciclo de Injeção

O processo de injeção é uma técnica complexa e meticulosa que envolve várias etapas cruciais. Tudo começa com a etapa de *Clamping*, na qual as duas metades do molde são firmemente fixadas pela unidade de fixação. Assim que o molde está devidamente fechado, inicia-se a etapa de *Injection*. Nesta fase, o material plástico é introduzido no molde. Durante este processo, o polímero é submetido a variações significativas de temperatura e pressão. Inicialmente, é transportado e aquecido na unidade de injeção. Uma vez que o polímero está no estado fundido, ele é injetado na cavidade do molde a uma taxa volumétrica constante. Este processo engloba várias sub-etapas, como enchimento, compactação, retenção, arrefecimento e, por fim, ejeção [143], [144].

Após a injeção, o material entra na etapa de *Cooling*. Aqui, começa a arrefecer e a solidificar-se dentro do molde. Uma vez solidificado, a peça é ejetada na etapa de *Ejection* e, se necessário, segue-se para o processamento pós-produção [143], [144].

As máquinas de injeção desempenham um papel fundamental neste processo. Tomando como exemplo a máquina representada na Figura 39, pode-se observar que ela é composta por duas unidades principais: a *Plasticating/Injecting Unit* (PIU) e a *Clamping Unit* (CU). Enquanto a PIU prepara o material para a injeção, a CU assegura que o molde permaneça fechado durante todo o processo de injeção [145].

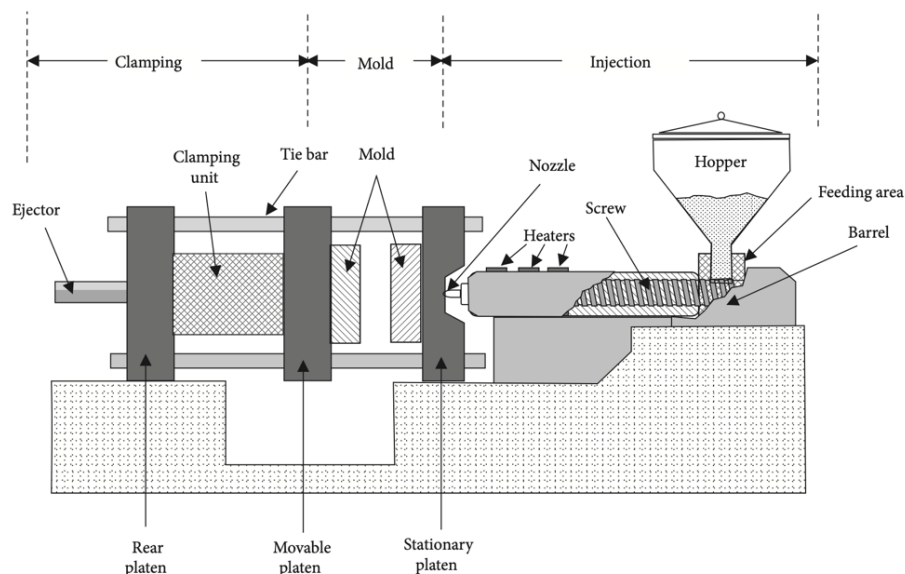


Figura 39 - Representação esquemática de uma máquina de injeção [146].

Um elemento-chave neste processo é o manuseamento adequado dos *pellets*⁶. Estes são inicialmente colocados num *hopper* e, posteriormente, transferidos para um *barrel* através de uma *throat*. No *barrel*, os *pellets* são compactados para formar uma massa sólida e, em seguida, derretidos pelo cisalhamento mecânico entre o *barrel* e um *screw*. Depois de plastificado, o material é pronto para ser injetado no molde, passando por etapas adicionais como a formação do *shot*⁷ à frente do *screw* [147].

Durante o processo de injeção, é de extrema importância existir um controlo das temperaturas. A área de plastificação deve ser mantida à temperatura de processamento ideal, enquanto o molde deve ser mantido a uma temperatura que garanta a formação e solidificação adequadas da peça [140]

2.8.2. Materiais Plásticos

A indústria automóvel, reconhecida como uma das maiores consumidoras de materiais de construção no mundo, está a atravessar uma transformação significativa. Em resposta às crescentes preocupações ambientais e económicas, a redução do peso dos veículos tornou-se uma prioridade. Estudos recentes sugerem que uma diminuição de 10% no peso de um veículo pode resultar numa redução do consumo de combustível entre 5% a 8%. Esta redução de peso não só melhora a eficiência energética, mas também potencia a segurança, conforto e design dos veículos.

Os plásticos avançados surgem como uma solução promissora para atingir estes objetivos. Estes materiais, mais leves do que os tradicionais, oferecem uma série de vantagens, desde resistência à corrosão até flexibilidade na integração de componentes [148], [149].

Segue-se a Tabela 22, resumo dos principais plásticos avançados utilizados na indústria automóvel:

⁶ Pellets são pequenos grânulos ou partículas de material, normalmente de plástico, que servem como matéria-prima na injeção. Os pellets tornam o manuseamento, transporte e medição do plástico mais eficaz e preciso.

⁷ Shot é a dose de plástico que será utilizada para formar uma peça específica durante um ciclo de injeção.

Tabela 22 - Tabela resumo dos principais materiais utilizados na indústria automóvel, suas características e aplicações [148], [149].

Material	Caraterísticas Principais	Aplicações no setor automóvel
Policloreto de vinilo (PVC)	Flexibilidade, estabilidade térmica, retardador de chama	Painéis de instrumentos, revestimentos de cabos elétricos, portas
Polipropileno (PP)	Boa resistência química	Pára-choques, isolamento de cabos e tanques químicos
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Baixo custo de produção, excelente isolamento	Painéis de instrumentos, coberturas de rodas, partes do corpo automóvel
Poliamida (PA)	Alta absorção de água, propriedades mecânicas elevadas	Engrenagens, cames, rolamentos, revestimentos impermeáveis
Poliestireno (PS)	Excelente resistência química e elétrica	Alojamentos de equipamentos, botões, bases de exibição
Polióxido de metileno (POM)	Estabilidade dimensional, resistência ao calor	Componentes de alto desempenho, sistemas de combustível
Polietileno (PE)	Alta resistência ao impacto, baixa densidade	Carroçarias, isolamento elétrico
Poliuretano (PUR)	Ampla gama de propriedades e usos	Assentos flexíveis em espuma, painéis de isolamento em espuma
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Transparente, boa resistência aos raios UV	Janelas, ecrãs
Polibutileno tereftalato (PBT)	Boa resistência química e propriedades elétricas	Alojamentos de faróis, partes frontais de teto solar
Polibutileno tereftalato (PET)	Boa estabilidade térmica e propriedades elétricas	Partes sob o capô do motor, principalmente reforçadas com fibra de vidro
Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA)	Elevada rigidez e resistência térmica	Alojamentos, perfis, partes internas

A evolução da indústria automóvel e as crescentes exigências de qualidade e segurança têm impulsionado a criação e aplicação de novos materiais. A tendência é clara: à medida que a ciência e a tecnologia avançam, a indústria automóvel adapta-se, incorporando inovações que não só melhoram o desempenho dos veículos, mas também contribuem para um futuro mais sustentável.

A incorporação de materiais leves e avançados nos automóveis é uma resposta direta aos desafios ambientais e económicos do século XXI. Através da contínua investigação e desenvolvimento, a indústria automóvel está a criar veículos mais eficientes, seguros e sustentáveis, preparando-se para um futuro mais verde e conectado [149], [150].

2.8.3. Projeto de Molde

A injeção é um dos processos de fabrico mais versáteis e amplamente utilizados na indústria de plásticos. Através deste método, é possível produzir peças plásticas com geometrias complexas, garantindo precisão e repetibilidade. A projeção do molde, ou *design* do molde, é uma etapa fundamental que influencia diretamente a qualidade e eficiência do processo e assenta nos seguintes pontos[151]–[153]:

1) Componentes do Molde e respetivas Funções:

- Placa de Fixação (*Clamp Plate*): Esta é a base que mantém o molde no lugar durante o processo de injeção. As metades do molde são fixadas às placas de molde⁸ por grandes parafusos ou, em algumas máquinas, ímanes.
- Placa de Suporte (*Support Plate*): Funciona como uma estrutura de apoio, garantindo que o molde mantém a sua forma e integridade sob as intensas pressões do processo de injeção.
- Cavidade e Macho (*Cavity* e *Core*): Estes são os componentes principais do molde que determinam a forma da peça. A cavidade molda as características externas, enquanto o macho é responsável pelo formato das características internas.
- Sistema de Alimentação: É o trajeto pelo qual o material no estado líquido é introduzido no molde. Inclui o *main runner* ou *sprue*, *secondary runners* e o *gate*, que é o ponto exato onde o plástico entra na cavidade.
- Sistema de Ejeção: Uma vez que a peça tenha arrefecido e solidificado, é necessário removê-la do molde. O sistema de ejeção, que inclui pinos de ejeção e uma placa de ejeção, empurra a peça para fora do molde.
- Sistema de Refrigeração: Durante o processo, é crucial controlar a temperatura do molde para garantir que o plástico solidifique corretamente. Canais de refrigeração são incorporados no molde para permitir a circulação de água ou outro fluido de refrigeração [151], [154]–[156].

2) Considerações de *Design* da Peça:

- Espessura da Parede: Uma espessura de parede uniforme garante um arrefecimento consistente, reduzindo o risco de defeitos como deformações. A espessura também pode influenciar o tempo de ciclo, a resistência da peça e a quantidade de material utilizado.
- Linha de Partição: Determinar a localização da linha de partição é crucial, pois influencia a estética da peça, a facilidade de ejeção e a complexidade do molde.
- Ângulo de Saída: Para garantir que a peça possa ser ejetada facilmente, as paredes internas e externas do molde devem ter um ligeiro ângulo. Isso é conhecido como ângulo de saída.
- *Ribs* e *Bosses*: Estas características são adicionadas para melhorar a rigidez e a resistência da peça sem aumentar a espessura da parede. No entanto, devem ser projetadas com cuidado para evitar defeitos.
- Localização e Tipo de *Gate*: A localização do *gate* influencia o fluxo do plástico, enquanto o tipo de *gate* (por exemplo, *edge gate*, *tab gate*) pode afetar a aparência e a qualidade da peça.
- Pinos de Ejeção: A localização e o tamanho dos pinos de ejeção devem ser considerados para garantir uma ejeção suave e evitar marcas visíveis na peça final.
- Contrasaídas (*Undercuts*) e Roscas (*Threads*): Estas são características que podem complicar a ejeção da peça. Em alguns casos, podem ser necessários mecanismos de ação lateral (*sliders*) ou moldes rotativos para acomodar undercuts.
- Cantos Arredondados: Cantos vivos podem criar pontos de tensão na peça. Arredondar os cantos pode ajudar a distribuir as tensões e melhorar a resistência da peça.
- Acabamento da Superfície: O acabamento da superfície, seja texturizado, polido ou mate, não só afeta a estética da peça, mas também pode influenciar a ejeção e o fluxo do plástico durante o processo de injeção.

⁸ Placas de molde é um termo genérico que se refere a todas as placas que compõem a estrutura de um molde de injeção.

- Seleção de Material: A escolha do material plástico adequado é fundamental. Cada material tem propriedades específicas, como ponto de fusão, resistência, flexibilidade e comportamento ao arrefecimento. A seleção adequada do material garante que a peça atenda às especificações desejadas e funcione conforme o esperado [151], [152], [157].

3) Guia de Design do Molde de Injeção:

- Disposição da Base e Cavidade: A disposição da base e da cavidade do molde deve ser otimizada para garantir um fluxo uniforme do plástico, minimizando o risco de defeitos como linhas de solda ou marcas de fluxo.
- Design do Sistema de Refrigeração: Uma distribuição uniforme dos canais de refrigeração é crucial para garantir um arrefecimento consistente em toda a peça, reduzindo o risco de deformações ou tensões residuais.
- Design do Corredor (*runner*) e Portão (*gate*): O design do corredor e do portão deve ser otimizado para garantir um fluxo laminar do plástico, minimizando turbulências que podem levar à incorporação de bolhas de ar ou à degradação do material.
- Design do Sistema de Ejeção: A localização e o tamanho dos pinos de ejeção, bem como a sequência de ejeção, devem ser cuidadosamente considerados para garantir uma ejeção suave e eficiente.
- Materiais e Acabamento do Molde: A escolha do material do molde (normalmente aço ou alumínio) e o acabamento da superfície (polido, texturizado) podem influenciar a vida útil do molde, o tempo de ciclo e a qualidade da peça final [155]–[157].

4) Controle do Processo:

- Seleção e Configuração da Máquina: A máquina de injeção deve ser adequada ao tamanho e complexidade da peça, bem como ao material selecionado.
- Otimização dos Parâmetros do Processo: Fatores como pressão de injeção, tempo de retenção, temperatura do molde e velocidade de injeção devem ser ajustados para otimizar a qualidade da peça.
- Controle de Qualidade e Inspeção: A inspeção regular das peças produzidas e a calibração da máquina são essenciais para garantir a consistência e qualidade ao longo do tempo [152], [157].

5) Problemas Comuns e Soluções:

- Marcas de Retração: São depressões que ocorrem quando áreas espessas da peça arrefecem e contraem. A solução é otimizar a espessura da parede e ajustar os parâmetros de injeção.
- Deformação: Ocorre quando diferentes partes da peça arrefecem a velocidades diferentes. A solução passa por otimizar o design do molde e o sistema de refrigeração.
- *Flash*: É o excesso de material que escapa da cavidade do molde. Pode ser resolvido garantindo que o molde esteja bem fechado e ajustando a pressão de injeção.
- Aderência da Peça: Quando a peça não é ejetada corretamente e adere ao molde, a solução passa por otimizar o sistema de ejeção e ajustar o ângulo de saída [152], [157].

Na Figura 40 pode-se observar uma representação esquemática de um molde e todos os seus componentes.

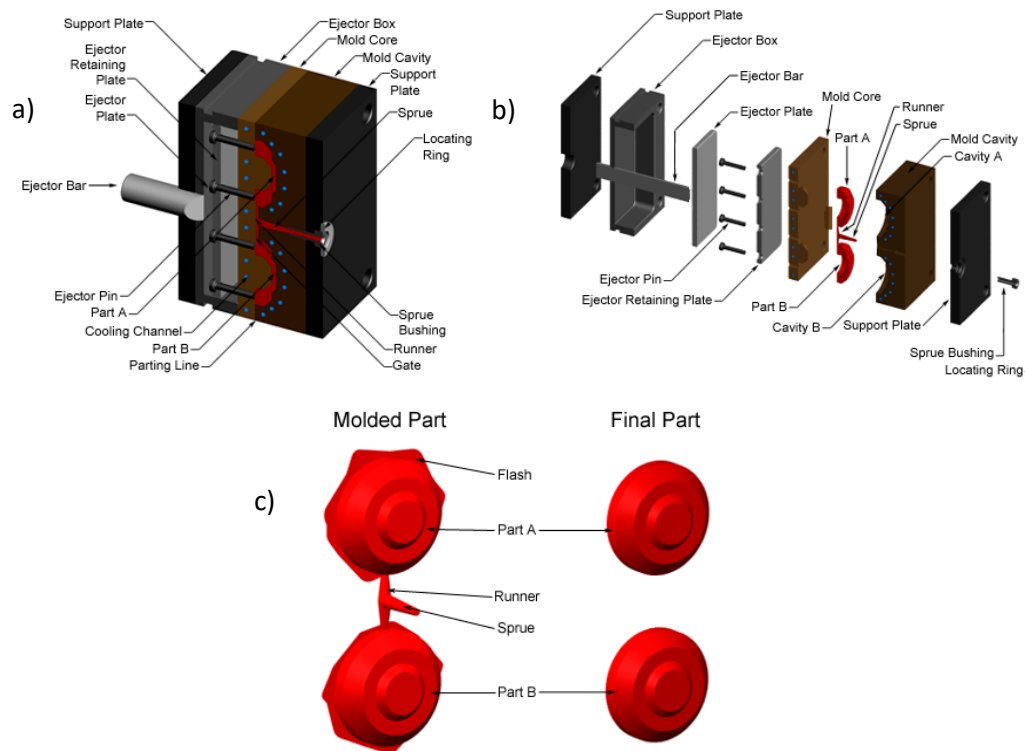


Figura 40 - Representação esquemática de um molde e peça final. (a) Molde fechado. (b) Molde em vista explodida. (c) Peça final antes e após pós-processamento [158].

2.8.4. Aplicações e Tendências

A injeção tem-se afirmado como um pilar fundamental no mundo do fabrico ao longo das décadas. Esta técnica, que teve origem como um método simples para produzir peças plásticas, evoluiu para um processo complexo e indispensável em diversas indústrias, desde a indústria automóvel à indústria médica. A sua capacidade para produzir peças com precisão, eficiência e em grande escala tornou-a incontornável no panorama industrial moderno. Desta forma, os principais setores industriais que beneficiam da injeção são:

- **Automóvel:** A injeção assume um papel preponderante na indústria automóvel, possibilitando a criação de componentes com precisão e duradouros. Adicionalmente, tem-se observado uma crescente preocupação com a sustentabilidade, com um foco principal na utilização de materiais reciclados e soluções mais amigas do ambiente [159], [160].
- **Bens de Consumo e Eletrodomésticos:** Esta técnica revela-se fundamental na produção de uma vasta gama de produtos, desde dispositivos eletrónicos a utensílios de cozinha, garantindo produção em larga escala e com elevada precisão [161].
- **Dispositivos Médicos:** A injeção é crucial na produção de dispositivos médicos, assegurando precisão, higiene e segurança em cada peça produzida [162].
- **Embalagem:** A indústria de embalagens beneficia amplamente da injeção, produzindo soluções de embalagens leves, duradouras e frequentemente recicláveis [163].

À medida que o mundo industrial avança, a injeção não fica para trás. A constante evolução tecnológica e as crescentes preocupações ambientais têm impulsionado a inovação neste campo.

Assim, é imperativo analisar as tendências emergentes que prometem moldar o futuro desta técnica:

- **Materiais Avançados:** Observa-se uma inovação contínua em materiais, desde bioplásticos a compósitos avançados [164], [165].
- **Indústria 4.0:** A integração de tecnologias digitais está a revolucionar a moldagem por injeção, permitindo uma produção mais eficaz e precisa [166].
- **Sustentabilidade:** Regista-se uma tendência para práticas mais sustentáveis, refletindo uma crescente consciência ambiental [160], [167].
- **Tecnologias Emergentes:** A impressão 3D está a ser integrada na injeção, possibilitando uma maior complexidade e flexibilidade na produção de peças [168].

A injeção, com a sua adaptabilidade e contínua inovação, promete definir o futuro do fabrico. À medida que a tecnologia avança e as exigências do mercado se alteram, antecipa-se que a injeção continue a desempenhar um papel central em diversas indústrias, moldando o mundo industrial à nossa volta.

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

Neste capítulo, explora-se o processo experimental que fundamenta esta dissertação, oferecendo um olhar detalhado sobre as metodologias e aplicações práticas em estudo. Começa-se pela Seleção de Materiais, justificando as escolhas feitas para a impressão. A seguir, abordam-se as Especificações das impressoras e os Parâmetros de impressão, esclarecendo quais as ferramentas e definições adotadas. No subcapítulo relativo à Preparação dos provetes, delinea-se o design e os métodos de preparação das amostras. Em Ensaios Realizados, desvendam-se os métodos de teste utilizados e os resultados que se esperam obter no capítulo 4. Finaliza-se com a Impressão do Postiço para o Molde e a Injeção sobre o Postiço Impresso, realçando a sinergia entre a impressão 3D e as técnicas convencionais de manufatura.

3.1. Seleção de materiais

No contexto da investigação realizada, identificou-se uma variedade de materiais em stock na empresa, com alguns claramente mais predominantes em utilização. Através desta observação inicial, surgiu a necessidade de compreender não só a natureza destes materiais, mas também as propriedades que os caracterizam conforme os seus fabricantes. Esta busca permitiu a criação de uma tabela resumo que categoriza cada material de acordo com o seu fabricante e suas propriedades essenciais. Ainda que a empresa, situada no setor automóvel, esteja a iniciar sua jornada na integração da impressão 3D, o interesse deste estudo não se limita apenas aos materiais já conhecidos. Há um foco claro em expandir horizontes e avaliar materiais que até então não foram explorados pela empresa. De seguida, a Tabela 23 e a Tabela 24 serão apresentadas as propriedades de impressão e mecânicas fornecidas pelos fabricantes de cada material.

Tabela 23 - Tabela resumo dos materiais estudados e das propriedades de impressão fornecidas pelos fabricantes.⁹

Material	Fabricante	Propriedades de Impressão				
		Temperatura de impressão (°C)	Temperatura da plataforma (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)	Espessura de camada (mm)	Diâmetro do nozzle (mm)
PLA	Filament PM	200 - 220	20 - 60	-	-	-
ABS	Filament PM	220 - 250	100	-	-	-
PC/ABS	Filament PM	240 - 260	110	-	-	-
PETG	Filament PM	230 - 250	60 - 80	-	-	-
PPJet	Filament PM	210 - 230	80 - 100	-	-	-
Filaflex 60A	RECREUS	215 - 235	21	20 - 30	0,2	> 0,4
Filaflex 95A	RECREUS	215 - 250	0 - 40	20 - 70	0,2	> 0,4
n-ASA	FILOALFA	230 - 250	70 - 110	40 - 120	-	-
ALFAOHM	FILOALFA	190 - 210	0 - 50	10 - 50	-	-
Poliamida	Filkemp	225 - 235	0	-	-	-
PAHT CF15	BASF	260 - 280	100 - 120	30 - 80	-	> 0,6

⁹ Informações relativas às propriedades de impressão de cada material retiradas das fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes. Documentos presentes no Anexo A.

Tabela 23 - Tabela resumo dos materiais estudados e das propriedades de impressão fornecidas pelos fabricantes.

Material	Fabricante	Propriedades de Impressão				
		Temperatura de impressão (°C)	Temperatura da plataforma (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)	Espessura de camada (mm)	Diâmetro do <i>nozzle</i> (mm)
PC CF	Prusa	285	110	< 200	-	-
ULTEM AM9085F	sabic	-	-	-	-	-
Poliamida 12	Formlabs	-	-	-	-	-
Tough 1500	Formlabs	-	-	-	-	-

Tabela 24 - Tabela resumo dos materiais estudados e das propriedades mecânicas fornecidas pelos fabricantes¹⁰.

Material	Propriedades Mecânicas						
	Tração				Flexão		
	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Alongamento à rotura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação (-)	Módulo de elasticidade (MPa)
PLA	-	-	-	-	-	-	3500
ABS	-	-	-	-	-	-	1800
PC/ABS	-	-	-	-	-	-	2650
PETG	-	-	-	-	-	-	1880
PPJet	-	8	-	-	-	-	-
Filaflex 60A	-	26	950	-	-	-	-
Filaflex 95A	-	55	500	-	-	-	-
n-ASA	-	47	25	2	-	-	-
ALFAOHM	-	25	12	1550	-	-	-
Poliamida	36,5	7,7	83	1410	48	-	775
PAHT CF15	-	103,2	1,8	8386	160,7	2,4	8258
PC CF	55	-	-	2300	85	-	3000
ULTEM AM9085F	-	62	5,1	2176	-	-	2126
Poliamida 12	-	50	11	1850	66	-	1600
Tough 1500	-	33	51	1500	39	-	1400

Na indústria e no âmbito da investigação, a seleção adequada de materiais para aplicações específicas reveste-se de uma importância fulcral, podendo ditar o sucesso ou não de um

¹⁰ Informações relativas às propriedades mecânicas de cada material retiradas das fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes. Documentos presentes no Anexo A.

determinado projeto ou produto. Contudo, depara-se frequentemente com uma notória lacuna informativa: nem sempre os fabricantes disponibilizam um leque completo de propriedades mecânicas e características dos materiais que colocam no mercado. Esta ausência de informação pode ser justificada por múltiplas razões, desde a complexidade e o custo associados aos ensaios necessários para determinar determinadas propriedades, até a estratégias de mercado.

Face a esta realidade, torna-se imperativo que se esteja ciente desta potencial limitação. Sem um entendimento das propriedades dos materiais, não é possível assegurar que estes desempenhem eficientemente o seu papel, sobretudo quando sujeitos a tensões e esforços específicos nas aplicações para as quais são destinados.

Assim, sempre que se detete que a informação disponibilizada pelo fabricante é insuficiente ou ambígua, recomenda-se a realização ou solicitação de ensaios complementares que permitam confirmar as propriedades dos materiais em análise. Embora esta medida possa implicar encargos adicionais a curto prazo, deve ser encarada como um investimento crucial na durabilidade, segurança e eficácia do produto ou sistema onde o material será incorporado.

3.2. Especificações das impressoras utilizadas

No decorrer da dissertação, verificou-se que os materiais possuíam distintas especificações e exigências de impressão. Assim, foi fundamental escolher cuidadosamente as impressoras a utilizar mais adequadas para cada material. Na Tabela 25, detalham-se as impressoras utilizadas, as suas tecnologias, e os materiais específicos impressos em cada uma delas.

Tabela 25 - Especificações técnicas das impressoras 3D selecionadas.

Impressora	Tecnologia de impressão	Materiais impressos	Volume de impressão (mm)	Resolução e precisão (mm)
Prusa MK3S+	FDM	PETG, Filaflex 60A, Filaflex 95A, ALFAOHM, PLA, PAHT CF15, PPJet	250 x 210 x 210	0,05
DeltaWASP 4070 Industrial X	FDM	ABS, n-ASA, PC/ABS	Ø 400 x 700	0,1
miniFactory Ultra	FDM	Poliamida, ULTEM AM9085F, PC CF	330 x 180 x 180	0,025
Formlabs Form 2	SLA	Tough 1500	145 x 145 x 175	0,025
Formlabs Fuse 1	SLS	Poliamida 12	165 x 165 x 320	0,11

A escolha da impressora 3D adequada foi crucial para garantir a qualidade e precisão desejadas, especialmente quando se trabalha com diferentes materiais. Cada impressora utilizada, a seguir apresentada, tem suas próprias características que a tornam mais adequada para certos materiais e aplicações:

1) Prusa MK3S+ (FDM)

- Superfície de Impressão Removível: A Prusa MK3S+ é equipada com chapas de aço de mola, que não só são fáceis de manter, como também simplificam a remoção dos objectos após a impressão. Estas chapas estão disponíveis em três acabamentos: liso, texturizado e acetinado, adequando-se a uma vasta gama de materiais.
- Compatibilidade com Múltiplos Materiais: A capacidade da MK3S+ pode ser expandida com a adição do Multi-Material Upgrade 3, permitindo a impressão com até cinco filamentos em simultâneo.
- *Software* PrusaSlicer: A Prusa desenvolveu o seu próprio software de *slicing*, denominado PrusaSlicer, que já inclui perfis pré-definidos para todos os modelos de impressoras 3D da marca e uma ampla variedade de filamentos.
- Diversidade de Materiais Compatíveis: A MK3S+ é compatível com uma vasta gama de materiais, desde o PLA e materiais flexíveis, até ao PETG, ASA, Policarbonato e Polipropileno.
- *Hardware* e *Firmware* de Código Aberto: A Prusa investe no desenvolvimento de firmware para todas as suas impressoras 3D, assegurando-se de que cada nova versão é rigorosamente testada antes do seu lançamento. Este compromisso garante que os equipamentos estão sempre actualizados com as mais recentes funcionalidades [169].

Na Figura 41 apresenta-se um dos exemplares da máquina Prusa MK3S+ que a empresa possui.

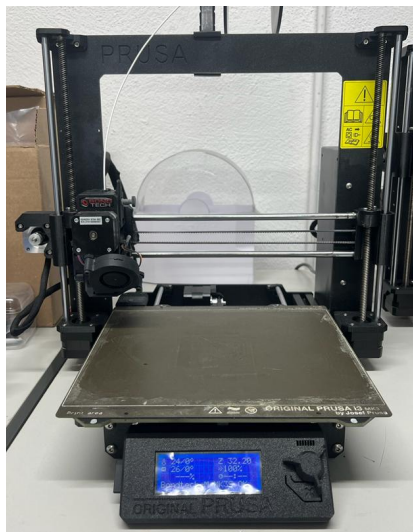


Figura 41 - Impressora Prusa MK3S+ utilizada na empresa.

2) DeltaWASP 4070 Industrial X (FDM)

- Ambiente Controlado: A capacidade de imprimir em ambientes de temperatura controlados é crucial para materiais sensíveis às variações térmicas.
- Design Vertical: A estrutura delta permite movimentos rápidos e precisos, otimizando o tempo de impressão.
- Materiais Suportados: A impressora suporta uma vasta gama de filamentos, incluindo ASA, ABS, PS, PETG, TPU, TPE, Polipropileno, Policarbonato, PC/ABS, PPS, PMMA, PVA, PA, PA CF e PLA.

- *Bowden*¹¹ Suspensão: Este recurso reduz a inércia nas bandas de borracha penduradas, melhorando a velocidade e a qualidade da impressão.
- Sistema *Free Zeta*: Permite iniciar a impressão a partir de uma altura específica no modelo a ser impresso. Isso é particularmente útil para impressões que requerem múltiplos materiais e/ou cores [170].

Na Figura 42 apresenta-se a impressora DeltaWASP 4070 Industrial X, caracterizada por ser uma impressora tipo Delta, e o seu sistema *Bowden* suspensão.

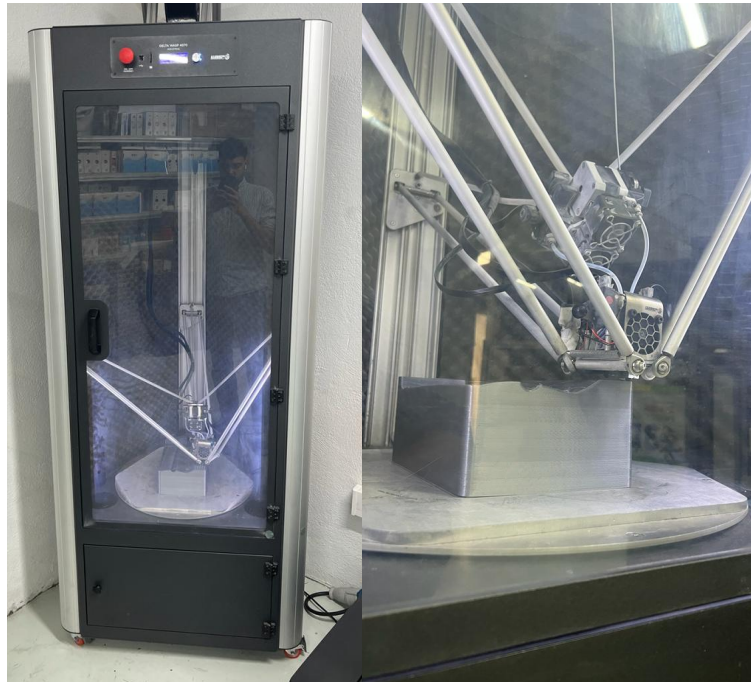


Figura 42 - À esquerda a impressora DeltaWASP 4070 Industrial X e à direita o *Bowden* suspensão evidenciado.

3) miniFactory Ultra (FDM)

- Especialização em Engenharia Avançada: A miniFactory Ultra foi desenvolvida especificamente para uma ampla gama de plásticos, desde polímeros de engenharia até polímeros de alto desempenho e compósitos.
- Câmara de Aquecimento Avançada: A câmara de aquecimento pode atingir temperaturas de até 250°C, o que é essencial para garantir a integridade dos materiais de engenharia durante a impressão. A temperatura ideal da câmara de impressão é a temperatura de transição vítrea do polímero utilizado.
- Ambiente Controlado e Monitorado: A capacidade de controlar o ambiente de impressão é crucial para garantir a qualidade das peças. A miniFactory Ultra vem equipada com um sistema de monitoramento de processo que permite a garantia de qualidade da impressão 3D durante todo o processo de impressão. Além disso, a câmara de filamento aquecida da miniFactory Ultra garante condições ótimas para os seus materiais, podendo armazenar filamentos a temperaturas de até 120°C e monitorizar o nível de humidade, garantindo sempre as melhores condições para impressão.

¹¹ O sistema Bowden é um tipo de configuração de extrusão em impressoras 3D em que o motor do extrusor está localizado longe do nozzle.

- Extrusão de Alta Temperatura: A miniFactory Ultra possui uma temperatura de extrusor que pode chegar a 470°C, permitindo a impressão de uma ampla variedade de materiais de engenharia avançada [171].

Na Figura 43 pode-se observar a impressora miniFactory Ultra, mais propriamente o compartimento da câmara de impressão e o da câmara de filamento aquecida.

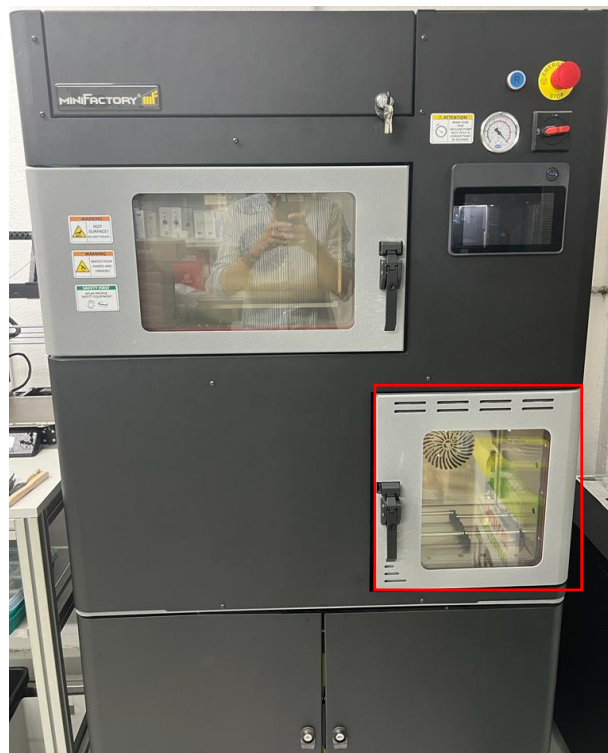


Figura 43 - Impressora miniFactory Ultra com a câmara de filamento aquecida em destaque a cor vermelha.

4) Formlabs Form 2 (SLA)

- Detalhes Finos: A tecnologia SLA da Form 2 permite impressões com detalhes incrivelmente finos e superfícies suaves.
- Pós-processamento Necessário: Após a impressão em SLA com a Form 2, as peças requerem várias etapas de pós-processamento. Inicialmente, as peças são lavadas em solvente (geralmente isopropanol) para remover a resina não curada. Após a lavagem, as peças são curadas sob luz UV para otimizar as suas propriedades mecânicas e garantir a completa polimerização da resina. Em seguida, os suportes usados durante a impressão precisam ser cuidadosamente removidos manualmente.
- Resinas Avançadas: A Formlabs tem ampliado continuamente a sua biblioteca de resinas avançadas. Estas resinas são versáteis e atendem a uma ampla gama de aplicações, desde prototipagem detalhada, passando por soluções odontológicas até joalheria e saúde, as resinas são formuladas para proporcionar peças de alta qualidade e com excelentes acabamentos superficiais. Seja para detalhes finos, prototipagem funcional ou aplicações específicas, as resinas garantem resultados precisos e confiáveis.
- Sistema Integrado de Resina: Este sistema facilita a gestão de materiais e permite uma operação limpa. A troca entre materiais é feita em segundos, substituindo o cartucho. A impressora reconhece automaticamente o tipo de resina e configura as definições apropriadas [172].

Na Figura 44, pode-se observar a impressora Form 2, de tecnologia SLA, que não fazia parte do objetivo principal da dissertação, no entanto a pedido da empresa foram também estudadas as propriedades do material Tough 1500 impresso através de SLA.



Figura 44 - Impressora Form 2 pertencente à empresa.

5) Formlabs Fuse 1 (SLS)

- Sinterização a Laser: A Fuse 1, apresentada na Figura 45, é especializada na sinterização a laser de materiais em pó, como a Poliamida 12.
- Pós-processamento: A sinterização a laser de materiais em pó na Fuse 1 cria peças que estão incrustadas em pó não sinterizado após a impressão. A primeira etapa do pós-processamento envolve a remoção cuidadosa desta peça do volume de pó e a escovação ou sopro do excesso de pó, de seguida as peças podem ainda ter resíduos de pó não sinterizado aderidos à sua superfície. A passagem das mesmas num jato de areia ajuda a remover eficazmente estes resíduos, garantindo que a peça esteja limpa e livre de pó. Dependendo da aplicação, pode ser necessário um tratamento térmico adicional para melhorar as propriedades mecânicas da peça. Além disso, as peças impressas em SLS podem ser submetidas a processos adicionais, como coloração, selagem ou revestimento, para melhorar a estética ou funcionalidade [173].



Figura 45 - Impressora Fuse 1 e duas câmaras de impressão.

3.3. Softwares de slicing

A escolha do *software* de *slicing* é crucial para obter os melhores resultados de impressão 3D. Cada *software* tem as suas características e vantagens, e a escolha do *software* certo pode fazer uma grande diferença na qualidade, velocidade e eficiência da impressão. Além disso, com a crescente popularidade da impressão 3D, a exigência por *softwares* de *slicing* de alta qualidade está a aumentar, tornando-se assim um tópico de grande relevância para a indústria.

1) PrusaSlicer (para a impressora Prusa MK3S+)

O PrusaSlicer, apresentado na Figura 46, é um *software open-source*, frequentemente atualizado e desenvolvido pela Prusa Research. Baseado no Slic3r, este *software* gratuito tem beneficiado da forte comunidade e da equipa de desenvolvedores, que continuamente adicionam novas funcionalidades. Algumas das suas características notáveis incluem:

- Interface Clara e Simples: A interface do utilizador foi reestruturada para expor todas as funcionalidades avançadas, mantendo-se clara e simples.
- Suportes Personalizados: Permite inserir suportes personalizados diretamente no modelo.
- Perfis de Material Ajustados: A equipa da Prusa Research trabalha constantemente em presets para mais de 250 filamentos e resinas presentes no mercado.
- Importação de Arquivos STEP: Permite a importação direta de arquivos STEP, evitando a necessidade de converter modelos CAD em STL.
- Compatibilidade: Além dos perfis para impressoras Prusa, o software inclui perfis para muitas outras impressoras graças à contribuição da comunidade.

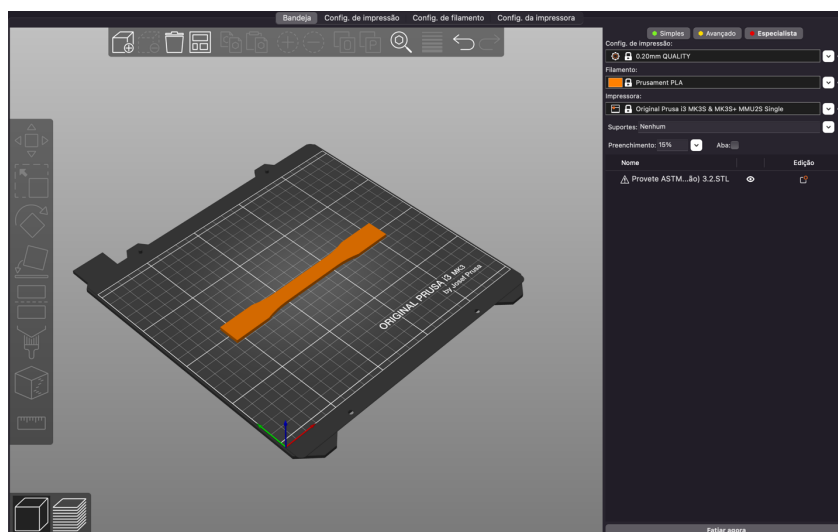


Figura 46 - Interface do *software* PrusaSlicer.

O *software* de *slicing* anteriormente descrito foi utilizado no fabrico dos materiais: PETG, Filaflex 60A, Filaflex 95A, ALFAOHM, PLA, PAHT CF15 e PPJet.

2) Simplify3D (para as impressoras DeltaWASP 4070 Industrial X e miniFactory Ultra)

O Simplify3D, presente na Figura 47, é um *software* de *slicing* de impressão 3D pago que oferece inovação em cada etapa do processo. É compatível com centenas de marcas de impressoras 3D e é conhecido pela sua confiabilidade e eficiência. Algumas das suas características incluem:

- Configuração Rápida: Algoritmos automáticos do Simplify3D configuram o layout, orientação e suportes da impressão.
- Controlos Manuais Avançados: Para utilizadores experientes, oferece a possibilidade de ajustar manualmente vários parâmetros.
- Camada Adaptativa: Permite seleccionar a altura da camada para cada parte do objeto separadamente.

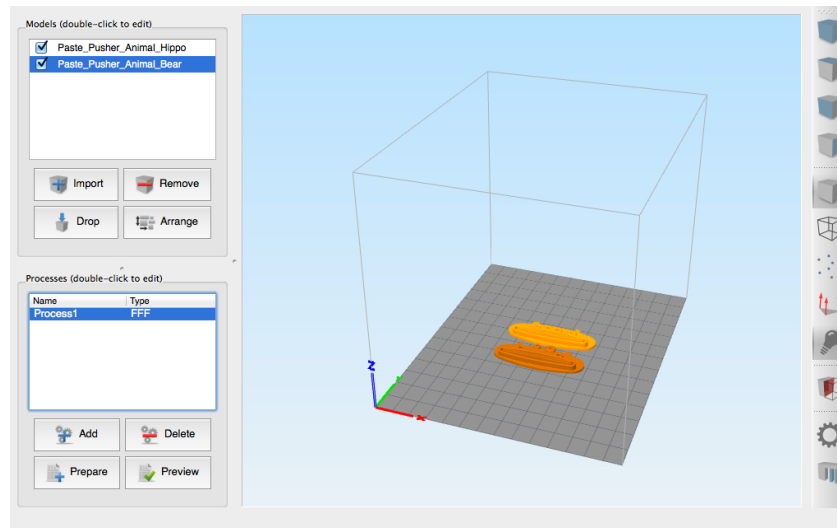


Figura 47 - Interface do *software* Simplify3D.

O *software* de *slicing* anteriormente descrito foi utilizado no fabrico dos materiais: ABS, n-ASA, PC/ABS, Poliamida, ULTEM AM9085F e PC CF.

3) PreForm (para as impressoras Form 2 e Fuse 1)

O PreForm, desenvolvido pela Formlabs, é projetado para otimizar o processo de impressão 3D. Este *software* é gratuito para utilizadores das impressoras Formlabs. Algumas das suas características notáveis são:

- Preparação Rápida: O PreForm utiliza algoritmos automáticos para configurar o *layout*, orientação e suportes da impressão.
- Controlos Manuais Avançados: Para utilizadores que desejam um controlo mais detalhado, o PreForm não oferece uma variedade de parâmetros ajustáveis, uma vez que os parâmetros de impressão já estão atribuídos para cada material.
- Espessura de Camada Adaptativa: Esta funcionalidade permite variar a espessura da camada durante a impressão.

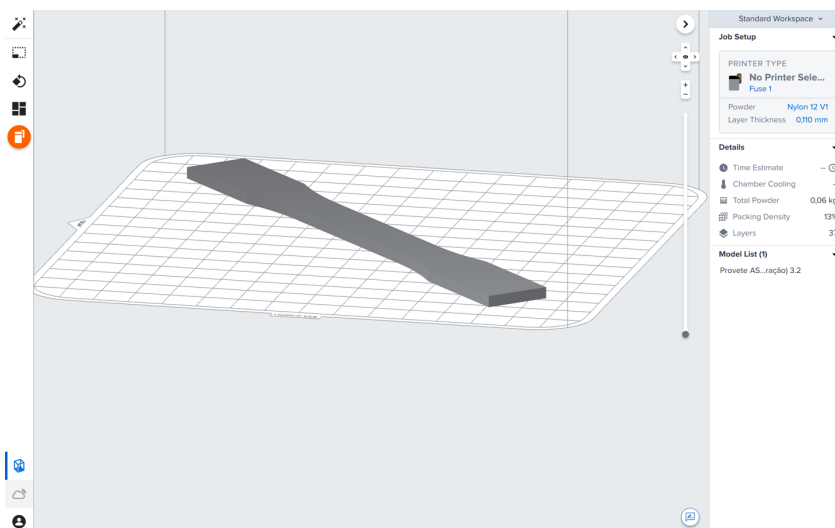


Figura 48 - Interface do *software* Preform no caso da impressora Fuse 1.

O *software* de *slicing* anteriormente descrito foi utilizado no fabrico dos materiais: Tough 1500 e Poliamida 12.

3.4. Parâmetros de impressão

No âmbito do desenvolvimento das tecnologias de impressão 3D, nomeadamente SLS e FDM, e tendo em vista a utilização de diversos materiais de engenharia, torna-se imperativo compreender os parâmetros de impressão adotados pela empresa acolhedora. Observou-se que, historicamente, a empresa tem-se pautado pela utilização de parâmetros predefinidos, quer pelo fabricante do material, quer pelo *software* de *slicing*. Estes parâmetros incluem o diâmetro do *nozzle*, a altura da camada (*layer height*), o número de *top layers* e *bottom layers*, o número de perímetros externos, a percentagem de *infill*, a orientação da peça a imprimir na plataforma, a temperatura de extrusão, a temperatura da plataforma de impressão e a velocidade de impressão.

Para o propósito desta dissertação, que visa não só o desenvolvimento das tecnologias mas também a análise comparativa dos materiais utilizados através de ensaios de tração, flexão e dureza, é de suma importância que todos os materiais sejam impressos sob condições análogas. Neste contexto, todos os provetes foram impressos no eixo XY (*flat*), garantindo uma uniformidade na direção de impressão. Contudo, uma exceção foi feita para os provetes construídos através da tecnologia SLS. Com o objetivo de testar a influência da direção de impressão neste método, foram impressos provetes de Poliamida 12 tanto no eixo XY, Poliamida 12 H, como no eixo ZX (*upright*), referenciados como Poliamida 12 V. Na Figura 49 pode-se observar uma representação esquemática do posicionamento dos provetes na plataforma de impressão.

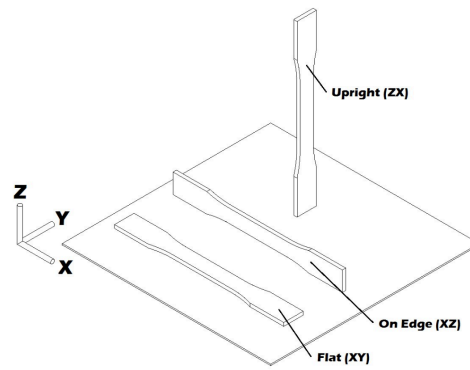


Figura 49 - Diferentes posicionamentos dos provetes na plataforma de impressão [174].

Contudo, enfrenta-se uma limitação intrínseca às tecnologias de SLS e SLA: os provetes impressos por estes métodos são maciços, dada a impossibilidade de alterar a percentagem de *infill*. O software de slicing Preform, utilizado para as tecnologias SLS e SLA nas impressoras Form 2 e Fuse 1, apresenta restrições. No caso da Form 2, permite-se apenas a variação da *layer height*, enquanto na Fuse 1, todos os parâmetros encontram-se inalteráveis como se pode observar na Figura 50.

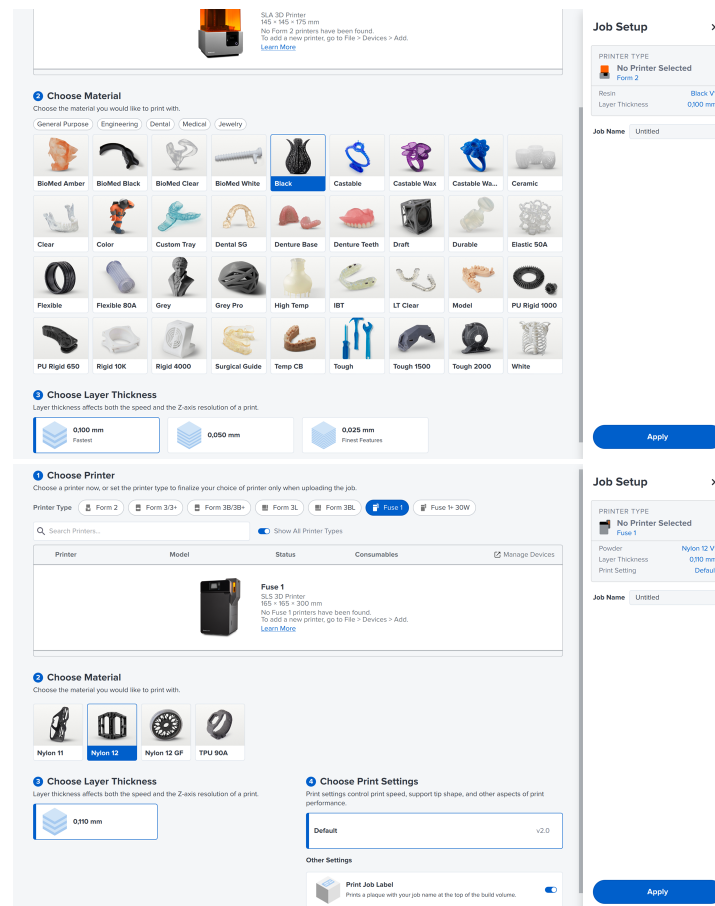


Figura 50 - Na figura superior é possível observar a limitação do *software* Preform aplicado à impressora Form 2 e em baixo a impressora Fuse 1.

Por outro lado, os materiais processados através da tecnologia FDM oferecem maior flexibilidade em termos de parâmetros, como mostra a Figura 51. No entanto, para assegurar a uniformidade na impressão dos provetes em todas as tecnologias, optou-se por configurar a impressão em FDM de modo a produzir um provete maciço. Esta decisão traduziu-se na configuração de um número

de camadas superiores e inferiores suficientes para englobar todo o corpo do provete, equivalendo a um *infill* de 100% teoricamente. Para prevenir possíveis inconsistências ou conflitos associados a diferentes tipologias de *infill*, manteve-se este parâmetro a 0% e o número de camadas superiores e inferiores iguais a 20, para garantir o tal *infill* teórico.

Também a escolha do *raster angle*, especialmente em FDM, pode ter um impacto significativo nas propriedades mecânicas do objeto impresso. A direção e o ângulo do preenchimento influenciam a resistência, a flexibilidade e outras propriedades mecânicas do material impresso. Assim sendo optou-se por um *raster angle* de 45°/-45° pois proporciona uma resistência mais isotrópica, mais uniforme em várias direções, o que ajuda a distribuir as tensões mais uniformemente em várias direções, resultando em propriedades mecânicas que são mais consistentes, independentemente da direção em que são testadas, assemelhando-se a um provete maciço.

Os parâmetros estudados e testados para fabrico dos provetes dos diversos materiais serão apresentados no capítulo seguinte.

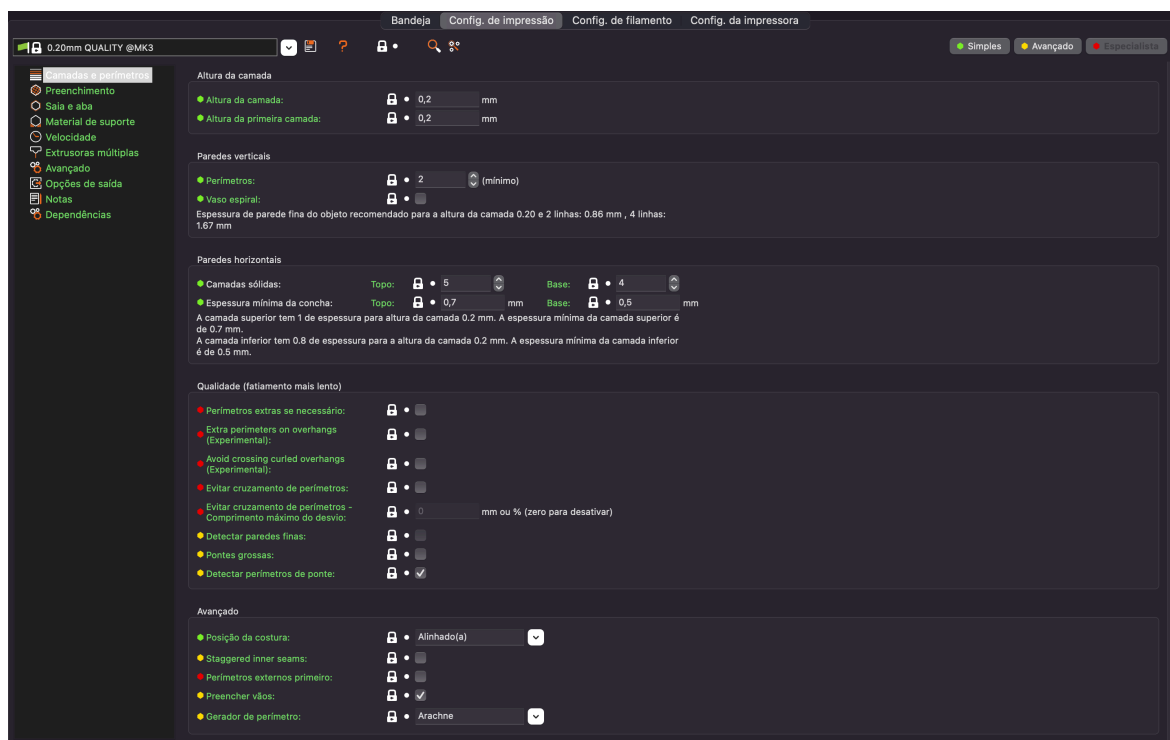


Figura 51 - Exemplo de flexibilidade de parâmetros na aba de “Configuração de impressão” do software PrusaSlicer.

3.5. Preparação dos provetes

No contexto do avanço das tecnologias de impressão 3D é crucial a caracterização dos materiais utilizados, tanto em termos de propriedades como de parâmetros de impressão. Neste sentido, a escolha das normas ASTM, apesar da existência das normas internacionais ISO, deveu-se ao facto destas se concentrarem principalmente em materiais e devido à vasta quantidade de materiais provenientes de fabricantes americanos. Assim, definiu-se a realização de ensaios específicos, cada um regido por uma norma ASTM distinta, que influenciaria diretamente o design dos provetes.

3.5.1. Descrição do Design dos Provetes

Para os ensaios de tração, adotou-se a norma ASTM D638 e a escolha pelo provete tipo I. Esta escolha baseou-se na sua boa combinação entre a facilidade de impressão e obtenção de resultados consistentes e repetíveis, essencial para garantir que os resultados dos ensaios sejam precisos e possam ser comparados com outros resultados ou padrões da indústria. As dimensões dos provetes foram estabelecidas conforme as diretrizes dessa norma e segundo a mesma, um dos requisitos seria testar pelo menos cinco provetes para cada amostra no caso de materiais isotrópicos, o que implicou a necessidade de imprimir pelo menos cinco provetes de qualidade para este ensaio. A Figura 52 e Tabela 26 a seguir ilustram as dimensões utilizadas para a construção deste tipo de provete [175].

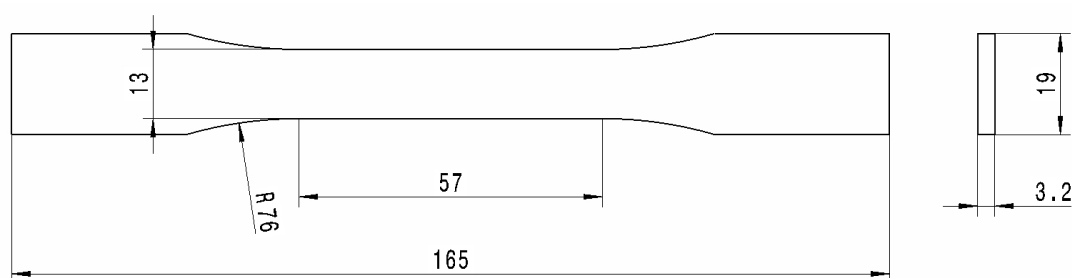


Figura 52 - Dimensões utilizadas para construção dos provetes a utilizar no ensaio de tração segundo a norma ASTM D638.

Tabela 26 - Dimensões dos provetes de tração.

Comprimento total, LO (mm)	Comprimento da secção mais estreita, L (mm)	Largura total, WO (mm)	Largura da secção mais estreita, W (mm)	Espessura, T (mm)	Raio, R (mm)
165	$57 \pm 0,5$	$19 \pm 0,6$	$13 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,4$	76 ± 1

Para o ensaio de flexão, seguindo a norma ASTM D790, as dimensões recomendadas para os provetes são segundo a mesma 127 por 12,7 por 3,2 mm. A Figura 53 e Tabela 27 subsequentes detalham estas dimensões e a velocidade de ensaio [176].

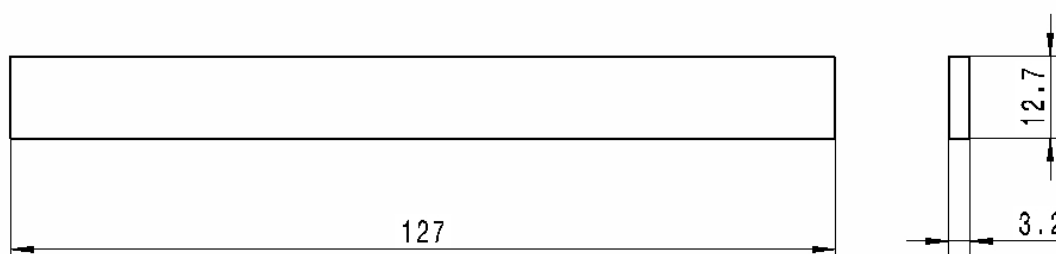


Figura 53 - Dimensões utilizadas para construção dos provetes a utilizar no ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790.

Tabela 27 - Dimensões dos provetes e velocidade de ensaio.

Comprimento, l (mm)	Largura, b (mm)	Espessura, h (mm)	Velocidade de ensaio (mm/min)
127	$12,7 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,2$	2

Relativamente ao ensaio de dureza shore D, de acordo com a norma ASTM D2240, o provete de teste deverá ter pelo menos 6,0 mm de espessura e as dimensões laterais do mesmo devem permitir medições a pelo menos 12,0 mm de qualquer borda [177].

A seleção e design dos provetes foram cuidadosamente planeados com base nas normas ASTM, garantindo a fiabilidade e comparabilidade dos resultados. A escolha destas normas, mesmo estando na Europa, reforça a busca por um padrão globalmente aceite e reconhecido. Para todos os 15 materiais em estudo, optou-se por provetes completamente maciços.

3.5.2. Etapas de preparação

No processo de impressão 3D, identifica-se um conjunto de procedimentos essenciais a serem seguidos antes de iniciar qualquer tarefa de impressão. Estes passos garantem não só a qualidade da impressão, mas também a longevidade e o bom funcionamento do equipamento.

Primeiramente, após cada sessão de impressão, recomenda-se a limpeza da plataforma de impressão utilizando álcool isopropílico. Esta etapa assegura a remoção de resíduos que possam comprometer a aderência e a qualidade da impressão subsequente.

Adicionalmente, é imperativo verificar as condições do material destinado à impressão. Este deve estar armazenado em locais secos, evitando a presença de humidade. A humidade pode não só afetar a qualidade da impressão, mas também danificar componentes da impressora, comprometendo a sua operacionalidade.

Outro passo crucial é a calibração da impressora, que visa o nivelamento adequado da máquina. Em todas as impressoras analisadas, esta calibração é realizada de forma automática, simplificando o processo e garantindo precisão.

Além destes procedimentos, é também aconselhável a aplicação de um *spray* adesivo na plataforma de construção, no caso da empresa foram utilizados os *sprays* da marca 3DLAC e DimaFix. Esta medida complementar visa otimizar a aderência da primeira camada do objeto impresso, prevenindo possíveis deformações e garantindo uma impressão uniforme e estável.

No que concerne aos materiais ULTEM AM9085F, PC CF e PA utilizados na impressora miniFactory Ultra, devido à sua complexidade de impressão e/ou valor monetário associado, estes são submetidos a um tratamento térmico específico. Este tratamento, realizado na câmara de filamento aquecida da Figura 54, tem como objetivo reduzir os riscos associados a impressões mal sucedidas. A temperatura e o período de tempo deste tratamento variam consoante o material em questão.

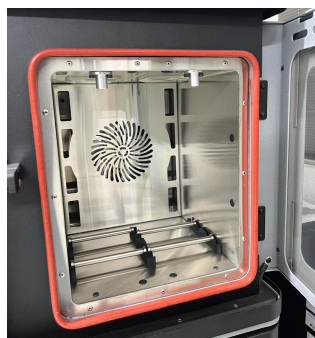


Figura 54 - Interior da câmara de filamento aquecida da impressora miniFactory Ultra.

3.5.3. Pós processamento

O pós-processamento é uma etapa crucial que visa otimizar a qualidade e as propriedades das peças impressas. Dependendo da tecnologia e dos materiais utilizados, os procedimentos de pós-processamento podem variar significativamente.

No caso dos provetes impressos através da tecnologia FDM no eixo xy, destaca-se a não necessidade de utilização de suportes durante a impressão. Além disso, opta-se por não submeter estas peças a etapas de pós-processamento, uma vez que qualquer intervenção poderia alterar as suas características intrínsecas e comprometer a sua integridade.

Por outro lado, os provetes produzidos através da tecnologia SLA, especificamente com o material Tough 1500, requerem cuidados adicionais após a impressão. Após a conclusão da impressão, é imperativo submeter as peças a uma lavagem em solvente, comumente em isopropanol, durante 10 minutos na Form Wash com o objetivo de eliminar qualquer resina não curada [178].

Posteriormente, para assegurar a otimização das propriedades mecânicas e garantir a completa polimerização da resina, as peças são expostas a luz UV na Form Cure durante 60 minutos a 70°C, num processo de cura. Estas configurações de tempo e temperatura quer para a Form Wash quer para a Form Cure, presentes na Figura 55, são estipuladas pelo fabricante e variam de material para material [179].



Figura 55 - Form Wash à esquerda e Form Cure à direita.

Relativamente à tecnologia SLS, quando se utiliza o material poliamida 12, o pós-processamento inicia-se na Fuse Sift, apresentada na Figura 56, com a câmara de impressão já arrefecida com a remoção cuidadosa dos provetes do volume de pó e de seguida inicia-se uma etapa de escovação ou sopro para eliminar o excesso de pó. Para garantir a completa remoção de vestígios de pó não sinterizado que possam permanecer aderidos à superfície das peças, recorre-se frequentemente a um jato de areia. Este procedimento assegura que as peças fiquem limpas, livres de resíduos e com uma superfície uniforme.



Figura 56 -Fuse Swift onde decorre a limpeza das peças.

O pós-processamento é uma fase determinante no ciclo de impressão 3D, e a sua execução adequada é fundamental para garantir a qualidade final e as propriedades desejadas das peças impressas para posterior análise através de ensaios mecânicos.

3.6. Ensaios realizados

Para se obter uma análise abrangente e precisa, torna-se imperativo a realização de uma série de ensaios que caracterizem as propriedades mecânicas e físicas dos materiais em estudo. Neste capítulo, detalham-se os procedimentos experimentais adoptados, bem como os métodos de tratamento dos dados recolhidos.

3.6.1. Ensaio de tração

Para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais em análise, decidiu-se realizar ensaios de tração com recurso a um extensómetro ótico. Estes ensaios seguiram a norma ASTM D638, garantindo, desta forma, a fiabilidade e a possibilidade de comparar os resultados.

Relativamente aos corpos de prova, a sua preparação respeitou as dimensões teóricas da Figura 52, conforme estabelecido pela norma anterior. Para cada material, dispôs-se de cinco corpos de prova diferentes, garantindo uma amostra fiável e representativa.

A máquina de ensaios universal utilizada para a execução dos ensaios foi a Shimadzu AGS-X 10kN, presente na Figura 57. Esta máquina foi consistentemente equipada com uma célula de carga de 10 kN, evitando assim a introdução de variáveis adicionais na investigação e contribuindo para a precisão das medições realizadas. Durante os ensaios, foram utilizadas diferentes velocidades, presentes na Tabela 28, consoante as condições de cada material.

Tabela 28 - Velocidades utilizadas no ensaios de tração.

Material	Velocidade de ensaio (mm/min)
PLA	3
ABS	5
PC/ABS	5
PETG	5
PPJet	5, 20, 30, 35, 35
Filaflex 60A	35
Filaflex 95A	5
n-ASA	5
ALFAOHM	35
Poliamida	5, 5, 15, 15, 20
PAHT CF15	5
PC CF	5
ULTEM AM9085F	5
Poliamida 12	5
Tough 1500	5

Optou-se por empregar diferentes velocidades de ensaio no material PPJet e Poliamida. Uma das principais motivações para esta variação reside na análise da sensibilidade do material à velocidade de deformação. Compreende-se que o comportamento de muitos materiais pode ser influenciado pela rapidez com que são deformados, a uma velocidade mais reduzida, permite-se que o material tenha mais tempo para se deformar, manifestando potencialmente um comportamento mais dúctil. Em contrapartida, a uma velocidade mais elevada, o material pode reagir de forma mais frágil, dada a insuficiência de tempo para uma deformação adequada.

De acordo com a norma utilizada, para materiais rígidos e semi-rígidos testados com provetes tipo I, é recomendada uma velocidade de ensaio de 5 mm/min, com o objetivo principal de obter valores mais precisos relativos ao módulo de elasticidade. Para materiais não rígidos como o Filaflex 60A e ALFAOHM, que idealmente seriam testados com provetes tipo III, a norma sugere uma velocidade de 50 mm/min. No entanto, no âmbito deste estudo, optou-se por ensaiar estes materiais não rígidos a uma velocidade intermédia de 35 mm/min, dado a sua elevada ductilidade e para garantir uma transição mais suave entre as zonas elástica e plástica durante o ensaio.



Figura 57 - Máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-X 10kN utilizada na Universidade de Aveiro.

Para efeitos de cálculo foi necessário recolher determinados dados antes do começo dos ensaios, como a distância inicial entre as marcas do extensómetro na zona central da amostra, como apresenta a Figura 58, variável entre os materiais utilizados e as dimensões de espessura e largura utilizadas para cálculo da área de secção do provete apresentadas no Apêndice A.

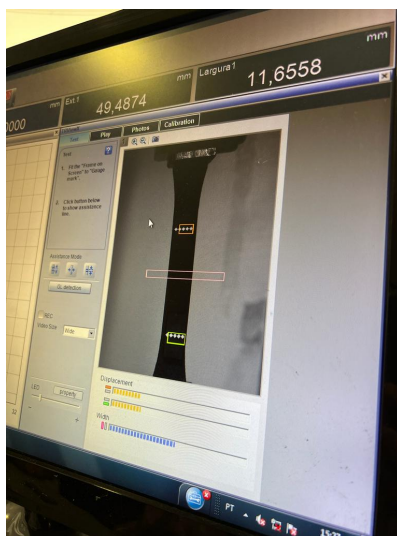


Figura 58 - Distância inicial entre as marcas do extensómetro de um provete.

Após ensaio, registou-se primordialmente os valores para as curvas força-deslocamento. De seguida, procedeu-se ao tratamento dos dados recolhidos, de modo a obter-se a curva tensão-deformação, mais relevante para a caracterização mecânica dos materiais.

A transformação da curva força-deslocamento em tensão-deformação foi realizada com base nas equações apresentadas na Tabela 29. A partir da curva tensão-deformação, várias características mecânicas foram determinadas, tais como o módulo de elasticidade à tração, que indica a rigidez do material, a tensão de rotura à tração, que representa a resistência máxima do material sob tração, e a deformação máxima, que indica a extensão em que o material pode ser estirado antes de romper.

Tabela 29 - Equações gerais para os cálculos utilizados no ensaio de tração.

Descrição	Equação	
Tensão	$\sigma_t = \frac{F}{A}$	Equação 1
Deformação	$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_0}{L_0}$	Equação 2
Módulo de elasticidade	$E = \frac{\sigma_{t2} - \sigma_{t1}}{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}$	Equação 3

Em que:

σ_t : Valor de tensão medido em determinado ponto, expresso em Megapascal.

F: Força aplicada, expressa em Newtons.

A: Área da secção transversal inicial da amostra, expressa em milímetros quadrados.

ε_t : Valor de deformação medido em determinado ponto.

ΔL_0 : Aumento da distância entre as marcas do extensómetro na parte central do provete, expressa em milímetros.

L_0 : Distância inicial entre as marcas do extensómetro na parte central do provete, expressa em milímetros.

σ_{t1} : Valor de tensão medido no ponto de deformação ε_{f1} , expresso em Megapascal.

σ_{t2} : Valor de tensão medido no ponto de deformação ε_{f2} , expresso em Megapascal.

ε_{t1} : Valor de deformação de 0,0005, expresso em mm/mm.

ε_{t2} : Valor de deformação de 0,0025, expresso em mm/mm.

3.6.2. Ensaio de flexão

Para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais em estudo, optou-se pela realização de ensaios de flexão em 3 pontos. Estes ensaios foram conduzidos seguindo a norma ASTM D790 garantindo assim a fiabilidade e comparabilidade dos resultados obtidos.

No que concerne aos provetes utilizados, estes foram preparados tendo em conta as dimensões teóricas específicas na Figura 53, de acordo com o estipulado na norma. Cada material foi representado por cinco provetes distintos, assegurando-se, assim, uma amostragem robusta e representativa.

A velocidade de ensaio 2 mm/min é frequentemente empregue devido a características particulares destes materiais. Esta taxa permite uma avaliação mais representativa da resposta elástica do material, minimizando efeitos viscosos. Além disso, considerando a anisotropia inerente à impressão 3D, uma taxa mais lenta oferece uma análise mais precisa da iniciação e propagação de falhas, especialmente nas interfaces entre camadas.

A máquina de ensaios universal utilizada para a execução dos ensaios foi a Autograph AG-I, ilustrada na Figura 59. Esta máquina foi consistentemente equipada com uma célula de carga de 5 kN, a fim de evitar a introdução de variáveis adicionais na investigação e contribuir para a precisão das

medições. Durante os ensaios, o foco principal foi o registo dos valores para as curvas força-deslocamento. Posteriormente, procedeu-se ao tratamento dos dados recolhidos, com o objetivo de se obter a curva tensão-deformação, que é mais relevante para a caracterização mecânica dos materiais.



Figura 59 - Provete de PC/ABS a ser ensaiado na máquina de ensaios universal do ISEP.

A transformação da curva força-deslocamento em tensão-deformação baseou-se nas equações apresentadas na Tabela 30. A partir da curva tensão-deformação, diversas características mecânicas foram extraídas, como o módulo de elasticidade à flexão, que traduz a rigidez do material, a tensão de rotura, que traduz a resistência à flexão e a deformação, que traduz a deformação correspondente à resistência à flexão.

Tabela 30 - Equações gerais para os cálculos utilizados no ensaio de flexão.

Descrição	Equação	
Distância entre apoios	$L = (16 \pm 1) \times \bar{h}$	Equação 4
Tensão	$\sigma_f = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2}$	Equação 5
Deformação	$\varepsilon_f = \frac{6 \times s \times h}{L^2}$	Equação 6
Módulo de elasticidade	$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$	Equação 7

Em que:

L : Distância entre apoios, expressa em milímetros.

$\bar{h}$: Espessura média do provete, expressa em milímetros.

σ_f : Valor de tensão medido em determinado ponto, expresso em Megapascal.

F : Força aplicada, expressa em Newtons.

b : Largura do provete, expressa em milímetros.

h : Espessura do provete, expressa em milímetros.

ε_f : Valor de deformação medido em determinado ponto.

s : Deslocamento sofrido, expresso em milímetros.

σ_{f1} : Valor de tensão medido no ponto de deformação ε_{f1} , expresso em Megapascal.

σ_{f2} : Valor de tensão medido no ponto de deformação ε_{f2} , expresso em Megapascal.

ε_{f1} : Valor de deformação de 0,0005, expresso em mm/mm.

ε_{f2} : Valor de deformação de 0,0025, expresso em mm/mm.

Decidiu não se realizar ensaios de flexão nos materiais ALFAOHM e Filaflex 60A devido ao facto de possuírem características intrínsecas que os tornam inadequados ou não representativos para ensaios de flexão no contexto da nossa investigação.

Para além disso, estabeleceu-se uma distância entre apoios, L , no valor de 51,2 mm, através da espessura teórica, uma vez que ao utilizar-se os valores de $\bar{h}$ para cada provete todos os valores estariam compreendidos entre os valores de toleranciamento calculados pela norma.

3.6.3. Ensaio de dureza

O ensaio de dureza é frequentemente reconhecido como um dos métodos mais para determinar a resistência de um material à deformação, em particular à penetração. A profundidade ou área da impressão deixada no material é medida e utilizada para calcular a dureza.

Durante a pesquisa em curso, os ensaios de dureza Shore D foram realizados em conformidade com a norma ASTM D2240. Para este efeito, recorreu-se a um instrumento da marca Hildebrand, modelo OS-2 presente na Figura 60. Curiosamente, os provetes originalmente preparados para ensaios de tração foram adaptados e utilizados nos ensaios de dureza. Dada a sua espessura inicial, foi necessário empilhar dois destes provetes até se atingir a altura mínima exigida de 6 mm. Além da questão da espessura, foi fundamental que a superfície em contacto com o penetrador do durómetro fosse perfeitamente plana e lisa, garantindo assim resultados precisos e consistentes.



Figura 60 - Instrumento utilizado para os ensaios de dureza Shore D no ISEP.

- Durante o ensaio Shore D, optou-se por efetuar 5 leituras em diferentes pontos do provete em diferentes intervalos de tempo para compreender melhor o comportamento do material sob carga:
- **Valor Máximo:** Realizou-se uma leitura através da posição do ponteiro de arrasto, leitura essa que traduz o valor máximo de dureza.
- **3 segundos:** A segunda leitura, realizada aos 3 segundos, fornece uma perspectiva imediata da resposta do material à carga aplicada.
- **15 segundos:** Aos 15 segundos, procedeu-se a uma nova leitura, frequentemente adotada como padrão no ensaio de dureza Shore D, especialmente para elastómeros mais rígidos e plásticos.

Através destas múltiplas leituras, como se pode observar na Figura 61, pretende-se obter uma visão abrangente e detalhada do comportamento dos materiais ensaiados, permitindo uma compreensão mais minuciosa das suas propriedades viscoelásticas e potencial aplicabilidade em contextos práticos.



Figura 61 - Medições de leitura de dureza consecutivas.

3.7. Impressão do postigo para o molde

No âmbito do desenvolvimento das tecnologias de impressão 3D, especialmente em FDM, a evolução dos materiais de engenharia tem sido notável. Para explorar o potencial dos materiais em estudo em aplicações de sobreinjeção, beneficiou-se da generosidade de uma empresa parceira que doou um molde que estava inativo e possuía porta-machos/porta-cavidades. Este molde, apresentado na Figura 62, foi cuidadosamente maquinado para alojar um postigo impresso em 3D que serviria como base para a sobreinjeção do símbolo da empresa. Este postigo foi desenhado não só para representar logótipo, mas também para incorporar parte do *runner* e o *gate*, componentes essenciais para o processo de injeção.



Figura 62 - Molde utilizado para o dimensionamento do postigo a imprimir.

Pensando na eficiência, facilidade de manutenção e versatilidade do processo, o design do postigo foi concebido de forma a permitir a rápida criação e substituição de postigos, facilitando a sobreinjeção de diferentes peças conforme a necessidade.

Neste contexto, foram maquinadas quatro ranhuras em cada postigo. Correspondendo a estas ranhuras, foram criados alojamentos específicos para porcas no próprio molde, simplificando a remoção do postigo. Adicionalmente, para garantir uma fixação segura do postigo ao corpo principal do molde, foram realizados três furos roscados tanto no postigo quanto no molde. Na Figura 63 pode-se notar as dimensões dos postigos e as características que promovem a facilidade de manutenção e versatilidade deste.

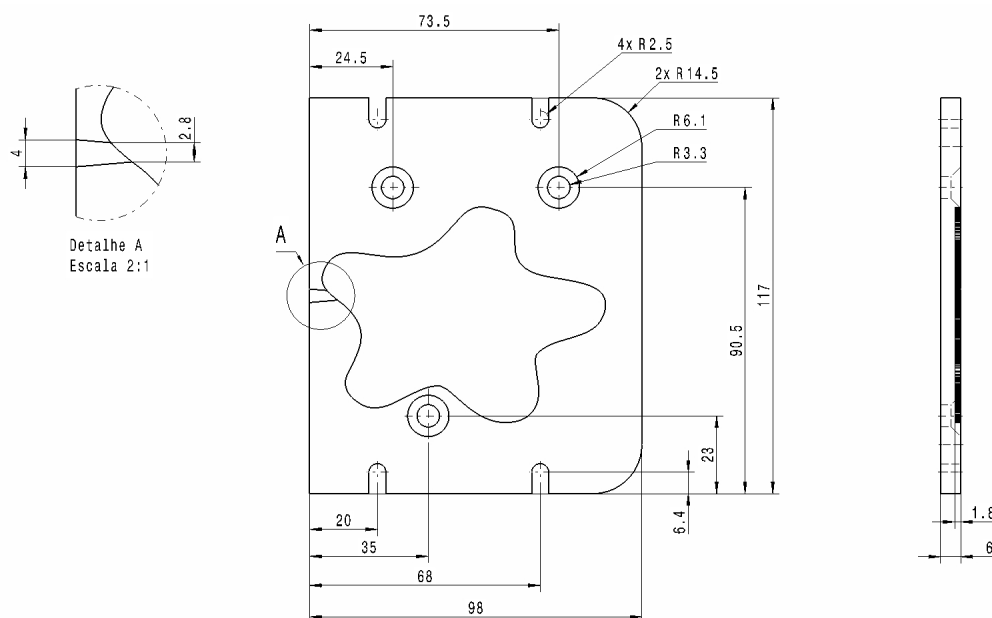


Figura 63 - Dimensões do postigo impresso com o formato do logótipo da Simoldes.

Relativamente ao molde reutilizado, este já possuía sistemas integrados de refrigeração e alimentação. No entanto, dadas as especificidades das novas peças a serem injetadas, o sistema de alimentação foi adaptado. O sistema de refrigeração também sofreu modificações, tendo em conta

a espessura de 6 mm do postigo e a ausência de refrigeração direta no mesmo. Para otimizar a remoção de calor dos postigos, o diâmetro dos canais das águas de refrigeração foram aumentados, aproximando-se ao máximo do postigo, mas sempre garantindo que a integridade do molde não fosse comprometida. A Figura 64 ilustra, à esquerda, o molde original e à direita, as adaptações previamente descritas realizadas para alojar o postigo impresso.

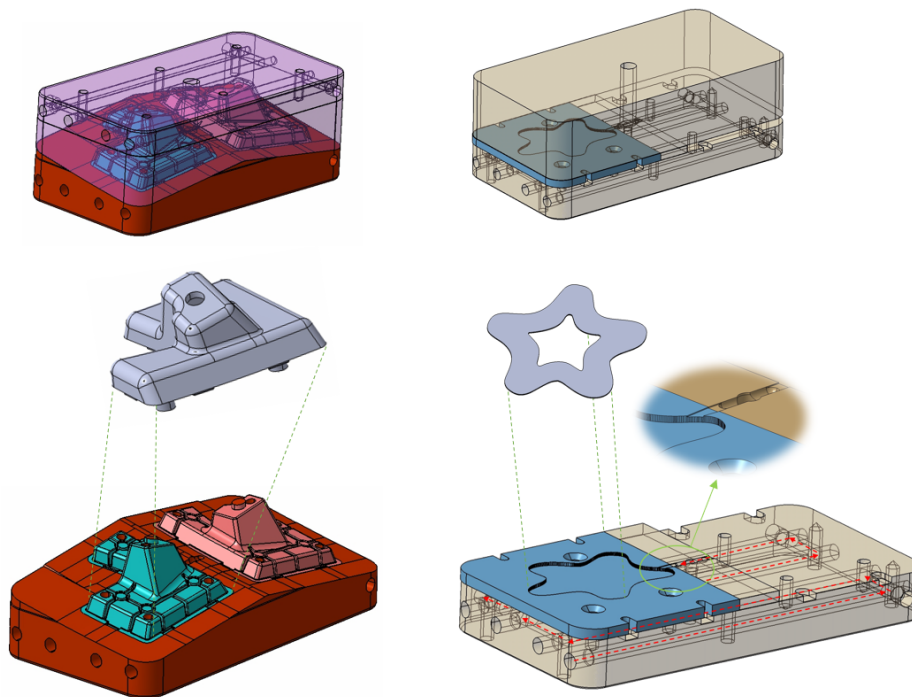


Figura 64 - Molde original e adaptações realizadas no molde de forma a alojar os novos postigos.

3.8. Injeção sobre o postigo impresso

No desenvolvimento, pretende-se realizar a injeção sobre o postigo impresso, utilizando dois materiais distintos: PP PHC31-81, da sabic, e Santoprene 8211-55B100. Ambos os materiais são amplamente reconhecidos na indústria pela sua versatilidade e propriedades específicas [180].

O PP PHC31-81 é reconhecido pela sua elevada rigidez e notável resistência ao impacto. Apresenta propriedades de fluxo notáveis e uma distribuição estreita de peso molecular. A sua injeção é caracterizada por tempos de ciclo rápidos, o que permite a produção de artigos com mínima deformação e elevada estabilidade dimensional. Este polímero termoplástico destaca-se pela sua capacidade de injeção, sendo frequentemente aplicado em componentes automóveis devido à sua combinação de resistência mecânica e leveza [181].

O Santoprene 8211-55B100, da família de elastómeros termoplásticos (TPE), é um versátil elastómero termoplástico vulcanizado (TPV). Criado para reforçar uma variedade de materiais como ABS, PS, PC, PMMA, ASA, e PET, é ideal para aplicações que necessitam de combinações tanto rígidas quanto macias. Este TPV é facilmente processado em equipamentos convencionais de termoplásticos, seja por injeção ou extrusão. Destaca-se não só pela sua reciclabilidade, mas também pela sua eficácia quando utilizado. Por estas razões, tem-se mostrado uma escolha popular no setor automóvel [182], [183].

O equipamento selecionado para a realização da injeção foi uma máquina KM 150X, presente na Figura 65, que dispõe de uma força de fecho de 150 toneladas. A escolha deste equipamento deveu-se às reduzidas dimensões do molde e ao facto de ser a máquina mais pequena disponível naquele momento, tornando-a adequada para a tarefa em questão.



Figura 65 - Equipamento KM 150X utilizado para o ensaio de injeção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo exploram-se os principais resultados da investigação relativa às tecnologias de fabrico aditivo e aos materiais de engenharia em estudo. Inicia-se com uma análise pormenorizada dos parâmetros de impressão ideais utilizados para a construção dos provetes, procurando compreender a influência de diferentes parâmetros na qualidade do provete impresso. Prossegue-se com a apresentação dos resultados dos ensaios de tração, flexão e dureza, que permitem avaliar a resistência mecânica, ductilidade e dureza dos materiais testados. Conclui-se com uma abordagem à técnica de sobreinjeção e ao seu impacto nas propriedades finais dos objetos impressos.

4.1. Parâmetros de impressão

No contexto da evolução das tecnologias de impressão 3D, a determinação dos parâmetros ideais para a impressão é de suma importância. Estes parâmetros não só influenciam a qualidade da impressão final, mas também as propriedades mecânicas e funcionais dos objetos impressos. A busca por parâmetros ideais foi realizada considerando não apenas a tecnologia de impressão utilizada, mas também os diferentes materiais de engenharia em questão. Este subcapítulo tem como objetivo apresentar e discutir os parâmetros ideais determinados para cada combinação de tecnologia e material, comparando-os com os parâmetros fornecidos pelos fabricantes.

A decisão de imprimir provetes maciços na tecnologia FDM foi tomada de forma a manter a uniformidade com as tecnologias SLS e SLA. Embora esta decisão possa parecer contraintuitiva, especialmente considerando a flexibilidade inerente à tecnologia FDM em termos de ajuste de parâmetros, foi crucial para assegurar que os resultados obtidos fossem comparáveis entre todas as tecnologias. Este compromisso foi vital para garantir que as variáveis controladas durante os ensaios fossem consistentes e que as diferenças observadas nas propriedades dos materiais pudessem ser atribuídas aos próprios materiais e não às variações no processo de impressão.

A seleção de um *raster angle* de 45°/-45° para as impressões FDM teve por base a busca por propriedades mecânicas que fossem consistentes em várias direções. Esta escolha foi fundamentada na revisão bibliográfica, que sugere que um ângulo de preenchimento de 45°/-45° proporciona uma resistência mais isotrópica em várias direções. A ideia subjacente a esta decisão foi garantir que os provetes impressos apresentassem propriedades que fossem, na medida do possível, uniformes e independentes da direção em que fossem testados.

Uma limitação inerente às tecnologias SLS e SLA, que se tornou evidente durante o estudo, foi a falta de flexibilidade na alteração de parâmetros. Em particular, a impossibilidade de ajustar a percentagem de *infill* resultou em provetes maciços para estas tecnologias. Esta característica contrasta significativamente com a flexibilidade oferecida pela tecnologia FDM. No entanto, foi importante reconhecer e contornar esta limitação para garantir a comparabilidade dos resultados entre as diferentes tecnologias.

Na Tabela 31 apresenta-se os parâmetros ideais utilizados para a construção dos provetes a serem sujeitos a ensaios mecânicos.

Tabela 31 - Parâmetros estudados e utilizados para o fabrico de provetes.

Material	Tecnologia	Diâmetro do nozzle (mm)	Layer Height (mm)	Temperatura de extrusão (°C)	Temperatura da plataforma de impressão (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)
PLA	FDM	0,6	0,2	210	60	45
ABS	FDM	0,4	0,11	250	105	45
PC/ABS	FDM	0,4	0,11	260	110	45
PETG	FDM	0,6	0,11	240	90	45
PPJet	FDM	0,6	0,2	220	100	45
Filaflex 60A	FDM	0,6	0,2	220	30	30
Filaflex 95A	FDM	0,6	0,2	245	50	20
n-ASA	FDM	0,4	0,11	235	100	45
ALFAOHM	FDM	0,6	0,2	200	30	30
Poliamida	FDM	0,4	0,2	245	105	30
PAHT CF15	FDM	0,6	0,2	300	105	35
PC CF	FDM	0,6	0,2	305	110	35
ULTEM AM9085F	FDM	0,4	0,2	360	185	35
Poliamida 12	SLS	-	-	-	-	-
Tough 1500	SLA	0,1	-	-	-	-

A comparação entre os parâmetros recomendados pelos fabricantes e os determinados através de ensaios revela uma série de observações interessantes. Em geral, observou-se que:

Em vários casos, como ABS, PC/ABS e PETG, os ensaios determinaram que a extremidade superior da faixa de temperatura recomendada pelos fabricantes era mais ideal. Isso pode indicar que temperaturas mais altas dentro da faixa recomendada proporcionam uma fusão mais consistente do material, levando a melhores propriedades mecânicas e qualidade de impressão.

A temperatura da plataforma desempenhou um papel crucial na adesão e estabilidade da peça durante a impressão. Em alguns materiais, como ABS e PC/ABS, as temperaturas ideais determinadas estavam muito próximas das recomendadas pelos fabricantes. No entanto, no caso de materiais como PETG, houve uma discrepância notável, com os ensaios sugerindo uma temperatura de plataforma de 90°C em comparação com a faixa de 60-80°C recomendada pelo fabricante.

Para muitos materiais, o diâmetro do *nozzle* de 0,4 mm ou 0,6 mm e uma *layer height* de 0,2 mm ou 0,11 mm provaram ser ideais, embora os fabricantes frequentemente não fornecessem recomendações específicas para estes parâmetros.

Os materiais Filaflex 60A e 95A, fornecidos pela RECREUS, são notáveis pela especificidade dos seus parâmetros. A recomendação de um diâmetro do nozzle superior a 0,4 mm, por exemplo, sugere que estes materiais, provavelmente devido à sua flexibilidade, beneficiam-se de um nozzle mais largo. Além disso, a velocidade de impressão mais lenta recomendada para o Filaflex 95A em comparação com o 60A indica diferenças nas propriedades de fluxo dos materiais.

O ULTEM AM9085F destaca-se devido à ausência de recomendações do fabricante e às temperaturas de extrusão relativamente altas determinadas pelos ensaios. A necessidade de temperaturas tão elevadas sugere que este material pode ser de alto desempenho, possivelmente adequado para aplicações que exigem resistência a altas temperaturas e esforços mecânicos.

4.2. Ensaio de tração

O ensaio de tração é uma ferramenta fundamental para caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais, permitindo compreender o seu comportamento quando submetidos a esforços de tração. A Figura 66 apresenta o gráfico tensão-deformação à tração de um provete de cada material.

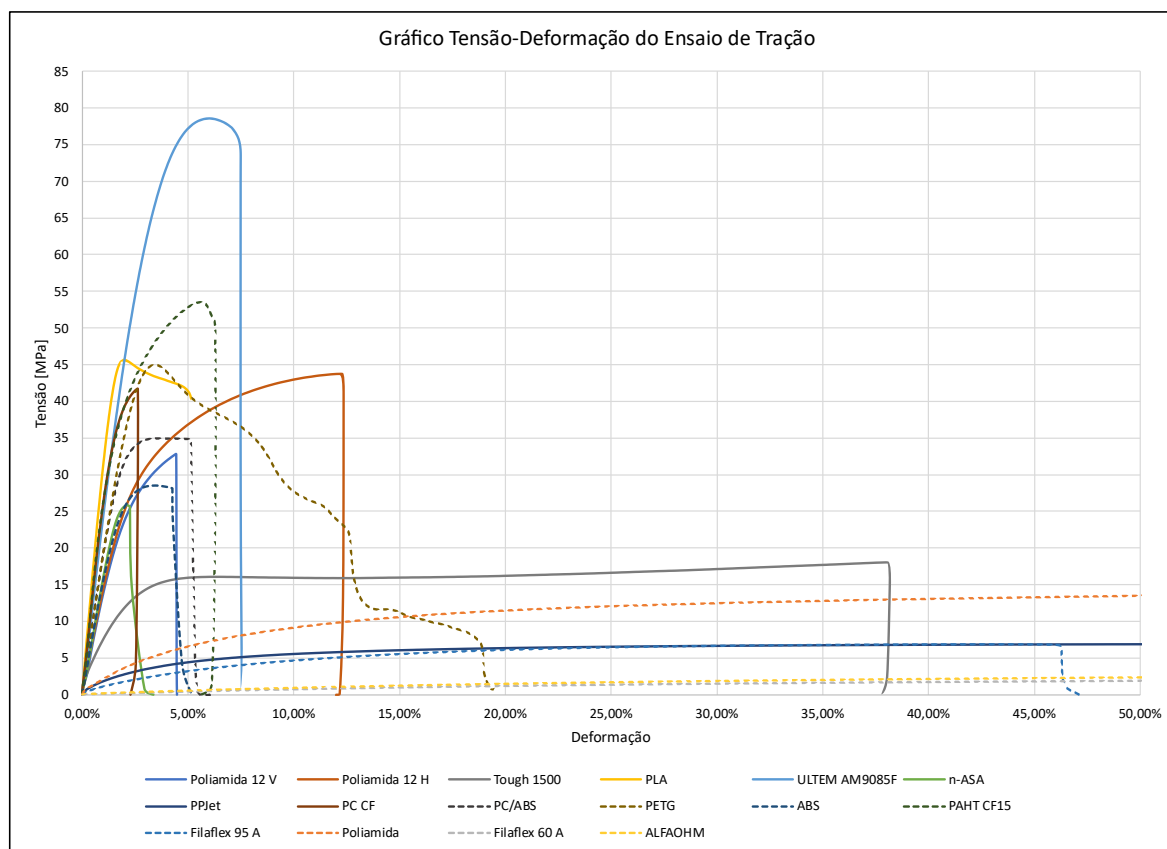


Figura 66 - Gráfico Tensão-Deformação de um provete à escolha para cada material ensaiado à tração.

Através da análise do gráfico foi possível constatar o seguinte:

O PLA demonstrou um notável declive linear na fase inicial, indicando um módulo de elasticidade elevado, isso sugere que o PLA é um material altamente rígido e que será menos propenso a deformações iniciais sob cargas de menores valores.

Materiais como Filaflex 60A e ALFAOHM, com declives menos acentuados, indicam maior flexibilidade e menor rigidez, traduzindo-se na não ocorrência de rutura do provete como se verifica nos materiais PPJet e Poliamida. Em contraste, o ULTEM AM9085F destaca-se notavelmente, exibindo uma combinação impressionante de resistência e rigidez. Este material, com a sua elevada tensão máxima e considerável módulo de elasticidade, sugere ser ideal para aplicações que requerem tanto resistência quanto rigidez.

A ductilidade é evidenciada pela extensão da curva após a fase elástica. Materiais que mostram um alongamento extenso antes de atingir a tensão máxima são considerados mais dúcteis. Por outro lado, materiais que alcançam a tensão máxima rapidamente, com pouco alongamento, são menos dúcteis.

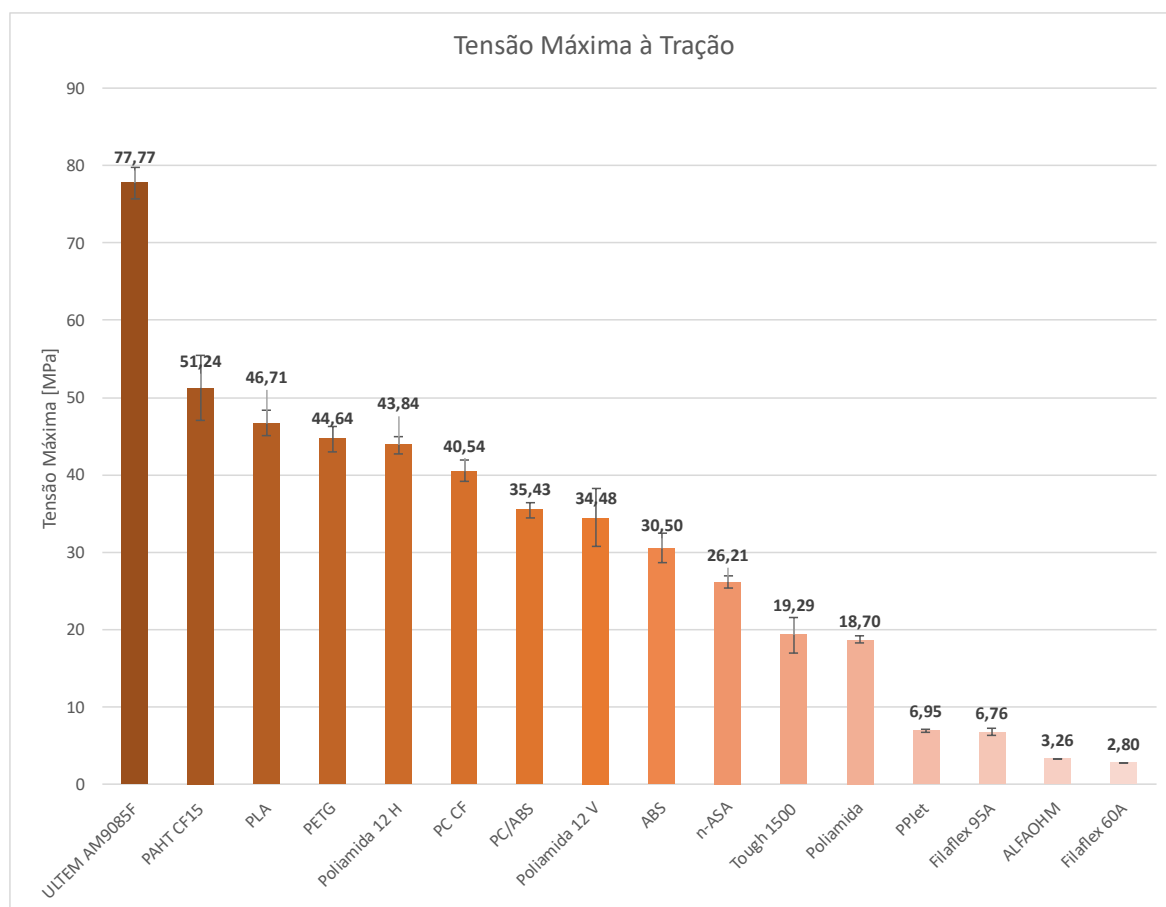


Figura 67 - Gráfico de barras relativo à tensão máxima obtida à tração e respectivos desvios padrão.

Através do gráfico de barras presente na Figura 67, relativo à tensão máxima à tração foi possível observar o seguinte:

No que toca ao ULTEM AM9085F, este material exibe o maior valor de tensão máxima no valor de 77,77 MPa, colocando-o em destaque em termos de resistência. Contudo, a sua curva tensão-deformação indica que, apesar da sua robustez, pode ter uma capacidade limitada de suportar grandes deformações antes da ruptura.

O PAHT CF15, por exemplo, apesar do seu elevado valor de tensão máxima registado (indicando boa resistência), não mostrou um alongamento tão extenso no gráfico tensão-deformação, o que sugere que, embora possua uma boa resistência, pode não ser tão dúctil quanto alguns dos outros materiais como a Poliamida 12 H, por exemplo, impressa segundo o eixo XY.

A relação entre resistência e ductilidade é crucial ao selecionar materiais para aplicações específicas. Materiais com boa resistência, mas baixa ductilidade, podem ser propensos a falhar de forma repentina sob cargas extremas, enquanto materiais dúcteis podem deformar-se mais antes da falha.

A análise subsequente do módulo de elasticidade presente na Figura 68, fornece um panorama mais quantitativo relativamente à rigidez dos materiais.

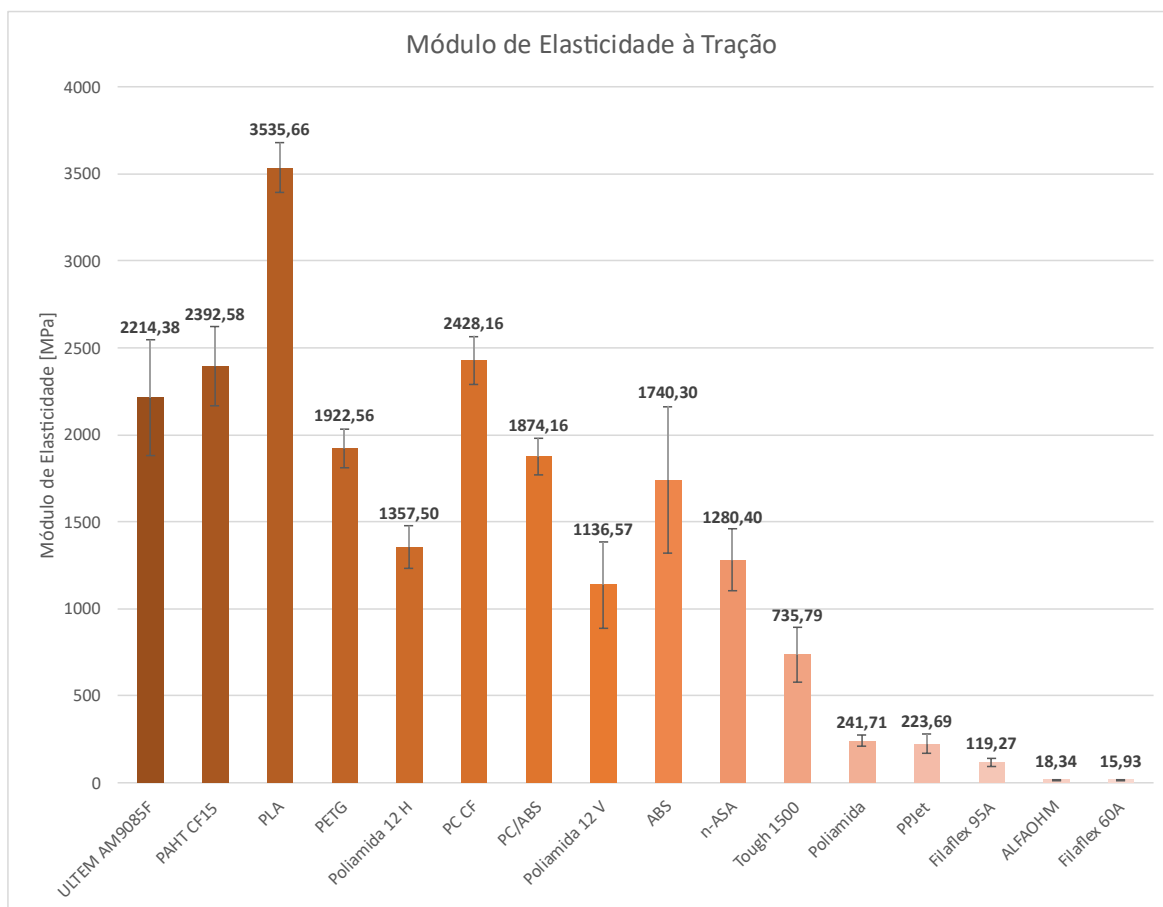


Figura 68 - Gráfico de barras relativo ao módulo de elasticidade à tração e respetivos desvios padrão.

O módulo de elasticidade quantifica a rigidez de um material. Os materiais PLA, PC CF, PAHT CF15 e ULTEM AM9085F são exemplos de materiais que apresentam módulos de elasticidade elevados, indicando rigidez. Esses materiais são mais adequados para aplicações que exigem resistência à deformação, já materiais como ALFAOHM e Filaflex 60A apresentam um módulo de elasticidade muito baixo, tornando-os ideais para aplicações que necessitam de alguma capacidade de flexão ou amortecimento.

A variação observada através da representação do desvio padrão, em alguns materiais, como o ABS, pode ser atribuída a uma combinação de fatores, como a heterogeneidade de material traduzida em impurezas, bolhas de ar ou inconsistências na impressão dos provetes. No caso do ABS também se poderá traduzir através da sua sensibilidade às variações térmicas durante o seu processamento.

Todos os gráficos tensão-deformação relativos à obtenção dos valores válidos para o módulo de elasticidade à tração encontram-se presentes no Apêndice B.

Para os materiais PPJet e Poliamida, observou-se uma prática particularmente interessante: os ensaios foram realizados a diferentes velocidades entre provetes, como se pode observar na Tabela 32.

Esta decisão foi tomada pelos técnicos do laboratório com o objetivo de combinar as velocidades de ensaio com as propriedades mecânicas ótimas. Os polímeros, devido à sua natureza

viscoelástica, podem exibir diferentes comportamentos mecânicos dependendo da taxa de deformação.

Tabela 32 - Velocidades de ensaio para os provetes de PPJet e Poliamida.

PPJet		Velocidade de ensaio (mm/min)	Poliamida		Velocidade de ensaio (mm/min)
PPJet	Provet 1	5	Poliamida	Provet 1	5
	Provet 2	20		Provet 2	5
	Provet 3	30		Provet 3	15
	Provet 4	35		Provet 4	15
	Provet 5	35		Provet 5	20

A uma velocidade de ensaio mais elevada, um polímero pode parecer mais frágil ou menos dúctil e pode apresentar maiores valores de tensão máxima, enquanto a uma velocidade mais lenta, o mesmo material pode exibir maior ductilidade ou alongamento à ruptura e menores valores de tensão. Através da Figura 69, pode-se constatar que nem sempre essas condições se verificam no ensaio de tração.

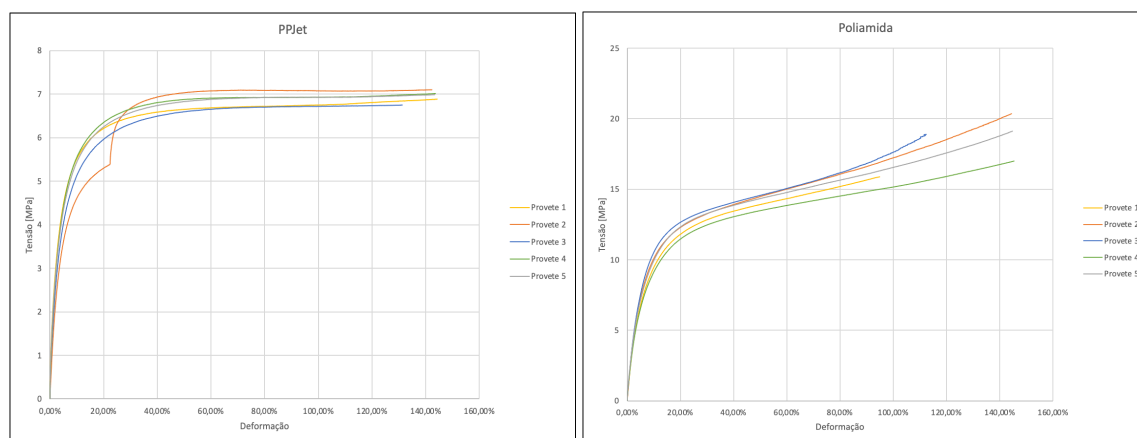


Figura 69 - Gráficos Tensão-Deformação dos 5 provetes para os materiais PPJet e Poliamida.

No caso do PPJet e a Poliamida, pode-se concluir que estas condições nem sempre se verificam verdadeiras, como se pode observar por exmplo para o caso do provete 5 de poliamida, ensaiado a 20mm/s, apresentar uma tensão máxima registada inferior comparativamente ao provete 2, ensaiado a 5mm/s.

No caso do PPJET, o provete 1, ensaiado a 5mm/s, apresenta um comportamento mais frágil do que o provete 3 ensaiado a 30mm/s. É importante referir que o provete 2 foi ensaiado a velocidades diferentes, 20mm/s, até uma deformação de 25% e 35mm/s após esse valor de deformação.

É evidente que não se pode constatar algo sem primeiro realizar ensaios a vários provetes a diferentes velocidades, desta forma estes resultados apresentam algumas limitações pois deveriam ter sido feitos mais ensaios a diferentes velocidades para validar a veracidade dos resultados apresentados.

À medida que exploramos as nuances do fabrico aditivo, torna-se claro que a orientação de impressão é uma variável de grande influência nas propriedades finais dos materiais impressos. A

Poliamida 12 H, impressa ao longo do eixo XY, e a Poliamida 12 V, orientada ao longo do eixo ZX, servem como protagonistas nesta investigação.

A Poliamida 12 H evidencia um comportamento elástico inicial com um declive proeminente, indicando uma elevada rigidez. Esta característica é complementada pela extensão da curva antes de atingir a tensão máxima, sugerindo uma capacidade de suportar deformações significativas. Em contrapartida, a Poliamida 12 V mostra um perfil ligeiramente mais suave, possivelmente indicando uma rigidez inferior.

A Poliamida 12 H alcançou uma tensão máxima média de 43,84 MPa e um módulo de elasticidade de 1357,5 MPa, já a Poliamida 12 V registou valores de 34,48 MPa e 1136,57 MPa para a tensão máxima média e módulo de elasticidade, respetivamente.

Esta diferença de valores pode ser traduzida no facto de os provetes Poliamida 12 H terem camadas impressas alinhadas com a direção da carga aplicada do ensaio de tração.

Na Figura 70 é apresentado um panorama geral dos provetes após ensaio de tração.

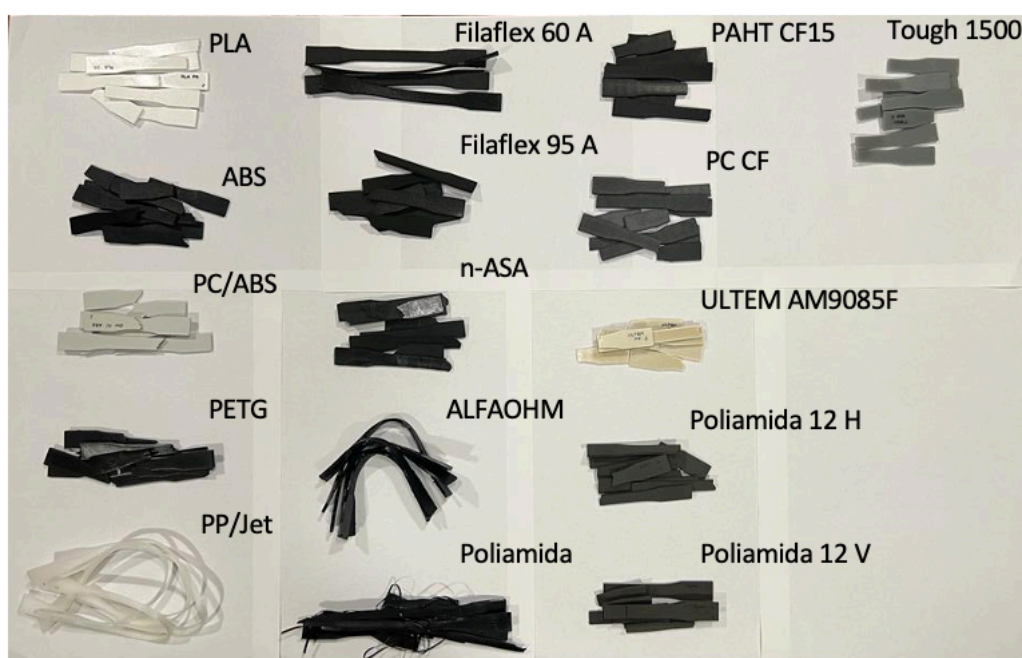


Figura 70 - Resultado dos provetes após ensaio de tração.

Todos os gráficos tensão-deformação relativos à obtenção dos valores válidos para o módulo de elasticidade à tração encontram-se presentes no Apêndice B.

4.3. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão em 3 pontos é uma ferramenta fundamental para caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais, permitindo compreender o seu comportamento quando submetidos a esforços de flexão. A Figura 71 apresenta o gráfico tensão-deformação à tração de um provete de cada material com exceção dos materiais Filaflex 60A e ALFAOHM devido ao facto de possuírem características intrínsecas que os tornam inadequados ou não representativos para ensaios de flexão no contexto da nossa investigação.

A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min devido a características particulares destes materiais. Esta taxa permite uma avaliação mais representativa da resposta elástica do material, minimizando efeitos viscosos.

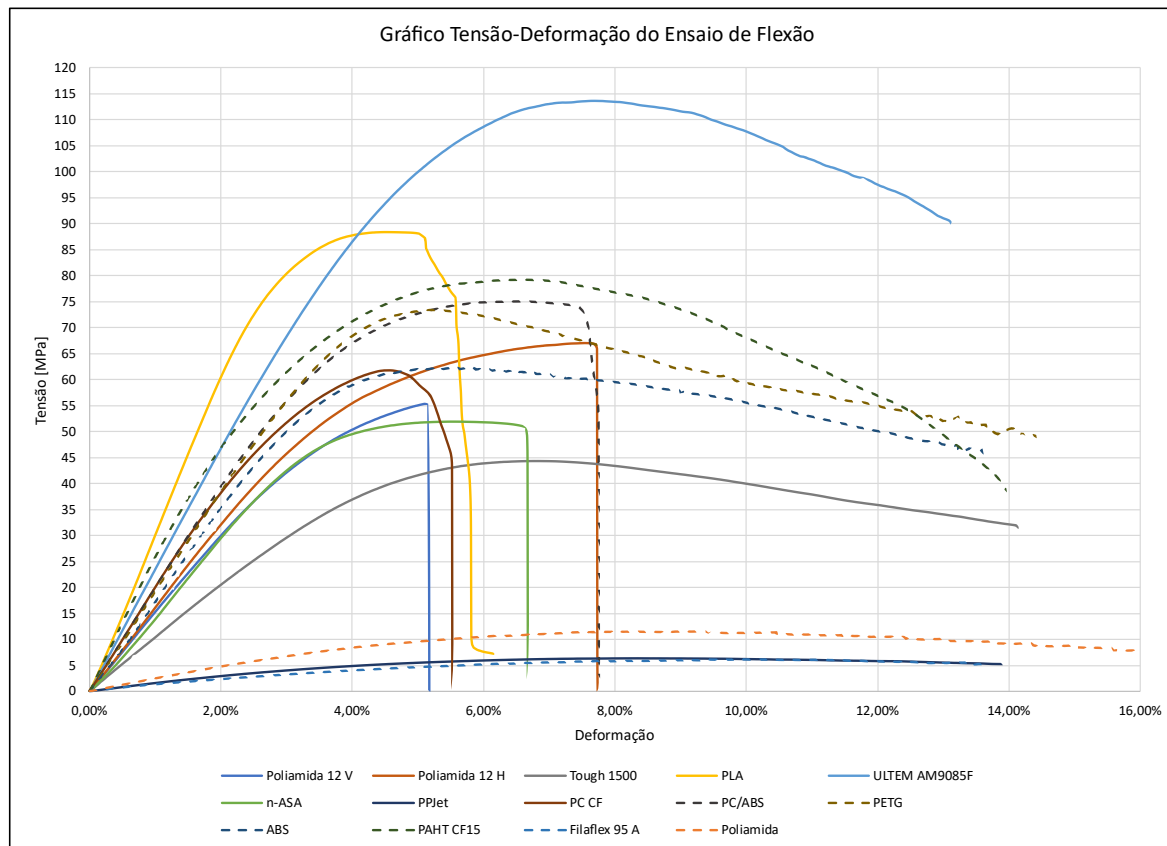


Figura 71 - Gráfico Tensão-Deformação de um provete à escolha para cada material ensaiado à flexão.

O ULTEM AM9085F destaca-se notavelmente devido ao seu elevado valor de tensão e rigidez evidente, com uma curva de inclinação pronunciada que sugere uma resistência mecânica significativa e um grau de deformação elevado. Em contraste, materiais como Filaflex 95 A, Poliamida e Tough 1500 tendem a uma maior flexibilidade, com curvas mais suaves que insinuam maior ductilidade.

A Poliamida 12 V, impressa no eixo ZX, e a Poliamida 12 H, impressa no eixo XY apresentam comportamentos distintos devido às diferentes orientações de impressão. Verifica-se um módulo de elasticidade semelhante, no entanto o material Poliamida 12 H apresenta um melhor comportamento à flexão, que se traduz nos valores de tensão, 65,85 Mpa, e deformação superiores até ao momento da rotura.

Materiais como o PLA e PAHT CF15 mostraram um comportamento mais rígido, possuindo um declive linear na fase elástica superior a todos os outros materiais.

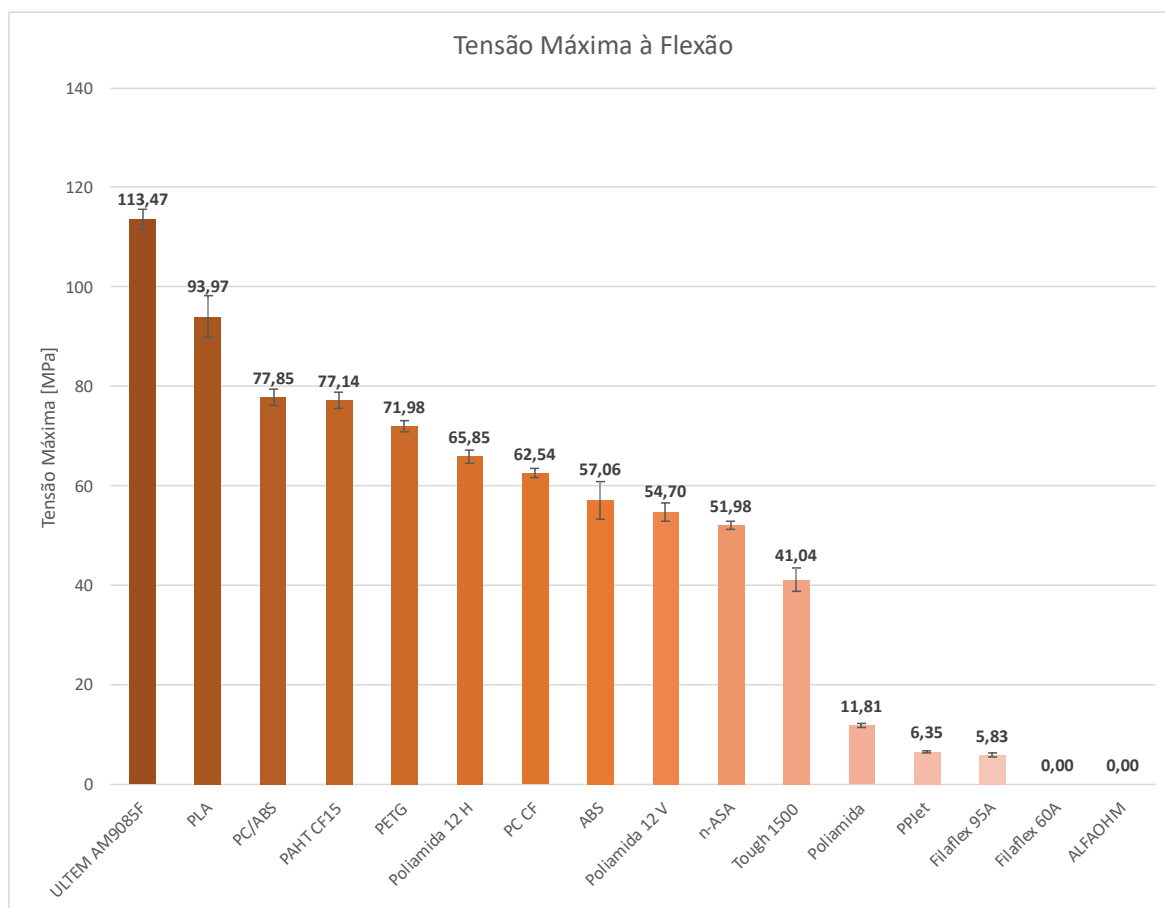


Figura 72 -Gráfico de barras relativo à tensão máxima à flexão e respectivos desvios padrão.

Através do gráfico de barras presente na Figura 72, relativo à tensão máxima à flexão foi possível observar quantitativamente o seguinte:

Como previamente observado no gráfico tensão-deformação, o material ULTEM AM9085F apresenta uma tensão máxima superior aos outros materiais, com um valor de 113,47 MPa. Isso reforça a ideia de que este material é um polímero de alto desempenho em termos mecânicos. No entanto, a sua ductilidade não é tão elevada quanto outros materiais, como por exemplo o Tough 1500.

Materiais como PLA, PC/ABS, PAHT CF15 e PETG apresentam tensões máximas médias que são notavelmente mais altas do que alguns dos outros materiais estudados, mas ainda assim inferiores ao ULTEM AM9085F.

O Filaflex 95, confirmado pelo seu desempenho neste gráfico, é claramente um material de natureza extremamente flexível com uma tensão máxima média mais baixa no valor de 5,83 MPa.

A análise subsequente do módulo de elasticidade presente na Figura 73, fornece um panorama mais quantitativo relativamente à rigidez dos materiais.

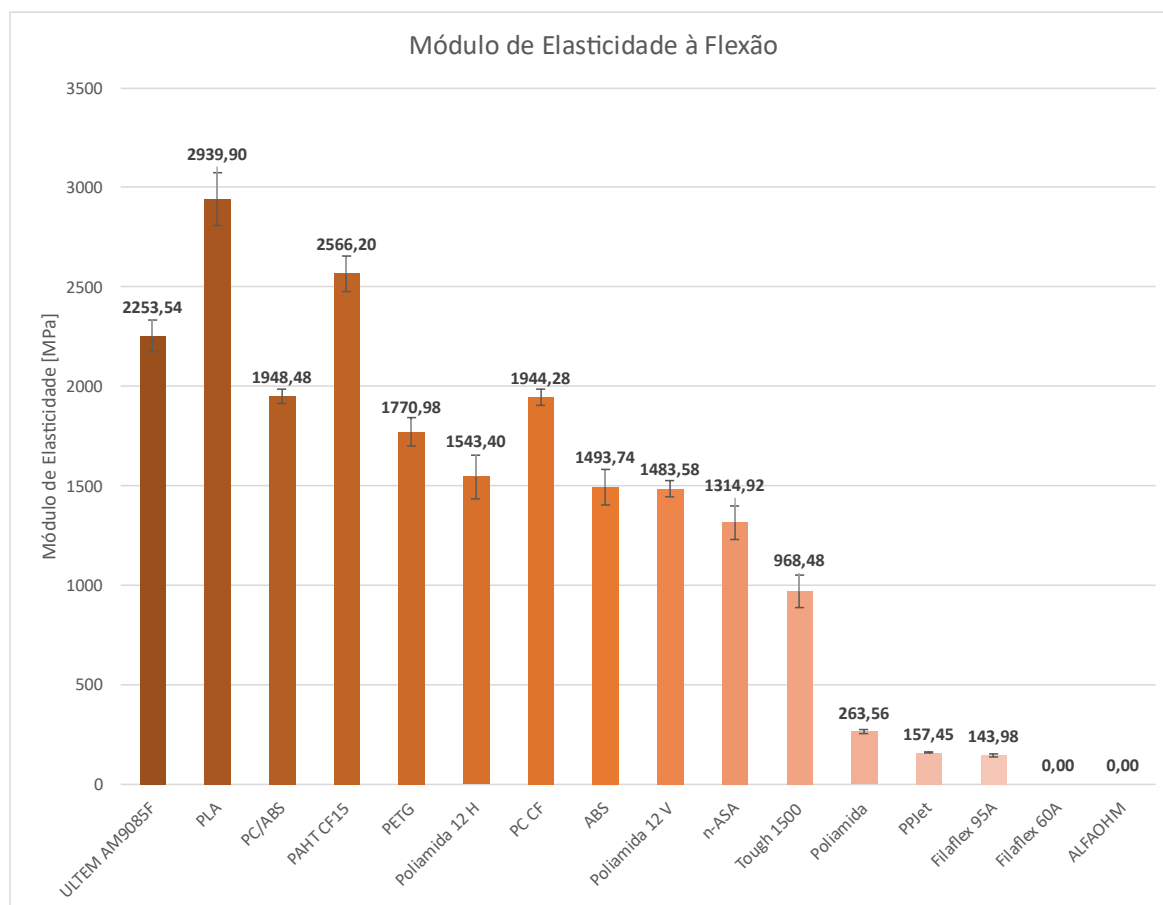


Figura 73 - Gráfico de barras relativo ao módulo de elasticidade à flexão e respectivos desvios padrão.

No que concerne ao módulo de elasticidade, o PLA registou o maior valor, evidenciando-se com 2939,90 MPa, o que demonstra a sua elevada rigidez e resistência à deformação elástica. O ULTEM AM9085F, por sua vez, apresentou o terceiro maior valor neste parâmetro, indicando também uma performance notável, embora não tão destacada quanto alguns dos outros materiais ensaiados. Estes resultados são coerentes com as observações anteriores sobre as propriedades mecânicas destes materiais.

Mais uma vez, observa-se que alguns materiais, como PLA, têm desvios padrão mais elevados. A variação no módulo de elasticidade entre os diferentes provetes pode ser devido a fatores como imperfeições internas (bolhas de ar ou porosidades), variações no desempenho da impressora.

Filaflex 95 A possui o módulo de elasticidade mais baixo de todos os materiais, 143,98 MPa, confirmando sua natureza extremamente flexível referida anteriormente.

Na Figura 74 é apresentado um resultado geral dos provetes após ensaio de flexão.

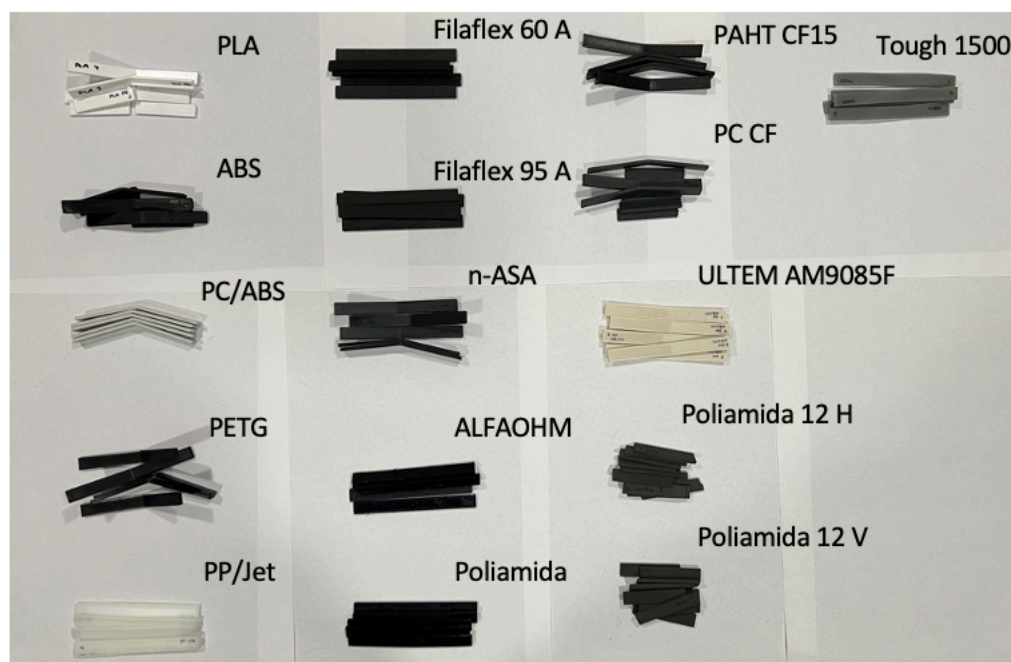


Figura 74 - Resultado dos provetes após ensaio de flexão

Todos os gráficos tensão-deformação relativos à obtenção dos valores válidos para o módulo de elasticidade à flexão encontram-se presentes no Apêndice C.

No estudo e aplicação de materiais plásticos, é frequentemente considerado que o valor de tensão mais crítico é o da tensão do limite elástico. Esta premissa assenta na ideia fundamental de que, na maioria das aplicações práticas destes materiais, é imperativo evitar a deformação plástica. Ou seja, é crucial que o material retorne à sua forma original após a remoção da carga aplicada, sem sofrer deformações residuais.

Contudo, é importante salientar que, no âmbito desta dissertação, a tensão de limite elástico não foi determinada explicitamente. A razão para esta decisão prende-se com a complexidade inerente à análise individual de cada um dos 150 ensaios realizados. Seria um processo moroso e exigente em termos de tratamento de dados determinar com precisão este valor para cada provete. Assim, optou-se por uma abordagem mais pragmática, focando-se exclusivamente no valor de tensão máxima a que os provetes estiveram sujeitos. Esta métrica serve como um indicador robusto da resistência do material, embora não ofereça uma visão completa das suas propriedades elásticas.

4.4. Ensaio de dureza

A dureza Shore D é um indicador importante das propriedades mecânicas de um material, principalmente quando se trata de polímeros. Ela oferece compreensão sobre a resistência do material à penetração e, por extensão, a sua resistência ao desgaste. Comumente, os fabricantes não disponibilizam valores de dureza para os seus materiais, tornando a validação direta dos ensaios uma tarefa complexa.

Os resultados do ensaio presentes na Figura 75 mostram uma ampla variação nas propriedades de dureza dos diferentes materiais.

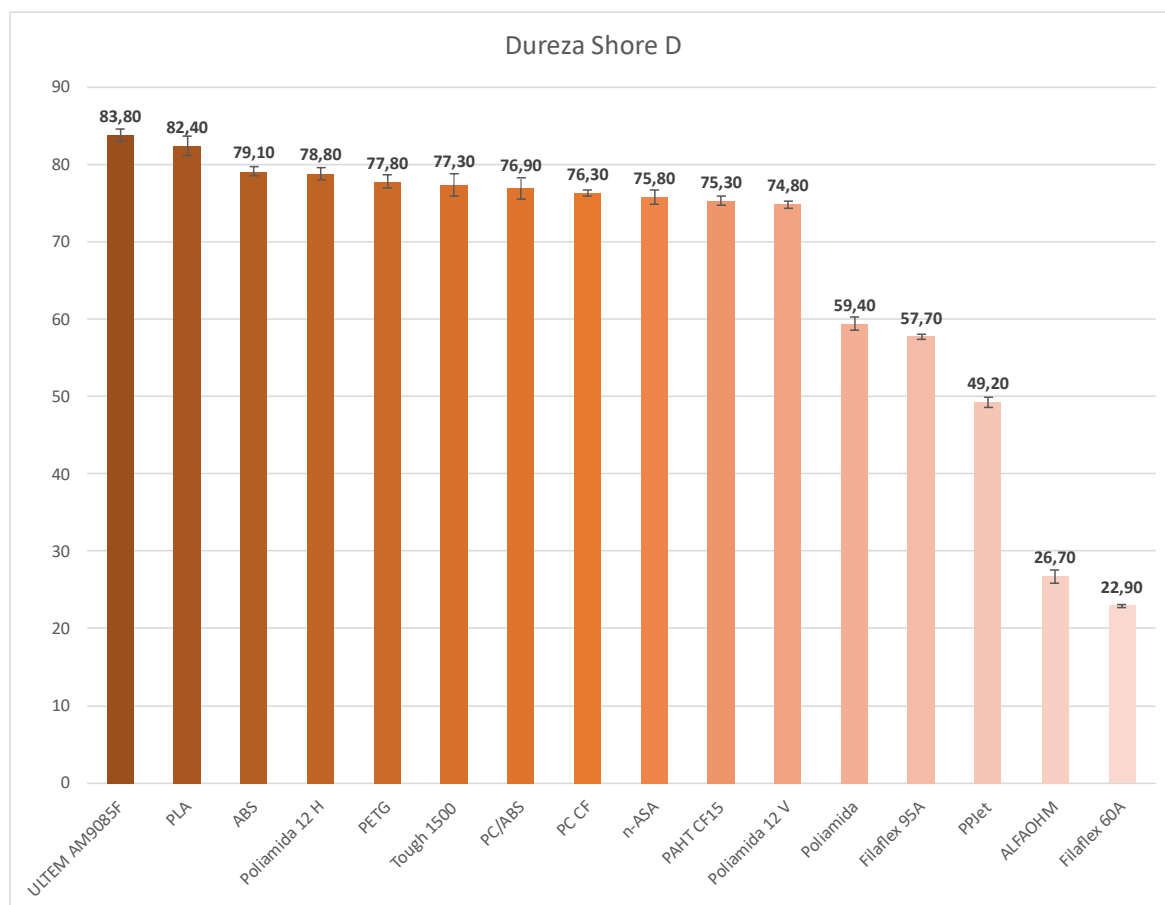


Figura 75 - Resultados obtidos nos ensaios de dureza Shore D.

Materiais como ULTEM AM9085F e PLA apresentam valores de dureza relativamente altos, indicando que esses materiais são mais rígidos e menos propensos a deformação sob carga, o que podem ser indicativo das suas aplicações em ambientes onde a resistência e a durabilidade são críticas. A maioria dos materiais mostrou uma dureza shore D na ordem de 70 e uma consistência razoável entre as diferentes medições (3 segundos, 15 segundos e valor máximo). Esta consistência sugere que os ensaios foram realizados sob condições controladas e que os materiais têm propriedades homogêneas.

Embora o ULTEM AM9085F tenha apresentado uma média máxima de dureza de 83,80, é importante notar que, considerando o valor do desvio padrão mais alto do PLA, o resultado deste último pode ser superior à média do ULTEM AM9085F. Assim, a afirmação de que o ULTEM AM9085F é o material com maior dureza testado deve ser reconsiderada, uma vez que o PLA apresenta um valor competitivo.

O Filaflex 60A e o ALFAOHM, com médias máximas de dureza de 22,90 e 26,70, respectivamente, são claramente materiais mais flexíveis em comparação com outros na lista. Eles podem ser adequados para aplicações onde a flexibilidade e a capacidade de absorção de impacto são desejadas.

O desvio padrão oferece uma percepção sobre a variação nos resultados do ensaio para um material específico. Materiais como Filaflex 60A e Filaflex 95A têm desvios padrões extremamente baixos (0,22 e 0,27, respectivamente), indicando uma elevada consistência nas medições. Por outro lado, materiais como Tough 1500, com um desvio padrão de 1,44, mostram uma variação maior

entre testes, o que pode ser devido a fatores como heterogeneidade do material ou condições de temperatura a que os provetes tenham sido sujeitos antes do ensaio, o que pode ter levado a empenos indesejados.

É fundamental reconhecer a componente visual dos ensaios de dureza. Esta característica pode, por si só, introduzir variações, dado que a interpretação visual pode ser influenciada tanto pelo operador como por condições ambientais. Assim, esta natureza subjetiva reforça a necessidade de uma abordagem metódica e uniforme ao conduzir este tipo de ensaios.

4.5. Sobreinjeção

Após definidos os parâmetros de impressão ideais para cada material e realizados ensaios de tração, flexão e dureza foi notória a distinção do material ULTEM AM9085F relativamente aos outros materiais estudados. Este material destacou-se não apenas pela sua capacidade de ser extrudido a 360 °C, mas também pela sua temperatura de deflexão térmica de 175 °C. O ULTEM AM9085F exibiu uma excelente combinação de resistência, traduzido pelos seus valores de tensão máxima obtida no ensaios de tração e flexão, respetivamente 77,77 MPa e 113,47 MPa, e rigidez, apresentando dos maiores valores de módulo de elasticidade à tração e flexão. A acrescentar, foi ainda o material com maior dureza Shore D obtida, no valor de 83,80, indicativo das suas aplicações em ambientes onde a resistência e a durabilidade são críticas.

No entanto, é importante notar que o PLA também demonstrou resultados competitivos em vários dos ensaios realizados. Em comparação global, o ULTEM AM9085F teve uma performance superior, mas o PLA mostrou ser uma alternativa viável, especialmente considerando o seu comportamento mecânico. A seleção final entre estes materiais também considerou as temperaturas envolvidas nos processos e as aplicações pretendidas.

Posto todas as informações recolhidas e propriedades analisadas, procedeu-se à impressão de dois postigos em ULTEM AM9085F, 100% maciços, como aquele observado na Figura 76.



Figura 76 -Postigo impresso em ULTEM 9085F para utilização em sobreinjeção.

Para o processo de sobreinjeção, como referido no capítulo anterior, optou-se por dois materiais com comportamentos distintos: PP PHC31-81, da sabic, injetado à temperatura de 200 °C e Santoprene 8211-55B100, injetado a 180 °C.

Para garantir a eficiência do processo e a qualidade das peças produzidas, otimizou-se o ciclo de injeção, como mostra a Figura 77. Estabeleceu-se um tempo de ciclo total de 30 segundos, dos quais 18 segundos são dedicados exclusivamente ao arrefecimento. Esta otimização visa assegurar que os materiais atinjam as propriedades desejadas e que o postigo impresso mantenha a sua integridade estrutural durante o processo.

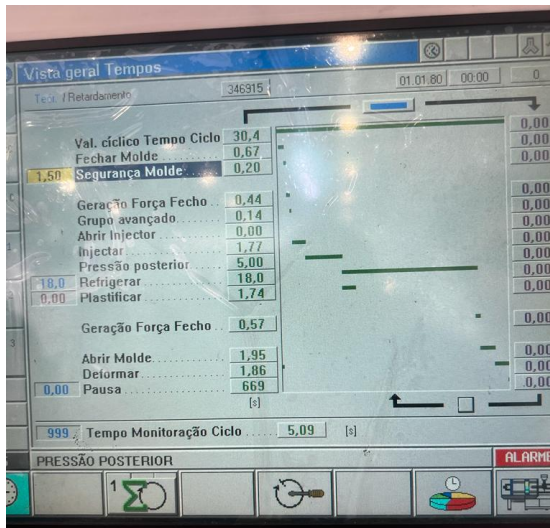


Figura 77 - Visão geral dos tempos otimizados para a injeção.

Durante a injeção, exibida na Figura 78, foi-se verificando uma diferença de temperatura entre o lado do macho (postigos em ULTEM) e o lado da cavidade (aço do molde). De forma a combater esta diferença de temperaturas verificada foi-se aumentando o tempo de arrefecimento durante o ciclo até perfazer o valor de 18 segundos.

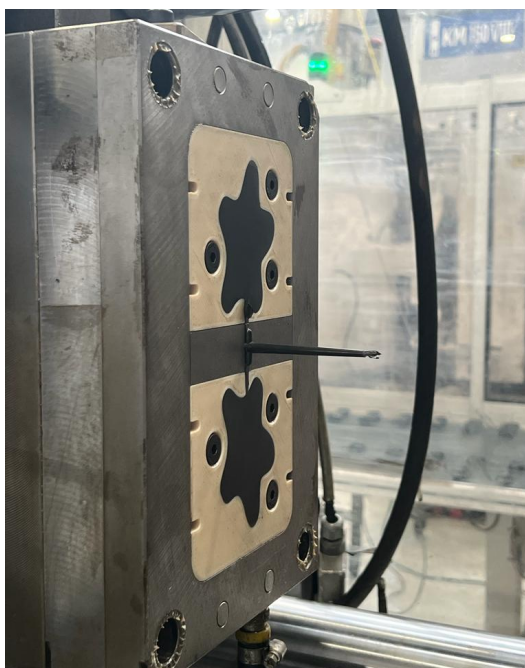


Figura 78 - Peças injetadas ainda com o sistema de alimentação acoplado.

Mesmo após esta solução de dissipação de temperatura, verificou-se uma deformação nas peças injetadas em PP PHC31-81 após saída do molde. Estas empenam devido ao arrefecimento desigual do molde, que se traduziu numa taxa de arrefecimento desigual da própria peça. Na Figura

79 pode-se observar um género de “barriga” na zona central das peças obtidas por injeção indicando um arrefecimento desigual entre os fins de peça e a zona central da mesma.



Figura 79 - Conjunto de peças injetadas em PP PHC31-81.

O mesmo não se verificou aquando da injeção do material Santoprene 8211-55B100. Após diversas injeções, as peças injetadas não evidenciavam qualquer deformação. Isto deveu-se ao facto de o Santoprene 8211-55B100 ser um elastómero com uma estrutura amorfa e tender a ter menos problemas de contração e empenos comparativamente ao PP PHC31-81 que possui uma estrutura semi-cristalina.

O Santoprene 8211-55B100 é por natureza mais flexível e elástico do que o PP PHC31-81. Essa flexibilidade também pode permitir que o material alivie tensões internas mais facilmente, reduzindo a chance de empenos.

Após várias injeções utilizando os postigos, procedeu-se a uma análise do desempenho do ULTEM AM9085F enquanto material do postigo. Numa primeira observação, o postigo parecia ter mantido a sua integridade estrutural sob as condições de temperatura e pressão extremas. Contudo, após uma análise mais detalhada, identificou-se um estrangulamento no sistema de alimentação do postigo, tal como evidenciado na Figura 80.

O design do *runner* e do *gate* foram mal dimensionados e não garantiram um fluxo laminar do material a injetar, que levaram à degradação do postigo na zona de entrada de material.



Figura 80 - Estrangulamento verificado no *runner* e *gate* do postigo.

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo final, procede-se à reflexão sobre o percurso da presente dissertação, consolidando-se os principais pontos discutidos e as descobertas alcançadas. Com o intuito de oferecer uma visão integrada do trabalho desenvolvido, o capítulo organiza-se em duas secções fundamentais: Conclusões Finais, sintetizam-se as descobertas mais relevantes, as implicações práticas e teóricas dos resultados e o seu impacto no domínio do fabrico aditivo e na utilização de materiais de engenharia. Na secção Limitações e Trabalhos Futuros, identificam-se as potenciais limitações observadas ao longo da investigação e sugerem-se direções para futuras investigações, visando a contínua expansão e aprofundamento do conhecimento nesta área. Através deste capítulo, pretende-se encerrar a narrativa da dissertação de forma clara e estruturada.

5.1. Conclusões finais

5.1.1. Parâmetros de impressão

A determinação e otimização dos parâmetros de impressão são essenciais para a impressão 3D, desempenhando um papel determinante na qualidade final e nas propriedades mecânicas dos objetos impressos. A escolha destes parâmetros não é apenas uma questão técnica, mas também estratégica, uma vez que eles devem ser adaptados tanto à tecnologia de impressão escolhida quanto ao material específico utilizado. Para garantir uma avaliação justa e comparativa, os provetes foram impressos em formato maciço nas tecnologias FDM, assegurando assim a uniformidade com outras tecnologias, como SLS e SLA. Esta abordagem uniforme é vital para a integridade dos ensaios, garantindo que as variáveis se mantenham consistentes e que os resultados sejam comparáveis.

No contexto da impressão FDM, o raster angle de 45°/-45° foi selecionado para assegurar propriedades mecânicas consistentes em diferentes direções, promovendo uma resistência isotrópica dos objetos impressos. No entanto, ao explorar outras tecnologias, como SLS e SLA, certas limitações tornam-se aparentes, especialmente quando se compara com a flexibilidade da FDM em termos de ajuste de parâmetros como percentagem de infill.

Uma observação relevante é que, por vezes, os parâmetros ideais identificados através dos ensaios diferem das recomendações padrão dos fabricantes. Esta divergência foi particularmente notória em aspectos como a temperatura de impressão e a temperatura da plataforma. Materiais como ABS, PC/ABS e PETG beneficiaram de temperaturas mais altas dentro da faixa recomendada pelos fabricantes. Além disso, parâmetros como o diâmetro do nozzle e a altura da camada mostraram-se cruciais, com determinados materiais a revelarem preferências claras por configurações específicas. Materiais como Filaflex 60A e 95A, e ULTEM AM9085F destacaram-se, cada um à sua maneira, seja pela sua flexibilidade inerente ou pelas suas propriedades mecânicas únicas.

5.1.2. Ensaios de tração

Os ensaios de tração revelaram-se fundamentais na caracterização profunda das propriedades mecânicas dos materiais analisados. Ao avaliar o comportamento destes sob esforços de tração,

notou-se que cada material apresenta características distintas, tornando-se evidente a sua singularidade. O PLA manifesta-se com o maior módulo de elasticidade registado, posicionando-se como um material altamente rígido, o que significa que é menos propenso a deformações iniciais sob tensão. Em contraste, materiais como Filaflex 60A e ALFAOHM demonstram uma flexibilidade superior e deformações imensas, evidenciando características mecânicas completamente diferentes.

Outro material que merece destaque é o ULTEM AM9085F, que, de forma impressionante, combina alta resistência e boa rigidez, como é evidenciado pelos seus valores de tensão máxima e módulo de elasticidade. Esta combinação de propriedades sugere uma gama ampla de aplicações potenciais onde tanto a resistência quanto a rigidez são críticas.

A velocidade a que os ensaios são realizados também desempenha um papel crucial. Os polímeros, sendo materiais viscoelásticos, podem apresentar comportamentos diferentes a diferentes velocidades de ensaio. Esta natureza requer uma abordagem cuidadosa, evitando generalizações sem ensaios adequados em diversas velocidades. Mais ainda, a orientação de impressão provou ter um impacto substancial nas propriedades mecânicas. Especificamente, a comparação entre as amostras de Poliamida 12 H e Poliamida 12 V ilustra claramente como a direção das camadas impressas pode influenciar a resistência e a rigidez.

No contexto de aplicações práticas, a tensão do limite elástico é frequentemente considerada o valor mais crítico, no entanto, neste estudo, a decisão foi focar na tensão máxima, que, embora não ofereça uma visão completa das propriedades elásticas, serve como um robusto indicador da resistência do material.

5.1.3. Ensaios de flexão

O ensaio de flexão em três pontos fornece perspectivas valiosas sobre o comportamento dos materiais quando submetidos a esforços de flexão. A escolha de uma velocidade de ensaio de 2 mm/min foi meticulosamente tomada, levando em consideração as características intrínsecas dos materiais em estudo. Esta velocidade, em particular, favorece uma avaliação mais representativa da resposta elástica do material, reduzindo possíveis efeitos viscosos.

Nos ensaios realizados, o ULTEM AM9085F apresentou características notáveis em termos de resistência mecânica e resistência à deformação, evidenciado pela sua inclinação pronunciada na curva tensão-deformação. No entanto, quando se analisa especificamente o módulo de elasticidade, o PLA demonstrou superioridade, o que indica a sua elevada rigidez. Em contraste, outros materiais, como Filaflex 95 A, Poliamida e Tough 1500, mostraram maior flexibilidade, com curvas mais suaves que sugerem uma maior ductilidade. Esta variedade no comportamento é ainda mais complexa quando se considera a influência da orientação de impressão. No caso de estudo da Poliamida 12 V e Poliamida 12 H, embora do mesmo material, exibiram propriedades mecânicas distintas devido às suas diferentes orientações de impressão.

No contexto da pesquisa, foi mais uma vez sublinhada a relevância da tensão do limite elástico. Na maioria das aplicações práticas de materiais plásticos, evitar deformações plásticas é vital. Contudo, neste trabalho, a tensão de limite elástico não foi determinada explicitamente devido à complexidade inerente à análise individual de cada ensaio. Em vez disso, a tensão máxima serviu

como um indicador confiável da resistência do material, embora não forneça uma imagem completa de suas propriedades elásticas.

5.1.4. Ensaios de dureza

A avaliação da dureza de materiais poliméricos é uma métrica essencial, frequentemente representada pela dureza Shore D. Este indicador é vital para compreender a resistência do material à penetração e, por extensão, sua resistência ao desgaste. No entanto, um desafio inerente nesta avaliação é a frequente omissão destes valores pelos fabricantes, o que torna a validação direta dos ensaios uma tarefa complexa.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam variações nas propriedades de dureza entre os diferentes materiais avaliados. O ULTEM AM9085F, com uma dureza Shore D média máxima de 83,80, destaca-se como um dos materiais mais rígidos testados. Contudo, é crucial salientar que, ao considerar o valor do desvio padrão mais alto do PLA, a dureza deste material pode, em certas circunstâncias, superar a média do ULTEM AM9085F. Portanto, embora o ULTEM se destaque, o PLA apresenta-se como um material altamente competitivo em termos de dureza.

Por outro lado, materiais como Filaflex 60A e ALFAOHM demonstraram ser mais flexíveis, com médias máximas de dureza de 22,90 e 26,70, respectivamente. Esta característica pode indicar uma propensão maior para aplicações que necessitem de flexibilidade e absorção de impacto.

Um aspeto crucial a considerar é a componente visual inerente aos ensaios de dureza. A natureza subjetiva desta avaliação reforça a necessidade de uma abordagem metodológica rigorosa e padronizada, de forma a minimizar variações devido a interpretações visuais.

5.1.5. Sobreinjeção

A sobreinjeção é um processo que exige precisão e um conhecimento profundo dos materiais envolvidos. Ao longo desta pesquisa, o ULTEM AM9085F destacou-se, demonstrando notáveis propriedades mecânicas, resistência térmica e uma temperatura de extrusão significativamente elevada. Em contraste, o PLA também se mostrou promissor em termos de propriedades mecânicas, posicionando-se como uma alternativa viável. No entanto, a seleção final inclinou-se para o ULTEM AM9085F, considerando as temperaturas envolvidas nos processos. Este polímero de engenharia foi identificado como um candidato ideal para postigos, graças à sua elevada resistência, rigidez e dureza Shore D, indicando a sua aplicabilidade em ambientes que exigem durabilidade e robustez.

A decisão de avançar com o ULTEM AM9085F foi seguida pela impressão de dois postigos maciços, preparando-os para o processo de sobreinjeção de dois materiais distintos: o PP PHC31-81 e o Santoprene 8211-55B100. A otimização do ciclo de injeção foi crucial para assegurar a integridade do postigo durante todo o processo e garantir que tanto o postigo impresso quanto o material injetado alcancem suas propriedades ideais.

Contudo, o processo não esteve isento de desafios. Durante a injeção, uma discrepância nas temperaturas entre o postigo e o molde foi observada. Apesar de medidas tomadas para equilibrar essa diferença, as peças injetadas com PP PHC31-81 mostraram deformações após o processo,

especificamente um empeno notável. Este empeno, possivelmente resultante do arrefecimento desigual e da natureza semi-cristalina do PP, apresentou-se como um desafio a ser superado.

O Santoprene 8211-55B100 provou ser mais resistente a tais problemas. As peças injetadas com este material não mostraram deformações evidentes, possivelmente devido à sua capacidade de aliviar tensões internas e contrair de maneira mais uniforme.

Após várias injeções, uma análise mais detalhada do postigo ULTEM AM9085F revelou um estrangulamento no sistema de alimentação que levou à degradação do postigo na zona de entrada do material, indicando a necessidade de ajustes no design para futuras iterações.

O estudo do ULTEM AM9085F no contexto da sobreinjeção não só sublinha o seu potencial em aplicações industriais, mas também reforça a necessidade de inovação e adaptação contínua nos processos de injeção, visando sempre a eficiência e qualidade. Com um processo acessível de impressão 3D, materiais de alto desempenho e um molde porta-machos/porta-cavidades, é possível injetar tanto peças de baixa cadência como peças protótipo. Esta combinação de processos pode ser uma solução para produzir protótipos funcionais com a matéria prima especificada para a fase série das peças, com custos muito mais reduzidos

5.2. Limitações e trabalhos futuros

No decorrer deste estudo, observou-se a relevância dos parâmetros de impressão na definição das propriedades dos objetos impressos. Contudo, reconhece-se que a investigação realizada, apesar de extensa, não teve em conta combinações possíveis de parâmetros devido à busca pela uniformidade entre tecnologias distintas de impressão, como FDM, SLS e SLA, assim sendo, levanta a questão de todas as capacidades inerentes a cada tecnologia não foram efetivamente contempladas. Adicionalmente, as discrepâncias identificadas entre os parâmetros tidos como ideais e as recomendações dos fabricantes suscitam dúvidas sobre a sua generalização para todos os cenários ou equipamentos. No que concerne aos ensaios realizados, embora abrangentes, pondera-se se cobrem de facto todas as situações e variações em que os materiais poderiam ser aplicados. Por fim, relativamente à sobreinjeção, as observações relativas à integridade dos postigos foram específicas às condições deste trabalho, levantando questões sobre a sua validade em diferentes contextos ou com distintos materiais de postigo.

Face ao exposto, propõe-se para trabalhos futuros uma exploração mais aprofundada de parâmetros de impressão, procurando compreender todas as suas particularidades. Tornar-se-ia enriquecedor comparar diferentes equipamentos de impressão, percebendo o impacto que distintas marcas ou modelos podem ter nos resultados finais, mesmo quando se utilizam parâmetros idênticos. Há ainda uma clara necessidade de se realizarem estudos de longa duração, focados na durabilidade dos materiais impressos em diversos contextos ambientais. A sobreinjeção, em particular com materiais que levantaram desafios como o PP PHC31-81, merece uma análise mais detalhada e focada. Finalmente, a otimização do design, especialmente no que diz respeito ao *runner* e ao *gate*, poderia potencialmente maximizar a eficiência do processo de sobreinjeção e assegurar a integridade dos postigos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Simoldes Plásticos, «Colaborador(a) GRUPO SIMOLDES DIVISÃO PLÁSTICOS».
- [2] «Sobre a Simoldes Plastics». <https://www.simoldes.com/plastics/empresa/> (acedido 3 de Abril de 2023).
- [3] M. Freitas, «SIMOLDES Plásticos», *COMPETE 2020*, 2018. https://www.compete2020.gov.pt/noticias/detalhe/NL_SIMOLDES_Plasticos (acedido 3 de Abril de 2023).
- [4] ISO/ASTM International, «ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles and Terminology», *International Standard*, vol. 5, n. 978-84-9042-335-6, pp. 1-26, 2015, [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:69669:en%0Ahttps://www.iso.org/standard/69669.html%0Ahttps://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm>
- [5] A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*. 2011. doi: 10.3139/9783446431621.
- [6] T. Wohlers e O. Diegel, «Wohlers Report 2017 Service Provider Survey Results», n. July, pp. 1-26, 2017.
- [7] W. HUANG *et al.*, «Various Types and Applications of Additive Manufacturing», *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, n. ammsso, pp. 377-381, 2019, doi: 10.12783/dtcse/ammsso2019/30160.
- [8] S. K. Parupelli e S. Desai, «A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential», *Am J Appl Sci*, vol. 16, n. 8, pp. 244-272, 2019, doi: 10.3844/ajassp.2019.244.272.
- [9] A. Agarwal e S. Khavnekar, «Additive Manufacturing — The Next Industrial Revolution?» [Em linha]. Disponível em: <https://www.aranca.com/knowledge-library/blogs-and-opinions/business-research/additive-manufacturing-the-next-industrial-revolution>
- [10] N. Shahrubudin, T. C. Lee, e R. Ramlan, «An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications», *Procedia Manuf*, vol. 35, pp. 1286-1296, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [11] Petch Michael, «What is the future of 3D printing? 80 additive manufacturing experts forecast 3D printing trends for 2023 - 3D Printing Industry». <https://3dprintingindustry.com/news/what-is-the-future-of-3d-printing-80-additive-manufacturing-experts-forecast-3d-printing-trends-for-2023-220261/> (acedido 25 de Maio de 2023).
- [12] M. Petch, «100 3D PRINTING EXPERTS PREDICT THE FUTURE OF 3D PRINTING IN 2030». <https://3dprintingindustry.com/news/100-3d-printing-experts-predict-the-future-of-3d-printing-in-2030-167623/>
- [13] A. Razavykia, E. Brusa, C. Delprete, e R. Yavari, «An overview of additive manufacturing technologies-A review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting», *Materials*, vol. 13, n. 17, pp. 1-22, 2020, doi: 10.3390/ma13173895.
- [14] «What is 3D printing?», [Em linha]. Disponível em: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing>
- [15] F. Wang *et al.*, «Fabrication and Characterization of PCL/HA Filament as a 3D Printing Material Using Thermal Extrusion Technology for Bone Tissue Engineering», *Polymers (Basel)*, vol. 14, n. 4, Fev. 2022, doi: 10.3390/POLYM14040669.
- [16] All3DP, «The Types of 3D Printing Technology of 2021», [Em linha]. Disponível em: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [17] D. Syrlybayev, B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen, e D. Talamona, «Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review», *Polymers 2021, Vol. 13, Page 1587*, vol. 13, n. 10, p. 1587, Mai. 2021, doi: 10.3390/POLYM13101587.

- [18] A. Khecho, S. A. Ghaffari, M. Behzadnasab, e M. Rahmat, «Role of Mixing Method and Solid Content on Printability of Alumina Inks for Stereolithography 3D Printing Process», *International Journal of Engineering*, vol. 35, n. 03, pp. 580–586, 2022, doi: 10.5829/ije.2022.35.03c.11.
- [19] G. González *et al.*, «Materials testing for the development of biocompatible devices through vat-polymerization 3d printing», *Nanomaterials*, vol. 10, n. 9, pp. 1–13, Set. 2020, doi: 10.3390/nano10091788.
- [20] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, e R. Mülhaupt, «Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing», *Chemical Reviews*, vol. 117, n. 15. American Chemical Society, pp. 10212–10290, 9 de Agosto de 2017. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [21] M.-S. Pham, B. Dovggy, P. A. Hooper, C. M. Gourlay, e A. Piglione, «The role of side-branching in microstructure development in laser powder-bed fusion», doi: 10.1038/s41467-020-14453-3.
- [22] L. Zárbynická, J. Petrů, P. Krpec, e M. Pagáč, «Effect of Additives and Print Orientation on the Properties of Laser Sintering-Printed Polyamide 12 Components», *Polymers 2022, Vol. 14, Page 1172*, vol. 14, n. 6, p. 1172, Mar. 2022, doi: 10.3390/POLYM14061172.
- [23] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integr Mater Manuf Innov*, vol. 5, n. 1, pp. 16–40, Dez. 2016, doi: 10.1186/S40192-016-0045-4/TABLES/3.
- [24] S. Tyagi, A. Yadav, e S. Deshmukh, «Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process», *Mater Today Proc*, vol. 51, pp. 1012–1016, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.07.073.
- [25] M. Rafiee, R. D. Farahani, e D. Theriault, «Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey», *Advanced Science*, vol. 7, n. 12, Jun. 2020, doi: 10.1002/ADVS.201902307.
- [26] B. Msallem, N. Sharma, S. Cao, F. S. Halbeisen, H. F. Zeilhofer, e F. M. Thieringer, «Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ printing technology», *J Clin Med*, vol. 9, n. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/jcm9030817.
- [27] M. Ziaee e N. B. Crane, «Binder jetting: A review of process, materials, and methods», *Addit Manuf*, vol. 28, pp. 781–801, Ago. 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.05.031.
- [28] M. Ziaee e N. B. Crane, «Binder jetting: A review of process, materials, and methods», *Addit Manuf*, vol. 28, pp. 781–801, Ago. 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.05.031.
- [29] M. Lalegani Dezaki *et al.*, «A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process», *Advanced Powder Materials*, vol. 1, n. 4, p. 100054, Out. 2022, doi: 10.1016/J.APMATE.2022.100054.
- [30] M. P. Paranthaman *et al.*, «Binder Jetting: A Novel NdFeB Bonded Magnet Fabrication Process», *JOM*, vol. 68, n. 7, pp. 1978–1982, Jul. 2016, doi: 10.1007/S11837-016-1883-4/FIGURES/5.
- [31] Q. Zeng, Y. Tian, Z. Xu, e Y. Qin, «Simulation of thermal behaviours and powder flow for direct laser metal deposition process», *MATEC Web of Conferences*, vol. 190, p. 2001, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819002001.
- [32] S. Jasveer e X. Jianbin, «Comparison of Different Types of 3D Printing Technologies», *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 8, n. 4, 2018, doi: 10.29322/IJSRP.8.4.2018.p7602.
- [33] «What is Sheet Lamination?».
- [34] M. H. M. Nasir, M. M. Taha, N. Razali, R. A. Ilyas, V. F. Knight, e M. N. F. Norrrahim, «Effect of Chemical Treatment of Sugar Palm Fibre on Rheological and Thermal Properties of the PLA Composites Filament for FDM 3D Printing», *Materials 2022, Vol. 15, Page 8082*, vol. 15, n. 22, p. 8082, Nov. 2022, doi: 10.3390/MA15228082.

- [35] J. Quodbach *et al.*, «Quality of FDM 3D Printed Medicines for Pediatrics: Considerations for Formulation Development, Filament Extrusion, Printing Process and Printer Design», *Ther Innov Regul Sci*, vol. 56, pp. 910–928, 2022, doi: 10.1007/s43441-021-00354-0.
- [36] B. Redwood, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 2017.
- [37] «3D Printing Metal End-use Part Applications - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing». <https://3dprint.com/252271/3d-printing-metal-end-use-part-applications/> (acedido 18 de Setembro de 2023).
- [38] T. Wakimoto, R. Takamori, S. Eguchi, e H. Tanaka, «Growable robot with ‘additive-additive-manufacturing’», *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, vol. 2018-April, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1145/3170427.3188449.
- [39] I. Karakurt e L. Lin, «3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing», *Curr Opin Chem Eng*, vol. 28, pp. 134–143, 2020, doi: 10.1016/j.coche.2020.04.001.
- [40] «WHAT ARE 3D PRINTED MATERIALS AND HOW ARE THEY USED?» <https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/>
- [41] «Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties». <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>
- [42] J. Prusa, *Basics of 3D Printing with Josef Prusa*.
- [43] A. Das *et al.*, «Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers», *Addit Manuf*, vol. 34, n. April, p. 101218, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101218.
- [44] A. Dey e N. Yodo, «A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics», *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, n. 3, 2019, doi: 10.3390/jmmp3030064.
- [45] «ASA vs ABS: Finding the right 3D printing filament». <https://www.wevolver.com/article/asa-vs-abs-finding-the-right-3d-printing-filament> (acedido 21 de Julho de 2023).
- [46] L. Musa *et al.*, «A review on the potential of polylactic acid based thermoplastic elastomer as filament material for fused deposition modelling», *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2841–2858, Set. 2022, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.08.057.
- [47] T. M. Joseph *et al.*, «3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2023 125:3, vol. 125, n. 3, pp. 1015–1035, Jan. 2023, doi: 10.1007/S00170-022-10795-Y.
- [48] «3D Printer Filament Comparison | MatterHackers». <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare> (acedido 22 de Julho de 2023).
- [49] «What is PETG? (Everything You Need To Know) - TWI». <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg#HowisitMade> (acedido 22 de Julho de 2023).
- [50] «Sci-Hub | Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: A focused review. European Polymer Journal, 147, 110295 | 10.1016/j.eurpolymj.2021.110295». <https://sci-hub.st/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110295> (acedido 23 de Julho de 2023).
- [51] S. Kobenko, D. Dejus, J. Jatnieks, D. Pazars, e T. Glaskova-Kuzmina, «Structural Integrity of the Aircraft Interior Spare Parts Produced by Additive Manufacturing», *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 1538, vol. 14, n. 8, p. 1538, Abr. 2022, doi: 10.3390/POLYM14081538.
- [52] «All About Nylon 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition | Xometry». <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/nylon-3d-printing-filament/> (acedido 23 de Julho de 2023).
- [53] «Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Polycarbonate». <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polycarbonate/> (acedido 25 de Julho de 2023).

- [54] «All You Need to Know About TPU for 3D Printing - 3Dnatives». <https://www.3dnatives.com/en/tpu-3d-printing-040620204/#!> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [55] «3D Printing with TPU - NinjaTek». <https://ninjatek.com/learn/3d-printing-materials/tpu/> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [56] «Using soluble 3D printer filament to build support structures». <https://www.bcn3d.com/using-soluble-3d-printer-filament-to-build-support-structures/> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [57] «Common Soluble Support Issues In Large Format 3D Printing». <https://www.3dplatform.com/Blog/2018/December/3D-Printing-Tech-Tips-Soluble-Support-Structures> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [58] «Composite materials (filled with carbon, kevlar or glass) | Prusa Knowledge Base». https://help.prusa3d.com/article/composite-materials-filled-with-carbon-kevlar-or-glass_167387 (acedido 26 de Julho de 2023).
- [59] «3D Printing:Carbon Fibre | 3D Prototyping». <https://3dprototyping.com.au/3d-printing-carbon-fibre> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [60] «3D Printing Carbon Fiber and Other Composites». <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites> (acedido 26 de Julho de 2023).
- [61] «Not Sticking to the Bed | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/not-sticking-to-the-bed/> (acedido 27 de Julho de 2023).
- [62] «Under-Extrusion | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/under-extrusion/> (acedido 29 de Julho de 2023).
- [63] «How to fix under extrusion: Maintenance and print settings». <https://www.wevolver.com/article/how-to-fix-under-extrusion-maintenance-and-print-settings> (acedido 29 de Julho de 2023).
- [64] «Over-Extrusion | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/over-extrusion/> (acedido 30 de Julho de 2023).
- [65] «How to Fix Over Extrusion on Your 3d Prints — Nikko Industries». <https://www.nikkoindustries.com/blogs/news/how-to-fix-over-extrusion-on-your-3d-prints> (acedido 30 de Julho de 2023).
- [66] «Stringing or Oozing | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/stringing-or-oozing/> (acedido 30 de Julho de 2023).
- [67] «5 Ways How to Fix Stringing & Oozing in Your 3D Prints – 3D Printerly». <https://3dprinterly.com/how-to-fix-stringing-oozing-in-your-3d-prints/> (acedido 31 de Julho de 2023).
- [68] «Overheating | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/overheating/> (acedido 1 de Agosto de 2023).
- [69] «Can 3D Printers Overheat? How to Fix Overheating in 3D Printing – 3D Printerly». <https://3dprinterly.com/can-3d-printers-overheat-how-to-fix-overheating-motors-more/> (acedido 2 de Agosto de 2023).
- [70] «Layer Separation and Splitting | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/layer-separation-and-splitting/> (acedido 3 de Agosto de 2023).
- [71] «3D Printing Layer Separation Fix (Bad Layer Adhesion)! – 3D Solved». <https://3dsolved.com/3d-printing-layer-separation-fix/> (acedido 5 de Agosto de 2023).
- [72] «Gaps Between Infill and Outline | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/gaps-between-infill-and-outline/> (acedido 5 de Agosto de 2023).

- [73] «7 Common 3D Printing Problems With Solutions». <https://additive-x.com/blog/7-common-3d-printing-problems-with-solutions/> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [74] «Infill settings». <https://support.makerbot.com/s/article/1667411002588> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [75] «Warping | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/warping/> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [76] «Prevent Warping - You Can Do It». <https://www.3djake.com/info/guide/prevent-warping-you-can-do-it> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [77] «Poor Bridging | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/poor-bridging/> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [78] «Avoid & Fix Poor Bridging in 3D Printing | Settings & Test». <https://the3dprinterbee.com/bridging-3d-printing/> (acedido 6 de Agosto de 2023).
- [79] I. Karakurt e L. Lin, «3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing», *Curr Opin Chem Eng*, vol. 28, pp. 134–143, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.COCH.2020.04.001.
- [80] N. Y. Z. Ng, R. H. Abdul Haq, O. M. F. Marwah, F. H. Ho, e S. Adzila, «Optimization of polyvinyl alcohol (PVA) support parameters for fused deposition modelling (FDM) by using design of experiments (DOE)», *Mater Today Proc*, vol. 57, pp. 1226–1234, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.046.
- [81] A. Mathew *et al.*, «Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts», *Progress in Additive Manufacturing*, pp. 1–18, Mar. 2023, doi: 10.1007/S40964-022-00391-7/FIGURES/2.
- [82] J. Hiemenz e I. Stratasys, «3D PRINTING WITH FDM: How it Works».
- [83] «The 3D Printing Waste Problem», <https://www.filamentive.com/>, Acedido: 7 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.filamentive.com/the-3d-printing-waste-problem/>
- [84] «How bad is water soluble support filament for 3D printing to the environment? - Quora». <https://www.quora.com/How-bad-is-water-soluble-support-filament-for-3D-printing-to-the-environment> (acedido 7 de Agosto de 2023).
- [85] «3D print post-processing steps: supports, sanding, smoothing, more». <https://www.wevolver.com/article/3d-print-post-processing-steps-supports-sanding-smoothing-more> (acedido 7 de Agosto de 2023).
- [86] «3D Print Post Processing - Ultimate Guide - 16 Ways». <https://bigrep.com/post-processing/> (acedido 8 de Agosto de 2023).
- [87] «(PDF) Post Processing Methods in Fused Deposition Modelling -A Review». https://www.researchgate.net/publication/355096251_Post_Processing_Methods_in_Fused_Deposition_Modelling_-_A_Review (acedido 9 de Agosto de 2023).
- [88] «Bonding and Gluing 3D Printing | Objective 3D». <https://www.objective3d.com.au/solutions/finishing-processes/bonding-and-gluing/> (acedido 8 de Agosto de 2023).
- [89] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N. H. Mallaya, e S. R. Siddharth, «Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA», *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 123, p. 104764, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JMBBM.2021.104764.
- [90] «FDM Printing Post Processing and Curing Methods - TheMechNinja». <https://themechninja.com/08/fdm-printing-post-processing-and-curing-methods/> (acedido 12 de Agosto de 2023).
- [91] «3D Printing Post-Processing: PLA, PETG, ABS & More | All3DP». https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/#google_vignette (acedido 12 de Agosto de 2023).
- [92] T. Kuhlman e J. Farrington, «What is Sustainability?», *Sustainability 2010, Vol. 2, Pages 3436-3448*, vol. 2, n. 11, pp. 3436–3448, Nov. 2010, doi: 10.3390/SU2113436.

- [93] L. Suárez e M. Domínguez, «Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, n. 3–4, pp. 1267–1279, Fev. 2020, doi: 10.1007/S00170-019-04676-0/METRICS.
- [94] L. Yi *et al.*, «An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment», *Addit Manuf*, vol. 33, p. 101120, Mai. 2020, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101120.
- [95] M. R. M. Saade, A. Yahia, e B. Amor, «How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies», *J Clean Prod*, vol. 244, p. 118803, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118803.
- [96] V. Shanmugam *et al.*, «Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy», *Materials Circular Economy 2020 2:1*, vol. 2, n. 1, pp. 1–11, Nov. 2020, doi: 10.1007/S42824-020-00012-0.
- [97] N. Vidakis, J. D. Kechagias, M. Petousis, F. Vakouftsi, e N. Mountakis, «The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption», <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882>, vol. 38, n. 8, pp. 915–932, 2022, doi: 10.1080/10426914.2022.2105882.
- [98] T. Peng, «Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes», *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 62–67, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.01.055.
- [99] «3D Printing Research at EPA | US EPA». <https://www.epa.gov/chemical-research/3d-printing-research-epa> (acedido 13 de Agosto de 2023).
- [100] H. Lee, D. Bin Kwak, C. Y. Choi, e K. H. Ahn, «Accurate measurements of particle emissions from a three-dimensional printer using a chamber test with a mixer-installed sampling system», *Scientific Reports 2023 13:1*, vol. 13, n. 1, pp. 1–13, Abr. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33538-9.
- [101] «Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing». <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [102] «What is SLS 3D printing?» <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [103] «Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing | Formlabs». <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/> (acedido 14 de Agosto de 2023).
- [104] «What is SLS 3D printing? | Hubs». <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/> (acedido 14 de Agosto de 2023).
- [105] «Diagnosing a print failure (SLS)». https://support.formlabs.com/s/article/Diagnosing-a-print-failure-SLS?language=en_US (acedido 14 de Agosto de 2023).
- [106] M. Doshi, A. Mahale, S. K. Singh, e S. Deshmukh, «Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects», *Mater Today Proc*, vol. 50, pp. 2269–2275, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.10.003.
- [107] «8 rules of SLS 3D printing model orientation – Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers». <https://sinterit.com/blog/sls-technology/sls-3d-printing-orientation/> (acedido 15 de Agosto de 2023).
- [108] «Nozzle diameter and layer height explained». <https://www.wevolver.com/article/nozzle-diameter-and-layer-height-explained> (acedido 16 de Agosto de 2023).
- [109] P. Czyżewski, D. Marciniak, B. Nowinka, M. Borowiak, e M. Bieliński, «Influence of Extruder’s Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products», *Polymers 2022, Vol. 14, Page 356*, vol. 14, n. 2, p. 356, Jan. 2022, doi: 10.3390/POLYM14020356.
- [110] D. Frunzaverde *et al.*, «The Influence of the Printing Temperature and the Filament Color on the Dimensional Accuracy, Tensile Strength, and Friction Performance of FFF-Printed PLA Specimens», *Polymers 2022, Vol. 14, Page 1978*, vol. 14, n. 10, p. 1978, Mai. 2022, doi: 10.3390/POLYM14101978.

- [111] L. R. Carneiro, G. Barbar, L. C. Pereira dos Santos, e A. Zuquete Guarato, «INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA MESA DE IMPRESSÃO 3D NA DUREZA E DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DE AMOSTRAS EM ABS», Out. 2019, doi: 10.26678/ABCM.CREEM2019.CRE2019-0046.
- [112] A. A. Ansari e M. Kamil, «Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process», *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 5462–5468, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.02.137.
- [113] M. Qamar Tanveer, G. Mishra, S. Mishra, e R. Sharma, «Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review», *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 100–108, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.310.
- [114] H. Alzyod e P. Ficzer, «Material-Dependent Effect of Common Printing Parameters on Residual Stress and Warpage Deformation in 3D Printing: A Comprehensive Finite Element Analysis Study», *Polymers (Basel)*, vol. 15, n. 13, p. 2893, Jun. 2023, doi: 10.3390/POLYM15132893.
- [115] P. E. Johnson, J. T. Keane, L. A. Young, e al -, «Mechanical Properties of 3D Printed Polylactic Acid Product for Various Infill Design Parameters: A Review You may also like New Constraints on Pluto's Sputnik Planitia Ice Sheet from a Coupled Reorientation-Climate Model», doi: 10.1088/1742-6596/1569/4/042010.
- [116] «Infill Pattern Basics | Simplify3D Software». <https://www.simplify3d.com/resources/videos/infill-pattern-basics/> (acedido 18 de Agosto de 2023).
- [117] S. H. Masood, «Advances in Fused Deposition Modeling», *Comprehensive Materials Processing*, vol. 10, pp. 69–91, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01002-5.
- [118] Z. Liu, Q. Lei, e S. Xing, «Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM», *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, n. 5, pp. 3741–3751, Set. 2019, doi: 10.1016/J.JMRT.2019.06.034.
- [119] M. R. Khosravani, F. Berto, M. R. Ayatollahi, e T. Reinicke, «Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds», *Scientific Reports 2022 12:1*, vol. 12, n. 1, pp. 1–9, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-05005-4.
- [120] S. Gupta e A. Bit, «Rapid prototyping for polymeric gels», *Polymeric Gels*, pp. 397–439, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102179-8.00016-8.
- [121] S. R. Rajpurohit e H. K. Dave, «Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, n. 5–8, pp. 1525–1536, Abr. 2019, doi: 10.1007/S00170-018-3047-X/METRICS.
- [122] «Understanding Refresh Rate in SLS 3D Printing | Formlabs». <https://formlabs.com/blog/refresh-rate-sls-3d-printing/> (acedido 18 de Agosto de 2023).
- [123] T. Pereira, J. V. Kennedy, e J. Potgieter, «A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job», *Procedia Manuf*, vol. 30, pp. 11–18, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.003.
- [124] M. Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing», *Bus Horiz*, vol. 60, n. 5, pp. 677–688, Set. 2017, doi: 10.1016/J.BUSHOR.2017.05.011.
- [125] S. S. Murugan, «Mechanical Properties of Materials: Definition, Testing and Application», *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*, vol. 6, n. 2, pp. 28–38, 2020, doi: 10.20431/2454-9711.0602003.
- [126] «Tensile Test». <https://www.testresources.net/applications/test-types/tensile-test/> (acedido 20 de Agosto de 2023).
- [127] T. Groeneveld e A. Elsea, «Mechanical Testing Methods», *Hydrogen Embrittlement Testing*, pp. 11–11–9, 2009, doi: 10.1520/stp38925s.
- [128] ASM International, «Introduction to Tensile Testing», *Tensile Testing, Second Edition*, pp. 1–13, 2004.

- [129] «Springer Handbook of Materials Measurement Methods», *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, 2006, doi: 10.1007/978-3-540-30300-8.
- [130] A. Shrivastava, «Plastic Properties and Testing», *Introduction to Plastics Engineering*, pp. 49–110, 2018, doi: 10.1016/B978-0-323-39500-7.00003-4.
- [131] «Flexure test | ZwickRoell». <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/flexure-test/> (acedido 22 de Agosto de 2023).
- [132] «What is Flexural Modulus - Definition, Formula, and Units». <https://phizze.com/materials-properties/flexural-modulus.html> (acedido 24 de Agosto de 2023).
- [133] «Flexural Test». <https://www.testresources.net/applications/test-types/flexural-test/> (acedido 22 de Agosto de 2023).
- [134] S. E. E. Profile, «Ensaio Mecânicos», n. September, 2019.
- [135] J. De e S. Coutinho, «MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 1 2005 Metais e ligas metálicas».
- [136] I. M. Meththananda, S. Parker, M. P. Patel, e M. Braden, «The relationship between Shore hardness of elastomeric dental materials and Young's modulus», *Dental Materials*, vol. 25, n. 8, pp. 956–959, Ago. 2009, doi: 10.1016/J.DENTAL.2009.02.001.
- [137] M. I. Mohamed e G. A. Aggag, «Uncertainty evaluation of shore hardness testers», *Measurement*, vol. 33, n. 3, pp. 251–257, Abr. 2003, doi: 10.1016/S0263-2241(02)00087-8.
- [138] P. E. Chatzistergos, D. Allan, N. Chockalingam, e R. Naemi, «Shore hardness is a more representative measurement of bulk tissue biomechanics than of skin biomechanics.», *Med Eng Phys*, vol. 105, p. 103816, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.MEDENGPY.2022.103816.
- [139] «Shore (Durometer) hardness test [SubsTech]». https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test (acedido 25 de Agosto de 2023).
- [140] «ARBURG Practical Guide to Injection Moulding - Google Livros». https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=jQJNDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq= injection+ moulding+ process&ots=TYtZCgilRN&sig=-xyHHTc-TzgXP3kp6dEXOSe1HYk&redir_esc=y#v=onepage&q= injection%20moulding%20process&f=false (acedido 25 de Agosto de 2023).
- [141] S. Ebnesajjad, «Injection Molding», *Fluoroplastics*, pp. 236–281, 2015, doi: 10.1016/B978-1-4557-3197-8.00010-9.
- [142] J. P. Greene, «Injection Molding», *Automotive Plastics and Composites*, pp. 241–254, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818008-2.00019-2.
- [143] N. yang Zhao, J. yuan Lian, P. fei Wang, e Z. bin Xu, «Recent progress in minimizing the warpage and shrinkage deformations by the optimization of process parameters in plastic injection molding: a review», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022 120:1*, vol. 120, n. 1, pp. 85–101, Fev. 2022, doi: 10.1007/S00170-022-08859-0.
- [144] «Injection Molding Process, Defects, Plastic». <https://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding> (acedido 26 de Agosto de 2023).
- [145] L. Zema, G. Loreti, A. Melocchi, A. Maroni, e A. Gazzaniga, «Injection Molding and its application to drug delivery», *Journal of Controlled Release*, vol. 159, n. 3, pp. 324–331, Mai. 2012, doi: 10.1016/J.JCONREL.2012.01.001.
- [146] S. M. S. Mukras, «Experimental-based optimization of injection molding process parameters for short product cycle time», *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/1309209.
- [147] S. R. Vijayakumar e S. Gajendran, «IMPROVEMENT OF OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) IN INJECTION MOULDING PROCESS INDUSTRY», *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, pp. 2278–1684, Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: www.iosrjournals.org

- [148] Plastivision, «Advanced Plastics Used in the Automobile Sector».
<https://www.plastivision.org/blog/8-advanced-plastics-used-in-the-automobile-sector/> (acedido 28 de Agosto de 2023).
- [149] A. Patil, A. Patel, e R. Purohit, «An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications», *Mater Today Proc*, vol. 4, n. 2, pp. 3807–3815, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.02.278.
- [150] H. T. P, B. K. V, P. V I, R. S. G, e M. A. I, «Modern materials for automotive industry», vol. 4, n. 2, 2017, doi: 10.21272/jes.2017.4(2).f8.
- [151] «Injection molding: The manufacturing & design guide».
<https://www.hubs.com/guides/injection-molding/> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [152] «Plastic Injection Molding 101: From Design to Production».
<https://www.plasticcomponents.com/plastic-injection-molding-101> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [153] «Basics of Injection Molding Design | 3D Systems».
<https://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/injection-molding-basics#equipment!> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [154] «Parts of an Injection Mold: Exploring Their Components and Design».
<https://waykenrm.com/blogs/injection-mold-components/> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [155] «What are the principal parts of mould ? -». <https://zetarmold.com/principal-parts-injection-mould/> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [156] «Components of an Injection Mold». <https://news.ewmfg.com/blog/components-of-an-injection-mold> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [157] «Injection Molding Design Guide | RapidDirect Manufacturing».
<https://www.rapiddirect.com/knowledge-base/injection-molding-design-guide/> (acedido 30 de Agosto de 2023).
- [158] «Injection Molding Process, Defects, Plastic».
<https://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding> (acedido 31 de Agosto de 2023).
- [159] «Industries That Use Injection Plastic Molding | Xometry».
<https://www.xometry.com/resources/injection-molding/industries-using-plastic-injection-molding/> (acedido 2 de Setembro de 2023).
- [160] «Sustainability and Plastic Injection Molding in the Automotive Industry | ManufacturingTomorrow».
<https://www.manufacturingtomorrow.com/story/2022/12/sustainability-and-plastic-injection-molding-in-the-automotive-industry/19856/> (acedido 2 de Setembro de 2023).
- [161] «Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality ... - Vannessa Dr Goodship, Bethany Middleton, Ruth Cherrington - Google Livros».
https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=RzROBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA103&dq=injection+molding+consumer+goods&ots=RNURvBR7p&sig=NluqqW_j7_iBaVASuPRCcm7srCM&redir_esc=y#v=onepage&q=injection%20molding%20consumer%20goods&f=false (acedido 2 de Setembro de 2023).
- [162] K. Amellal, C. Tzoganakis, A. Penlidis, e G. L. Rempel, «Injection molding of medical plastics: A review», *Advances in Polymer Technology*, vol. 13, n. 4, pp. 315–322, Dez. 1994, doi: 10.1002/ADV.1994.060130407.
- [163] T. A. Cooper, «Developments in plastic materials and recycling systems for packaging food, beverages and other fast-moving consumer goods», *Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)*, pp. 58–107, Jan. 2013, doi: 10.1533/9780857098979.58.
- [164] C. S. Chen, T. J. Chen, S. C. Chen, e R. D. Chien, «Optimization of the injection molding process for short-fiber-reinforced composites», *Mechanics of Composite Materials*, vol. 47, n. 3, pp. 359–368, Jul. 2011, doi: 10.1007/S11029-011-9214-X/TABLES/7.

- [165] H. K. Ahn, M. S. Huda, M. C. Smith, W. Mulbry, W. F. Schmidt, e J. B. Reeves, «Biodegradability of injection molded bioplastic pots containing polylactic acid and poultry feather fiber», *Bioresour Technol*, vol. 102, n. 7, pp. 4930–4933, Abr. 2011, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2011.01.042.
- [166] R. D. Párizs, D. Török, T. Ageyeva, e J. G. Kovács, «Machine Learning in Injection Molding: An Industry 4.0 Method of Quality Prediction», *Sensors 2022, Vol. 22, Page 2704*, vol. 22, n. 7, p. 2704, Abr. 2022, doi: 10.3390/S22072704.
- [167] J. B. Tranter, P. Refalo, e A. Rochman, «Towards sustainable injection molding of ABS plastic products», *J Manuf Process*, vol. 29, pp. 399–406, Out. 2017, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2017.08.015.
- [168] R. P. K e K. J. G, «Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting», doi: 10.3144/expresspolymlett.2019.77.
- [169] «Original Prusa i3 MK3S+ 3D printer | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa». <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/#specs> (acedido 4 de Setembro de 2023).
- [170] «DeltaWASP 4070 Industrial X Technical Details», Acedido: 4 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: www.3dwasp.com
- [171] «ULTRA 3D PRINTER YOUR TRUSTED PARTNER IN ADDITIVE MANUFACTURING».
- [172] «Form 2: Affordable Desktop SLA 3D Printer | Formlabs». <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/> (acedido 4 de Setembro de 2023).
- [173] «Installation and Usage Instructions Fuse 1 Benchtop Selective Laser Sintering (SLS) 3D printer».
- [174] SABIC, «ULTEM™ FILAMENT AM9085F», 2021.
- [175] ASTM, «Designation: D 638-99 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1».
- [176] ASTM, «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1», doi: 10.1520/D0790-10.
- [177] ASTM, «Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness 1», doi: 10.1520/D2240-15.
- [178] «Form Wash/Form Wash L time settings». https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-Time-Settings?language=en_US (acedido 7 de Setembro de 2023).
- [179] «Form Cure time and temperature settings».
- [180] «MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO SOBRE POSTIÇOS EM MANUFATURA ADITIVA», Acedido: 10 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: www.simoldes.com
- [181] «SABIC® PP_PHC31-81_Global_Technical_Data_Sheet».
- [182] S. F. T. D. GmbH, S. F. Ter Usa, e S. F. Ter Brasil, «THERMOPLASTIC ELASTOMERS». [Em linha]. Disponível em: www.softergroup.com
- [183] «SANTOPRENE™ 8211-55B100-TPV Product Description», 2021. [Em linha]. Disponível em: www.tcpdf.org

APÊNDICE A - DIMENSÕES DOS PROVETES PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO

TRAÇÃO 10kN

1	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,24	12,92	12,9	13,02	3,23	3,25	3,27	3,25	42,315
PLA	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,91	12,92	12,9	12,91	3,23	3,25	3,27	3,25	41,9575
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,1	12,92	12,9	12,973333	3,22	3,26	3,25	3,2433333	42,076844
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,94	12,87	12,88	12,896667	3,24	3,26	3,26	3,2533333	41,957156
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,1	13	13,02	13,04	3,2	3,22	3,21	3,21	41,8584

2	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,97	13	13	12,99	3,16	3,15	3,12	3,1433333	40,8319
ABS	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,94	12,85	12,82	12,87	3,15	3,17	3,15	3,1566667	40,6263
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	3,16	12,98	13	9,7133333	3,16	3,15	3,16	3,1566667	30,661756
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,98	12,96	12,92	12,953333	3,17	3,17	3,16	3,1666667	41,018889
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,01	13,01	12,9	12,973333	3,17	3,17	3,19	3,1766667	41,211956

3	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13	12,97	12,88	12,95	3,15	3,13	3,13	3,1366667	40,619833
PC/ABS	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,96	12,93	12,9	12,93	3,15	3,12	3,14	3,1366667	40,5571
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,01	13	13,03	13,013333	3,15	3,1	3,12	3,1233333	40,644978
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,04	13,04	12,99	13,023333	3,1	3,1	3,1	3,1	40,372333
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,06	12,93	12,9	12,963333	3,11	3,11	3,14	3,12	40,4456

4	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,94	12,92	12,99	12,95	3,29	3,27	3,27	3,2766667	42,432833
PETG	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,97	12,98	12,95	12,966667	3,27	3,27	3,26	3,2666667	42,357778
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,96	12,97	12,96	12,963333	3,26	3,25	3,24	3,25	42,130833
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13	12,97	12,98	12,983333	3,24	3,23	3,22	3,23	41,936167
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,99	12,94	12,93	12,953333	3,27	3,26	3,24	3,2566667	42,184689

5	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,91	12,8	12,79	12,833333	3,19	3,15	3,18	3,1733333	40,724444
PP let	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,87	12,68	12,69	12,746667	3,21	3,2	3,2	3,2033333	40,831822
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,69	12,72	12,75	12,72	3,21	3,21	3,21	3,21	40,8312
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,69	12,65	12,65	12,663333	3,2	3,19	3,19	3,1933333	40,438244
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,68	12,7	12,67	12,683333	3,19	3,19	3,22	3,2	40,586667

6	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,91	12,7	12,88	12,83	3,19	3,16	3,11	3,1533333	40,457267
Filaflex 60A	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,86	12,75	12,77	12,7933333	3,14	3,14	3,08	3,12	39,9152
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,88	12,78	12,74	12,8	3,1	3,11	3,13	3,1133333	39,850667
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,84	12,67	12,63	12,7133333	3,12	3,1	3,11	3,11	39,538467
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,82	12,67	12,68	12,7233333	3,11	3,13	3,16	3,1333333	39,866444

7	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,19	13,19	13,12	13,166667	3,21	3,23	3,21	3,2166667	42,352778
Filaflex 95A	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,21	13,19	13,24	13,2133333	3,2	3,2	3,28	3,2266667	42,635022
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,12	13,12	13,15	13,13	3,23	3,24	3,19	3,22	42,2786
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,27	13,11	13,1	13,16	3,19	3,24	3,26	3,23	42,5068
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,24	13,17	13,22	13,21	3,22	3,24	3,25	3,2366667	42,756367

8	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,93	12,94	12,83	12,9	3,26	3,24	3,21	3,2366667	41,753
n-ASA	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,82	12,82	12,88	12,84	3,29	3,28	3,27	3,28	42,1152
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,93	12,81	12,76	12,8333333	3,3	3,27	3,27	3,28	42,093333
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,1	13,05	13,03	13,06	3,3	3,29	3,36	3,3166667	43,315667
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13	12,99	12,93	12,9733333	3,28	3,28	3,28	3,28	42,552533

9	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,72	12,62	12,63	12,656667	3,23	3,19	3,17	3,1966667	40,459144
ALFAOHM	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,66	12,58	12,63	12,6233333	3,23	3,26	3,15	3,2133333	40,562978
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,89	12,71	12,69	12,7633333	3,2	3,18	3,19	3,19	40,715033
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,72	12,71	12,67	12,7	3,18	3,17	3,19	3,18	40,386
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,59	12,51	12,61	12,57	3,14	3,11	3,04	3,0966667	38,9251

10	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,51	13,28	13,32	13,37	3,14	3,1	3,14	3,1266667	41,803533
Poliamida	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,3	13,18	13,24	13,24	3,17	3,16	3,16	3,1633333	41,882533
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,19	13,21	13,24	13,2133333	3,16	3,16	3,14	3,1533333	41,666044
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,24	13,21	13,18	13,21	3,15	3,12	3,14	3,1366667	41,435367
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,33	13,18	13,24	13,25	3,15	3,18	3,15	3,16	41,87

11	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,03	12,98	13,01	13,006667	3,21	3,23	3,25	3,23	42,011533
PAHT CF15	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,18	13	13	13,06	3,21	3,24	3,21	3,22	42,0532
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,06	13,09	13,04	13,063333	3,17	3,14	3,19	3,166667	41,367222
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,06	13,1	13,11	13,09	3,17	3,16	3,14	3,156667	41,320767
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,14	13,08	13,19	13,136667	3,14	3,14	3,15	3,1433333	41,292922

12	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,99	12,79	12,84	12,873333	3,29	3,26	3,24	3,2633333	42,009978
PC CF	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13	12,83	12,83	12,886667	3,27	3,29	3,29	3,2833333	42,311222
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,88	12,82	12,82	12,84	3,26	3,29	3,28	3,276667	42,0724
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,9	12,86	12,88	12,88	3,29	3,27	3,25	3,27	42,1176
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,96	12,96	12,93	12,95	3,35	3,33	3,39	3,356667	43,468833

13	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,13	13,1	13,04	13,09	3,18	3,12	3,12	3,14	41,1026
ULTEM AM9085F	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,31	13,17	13,26	13,246667	3,12	3,13	3,15	3,1333333	41,506222
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,27	13,06	13,1	13,143333	3,15	3,13	3,13	3,136667	41,226256
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,26	13,32	13,2	13,26	3,13	3,13	3,12	3,126667	41,4596
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,22	13,24	13,2	13,22	3,13	3,13	3,12	3,126667	41,334533

14	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,17	13,08	13,18	13,143333	3,32	3,32	3,32	3,32	43,635867
Poliamida 12 H	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,15	13,16	13,17	13,16	3,36	3,34	3,4	3,366667	44,305333
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,14	13,1	13,2	13,146667	3,27	3,23	3,25	3,25	42,726667
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,12	13,13	13,14	13,13	3,25	3,22	3,28	3,25	42,6725
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,13	13,09	13,14	13,12	3,34	3,33	3,34	3,336667	43,777067

15	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,08	13,09	13,09	13,086667	3,25	3,24	3,22	3,236667	42,357178
Poliamida 12 V	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,02	13,01	13,13	13,053333	3,17	3,21	3,19	3,19	41,640133
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,13	13,1	13,11	13,113333	3,25	3,24	3,24	3,2433333	42,530911
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	13,03	13,08	13,04	13,05	3,19	3,2	3,24	3,21	41,8905
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13	13,02	13,01	13,01	3,15	3,17	3,21	3,176667	41,328433

16	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	13,02	12,85	12,89	12,92	3,23	3,24	3,21	3,226667	41,688533
T1500	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	13,16	12,9	12,88	12,98	3,21	3,24	3,21	3,22	41,7956
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	13,14	12,86	12,98	12,993333	3,22	3,23	3,22	3,2233333	41,881844
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,86	12,84	12,82	12,84	3,23	3,2	3,21	3,2133333	41,2592
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	13,02	12,91	12,91	12,946667	3,23	3,24	3,21	3,226667	41,774578

APÊNDICE A - DIMENSÕES DOS PROJETES PARA O ENSAIO DE FLEXÃO

FLEXÃO 5kN

1	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,65	12,58	12,59	12,606667	3,19	3,26	3,21	3,22	40,593467
PLA	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,85	12,59	12,64	12,693333	3,15	3,2	3,18	3,1766667	40,322489
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,67	12,59	12,81	12,69	3,22	3,23	3,19	3,2133333	40,7772
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,73	12,6	12,7	12,676667	3,21	3,28	3,23	3,24	41,0724
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,72	12,63	12,63	12,66	3,28	3,25	3,24	3,2566667	41,2294

2	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,87	12,88	12,89	12,88	3,12	3,1	3,15	3,1233333	40,228533
ABS	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,61	12,55	12,52	12,56	3,3	3,28	3,27	3,2833333	41,238667
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,74	12,71	12,63	12,693333	3,12	3,1	3,07	3,0966667	39,307022
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,57	12,55	12,54	12,553333	3,12	3,1	3,15	3,1233333	39,208244
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,72	12,61	12,61	12,646667	3,19	3,19	3,1	3,16	39,963467

3	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,75	12,71	12,81	12,756667	3,15	3,18	3,21	3,18	40,5662
PC/ABS	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,73	12,62	12,55	12,633333	3,19	3,2	3,22	3,2033333	40,468778
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,66	12,56	12,53	12,583333	3,15	3,17	3,19	3,17	39,889167
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,64	12,54	12,58	12,586667	3,28	3,2	3,24	3,24	40,7808
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,68	12,66	12,73	12,69	3,25	3,2	3,21	3,22	40,8618

4	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,68	12,64	12,81	12,71	3,29	3,27	3,27	3,2766667	41,646433
PETG	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,6	12,61	12,71	12,64	3,27	3,27	3,26	3,2666667	41,290667
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,68	12,59	12,6	12,623333	3,26	3,25	3,24	3,25	41,025833
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,68	12,64	12,66	12,66	3,24	3,23	3,22	3,23	40,8918
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,67	12,65	12,59	12,636667	3,27	3,26	3,24	3,2566667	41,153411

5	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,43	12,43	12,43	12,43	3,19	3,16	3,13	3,16	39,2788
PPIet	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,38	12,4	12,41	12,396667	3,2	3,21	3,18	3,1966667	39,628011
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,38	12,41	12,4	12,396667	3,25	3,19	3,18	3,2066667	39,751978
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,43	12,38	12,46	12,423333	3,2	3,16	3,16	3,1733333	39,423378
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,42	12,46	12,37	12,416667	3,15	3,18	3,23	3,1866667	39,567778

6	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
Filaflex 60A	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!

7	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,79	12,78	12,75	12,773333	3,19	3,17	3,19	3,1833333	40,661778
Filaflex 95A	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,8	12,85	12,92	12,856667	3,26	3,2	3,2	3,22	41,398467
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,79	12,7	12,84	12,776667	3,19	3,21	3,23	3,21	41,0131
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,75	12,72	12,69	12,72	3,17	3,24	3,19	3,2	40,704
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,72	12,73	12,68	12,71	3,14	3,15	3,19	3,16	40,1636

8	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,87	12,82	12,82	12,836667	3,24	3,23	3,26	3,2433333	41,633589
n-ASA	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,56	12,49	12,56	12,536667	3,36	3,27	3,33	3,32	41,621733
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,75	12,66	12,76	12,723333	3,32	3,31	3,32	3,3166667	42,199056
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,71	12,73	12,78	12,74	3,31	3,21	3,35	3,29	41,9146
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,44	12,35	12,65	12,48	3,2	3,2	3,18	3,1933333	39,8528

9	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
ALFAOHM	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
				#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!

10	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,86	12,84	12,9	12,866667	3,15	3,15	3,13	3,1433333	40,444222
Poliamida	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,8	12,81	12,78	12,796667	3,13	3,11	3,1	3,1133333	39,840289
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,93	12,9	12,86	12,896667	3,15	3,14	3,11	3,1333333	40,409556
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,88	12,82	12,81	12,836667	3,15	3,16	3,13	3,1466667	40,392711
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,87	12,83	12,92	12,873333	3,11	3,13	3,13	3,1233333	40,207711

11	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,84	12,85	12,96	12,883333	3,23	3,22	3,24	3,23	41,613167
PAHT CF15	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,87	12,98	12,96	12,936667	3,21	3,22	3,2	3,21	41,5267
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,84	12,95	12,97	12,92	3,21	3,23	3,19	3,21	41,4732
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,8	12,85	12,79	12,813333	3,23	3,19	3,18	3,2	41,002667
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,89	12,87	12,98	12,913333	3,24	3,21	3,18	3,21	41,4518

12	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,64	12,62	12,68	12,646667	3,26	3,29	3,3	3,283333	41,523222
PC CF	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,58	12,54	12,6	12,573333	3,27	3,36	3,23	3,286667	41,324356
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,59	12,55	12,69	12,61	3,27	3,33	3,17	3,256667	41,066567
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,57	12,58	12,53	12,56	3,29	3,34	3,3	3,31	41,5736
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,5	12,61	12,6	12,57	3,26	3,31	3,33	3,3	41,481

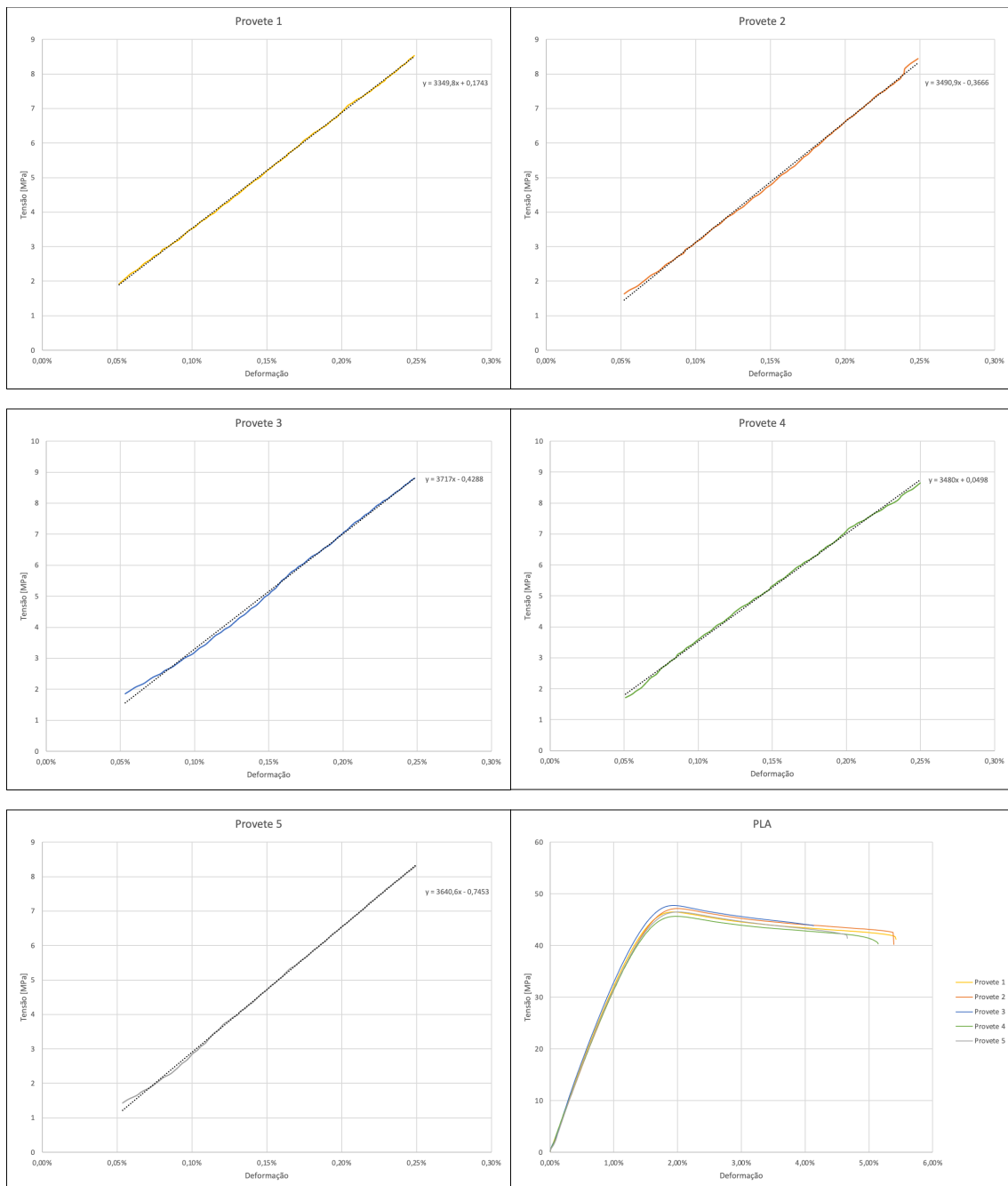
13	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,82	12,88	12,9	12,866667	3,13	3,14	3,22	3,163333	40,701556
ULTEM AM9085F	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,79	12,68	12,57	12,68	3,18	3,17	3,26	3,203333	40,618267
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,88	12,75	12,95	12,86	3,18	3,06	3,12	3,12	40,1232
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,91	12,79	12,69	12,796667	3,12	3,16	3,24	3,173333	40,608089
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,97	12,89	12,9	12,92	3,18	3,2	3,21	3,196667	41,300933

14	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,79	12,88	12,87	12,846667	3,35	3,37	3,35	3,356667	43,121978
Poliamida 12 H	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,86	12,91	12,91	12,893333	3,36	3,36	3,34	3,353333	43,235644
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,87	12,91	12,18	12,653333	3,2	3,18	3,19	3,19	40,364133
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,92	12,86	12,92	12,9	3,31	3,36	3,32	3,33	42,957
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,83	12,81	12,96	12,866667	3,35	3,3	3,29	3,313333	42,631556

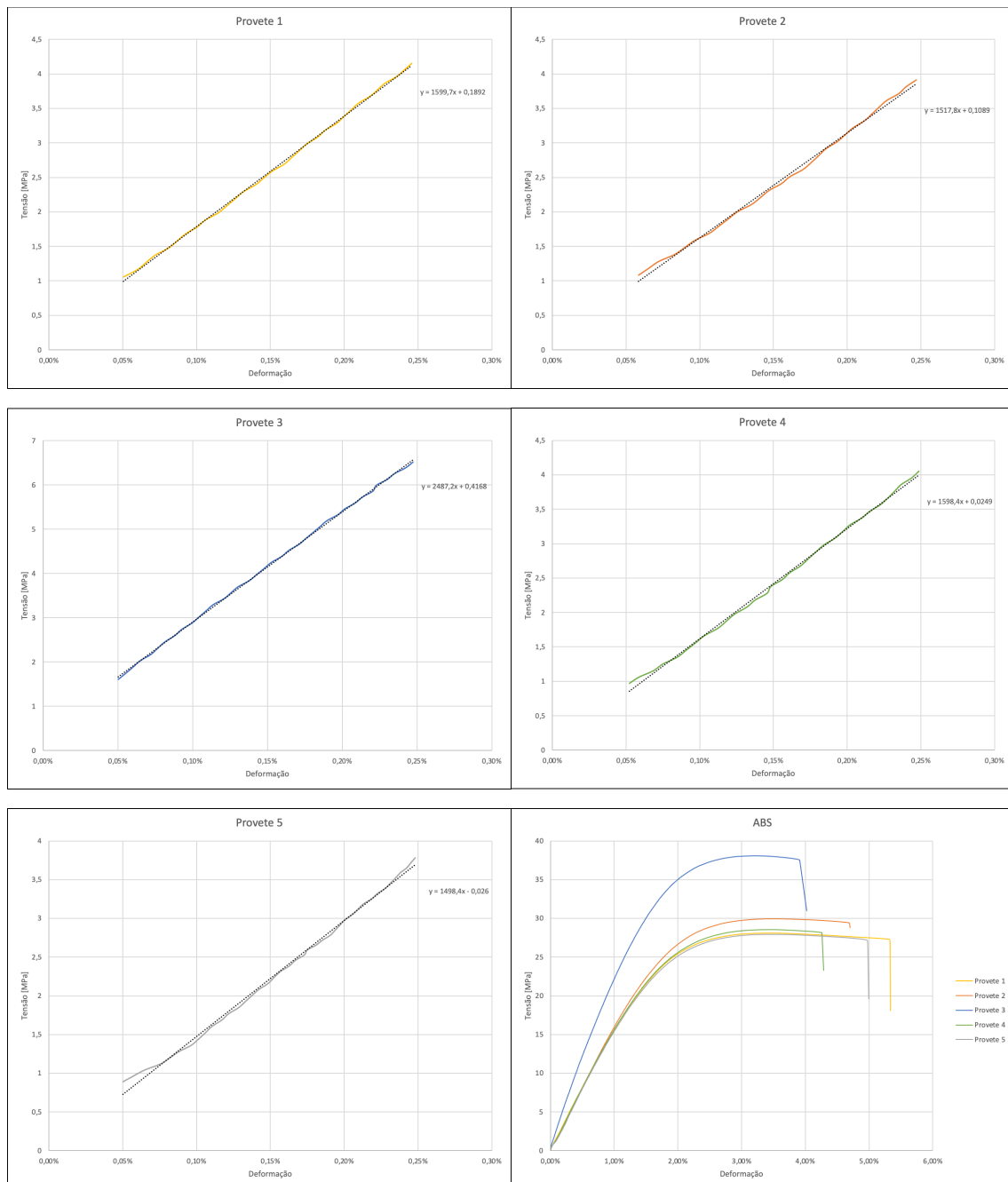
15	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,77	12,69	12,71	12,723333	3,11	3,12	3,1	3,11	39,569567
Poliamida 12 V	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,73	12,72	12,72	12,723333	3,18	3,19	3,19	3,186667	40,545022
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,73	12,71	12,75	12,73	3,19	3,2	3,19	3,193333	40,651133
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,72	12,69	12,67	12,693333	3,23	3,24	3,21	3,226667	40,957156
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,68	12,72	12,73	12,71	3,19	3,2	3,17	3,186667	40,502533

16	Largura, b (mm)				Espessura, h (mm)				Área
	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_1	a1
Material	12,69	12,47	12,72	12,626667	3,33	3,46	3,28	3,356667	42,383511
Tl500	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	provete2_1	provete2_2	provete2_3	méd_2	a2
	12,69	12,74	12,61	12,68	3,32	3,28	3,46	3,353333	42,520267
	provete3_1	provete3_2	provete3_3	méd_3	provete1_1	provete1_2	provete1_3	méd_3	a3
	12,65	12,57	12,59	12,603333	3,29	3,5	3,32	3,37	42,473233
	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	provete4_1	provete4_2	provete4_3	méd_4	a4
	12,64	12,63	12,52	12,596667	3,27	3,56	3,3	3,376667	42,534744
	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	provete5_1	provete5_2	provete5_3	méd_5	a5
	12,45	12,64	12,73	12,606667	3,32	3,53	3,32	3,39	42,7366

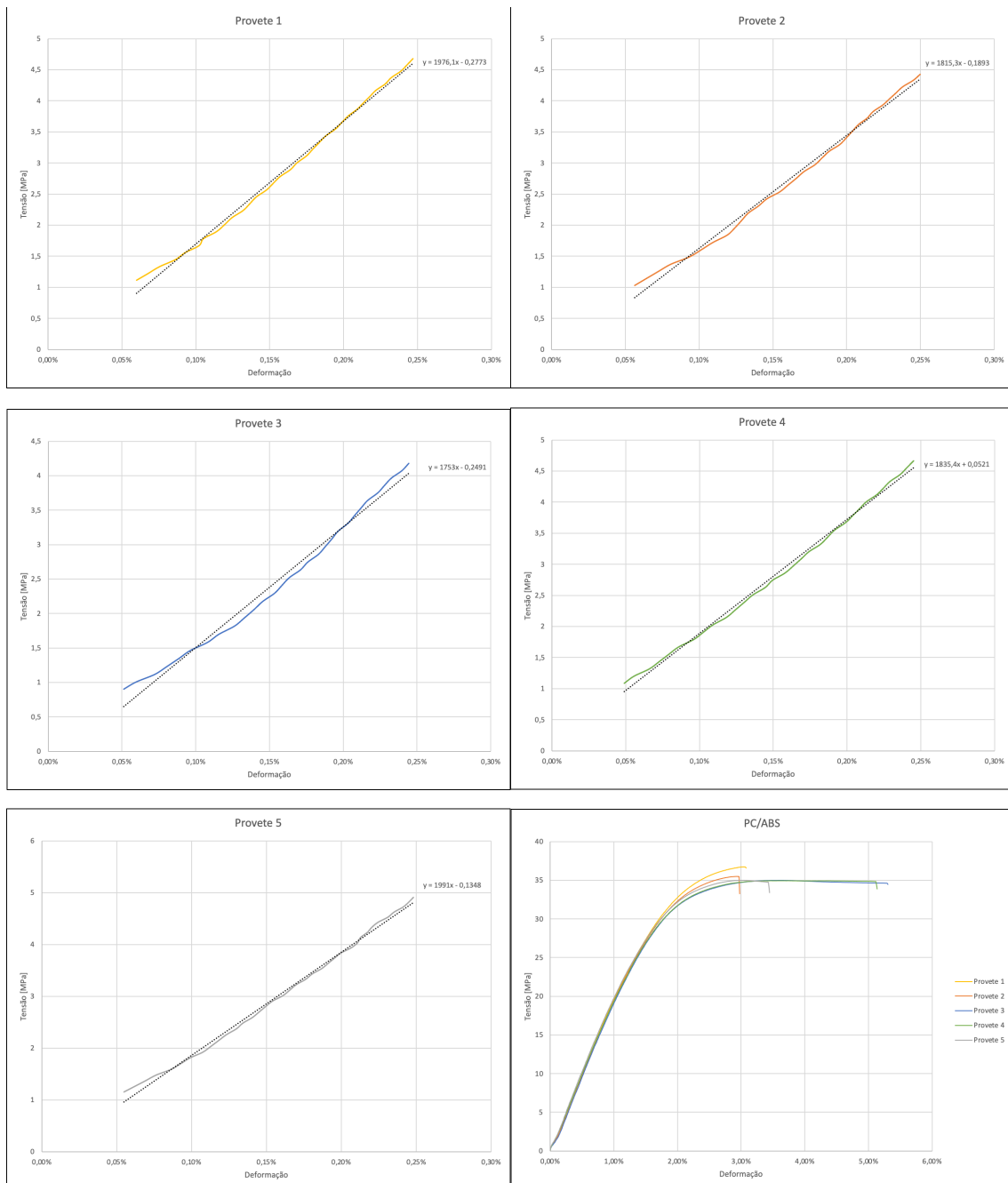
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PLA



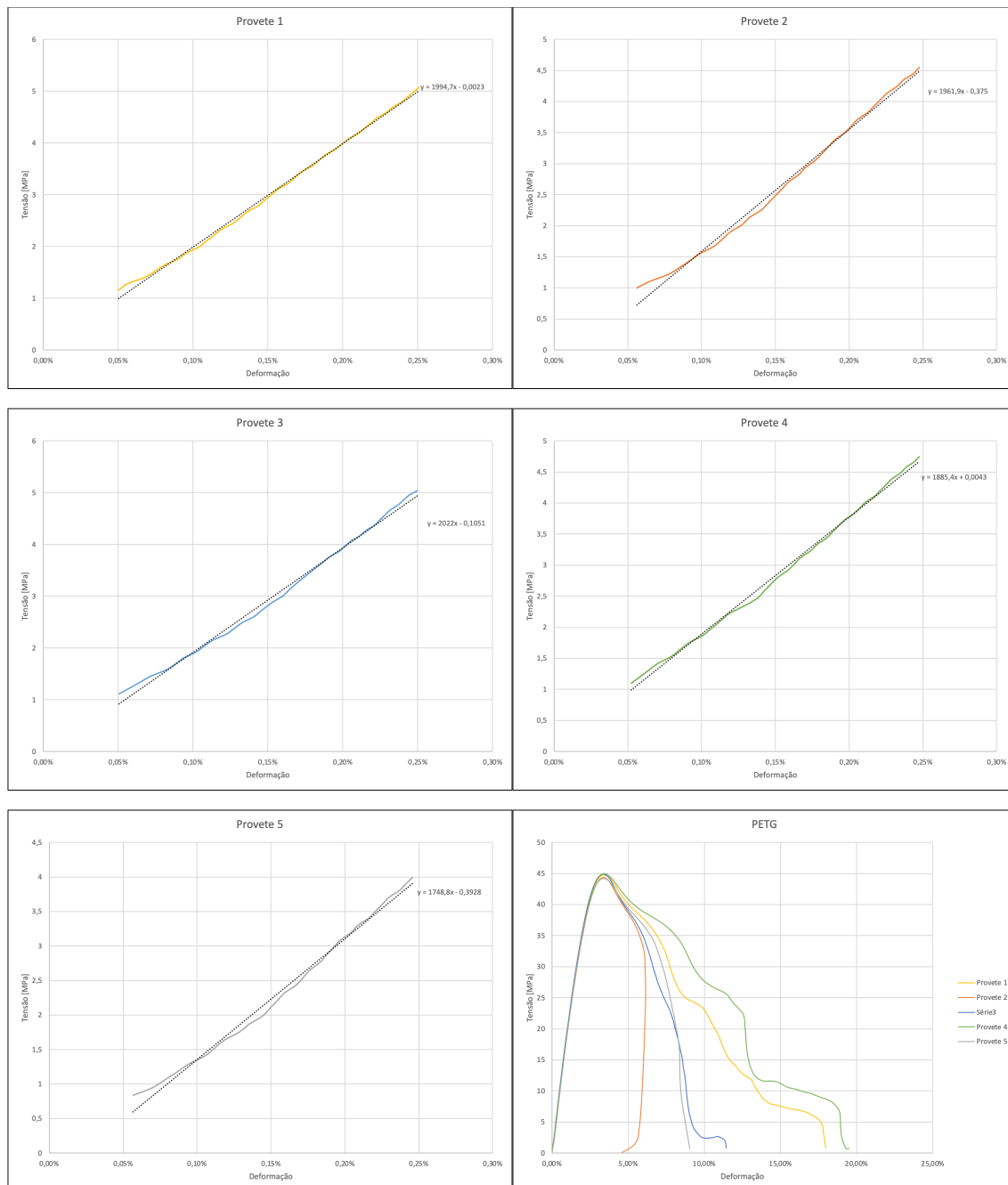
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ABS



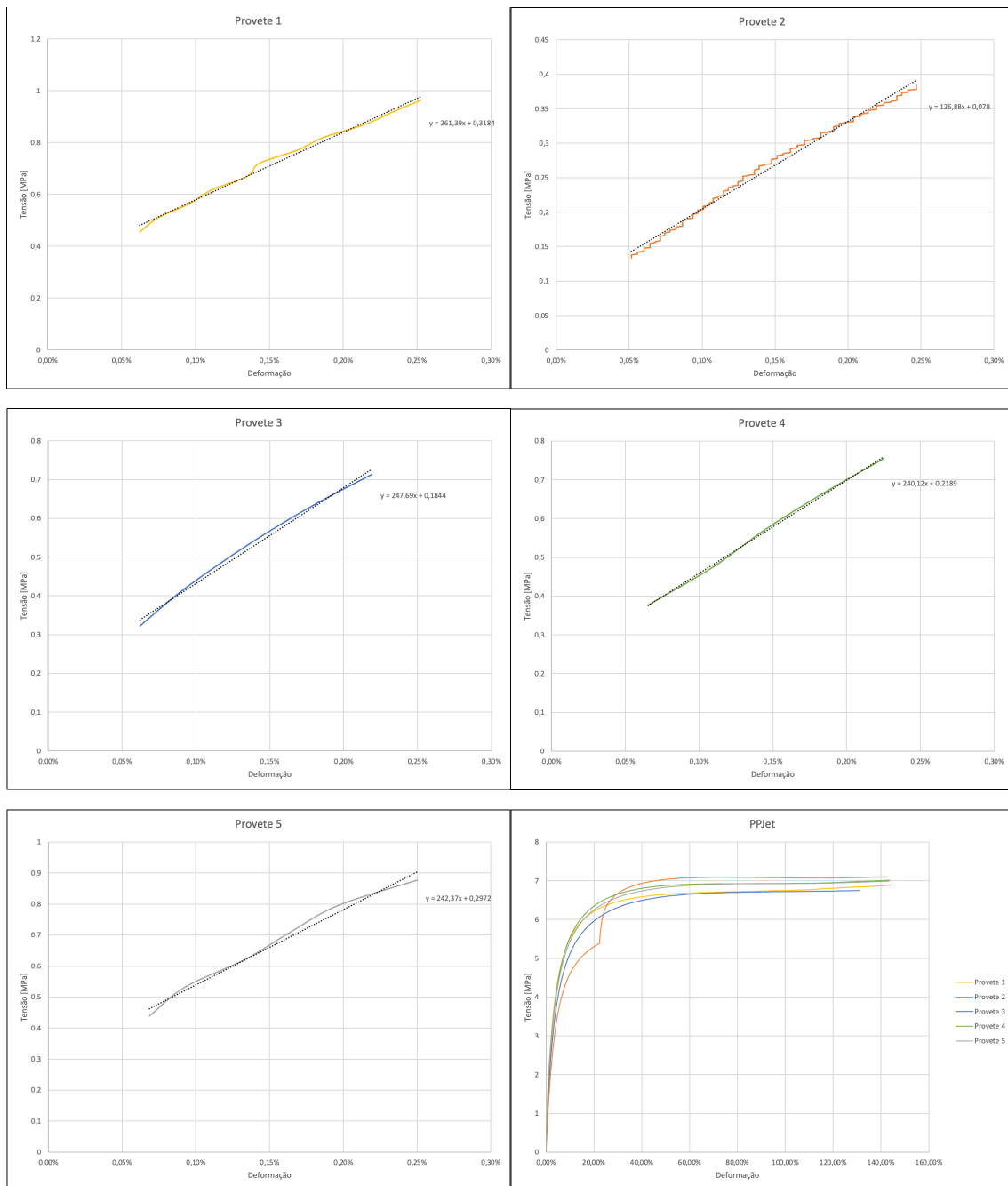
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC/ABS



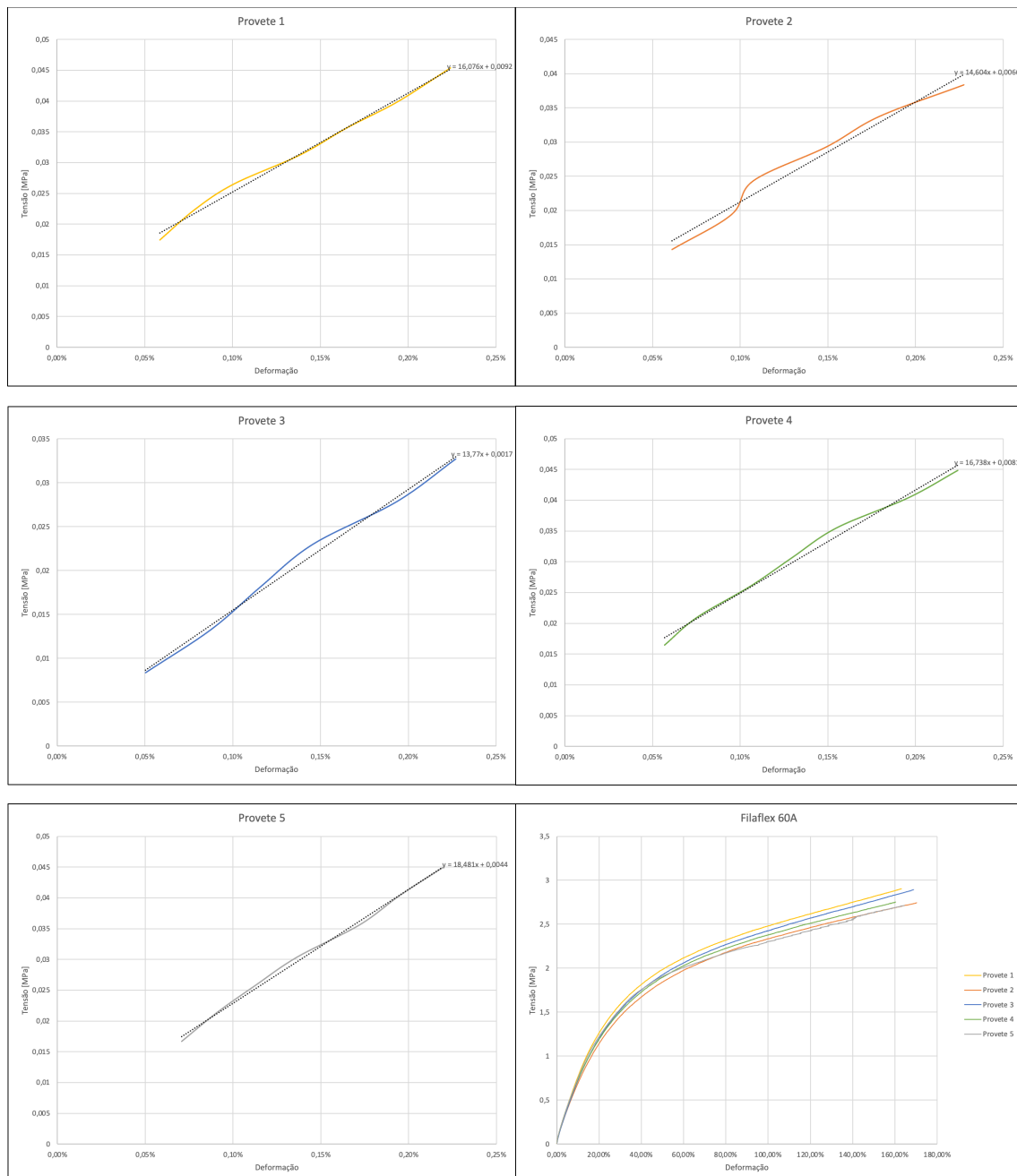
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PETG



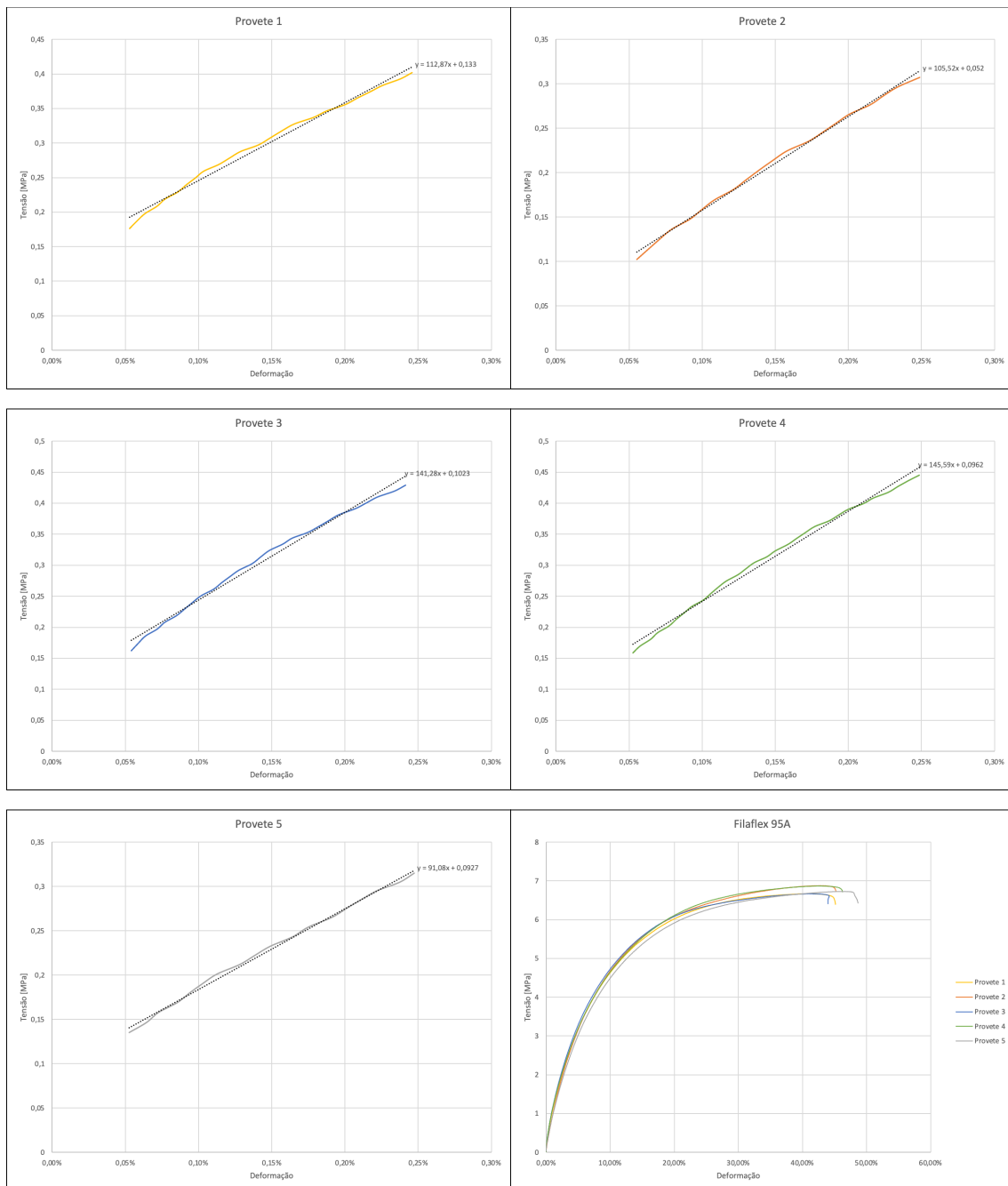
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PPJET



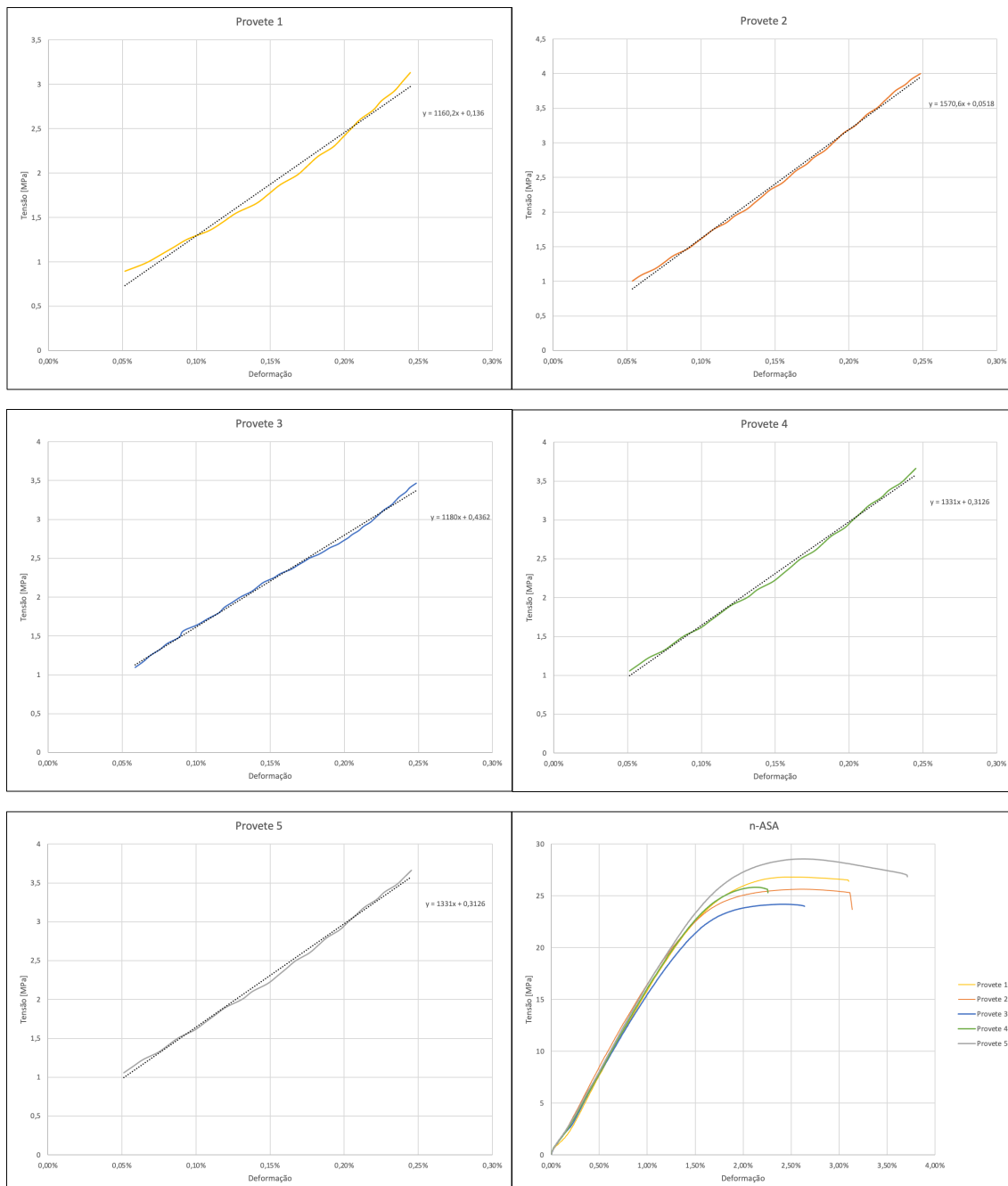
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE 60 A



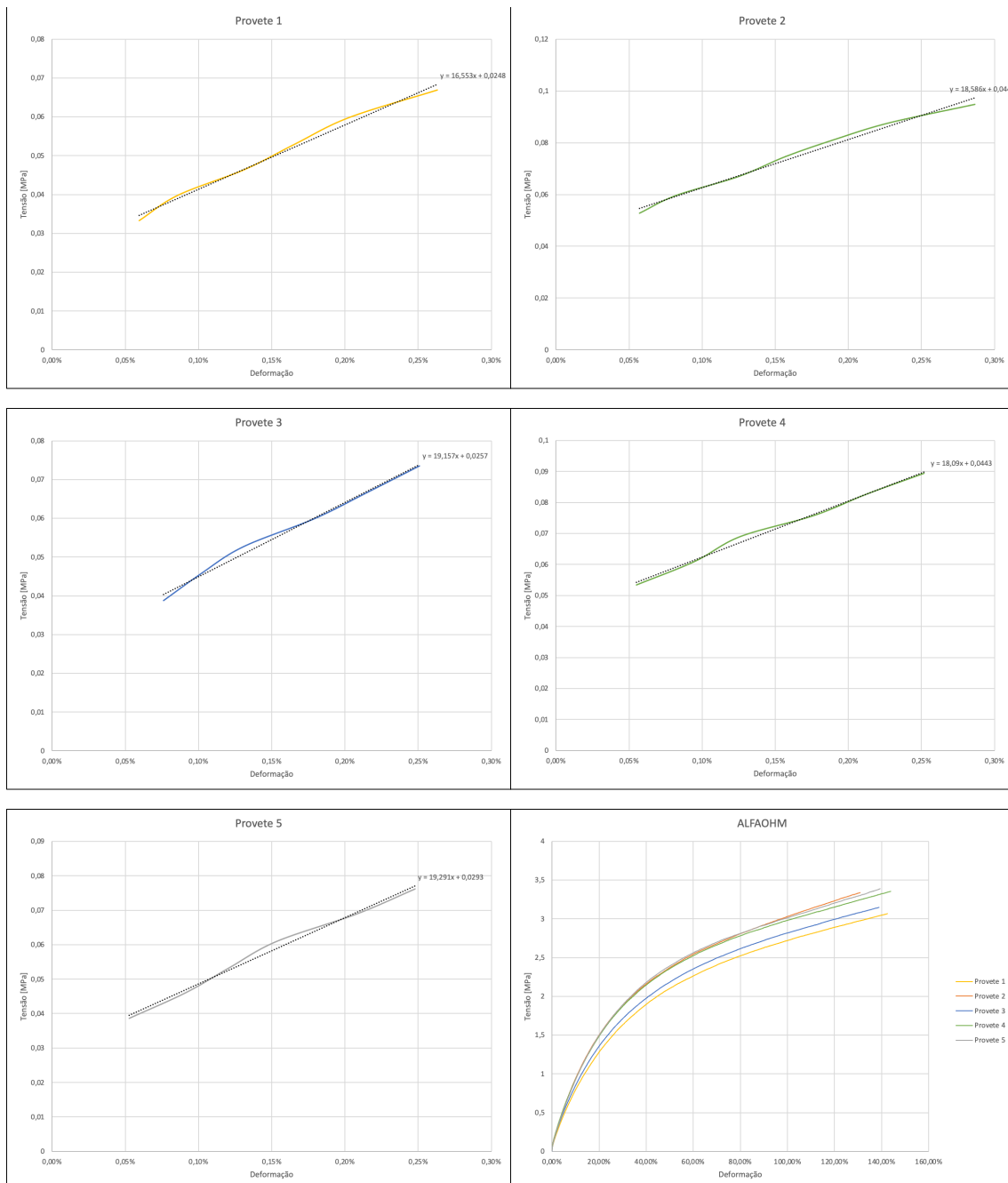
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 95 A



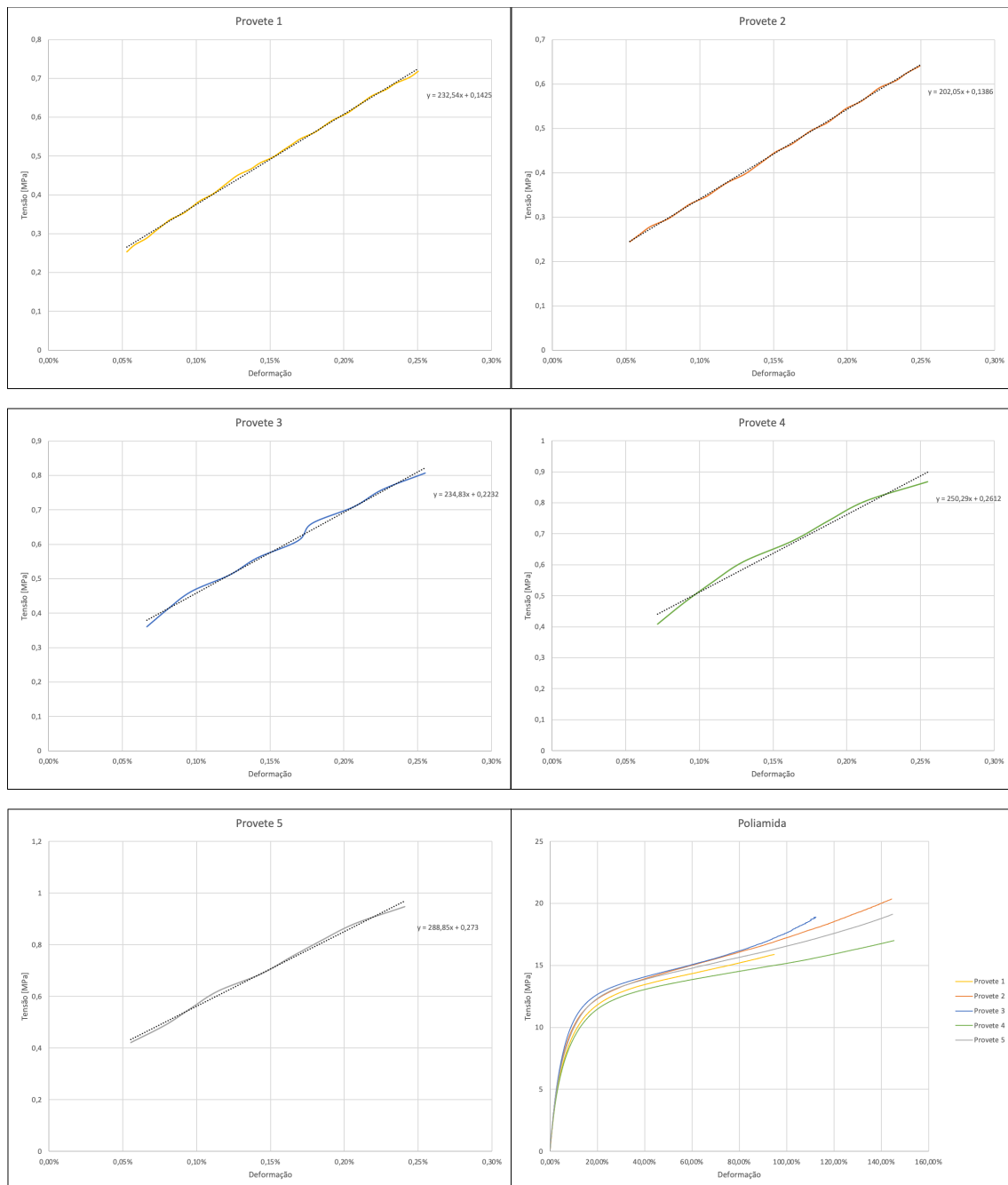
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE N-ASA



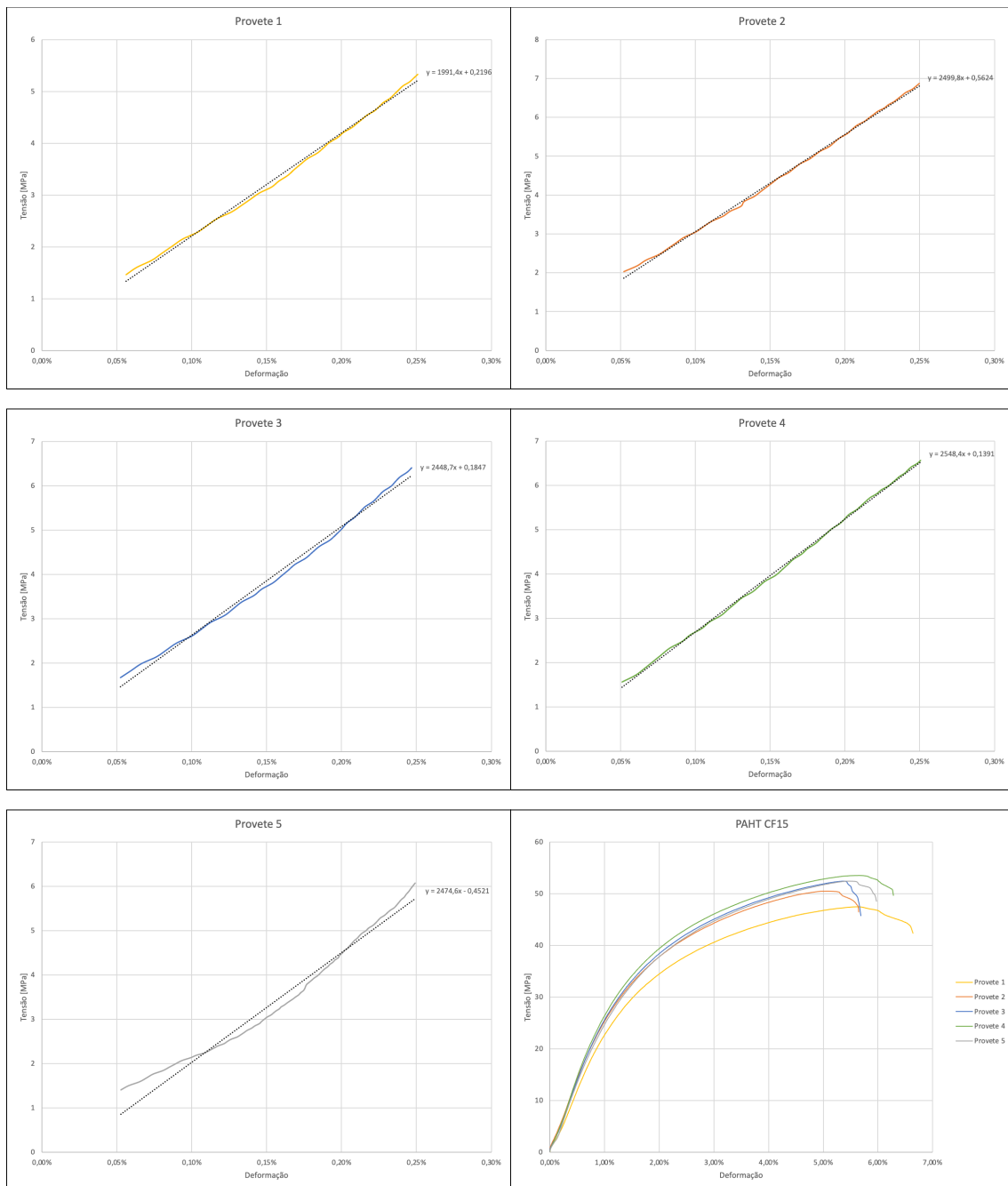
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ALFAOHM



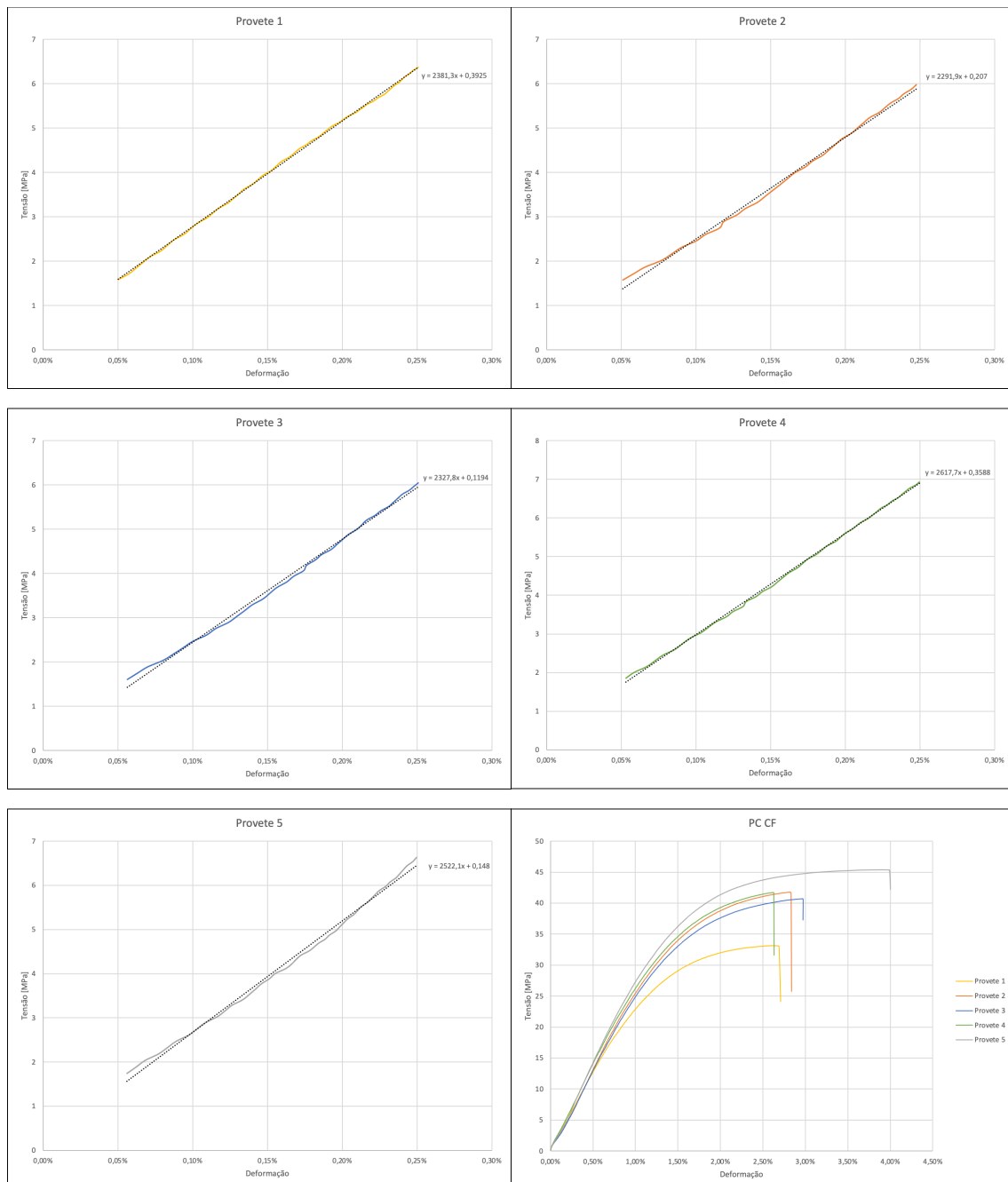
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA



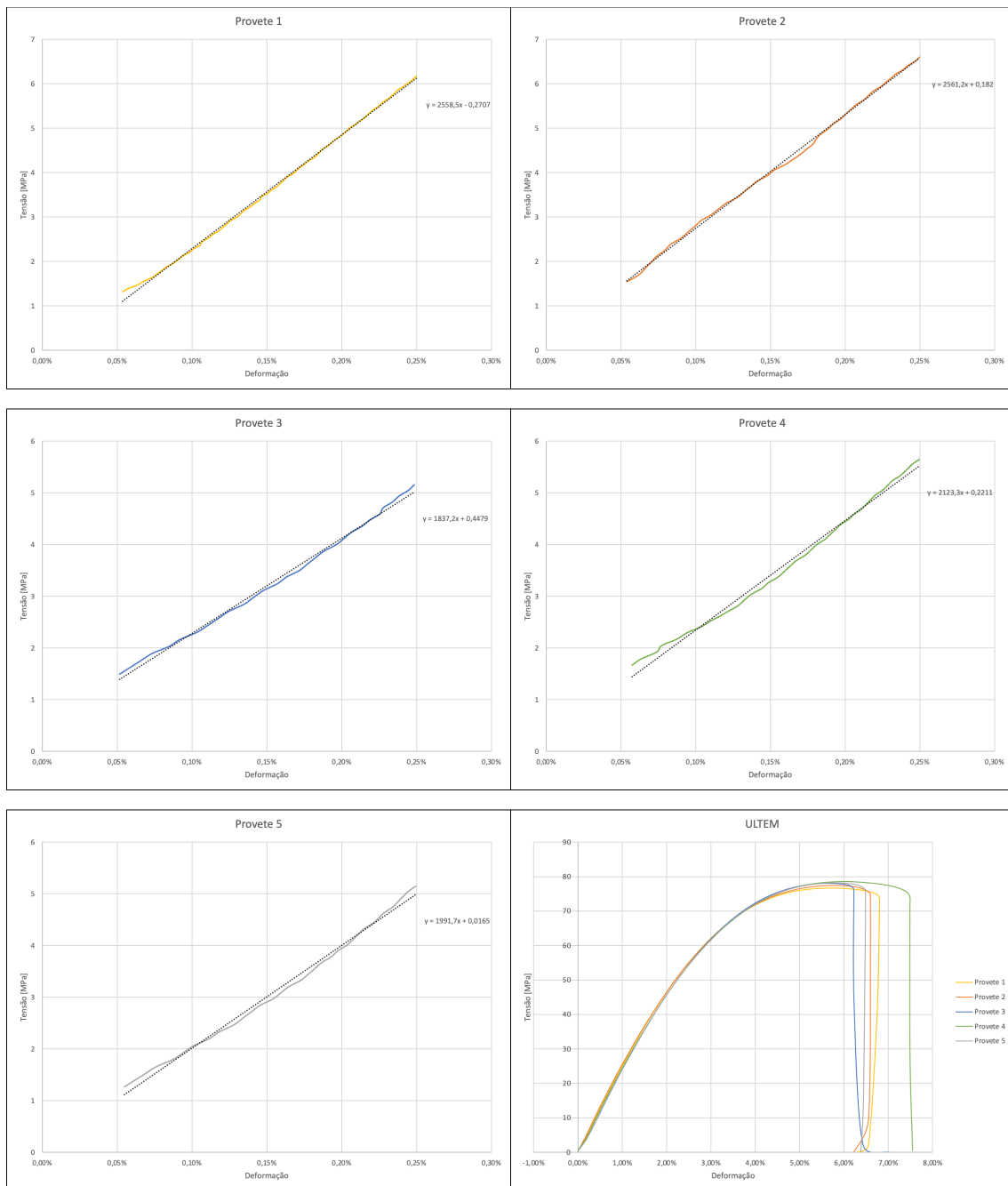
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PAHT CF15



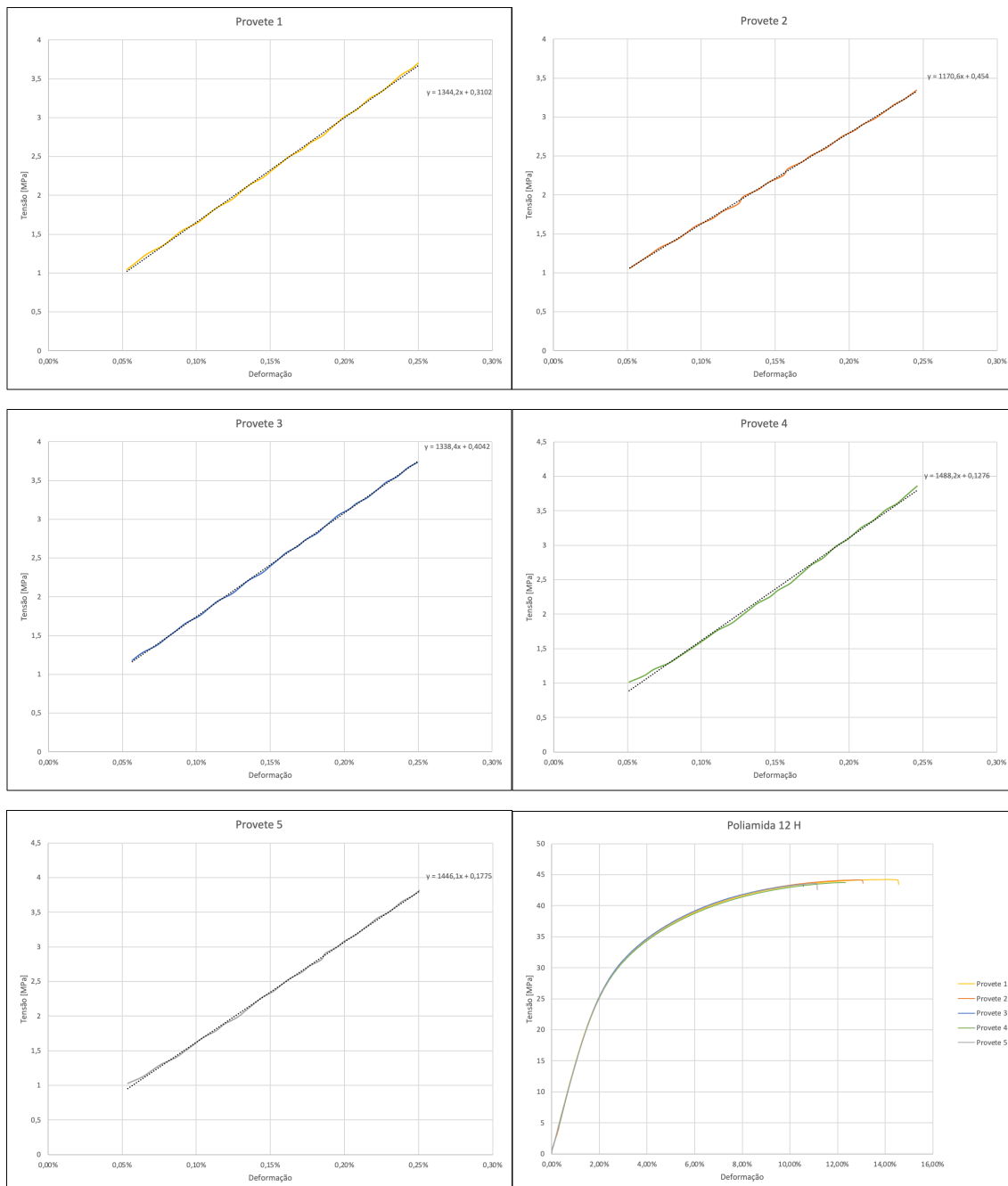
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC CF



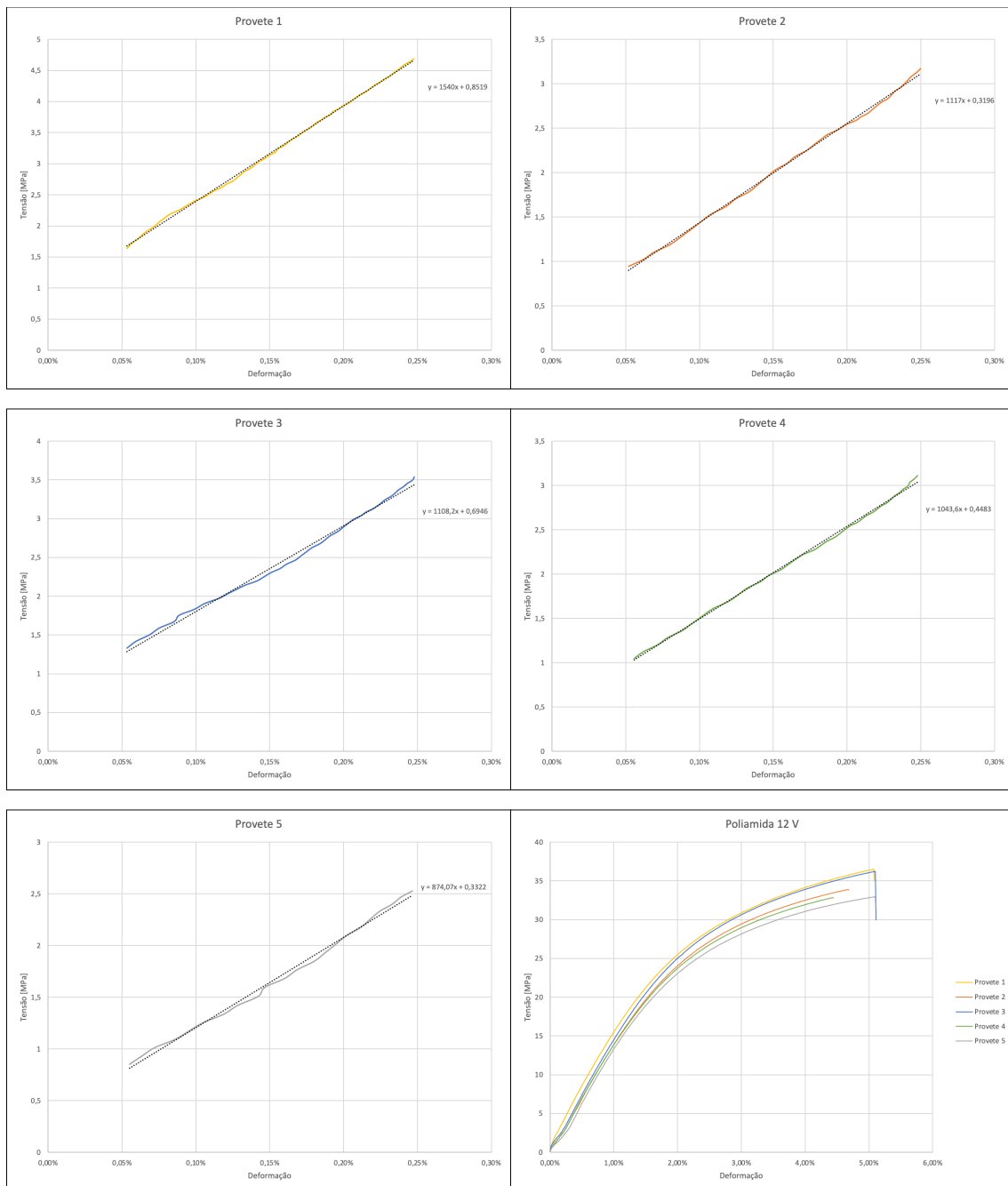
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ULTEM AM9085F



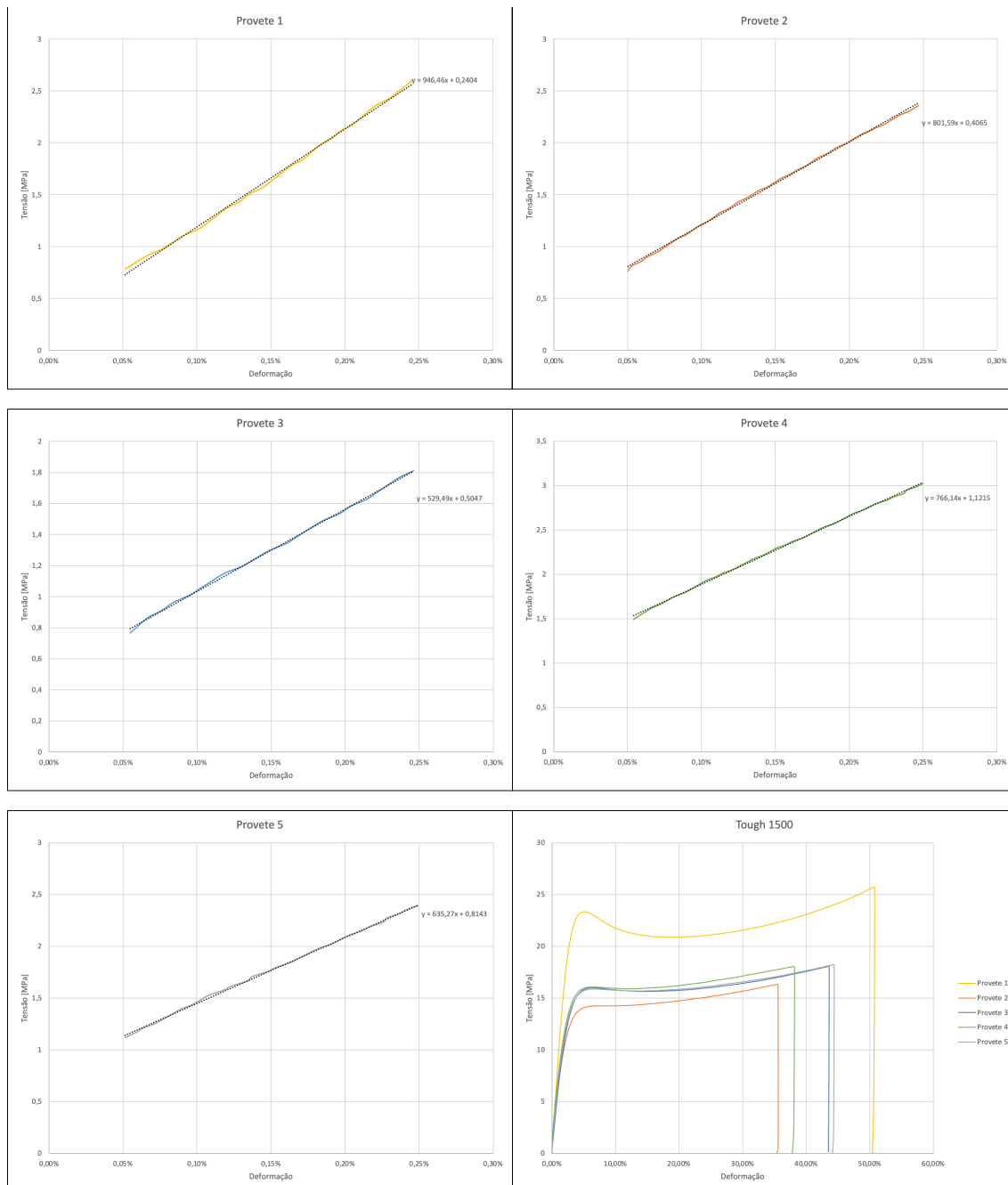
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 H



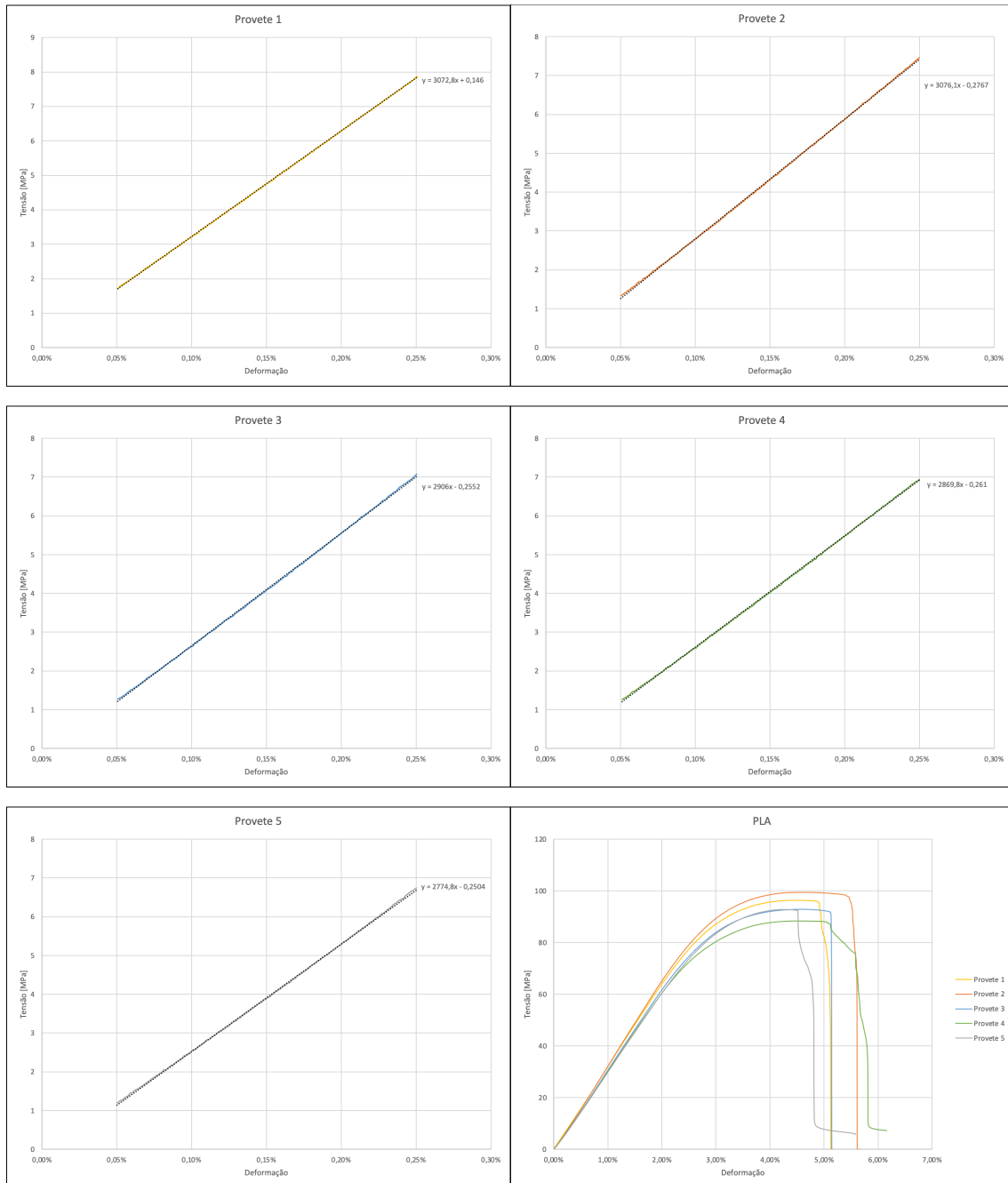
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 V



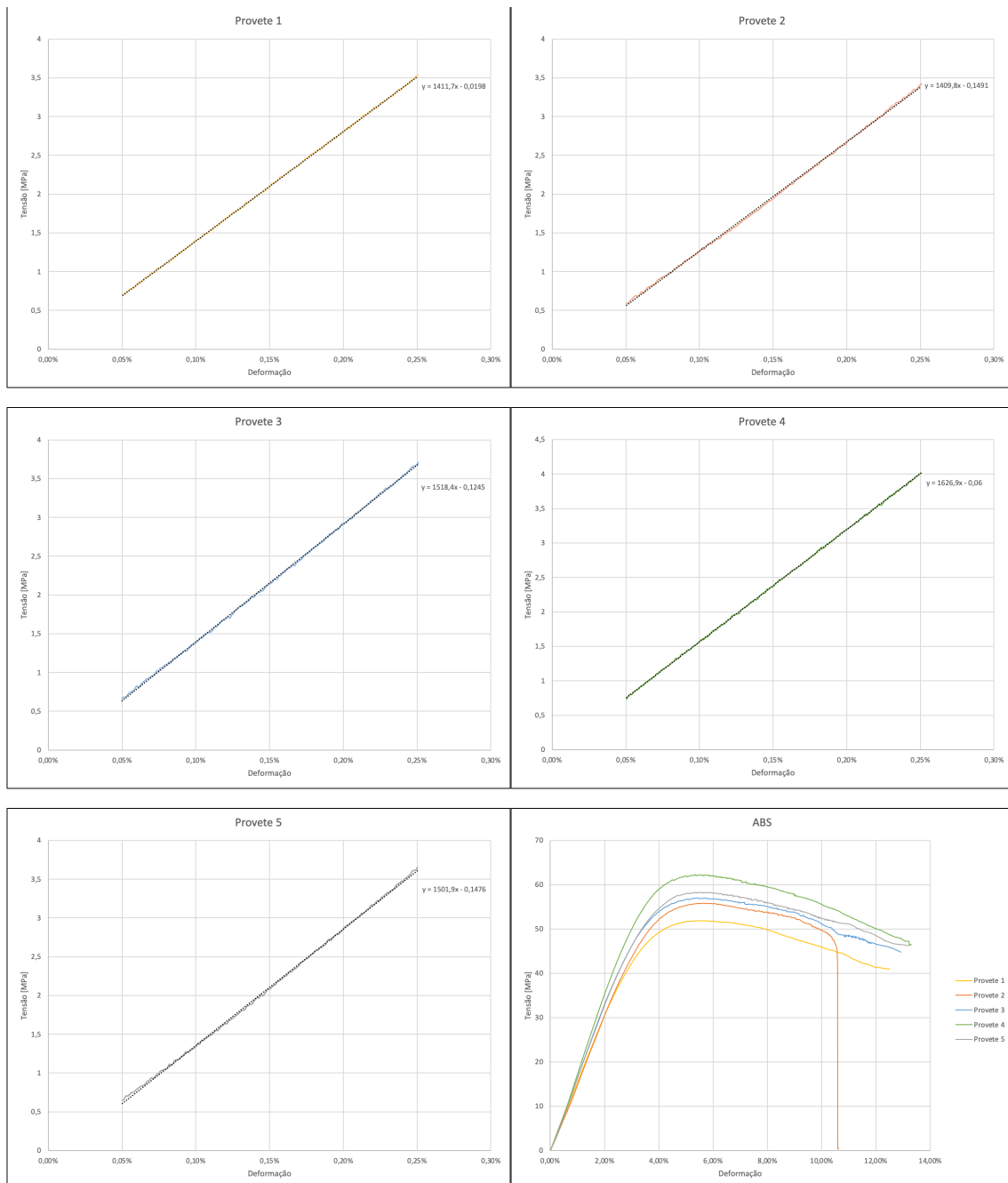
APÊNDICE B - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE TOUGH 1500



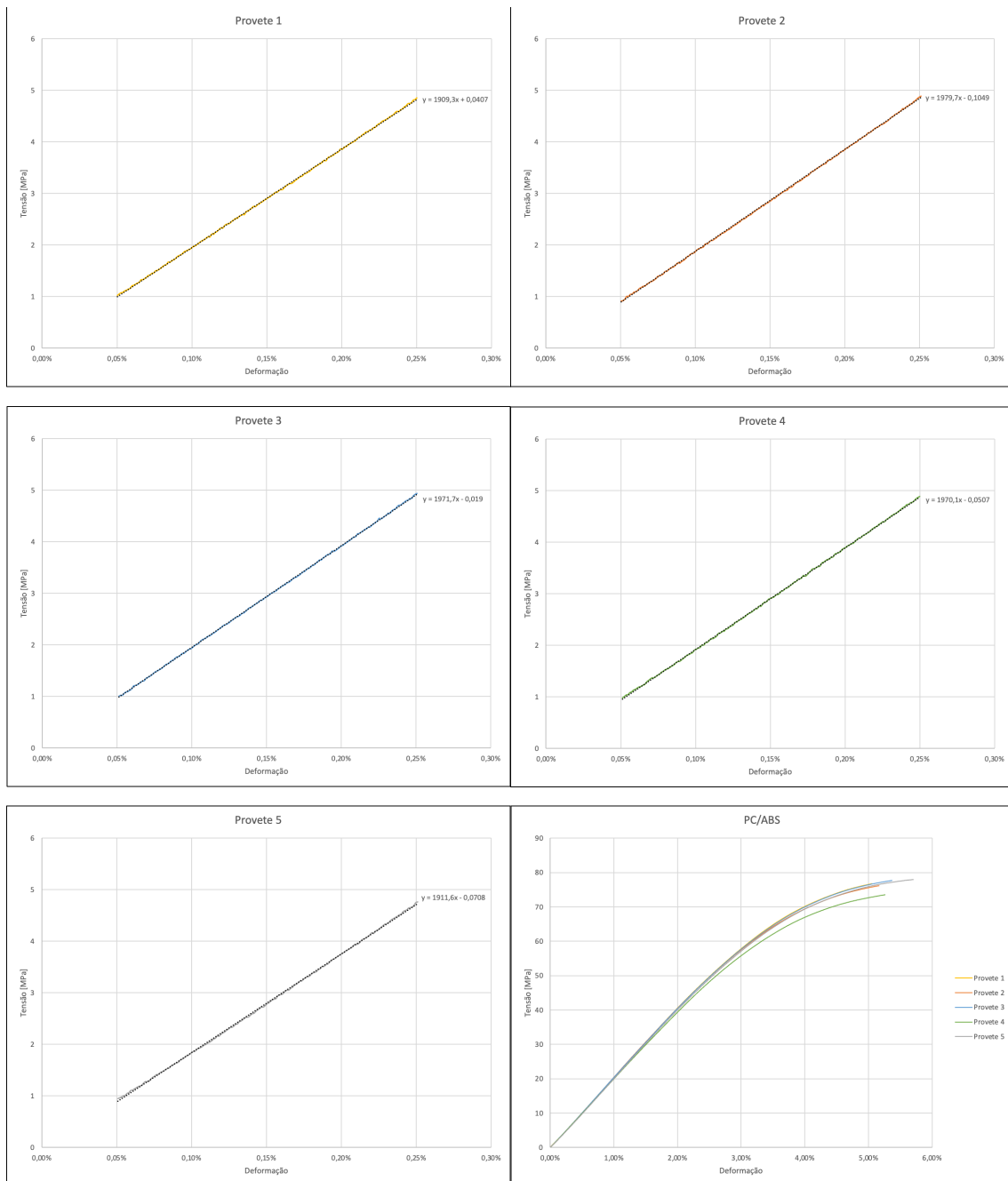
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PLA



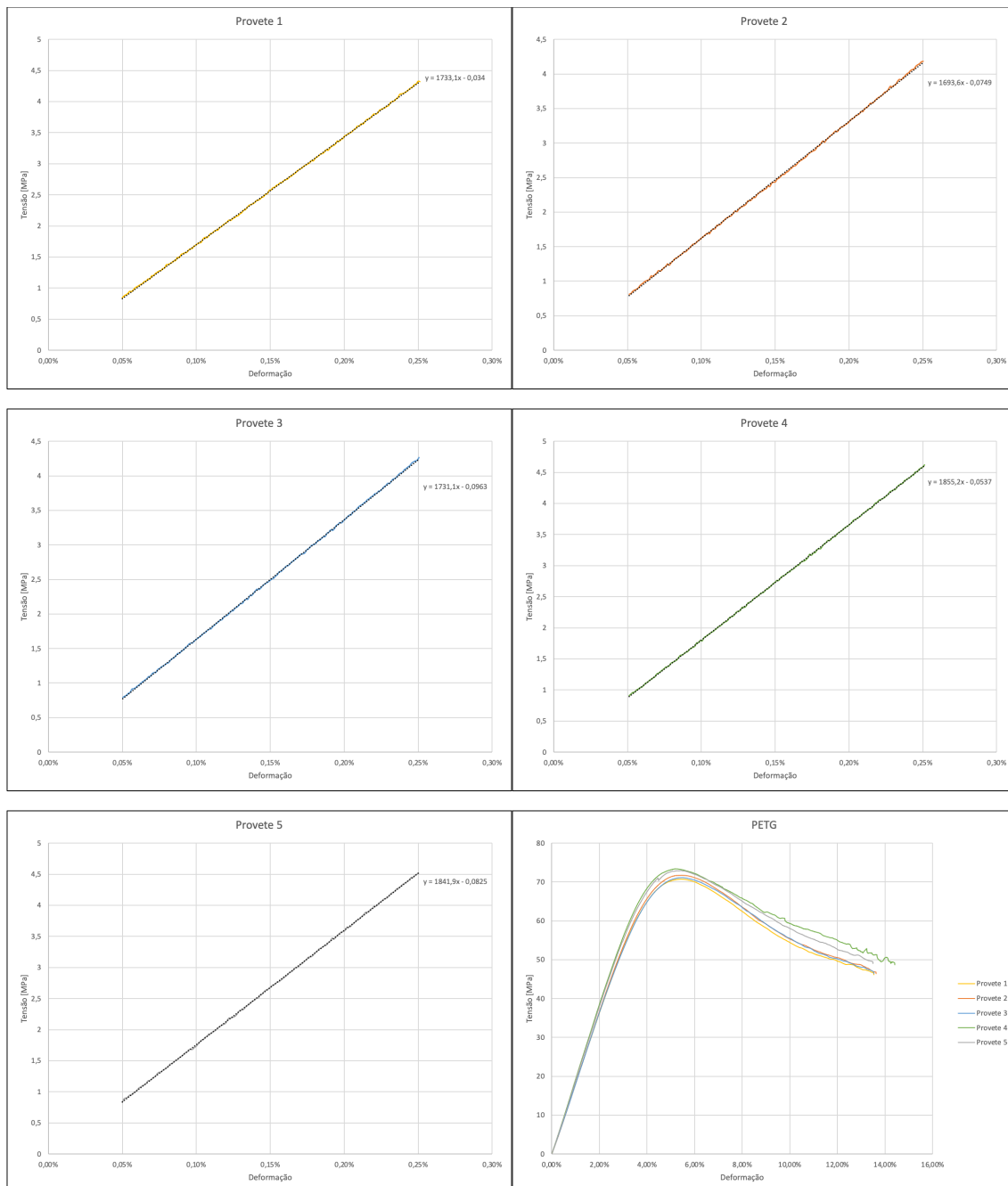
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ABS



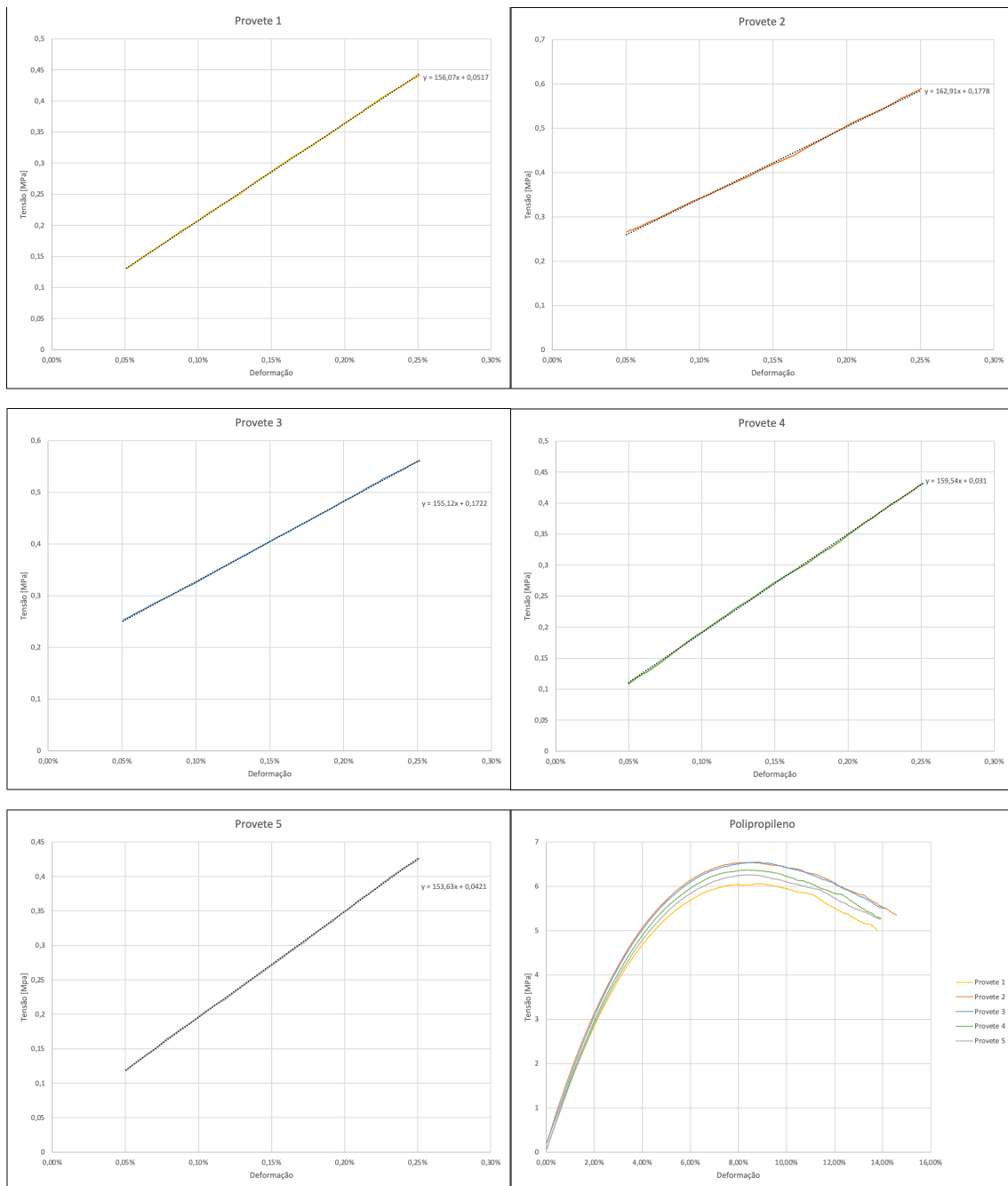
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC/ABS



APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PETG



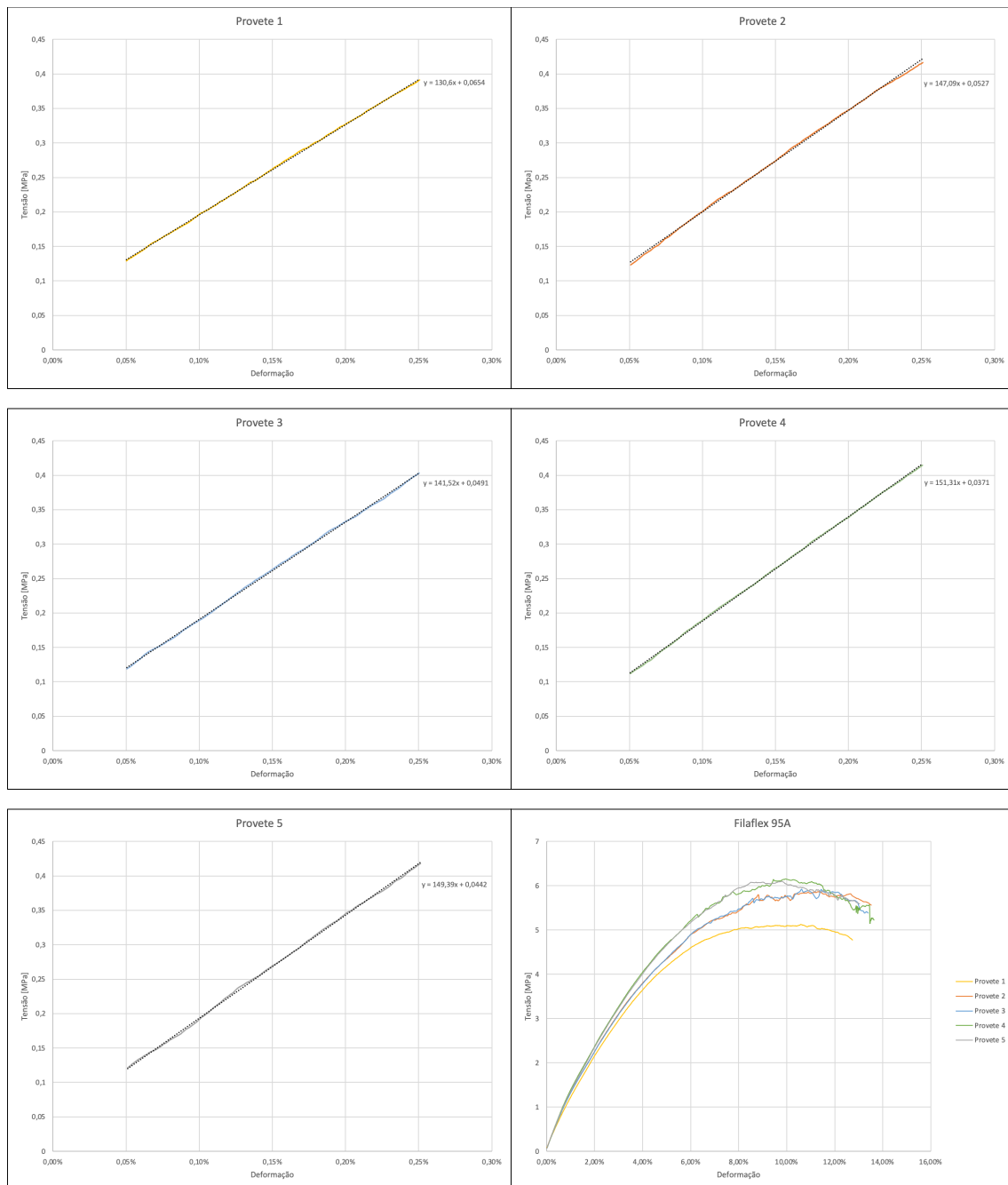
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PPJET



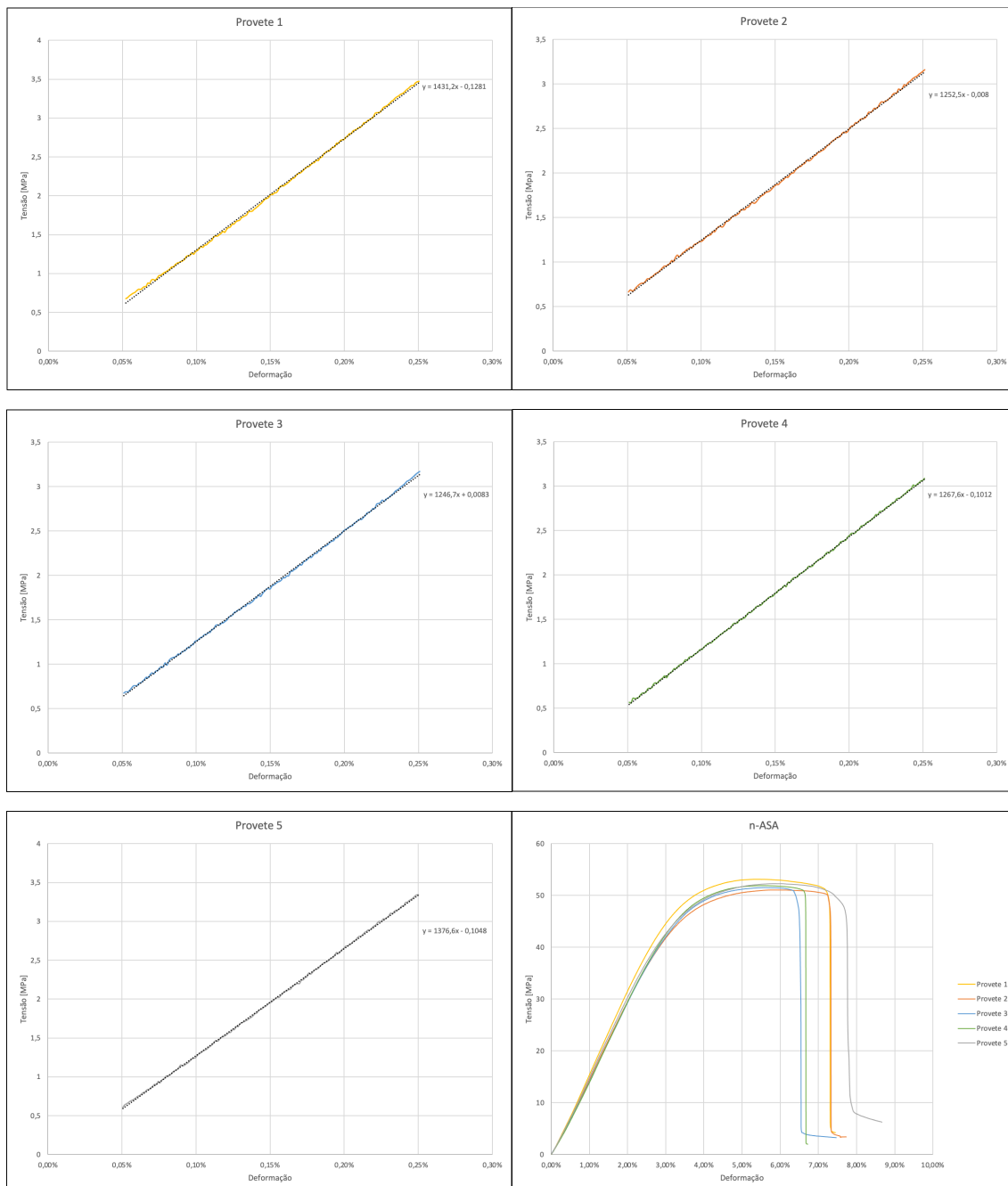
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 60 A

-

APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE FILAFLEX 95 A



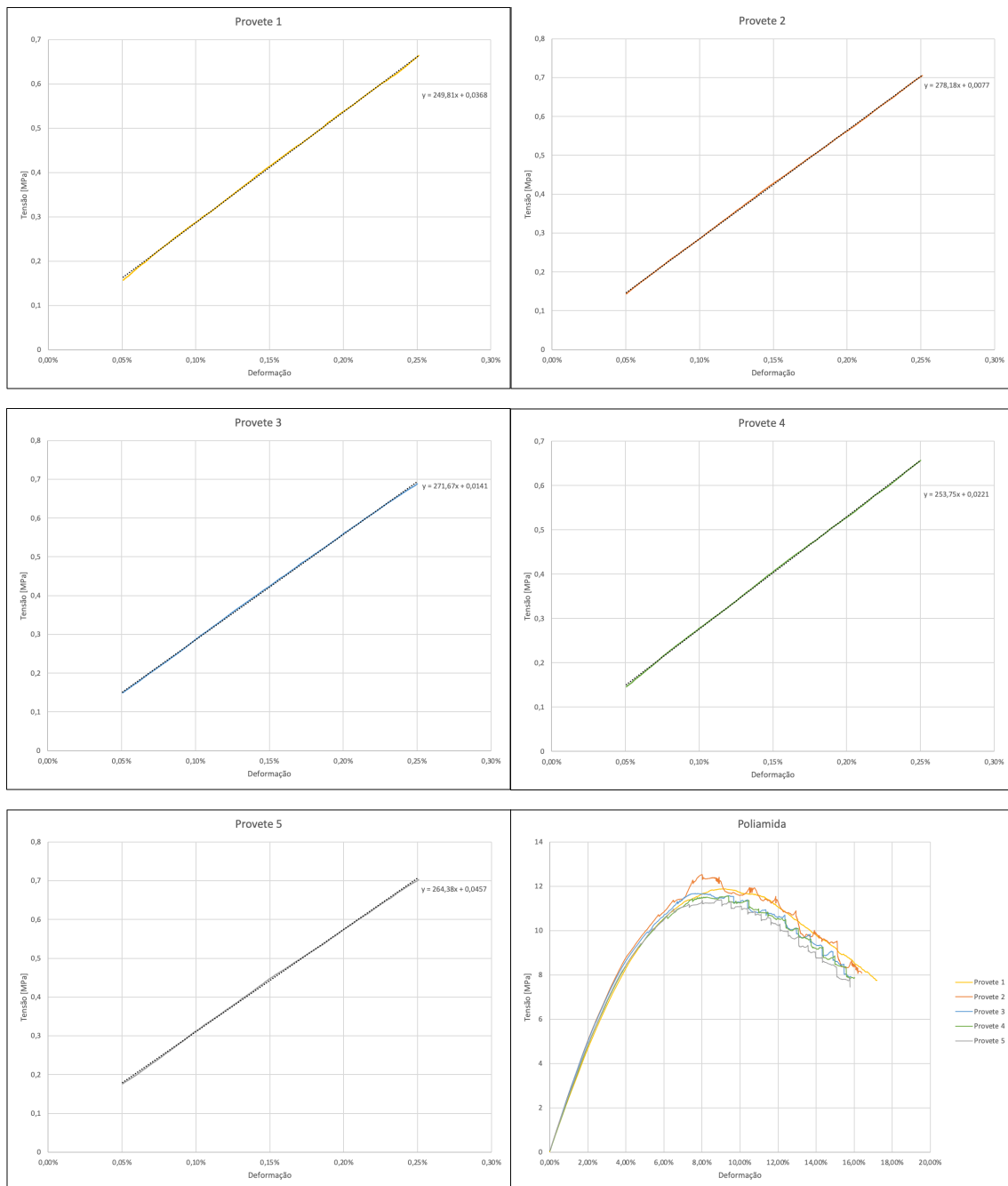
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE N-ASA



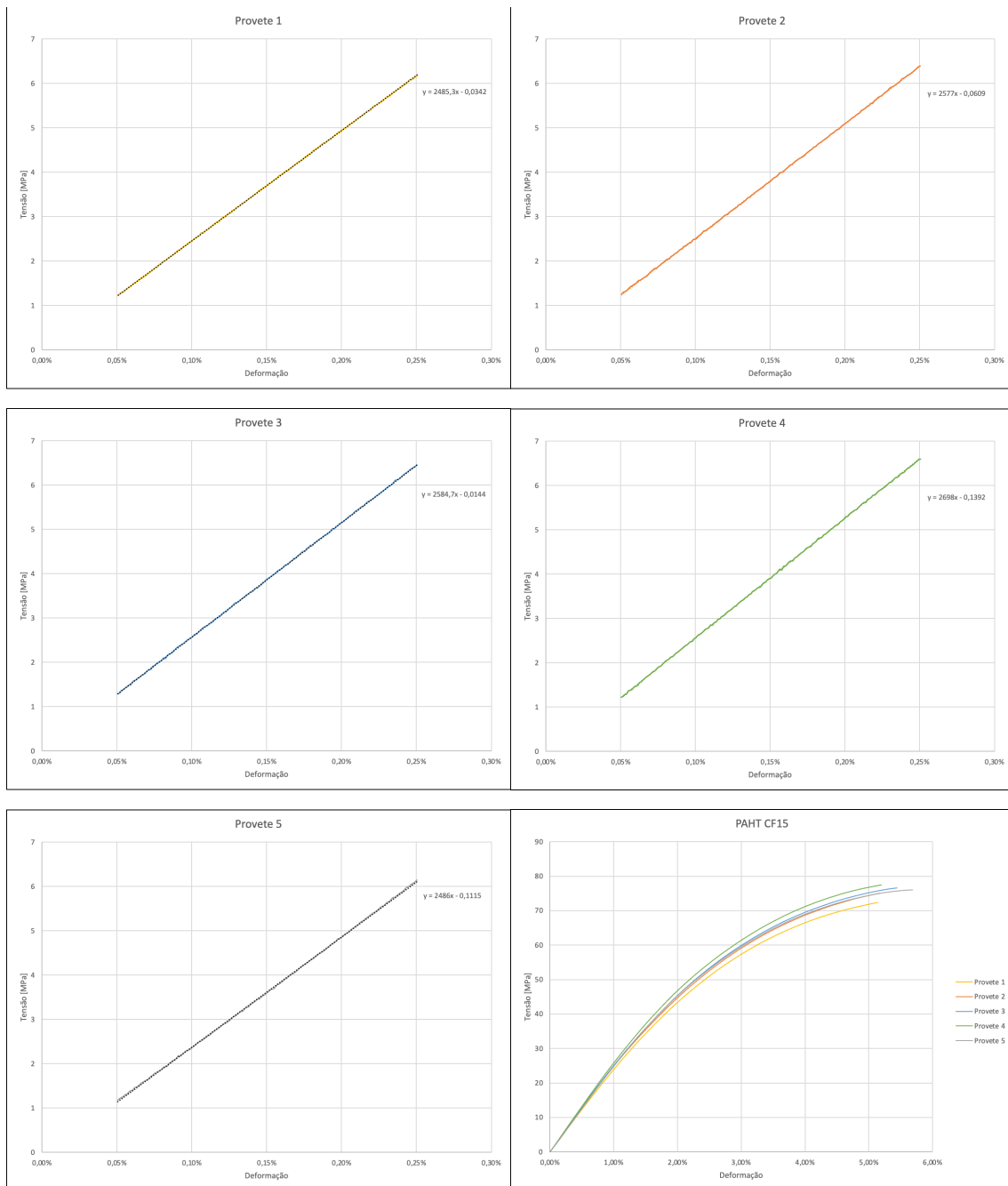
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ALFAOHM

-

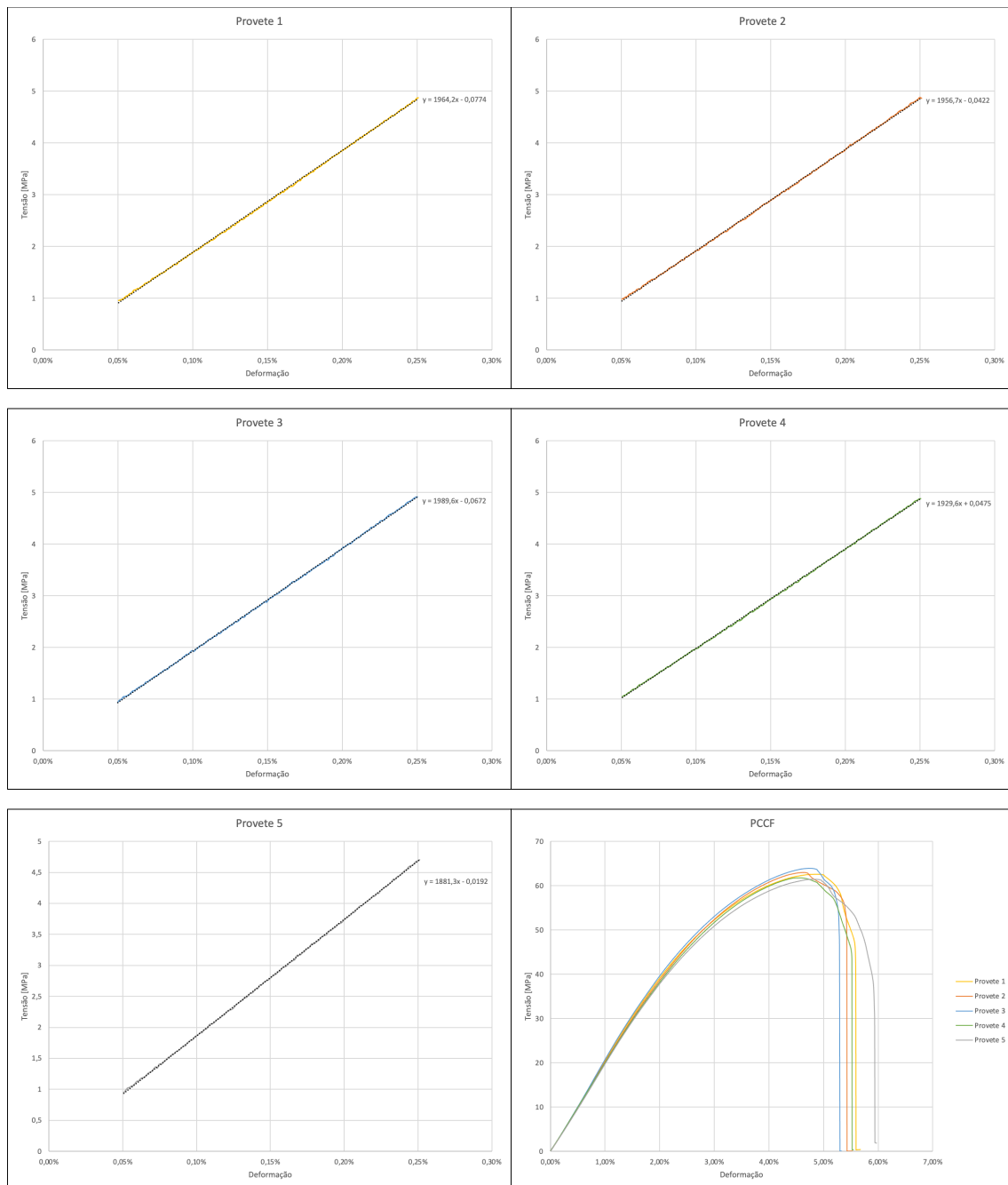
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA



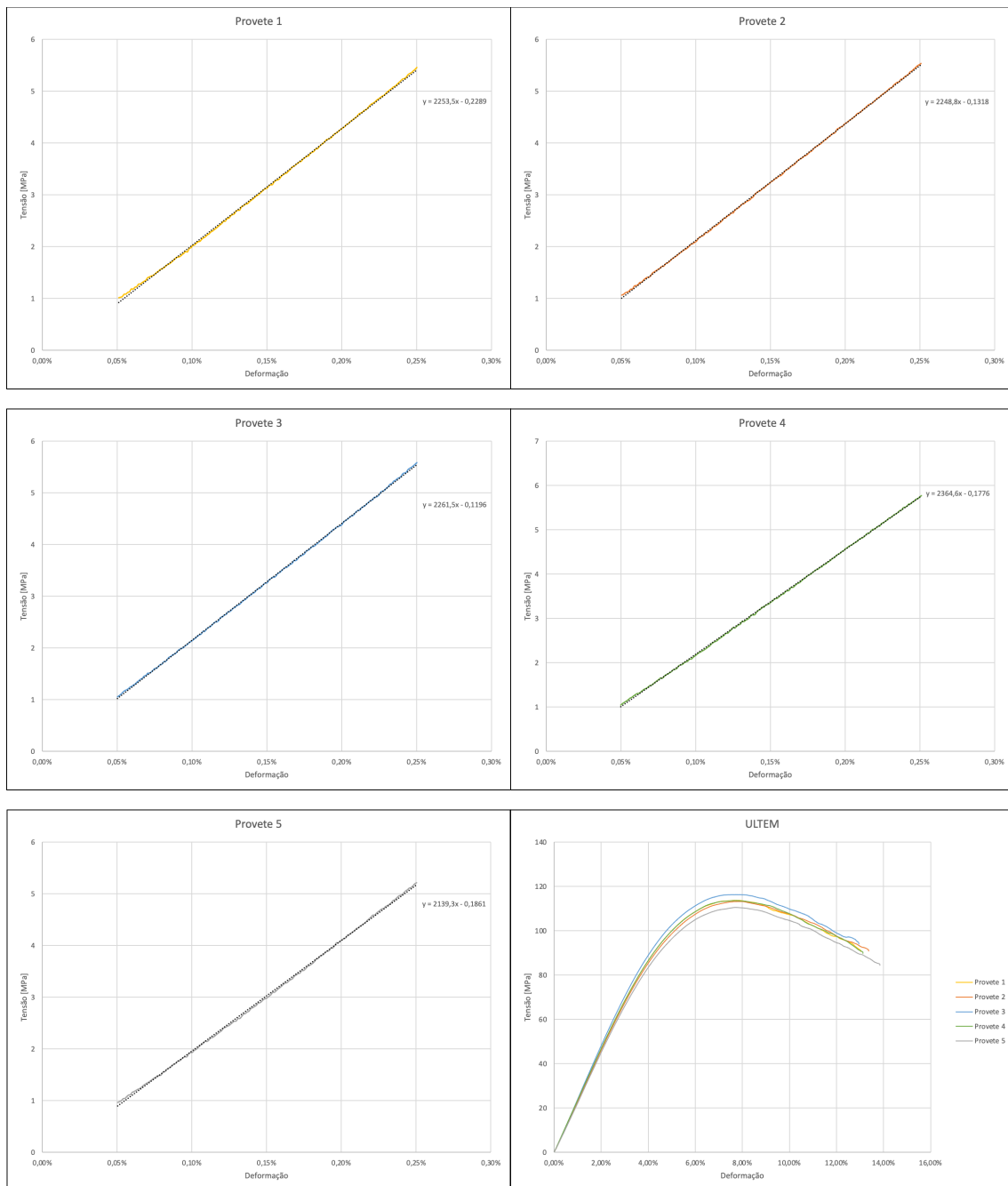
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PAHT CF15



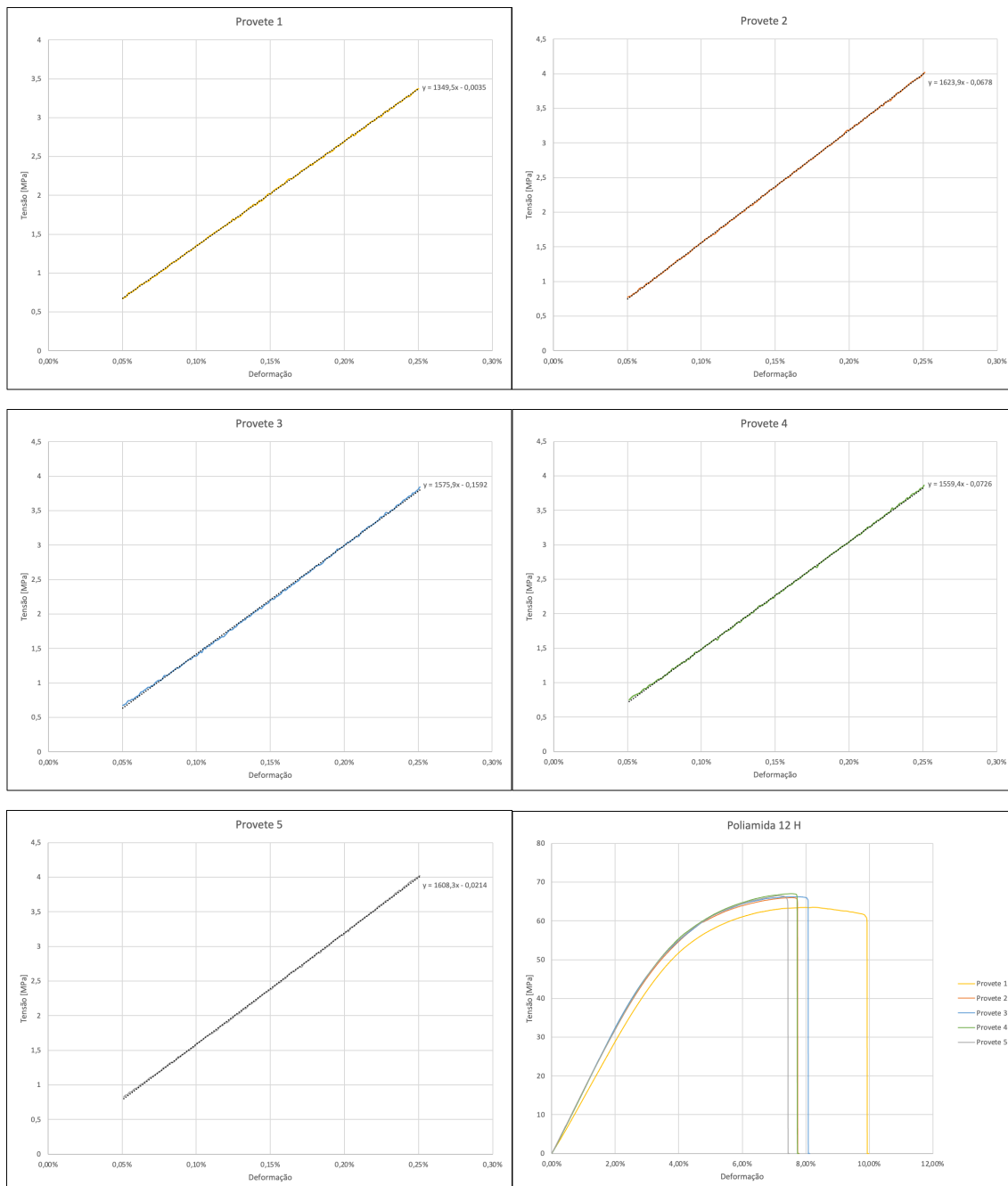
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PC CF



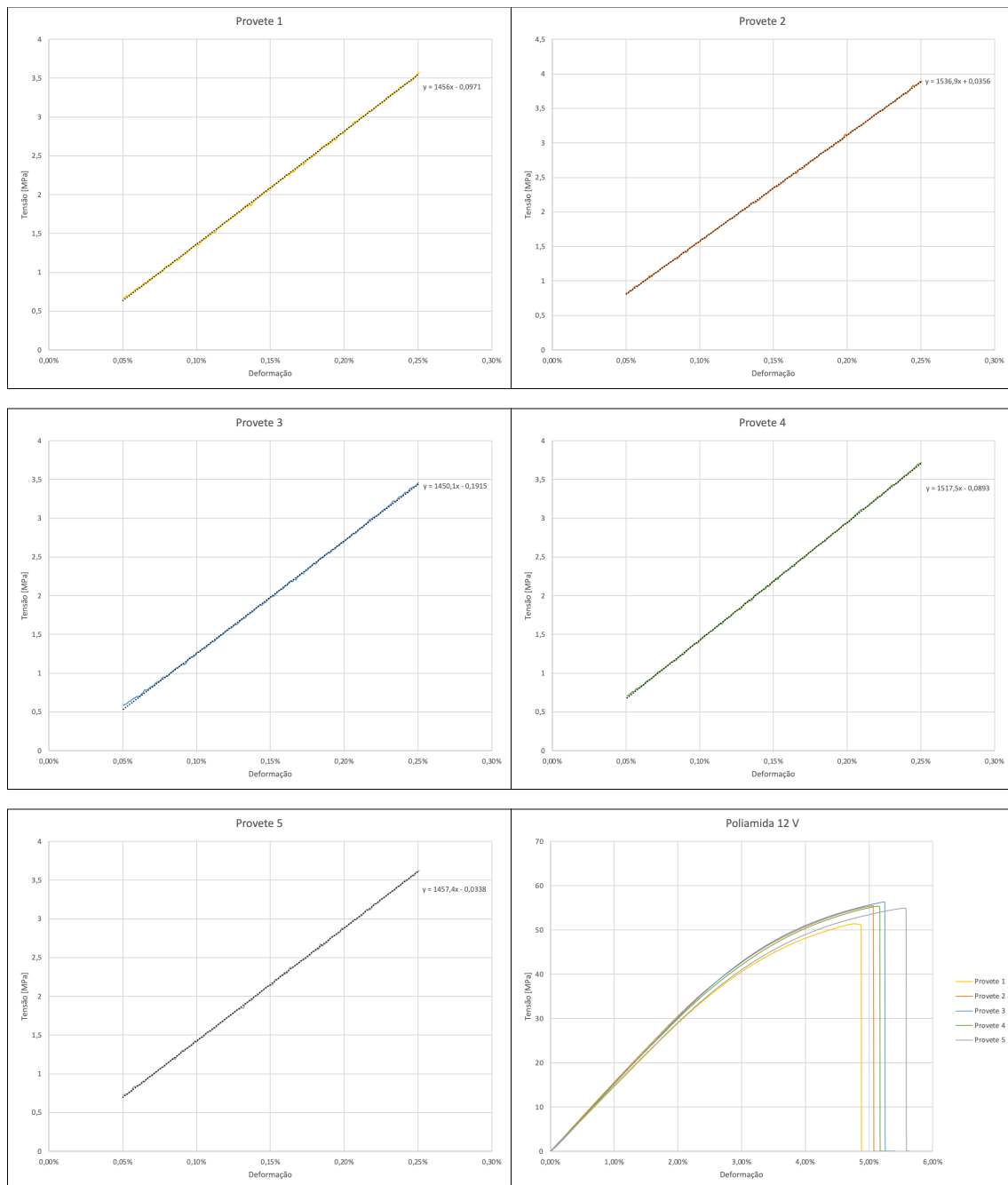
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ULTEM AM9085F



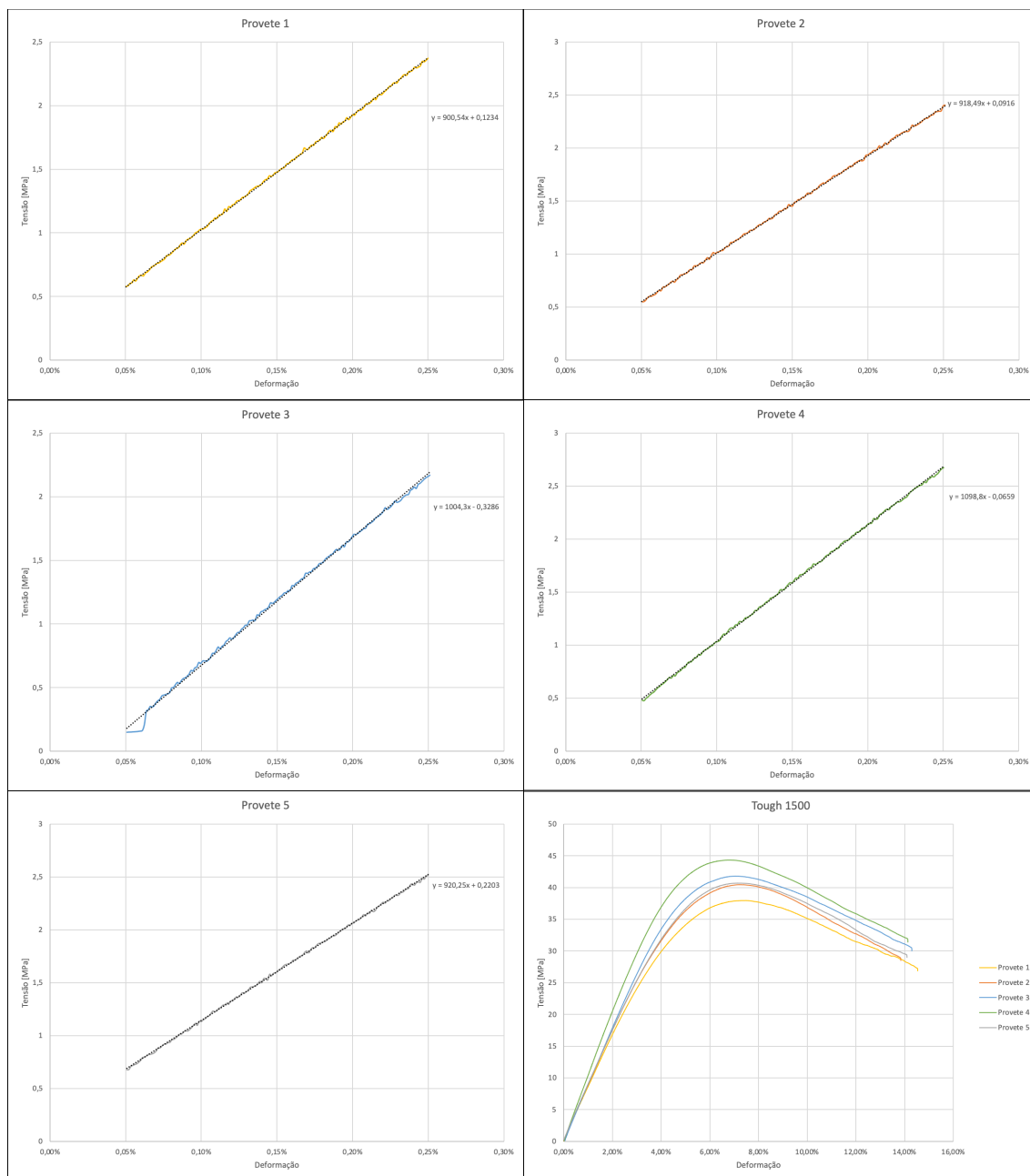
APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 H



APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE POLIAMIDA 12 V



APÊNDICE C - GRÁFICOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO E TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE TOUGH 1500



ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAIS



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PLA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø 1,75: 200 – 220 °C Ø 2,90: 210 – 230°C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

ABS FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/abs-not-dead		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	220 – 250 °C		
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	94 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	89 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	20 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,04 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	40 g/10 min



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PC/ABS FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polycarbonate/Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 mm		
Tolerance	± 0,1 mm		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pc-abs		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	240 – 260 °C		
Temperature HB	110 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PCABS Juice (blend Acetone)		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	115 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	98 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	40 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	2650 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,19 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min
Flammability	Fire resistance	UL94	V0 Class



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PETG FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polyetylentefeftalat - polyester, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/petg		
Solvents	Acetaldehyde, benzene		
Printing Properties:			
Temperature HE	230 – 250 °C		
Temperature HB	60 - 80 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	11 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1880 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PPJet FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polypropylene, petroleum product		
Diameters	1,75 mm		
Tolerance	± 0,1 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/ppjet		
Solvents	cyklohexane, tetrahydrofurane		
Printing Properties:			
Temperature HE	210– 230 °C		
Temperature HB	80 - 100 °C		
Surface bed	PP tape, ultem, Magigoo PP		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters		
Printer space	close		
Material Properties for TPE88:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	100 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	100 °C
Mechanical	Tensile strength	ISO 37	8 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	0,89 g/cm³
	Hardness	ISO 7619	41 ShoreD
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10min

TECHNICAL DATA SHEET

FILAFLEX 60A 'PRO'

Description

Filaflex is a Thermoplastic Polyether-Polyurethane elastomer with additives that allow high printability in FDM printers. Filaflex® has a remarkable hydrolysis resistance, high resistance to bacteria and low temperature flexibility properties in printed parts.

Physical properties	Value	Unit	Test method according to
Material density	1.07	g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1-A

Mechanical properties	Value	Unit	Test method according to
Hardness	63	Shore A	DIN ISO 7619-1 (3s)
Tensile strength	26	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break	950	%	DIN 53504-S2
Stress at 20% elongation	1	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 100% elongation	2.5	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 300% elongation	4.5	MPa	DIN 53504-S2
Tear strength	40	N/mm	DIN ISO 34-1Bb
Abrasion loss	45	mm ³	DIN ISO 4649-A
Compression set 23°C / 72 hours	40	%	DIN ISO 815
Compression set 70°C / 24 hours	25	%	DIN ISO 815

Printing properties	Recommended
Printing temperatures	215 - 235°C
Printing speed	20 - 30 mm/s
Hot-bed temperature	21°C
Optimal layer height	0.2 mm
Minimal nozzle diameter	0.4 mm or higher
Retraction parameters	3.5 - 6.5 mm (speed 20 - 160 mm/s)

TECHNICAL DATA SHEET

FILAFLEX 95A MEDIUM-FLEX

Description

Filaflex is a Thermoplastic Polyether-Polyurethane elastomer with additives that allow high printability in FDM printers. Filaflex® has a remarkable hydrolysis resistance, high resistance to bacteria and low temperature flexibility properties in printed parts.

Physical properties	Value	Unit	Test method according to
Material density	1	g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1-A
Mechanical properties	Value	Unit	Test method according to
Hardness	96	Shore A	DIN ISO 7619-1 (3s)
Hardness (approx. ≈)	48	Shore D	DIN ISO 7619-1 (3s)
Tensile strength	55	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break	500	%	DIN 53504-S2
Stress at 20% elongation	6	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 100% elongation	10	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 300% elongation	18	MPa	DIN 53504-S2
Tear strength	100	N/mm	DIN ISO 34-1Bb
Abrasion loss	25	mm ³	DIN ISO 4649-A
Compression set 23°C / 72 hours	30	%	DIN ISO 815
Compression set 70°C / 24 hours	45	%	DIN ISO 815
Tensile strength after storage in water at 80°C for 42 days	37	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break after storage in water at 80°C for 42 days	500	%	DIN 53504-S2
Notched impact strength (Charpy) at +23°C	nb	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1
Notched impact strength (Charpy) at - 30°C	nb	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1
Burning behaviour	HB		UL 94
Printing properties	Recommended		
Printing temperatures	215 - 250°C		
Printing speed	20 - 70 mm/s		
Hot-bed temperature	0-40°C		
Optimal layer height	0.2 mm		
Minimal nozzle diameter	0.4 mm or higher		
Retraction parameters	3.5 - 6.5 mm (speed 20 - 160 mm/s)		

TECHNICAL DATE SHEET

n-ASA

PROPERTIES

	PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDICTION
PHYSICAL & MECHANICAL	Density	1.07 g/cm3	ASTM D792
	Rockwell Hardness	103 R-Scale	D790
	IZOD Impact Strength, 3.2mm	18 / 4 kg·cm/cm	ASTM D256 23°/-30°C
	Tensile strength	480 kg/cm2	ASTM D785
	Tensile Modulus	21,2 kg/cm2	D882
	Tensile Elongation	0,06	yeald
	Tensile Elongation	0,25	break
THERMAL	Melt flow rate	12 g/10min	ASTM D1238 220°C/10kg
	Heat Deflection Temperature	96°C	ASTM D648 4,6Kg
	Vicat Softening Temperature	95°C	ASTM D1525
	Flammability:		
	Burging Rate	ND	
	Flame Rating	Class HB	UL94

SUGGESTED PRINTER SETTING

	VALUE	UNIT
Extruder Temperature	230 – 250	°C
Print Speed	40 – 120	mm/sec
Bed Material	70 – 110	°C

PRODUCT DETAILS & CERTIFICATION

Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tollerance ± 0,05mm Tollerance ± 0,10mm
REACH compliant		ND
FDA compliant		ND
ROHS certified		ND

The information supplied in relation to our products recommendations or otherwise, is collected from source considered to be dependable or internally developed. Ciceri de Mondel Srl assumes no liability and makes no warranties of any kind about the accuracy of this datas. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall.

TECHNICAL DATE SHEET

ALFAOHM

BASE MATERIAL: Polylactic acid + carbon nanotubes

PROPERTIES

PROPERTIES	VALUE	METOD AND CONDICTION
PHYSICAL & MECHANICAL	Density	1,35 g/cm ³
	CHARPY (test 80x10x4 mm)	9 kJ/m ²
	Elongation at break	12,00%
	Tensile strength at break	25 Mpa
	Flexure Modulus	1550 Mpa
	Electrical resistivity of surface	
	along the layers	15 ohm*cm
	perpendicular to the layers	20 ohm*cm

SUGGESTED PRINTER SETTING

	VALUE	UNIT
Extruder Temperature	190 - 210	°C
Print Speed	10 - 50	mm/s
Bed Material	0 - 50	°C

PRODUCT DETAILS & CERTIFICATION

Diameter	1,75 mm 2,85 mm	Tollerance ± 0,05mm Tollerance ± 0,10mm
----------	--------------------	--

The information supplied in relation to our products recommendations or otherwise, is collected from source considered to be dependable or internally developed. Ciceri de Mondel Srl assumes no liability and makes no warranties of any kind about the accuracy of this datas. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall.

Filoalfa by Ciceri de Model Srl
Via Galvani 13, 20080
Ozzero (MI)

Nylon for 3D Printing

856

The first low-temp Nylon

- Ideal for Industrial modelling and prototyping
- Fast cooling
- Low-temp nylon designed to extrude at ~230°C
- Semi-flexible filament produces results similar to an injection moulded part
- Durable and impact resistant with high thermal durability
- Pre-lubricated filament using exclusive lubricity™ technology
- Odour-free

Size Specifications ^[a]		Units	Test Method
Nominal Diameter	1.75 / 2.85	mm	-
Diameter Tolerances	±0.10 / ±0.10	mm	-
Mechanical Properties		Units	Test Method
Tensile Modulus	1410 ± 100	MPa	ISO 527-1
Tensile Stress at Yield	36.5 ± 2.6	MPa	ISO 527-1
Tensile Stress at Break	7.7 ± 1.4	MPa	ISO 527-1
Tensile Strain at Yield	3.7 ± 0.1	%	ISO 527-1
Tensile Strain at Break	83 ± 12	%	ISO 527-1
Flexural Strength	48 ± 5	MPa	ISO 178
Flexural Modulus	775 ± 120	MPa	ISO 178
Izod Impact Strength, notched	11 ± 2	kJ/m ²	ISO 180

^[a]Property measured using the filament. All remaining properties are measured using 3D test specimens.

Thermal Properties		Units	Test Method
Melt Mass-Flow Rate	6.0 ± 0.5	g/10min	ISO 1133
Heat Deflection (HDT) at 0.455 MPa	95 ± 7	°C	ISO 75
Heat Deflection (HDT) at 1.820 MPa	59 ± 2	°C	ISO 75
Glass Transition, 1Hz	30 – 31	°C	ISO 6721
Coefficient of Thermal Expansion	6 x 10 ⁻⁵	m/m°C	-
Melting Temperature ^[a]	210 – 220	°C	ISO 11357
VICAT Softening Temperature	144 ± 5	°C	ISO 306
Printer Settings ^[b]		Units	Test Method
Extruder Temperature	225 – 235	°C	-
Plate Temperature	0	°C	-
Ventilation	0	%	-

^[b]Recommended settings. For the best results when printing with Filkemp filaments, carefully read the 3D printer manufacturer's instructions manual.

Additional Information

Regulatory Compliance: REACH / RoHs

Spool Weight: 1kg (2.2lbs)

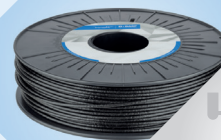
All filaments are supplied in vacuum-sealed packaging containing a desiccant bag

Other sizes, spool weight and packaging are available upon request

Revision: 01/2018

Disclaimer:

This information is based on our current knowledge of raw materials and the manufacturing process and refers to the above mentioned products when leaving Filkemp. It is solely the customer's responsibility to determine if the product and information in this document are appropriate for the customer's end use. Responsibility for the use, storage, handling and disposal of the products herein is that of the purchaser or end user.



Ultrafuse® PAHT CF15

High Temperature PA with 15 % Carbon Fiber

Ultrafuse® PAHT CF15 is a high-performance 3D printing filament that opens up new application areas in FFF printing. It works in any FFF printer with a hardened nozzle. Additionally, it is compatible with BVOH, water-soluble support material, and HIPS which enables the printing of complex geometries for the most challenging operating environments.

Ultrafuse® PAHT CF15 combines high temperature and chemical resistance with outstanding mechanical resilience. Due to its excellent dimensional stability your printed component will display low shrinkage during printing, ensuring an easy print experience. The nature of the fibers ensures that the parts remain very strong and highly rigid.

Benefits at a Glance

- Higher chemical resistance than most PA grades
- High temperature resistance up to 150 °C
- Strong, rigid components
- High dimensional stability
- Easy to process
- Low moisture absorption

Example Applications

- Complex geometries in challenging environments
- Automotive

Material Properties (dry)

Tensile Strength (MPa)	18.2 (ZX), 103.2 (XY)
Flexural Modulus (MPa)	2715 (ZX), 7669 (XZ), 8258 (XY)
Elongation at Break	0.5 % (ZX), 1.8 % (XY)
Impact Strength Izod notched (kJ/m²)	5.1 (XZ), 4.9 (XY)
Impact Strength Izod unnotched (kJ/m²)	2.9 (ZX), 18.1 (XZ), 16.4 (XY)
HDT @ 0.45 MPa	145 °C

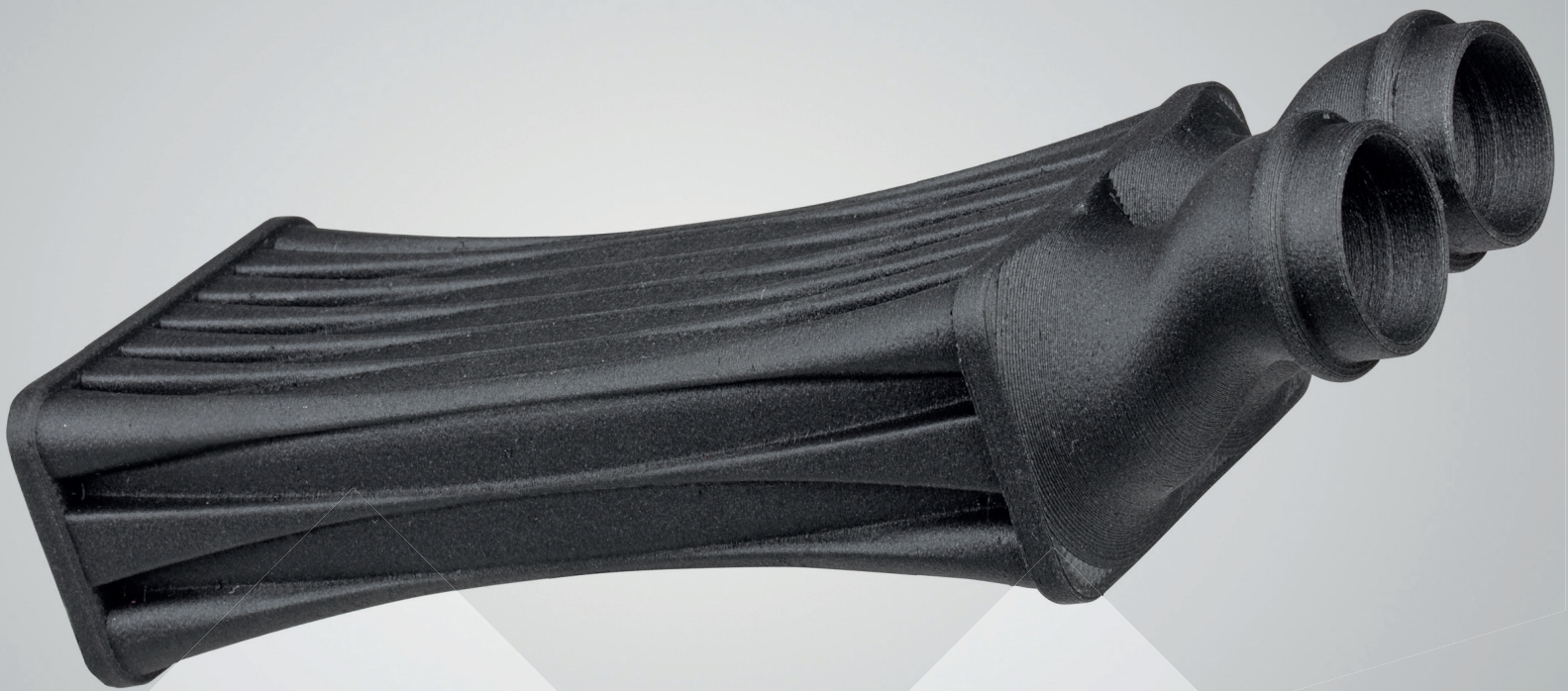
Printing Guidelines

Print Speed	30-80 mm / sec
Nozzle Temperature	260-280 °C
Nozzle	Hardened/Ruby ≥ 0.6 mm diameter
Bed Temperature	100-120 °C
Bed Modification	PEI or clean glass
Fan Speed	0 %
Layer Height	0.2-0.4 mm

The product data is provided in good faith and represents typical properties based on our current knowledge and experience; these data are not to be construed as specification limits or minimum values. Product properties may be changed without notice. This document does not create any liability, warranty or guarantee of product performance. It is the buyer's responsibility to determine the suitability of Ultrafuse® products for the intended application.



Ultrafuse® PAHT CF15



Technical Data Sheet

Prusament PC Blend Carbon Fiber by Prusa Polymers

Identification:

Trade name	Prusament PC Blend Carbon Fiber
Chemical name	Polycarbonate blend filled with Carbon Fiber
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1,75 ± 0,04 mm
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings:

Nozzle Temperature [°C]	285 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	110 ± 10
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	0 % (0 – 20 %*)
Brim	Not necessary in general

*Depends on the geometry of the printed object, to improve bridges set 20 % in PrusaSlicer. Note, cooling decreases significantly interlayer adhesion with just small or no effect on printing quality.

Typical material properties:

	Typical Value	Method
MFR [g/10min] ⁽¹⁾	18	ISO 1133
MVR [cm ³ /10min] ⁽¹⁾	16	ISO 1133
Density [g/cm ³]	1,16	Prusa Polymers
Moisture Absorption 24 hours [%] ⁽²⁾	0,38	Prusa Polymers
Moisture Absorption 7 days [%] ⁽²⁾	0,42	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C]	114	ISO 75
Heat Deflection Temperature (1,80 MPa) [°C]	106	ISO 75
Tensile Yield Strength Filament [MPa]	55 ± 2	ISO 527
Hardness – Shore D	82	Prusa Polymers
Interlayer adhesion [MPa]	20 ± 2	Prusa Polymers

(1) 265 °C; 5 kg

(2) 25 °C; humidity 23 %

Mechanical properties of printed testing specimens⁽³⁾:

Property\Print Direction	Horizontal	Vertical xz	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	55 ± 4	65 ± 4	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	2,3 ± 0,1	2,8 ± 1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	3,5 ± 0,5	3,9 ± 0,4	ISO 527-1
Flexural Strength [MPa]	85 ± 1	106 ± 1	ISO 178
Flexural Modulus [GPa]	3,0 ± 0,1	4,9 ± 0,1	ISO 178
Deflection at Flexural Str. [mm]	8,8 ± 0,2	6,9 ± 0,1	ISO 178
Impact Strength Charpy ⁽⁴⁾ [kJ/m ²]	30 ± 6	35 ± 3	ISO 179-1
Impact S.Charpy notch. ⁽⁵⁾ [kJ/m ²]	9 ± 1	10 ± 1	ISO 179-1

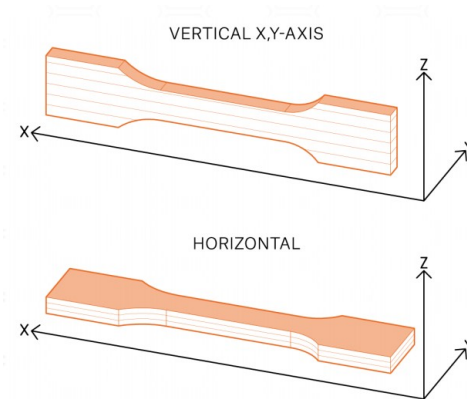
(3) Original Prusa i3 MK3S 3D printer was used to make testing specimens. PrusaSlicer-2.3.1 was used to create G-codes with following settings: Prusament PC Blend Carbon Fiber; Print settings 0,20 mm FAST (layers 0,2 mm); solid layers Top: 0 Bottom: 0; perimeters: 2, infill 100 % Rectilinear, infill print speed 200 mm/s; extruder temperature 285 °C all layers; bed temperature 120 °C all layers; extrusion multiplier 1,07; print cooling off; other parameters set default

(4) Charpy unnotched - Edgewise direction of blow according to ISO 179-1

(5) Charpy notched - Edgewise direction of blow according to ISO 179-1

Disclaimer:

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, the operator's experience, and surrounding conditions. Everyone has to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers a.s. can not carry any responsibility for injuries or any loss caused by using Prusament PC Blend CF (Prusament PC Blend Carbon Fiber) material. Before using PC Blend material read properly all the details in the available safety data sheet (SDS).



ULTEM™ FILAMENT AM9085F

DESCRIPTION

ULTEM™ AM9085F filament is a high performance polyetherimide blend product manufactured from ULTEM™ 9085 resin. It is available in black and natural (unpigmented) colors. It provides high heat resistance and mechanical strength, is UL94 V-0 compliant at 1.5 and 3.0 mm (Blue Cards are available on UL IQ Database), and meets FAR 25.853 and OSU 55/55 with low toxicity, smoke, and flame evolution.

TYPICAL PROPERTY VALUES

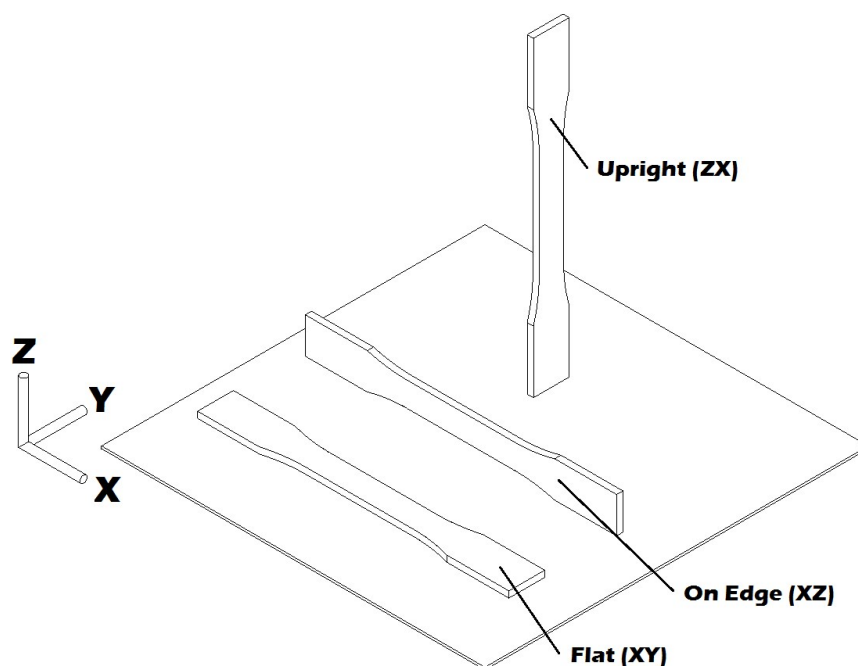
Revision 20210812

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Tensile Modulus			
XY ORIENTATION	2176	MPa	ASTM D638
XZ ORIENTATION	2555	MPa	ASTM D638
ZX ORIENTATION	2439	MPa	ASTM D638
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min			
XY ORIENTATION	62	MPa	ASTM D638
XZ ORIENTATION	80	MPa	ASTM D638
ZX ORIENTATION	45	MPa	ASTM D638
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min			
XY ORIENTATION	5.1	%	ASTM D638
XZ ORIENTATION	5.8	%	ASTM D638
ZX ORIENTATION	2.3	%	ASTM D638
Flexural Modulus, 1.3 mm/min			
XY ORIENTATION	2126	MPa	ASTM D790
XZ ORIENTATION	2550	MPa	ASTM D790
ZX ORIENTATION	2070	MPa	ASTM D790
Izod Impact, notched, 23°C ⁽¹⁾			
XY ORIENTATION	104	J/m	ASTM D256
XZ ORIENTATION	100	J/m	ASTM D256
ZX ORIENTATION	33	J/m	ASTM D256
Izod Impact, un-notched, 23°C			
XY ORIENTATION	763	J/m	ASTM D256
XZ ORIENTATION	1003	J/m	ASTM D256
ZX ORIENTATION	131	J/m	ASTM D256
THERMAL			
HDT, 1.82 MPa, 3.2 mm, unannealed			
XY ORIENTATION	175	°C	ASTM D648
XZ ORIENTATION	175	°C	ASTM D648
ZX ORIENTATION	165	°C	ASTM D648
Coefficient of Thermal Expansion - flow			
XY ORIENTATION	57.1	µm/(m·°C)	ASTM E831
XZ ORIENTATION	60.6	µm/(m·°C)	ASTM E831
ZX ORIENTATION	62.1	µm/(m·°C)	ASTM E831
Coefficient of Thermal Expansion - x-flow			
XY ORIENTATION	58.3	µm/(m·°C)	ASTM E831

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
XZ ORIENTATION	61.1	$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$	ASTM E831
ZX ORIENTATION	62.9	$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$	ASTM E831
PHYSICAL			
Density	1.275	g/cm^3	ASTM D792
ELECTRICAL			
Volume Resistivity			
XY ORIENTATION	1.07E+15	Ohm-cm	ASTM D257
XZ ORIENTATION	1.1E+15	Ohm-cm	ASTM D257
Dielectric Constant - 100 MHz			
XY ORIENTATION	2.54	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	2.73	-	ASTM D150
Dissipation Factor - 100 MHz			
XY ORIENTATION	0.00233	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	0.003	-	ASTM D150
Dielectric Constant - 500 MHz			
XY ORIENTATION	2.53	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	2.72	-	ASTM D150
Dissipation Factor - 500 MHz			
XY ORIENTATION	0.005	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	0.00567	-	ASTM D150
Dielectric Constant - 1000 MHz			
XY ORIENTATION	2.52	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	2.71	-	ASTM D150
Dissipation Factor - 1000 MHz			
XY ORIENTATION	0.004	-	ASTM D150
XZ ORIENTATION	0.004	-	ASTM D150
FLAME CHARACTERISTICS			
FAA Flammability			
XY ORIENTATION, 1.5mm	PASS	-	FAR 25.853
OSU total heat release (2 minute test)			
XY ORIENTATION, 1.5mm	44	$\text{kW}\cdot\text{min}/\text{m}^2$	FAR 25.853
OSU peak heat release rate (5 minute test)			
XY ORIENTATION, 1.5mm	45	kW/m^2	FAR 25.853
UL94 Flame Class Rating ⁽²⁾			
XY ORIENTATION, 1.5mm	V-0	-	-
XZ ORIENTATION, 1.5mm	V-0	-	-
ZX ORIENTATION, 1.5mm	V-0	-	-
XY ORIENTATION, 3.0mm	V-0	-	-
XZ ORIENTATION, 3.0mm	V-0	-	-
ZX ORIENTATION, 3.0mm	V-0	-	-

(1) Izod impact strength test coupons were printed using a Stratasys FORTUS† 900mc printer at high print density (88.5%).

(2) UL results provided herein may not be sufficient to waive end use part testing for UL listing. Contact UL for further details.



DISCLAIMER

Typical values only. Not intended for design or specification purposes. Variations within normal tolerances are possible for various colors. Test coupons were printed using a Stratasys FORTUS† 400mc printer under standard parameters unless otherwise noted.

† Any brands, products or services of other companies referenced in this document are the trademarks, service marks and/or trade names of their respective holders.

DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.

ENGINEERING MATERIAL

Nylon 12

Nylon 12 Powder For Strong, Functional
Prototypes and End-Use Parts

With high tensile strength, ductility, and environmental stability,
Nylon 12 Powder is suitable for creating complex assemblies
and durable parts with minimal water absorption.

Nylon 12 Powder is specifically developed for use on the Fuse 1.



V1 FLP12G01

formlabs 

Prepared 08 . 19 . 2020
Rev 01 08 . 19 . 2020

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

NYLON 12 MATERIAL PROPERTIES DATA

	METRIC ^{1,2}	IMPERIAL ^{1,2}	METHOD
Tensile Properties			
Ultimate Tensile Strength	50 MPa	7252 psi	ASTM D638 Type 1
Tensile Modulus	1850 MPa	268 ksi	ASTM D638 Type 1
Elongation at Break (X/Y)	11%	11%	ASTM D638 Type 1
Elongation at Break (Z)	6%	6%	ASTM D638 Type 1
Flexural Properties			
Flexural Strength	66 MPa	9572 psi	ASTM D790 A
Flexural Modulus	1600 MPa	232 ksi	ASTM D790 A
Impact Properties			
Notched Izod	32 J/m	0.60 ft-lb/in	ASTM D256
Temperature Properties			
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	87 °C	189 °F	ASTM D648
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	171 °C	340 °F	ASTM D648
Vicat Softening Temperature	175 °C	347 °F	ASTM D1525
Other Properties			
Moisture Content (powder)	0.25%	0.25%	ISO 15512 Method D
Water Absorption (printed part)	0.66%	0.66%	ASTM D570

Samples printed with Nylon 12 Powder have been evaluated in accordance with ISO 10993-1:2018, and has passed the requirements for the following biocompatibility risks:

ISO Standard	Result ^{3,4}
EN ISO 10993-5:2009	Not cytotoxic
ISO 10993-10:2010/(R)2014	Non irritant
ISO 10993-10:2010/(R)2014	Not a sensitizer

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain (%)	Solvent	24 hr weight gain (%)
Acetic Acid 5%	0.10	Mineral oil, heavy	0.66
Acetone	0.14	Mineral oil, light	0.54
Bleach ~5% NaOCl	0.21	Salt Water (3.5% NaCl)	0.15
Butyl Acetate	0.18	Skydrol 5	0.59
Diesel Fuel	0.43	Sodium hydroxide solution (0.025% pH = 10)	0.20
Diethyl glycol monomethyl ether	0.49	Strong Acid (HCl Conc)	0.76
Hydraulic Oil	0.59	TPM	0.31
Hydrogen peroxide (3%)	0.20	Water	0.05
Isooctane	0.01	Xylene	0.12
Isopropyl Alcohol	0.19		

¹ Material properties may vary with part geometry, print orientation and temperature.
² Parts were printed using Fuse 1 with Nylon 12 Powder. Parts were conditioned at 50% relative humidity and 23 °C for 7 days before testing.
³ Material properties may vary based on part design and manufacturing practices. It is the manufacturer's responsibility to validate the suitability of the printed parts for the intended use.
⁴ Nylon 12 was tested at NAMS World Headquarters, OH, USA.

ENGINEERING RESIN

Tough 1500

Tough 1500 Resin for Resilient Prototyping

Tough 1500 Resin is the most resilient material in our functional family of Tough and Durable Resins. It produces stiff and pliable parts that bend and spring back quickly under cyclic loading.

Springy prototypes and assemblies

Snap fit and press fit connectors

Polypropylene-like strength



FLTO1501

formlabs 

Prepared 01 . 27 . 2020
Rev 01 01 . 27 . 2020

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

Tough 1500 Resin Material Properties Data

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Mechanical Properties					
Ultimate Tensile Strength	26 MPa	33 MPa	3771 psi	4786 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	0.94 GPa	1.5 GPa	136 ksi	218 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break	69 %	51 %	69 %	51 %	ASTM D 638-14
Flexural Properties					
Flexural Strength	15 MPa	39 MPa	2175 psi	5656 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.44 GPa	1.4 GPa	58 ksi	203 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched IZOD	72 J/m	67 J/m	1.3 ft-lbf/in	1.2 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Unnotched IZOD	902 J/m	1387 J/m	17 ft-lbf/in	26 ft-lbf/in	ASTM D4812-11
Thermal Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	34 °C	45 °C	93 °F	113 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	42 °C	52 °C	108 °F	126 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion	114 µm/m/°C	97 µm/m/°C	63 µin/in/°F	54 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm without additional treatments.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm and post-cured with a Form Cure for 60 minutes at 70 C.

Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 Hour Weight Gain (%)	Solvent	24 Hour Weight Gain (%)
Acetic Acid, 5 %	0.75	Hydrogen Peroxide (3 %)	0.71
Acetone	19.07	Isooctane	0.02
Isopropyl Alcohol	3.15	Mineral Oil, light	0.05
Bleach, ~5 % NaOCl	0.62	Mineral Oil, heavy	0.09
Butyl Acetate	5.05	Salt Water (3.5 % NaCl)	0.66
Diesel	0.11	Sodium hydroxide (0.025 %, pH = 10)	0.7
Diethyl glycol monomethyl ether	5.25	Water	0.69
Hydrolic Oil	0.17	Xylene	3.22
Skydrol 5	0.46	Strong Acid (HCl Conc)	4.39

SABIC® PP PHC3 1-81

PP IMPACT COPOLYMER

DESCRIPTION

SABIC® PP PHC3 1-81 is a grade which combines high stiffness with good impact strength. Its excellent flow properties and narrow molecular weight distribution permits fast cycle-times and injection moulding of articles demanding low warpage and high dimensional stability. This grade is formulated with a combined processing and UV-stabilisation package. Typical applications are automotive components. It is also available in a general purpose additive package.

SABIC® PP PHC3 1-81 is a designated automotive grade.

IMDS ID: 80775790

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20220720

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
POLYMER PROPERTIES			
Melt Flow Rate (MFR)			
at 230 °C and 2.16 kg	15	dg/min	ISO 1133
Density	905	kg/m³	ISO 1183
Mould shrinkage			
24 hours after injection moulding ⁽¹⁾	1.6	%	SABIC method
FORMULATION			
UV stabilized	☒	-	-
Anti static agent	☐	-	-
Nucleating agent	☐	-	-
MECHANICAL PROPERTIES			
Tensile test			
stress at yield	25	MPa	ISO 527-2 1A
strain at yield ⁽²⁾	5	%	ISO 527-2 1A
tensile modulus ⁽³⁾	1300	MPa	ISO 527-2 1A
Izod impact notched			
at 23 °C	11	kJ/m²	ISO 180/1A
at 0 °C	7	kJ/m²	ISO 180/1A
at -20 °C	5	kJ/m²	ISO 180/1A
Charpy Impact Strength Notched			
at 23 °C	12.5	kJ/m²	ISO 179/1eA
at 0 °C	8	kJ/m²	ISO 179/1eA
at -20 °C	5	kJ/m²	ISO 179/1eA
Hardness Shore D	65	-	ISO 868
THERMAL PROPERTIES			
Heat deflection temperature ⁽⁴⁾			
at 1.80 MPa (HDT/A)	55	°C	ISO 75
at 0.45 MPa (HDT/B)	80	°C	ISO 75
Vicat Softening Temperature ⁽⁵⁾			
at 10 N (VST/A)	149	°C	ISO 306
at 50 N (VST/B)	74	°C	ISO 306

- (1) All measurements on injection molded samples.
- (2) Speed of testing: 50 mm/min
- (3) Speed of testing: 1 mm/min
- (4) Flat wise (testbar 80*10*4mm)
- (5) Temperature rate: 120°C/h

STORAGE AND HANDLING

Avoid prolonged storage in open sunlight, high temperatures (<50 °C) and/or high humidity as this could well speed up alteration and consequently loss of quality of the material and/or its packaging. Keep material completely dry for good processing.

DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NONINFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.

SANTOPRENE™ 8211-55B100 - TPV

Product Description

A soft, colorable, specialty, non-hygroscopic thermoplastic vulcanizate (TPV) in the thermoplastic elastomer (TPE) family. It is especially formulated to bond to ABS, PS, PC, PMMA, ASA, PET and PPO/PS blends for applications where hard/soft combinations are required. This grade of Santoprene™ TPV is shear-dependent and can be processed on conventional thermoplastics equipment for injection molding or extrusion. It is polyolefin based and recyclable within the manufacturing stream.

Characteristics

Applications	Automotive - Grips, Automotive - HVAC Flapper Door Seals, Automotive - Interior, Consumer - Electronics, Consumer - Floor Care, Consumer - Kitchen Tools, Consumer - Power Tools, Consumer - Writing Instruments, Consumer Applications, Seals and Gaskets, Soft Touch Grips
Uses	Appliance components, Appliances, Automotive applications, Automotive under the hood, Bonding, Cell phones, Consumer applications, Eyeglass frames, Flexible grips, Kitchenware, Living hinges, Seals, Sporting goods, Strain reliefs, Tie-layer, White goods & small appliances
Agency Ratings	UL QMFZ2, UL QMFZ8
UL File Number	E80017
Color	Natural color
Delivery Form	Pellets
Processing	Coextrusion, Injection molding, Multi injection molding

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1.04	g/cm ³	ASTM D792
Density	1040	kg/m ³	ISO 1183
Hardness	Value	Unit	
Shore A hardness-TPE, 15s	53		ISO 868
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Elongation at break elast, perpendicular	600	%	ASTM D412
Tensile strain at break, perpendicular	600	%	ISO 37
Compression set, 125°C, 70h, Type 1, Method B	55	%	ASTM D395
Compression set, 125°C, 70h, Type A	55	%	ISO 815
Aging	Value	Unit	Test Standard
Change in Tensile Strength in Air @ 100 C, 168 h	-28	%	ASTM D573
Change in Tensile Strength in Air @ 100 C, 168 h	-28	%	ISO 188
Change in Tensile Strength in Air @ 125 C, 168 h	-61	%	ASTM D573
Change in Tensile Strength in Air @ 125 C, 168 h	-61	%	ISO 188
Change in Ultimate Elongation in Air @ 100 C, 168 h	-14	%	ASTM D573
Change in Tensile Strain at Break in Air @ 100 C, 168 h	-14	%	ISO 188
Change in Ultimate Elongation in Air @ 125 C, 168 h	-70	%	ASTM D573
Change in Tensile Strain at Break in Air @ 125 C, 168 h	-70	%	ISO 188
Change in Durometer Hardness in Air @ 100 C, 168 h, Shore A	-4	-	ASTM D573
Change in Shore Hardness in Air @ 100 C, 168 h, Shore A	-4	-	ISO 188
Change in Durometer Hardness in Air @ 125 C, 168 h, Shore A	8	-	ASTM D573
Change in Shore Hardness in Air @ 125 C, 168 h, Shore A	8	-	ISO 188

SANTOPRENE™ 8211-55B100 - TPV

Flammability	Value	Unit
Flame rating, 1.1 mm	HB	UL 94
Flame rating, 2.9 mm	HB	UL 94

Other text information

Processing Notes

Desiccant drying for 3 hours at 70°C (160°F) can be performed if desired. For two-shot injection molding, recommended melt temperature is 210 to 230°C (410 to 445°F) with mold temperatures of 30 to 50°C (90 to 125°F). For insert injection molding, recommended melt temperature is 230 to 250°C (445 to 485°F) with mold temperatures of 25 to 50°C (75 to 125°F). Because of its inherent nature to bond, this material may, on occasion, agglomerate from shipping and storage. Santoprene™ TPV is incompatible with acetal and PVC.

Other Approvals

OEM	Specification
GM	GMW15702-250006

Contact

Americas

8040 Dixie Highway
Florence, KY 41042 USA
Product Information Service
t: +1-800-833-4882
t: +1-859-372-3244
Customer Service
t: +1-800-526-4960
t: +1-859-372-3214
e: info-engineeredmaterials-am@celanese.com

Asia

4560 Jinke Road
Zhang Jiang Hi Tech Park
Shanghai 201210 PRC
Customer Service
t: +86 21 3861 9288
e: info-engineeredmaterials-asia@celanese.com

Europe

Am Unisys-Park 1
65843 Sulzbach, Germany
Product Information Service
t: +49-800-86427-531
t: +49-(0)-69-45009-1011
e: info-engineeredmaterials-eu@celanese.com

General Disclaimer

NOTICE TO USERS: Values shown are based on testing of laboratory test specimens and represent data that fall within the standard range of properties for natural material. These values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes. Colorants or other additives may cause significant variations in data values. Properties of molded parts can be influenced by a wide variety of factors including, but not limited to, material selection, additives, part design, processing conditions and environmental exposure. Any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the users and the manner of such use is the sole responsibility of the users, who must assure themselves that the material as subsequently processed meets the needs of their particular product or use. To the best of our knowledge, the information contained in this publication is accurate; however, we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information. The information contained in this publication should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of the materials mentioned in this publication. Moreover, there is a need to reduce human exposure to many materials to the lowest practical limits in view of possible adverse effects. To the extent that any hazards may have been mentioned in this publication, we neither suggest nor guarantee that such hazards are the only ones that exist. We recommend that persons intending to rely on any recommendation or to use any equipment, processing technique or material mentioned in this publication should satisfy themselves that they can meet all applicable safety and health standards. We strongly recommend that users seek and adhere to the manufacturer's current instructions for handling each material they use, and entrust the handling of such material to adequately trained personnel only. Please call the telephone numbers listed for additional technical information. Call Customer Services for the appropriate Materials Safety Data Sheets (MSDS) before attempting to process our products. The products mentioned herein are not intended for use in medical or dental implants.

Trademark

© 2021 Celanese or its affiliates. All rights reserved. Celanese®, registered C-ball design and all other trademarks identified herein with ®, TM, SM, unless otherwise noted, are trademarks of Celanese or its affiliates. Fortron is a registered trademark of Fortron Industries LLC.