



OPTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E ESTUDO DAS PROPRIEDADES DA IMPRESSÃO 3D FUSED DEPOSITION MODELING TRÊS EIXOS NÃO-PLANAR

JOÃO PAULO MARQUES DE MAGALHÃES COSTA

outubro de 2023

OPTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E ESTUDO DAS PROPRIEDADES DA IMPRESSÃO 3D *FUSED DEPOSITION* *MODELING* NÃO PLANAR

João Paulo Marques Magalhães Costa

1160575

2022/2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

OPTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E ESTUDO DAS PROPRIEDADES DA IMPRESSÃO 3D *FUSED DEPOSITION* *MODELING NÃO PLANAR*

João Paulo Marques Magalhães Costa

1160575

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (IPP) para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação dos Doutores Arnaldo Manuel Guedes Pinto e Doutora Rita de Cássia Mendonça Sales-Contini.

2022/2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à empresa LaniRobotics por todo o auxílio prestado ao longo deste trabalho, e pela receção calorosa nas suas instalações, onde tive a possibilidade de realizar um estágio. Um obrigado especial ao Filipe, à Liliane, aos Mários e ao Luís, por estarem sempre prontos para colaborar e ajudar no que foi preciso, e ainda por criarem um esplêndido ambiente de trabalho.

Um agradecimento especial aos meus pais por me acompanharem ao longo de toda esta caminhada, e por estarem sempre disponíveis para tudo. Foram de facto inalcançáveis em todos os gestos e palavras ditas, elevando sempre o meu estado de espírito e tornando todo o processo muito mais simples.

À Ana Rita, a minha namorada, gostaria de agradecer toda a força e motivação que, durante este caminho, foram essenciais para chegar tão longe. Uma verdadeira voz de incentivo que fez sempre de tudo para auxiliar e facilitar esta minha etapa, através do seu ânimo e da sua boa disposição.

À minha família e aos meus amigos, deixo um enorme agradecimento pela disponibilidade, apoio e força passada, que foram, e têm sido, cruciais ao longo de toda a minha existência, para superar as mais diversas etapas com a melhor das atitudes.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Engenheiro Francisco Silva, pelo apoio prestado, recursos disponibilizados e pela orientação ao longo de todo o trabalho. Ao Doutor Arnaldo Pinto, à Doutora Rita Sales-Contini, ao Doutor Jorge Castro e ao Doutor Carlos Fernandes (FEUP - INEGI) pelo tempo, colaboração na realização dos ensaios mecânicos efetuados e na preparação da apresentação.

Por último, gostaria de agradecer a todos aqueles que se cruzaram no meu caminho e contribuíram para o meu crescimento, direta ou indiretamente.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido durante um estágio na empresa LaniRobotics e surge através da necessidade de se efetuar um estudo sobre capacidade de otimização do processo de fabrico *Fused Deposition Modeling* (FDM). O FDM é um tipo de manufatura aditiva cada vez mais presente na indústria atual, auxiliando diversas áreas devido à sua versatilidade, flexibilidade e adaptabilidade.

Num mercado onde cada vez mais a monitorização, o acompanhamento e a automação são características chave, este processo de fabrico apresenta características que tornam a sua utilização muito desejável. Apesar de apresentar muitas e fortes vantagens relativamente aos restantes processos de fabrico, possui as suas limitações, tal como qualquer outro processo. No entanto, o desenvolvimento constante deste processo, tem vindo a reduzir, ou até mesmo eliminar, algumas destas limitações.

Neste sentido, foi definido como objetivo deste trabalho, analisar os diversos parâmetros e propriedades do processo de impressão FDM, de 3 eixos, não planar. Este estudo foi realizado com o intuito de analisar a capacidade de otimização do processo de impressão FDM, através de uma técnica de impressão diferente da típica impressão planar, com recurso a camadas tridimensionais (3D).

Para esta análise, foram efetuados diversos ensaios e simulações, de modo a perceber quais as principais alterações obtidas com a aplicação da impressão não planar, e também, simular diversas metodologias de fatiamento e geração de caminhos de impressão. Para tal, foram analisadas as principais características da impressora utilizada e realizadas modificações para possibilitar um aumento das geometrias possíveis de ser estudadas.

Todos os dados recolhidos tiveram como principal objetivo encontrar formas de otimizar os parâmetros e características de impressão, tais como a qualidade superficial, a resistência mecânica e o ângulo máximo de impressão, através da técnica de uma impressão não planar, para impressoras FDM de 3 eixos. Não obstante, o presente estudo teve também como propósito a procura de métodos e técnicas capazes de ultrapassar algumas das limitações deste tipo de processo de fabrico.

Através deste trabalho foi possível concluir que a implementação da impressão não planar, em impressoras FDM de 3 eixos, resultam num melhoramento da qualidade superficial e da resistência mecânica das peças impressas, e também num aumento do ângulo máximo de impressão.

PALAVRAS-CHAVE

Manufatura Aditiva, *Fused Deposition Modeling*, Impressão 3D Não planar, Otimização, Parametrização, Processo de Fabrico.

ABSTRACT

The present work was developed during an internship at the company LaniRobotics and arises from the need to carry out a study of the optimization capacity of the Fused Deposition Modeling (FDM) manufacturing process. FDM is an additive manufacturing process increasingly present in today's industry, helping several areas due to its versatility, flexibility and adaptability.

In a market where, more and more, monitoring and automation are key features, this manufacturing process has characteristics that make its use very desirable. Despite presenting many strong advantages compared to other manufacturing processes, it has its limitations just like any other process. However, the constant development of this process has been reducing, or even eliminating, some of these limitations.

In this sense, the objective of this work was defined as analyzing the various parameters and properties of the 3-axis, non-planar FDM printing process. This study was carried out with the aim of analyzing the optimization capacity of the FDM printing process, through a printing technique different from typical planar printing, using three-dimensional (3D) layers.

For this analysis, several tests and simulations were carried out, to understand the main changes obtained with the application of non-planar printing, and to simulate different slicing methodologies and generation of printing paths. To this end, the main characteristics of the printer used were highlighted and modifications were introduced to enable an increase in the geometries possible to be studied.

All data collected had the main objective of finding ways to optimize printing parameters and characteristics, such as surface quality, mechanical resistance, and maximum printing angle, through the technique of non-planar printing, for 3-axis FDM printers. However, the present study also aimed to search for methods and techniques capable of overcoming some of the limitations of this type of manufacturing process.

Through this work it was possible to conclude that the implementation of non-flat printing, on 3-axis FDM printers, resulted in an improvement in the surface quality and mechanical resistance of the printed parts, and in an increase in the maximum printing angle.

KEYWORDS

Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Non-planar 3D Printing, Optimization, Parameterization, Manufacturing process.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XXV
LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XXIX
1. INTRODUÇÃO	33
1.1. Enquadramento do projeto.....	33
1.2. Local e período do estágio	33
1.3. Objetivos	35
1.4. Metodologia	35
1.5. Estrutura da dissertação.....	36
2. Caracterização teórica e estado da arte	41
2.1. Manufatura aditiva.....	41
2.2. Contextualização comercial	42
2.3. Tipos de Manufatura aditiva	45
2.3.1. Fotopolimerização em tanque (<i>Vat Photopolymerization</i>).....	45
2.3.2. Fusão em leito de pó (<i>Powder Bed Fusion</i>).....	46
2.3.3. Jateamento de material ligante (<i>Binder Jetting</i>).....	47
2.3.4. Laminação em folha (<i>Sheet Lamination</i>).....	47
2.3.5. Jateamento de material (<i>Material Jetting</i>)	47
2.3.6. Deposição de energia direcionada (<i>Directed Energy Deposition</i>).....	47
2.3.7. Extrusão de material (<i>Material Extrusion</i>)	48
2.4. <i>Fused Deposition Modeling</i>	48
2.4.1. Vantagens e desvantagens.....	51
2.4.2. Principais parâmetros de impressão.....	52
2.4.3. Defeitos comuns de uma impressão.....	54
2.4.4. Materiais utilizados.....	58
2.5. <i>G-CODE</i>	60
2.6. Impressão FDM não planar	61
3. Metodologia experimental	67
3.1. Equipamento e material de impressão	67
3.2. Equipamentos e técnicas de pós-processamento.....	69
3.3. Equipamentos de teste e medição.....	69
3.4. Análise das limitações mecânicas da impressora.....	70
3.4.1. Desenvolvimento de uma solução para otimizar o espaço de impressão não planar	70
3.5. Calibração da impressora	75
3.5.1. Determinação do multiplicador de extrusão	75
3.5.2. Nivelamento da cama de impressão.....	76

3.5.3. Calibração da temperatura de extrusão	78
3.5.4. Calibração dos parâmetros de retração.....	80
3.5.5. Ângulo máximo de impressão planar	81
3.6. Programa de fatiamento não planar	82
3.7. Procedimento experimental.....	83
3.7.1. Provetes para análise superficial	84
3.7.2. Provetes de tração não planares	87
3.7.3. Otimização do ângulo máximo de impressão	91
4. Apresentação dos resultados.....	95
4.1. Análise superficial.....	95
4.1.1. Provetes “Inclinação”	95
4.1.2. Provetes “Parábola”	96
4.1.3. Otimização dos provetes “Inclinação”	98
4.1.4. Ensaios de Rugosidade.....	99
4.1.5. Aplicação prática.....	104
4.2. Ensaio de tração	105
4.3. Otimização do ângulo máximo de impressão	111
5. Análise crítica	115
5.1. Qualidade superficial.....	115
5.1.1. Provetes “Inclinação”	115
5.1.2. Provetes “Parábola”	120
5.1.3. Suporte para tubos	121
5.1.4. Ensaios de rugosidade.....	121
5.2. Ensaios de tração.....	124
5.3. Otimização do ângulo máximo de impressão	125
6. Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	129
6.1. Conclusões.....	129
6.2. Propostas de trabalhos futuros.....	134
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
8. Anexos.....	145
8.1. ANEXO A – Ficha técnica da impressora 3D <i>Ender 3 V2</i>	145
8.2. Anexo B – Ficha técnica do filamento	148
8.3. Anexo C – Desenhos Técnicos	149
8.4. Anexo D – Imagens dos provetes “Inclinação” e “Raio”	161
8.4.1. Imagens dos provetes “Inclinação” (com padrão retilíneo)	161
8.4.2. Imagens dos provetes “Inclinação” (com padrão concêntrico).....	163
8.4.3. Imagens dos provetes “Parábola”.....	163
8.4.4. Características dos provetes “Inclinação” (otimização de parâmetros).....	165
8.5. Anexo E – Ensaios de rugosidade	173
8.5.1. Provetes planares.....	173

8.5.2. Medição da rugosidade da camada superior do Gabari 20°.....	175
8.5.3. Medição da rugosidade de uma parede lateral do provete “Inclinação” planar com 30°	176
8.5.4. Provetes “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,3 mm.....	176
8.5.5. Provetes “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,4 mm.....	177
8.5.6. Provetes “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,5 mm.....	179
8.5.7. Provetes “Inclinação” não planar com largura de extrusão de 0,6 mm	181
8.5.8. Provetes com largura de extrusão de 0,7 mm	183
8.5.9. Provetes do teste 1	185
8.5.10. Provetes do teste 2.....	187
8.5.11. Provetes do teste 3.....	187
8.5.12. Provetes do teste 4.....	189
8.5.13. Provetes do teste 5.....	191
8.5.14. Provetes do teste 6.....	193
8.5.15. Provetes do teste 7.....	195
8.5.16. Provetes do teste 8.....	197
8.6. Anexo F – Ensaios de tração	200
8.6.1. Provetes planares - PLXY	200
8.6.2. Provetes XY 10° Não Planares - NPXY1	202
8.6.3. Provetes XY 20° Não Planares - NPXY2	203
8.6.4. Provetes XY 30° Não planares - NPXY3	205
8.6.5. Provetes planares – NPZ	206
8.6.6. Provetes Z 10° Não planares – NPZ1.....	208
8.6.7. Provetes Z 20° Não planares – NPZ2.....	210
8.6.8. Provetes Z 30° Não planares – NPZ3.....	211

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma da empresa <i>LaniRobotics</i>	34
Figura 2- Representação do equipamento SLA 250 e esquematização do processamento por SL [5]	41
Figura 3- Processamento da impressão 3D [7]	42
Figura 4 - Gráfico da evolução do conhecimento sobre MA [1]	43
Figura 5 - Gráfico da utilização da MA por indústria [1].	43
Figura 6 - Gráfico de custo unitário por volume de produção, para cada processo de fabrico [9] .	44
Figura 7 - Gráfico do relatório anual global da produção de peças AM de prestadores de serviços independentes (em milhões de dólares) por Wohler [11]	44
Figura 8 - Representação de impressão por <i>Vat Polimerization</i> [17]	45
Figura 9 - Representação de um <i>voxel</i> num conjunto [18].	45
Figura 10 – Representação do processo de impressão por <i>Powder Bed Fusion</i> [20]	46
Figura 11 - Representação do processo de otimização da topologia da peça [22]	46
Figura 12 - Representação do sistema de extrusão por tubo guia a) e direta b) [12]	50
Figura 13 - Representação dos componentes de uma cabeça de impressão [50].....	50
Figura 14 - Representação da influência da altura da camada de uma impressão [66].	53
Figura 15 - Caracterização do perfil de extrusão por FDM [9].	53
Figura 16 - Representação da orientação de construção consoante o posicionamento do objeto [65].	54
Figura 17 - Altura da primeira camada ideal [69].	55
Figura 18 - Representação efeito ' <i>elephant foot</i> ' [72].	56
Figura 19 - Representação efeito de <i>warping</i> [72].	56
Figura 20 - Representação do efeito delaminação [73].	56
Figura 21 - Representação efeito stringing [72].	56
Figura 22 - Objeto com suportes aplicados [9].	57
Figura 23 - Blobs e Zits numa superfície impressa [69].	57
Figura 24 - Efeito de excesso de extrusão [72].	57
Figura 25 - Efeito de falta de extrusão [72].	57
Figura 26 - Formas de colocar fibras numa impressão FDM [77].	59
Figura 27 - Exemplo de <i>G-CODE</i> com comentários.	61
Figura 28 - a) Exemplificação da utilização de camadas não planares para eliminação da necessidade de utilização de suportes [88]. b) Comparação do efeito escada entre uma impressão não planar (lado esquerdo) e uma impressão planar (lado direito) [89].	62
Figura 29 - Impressora 3D Ender 3 V2 [91].	67
Figura 30 - Adaptação do sistema de extrusão para extrusão direta.	68
Figura 31 - Texturas da cama de impressão magnética aplicada.....	68
Figura 32 - Cabeça de impressão da <i>Ender 3 V2</i>	70
Figura 33 - Propriedades não planares da <i>Ender 3 V2</i>	70
Figura 34 - Rebordo do <i>nozzle</i> pequeno.	71
Figura 35 - Altura do <i>nozzle</i> pequeno.	71
Figura 36 - <i>Nozzle</i> Vulcano.	71
Figura 37 - Análise da aplicação do <i>nozzle</i> Vulcano.	71

Figura 38 - Aplicação de fêmeas no bico de extrusão Vulcano.....	71
Figura 39 - <i>Nozzle</i> com ponta em aço inoxidável.....	72
Figura 40 - Altura do bico com ponta em aço inoxidável.....	72
Figura 41 - Geometria do <i>nozzle</i> 0,4mm com a ponta em aço inoxidável.....	72
Figura 42 - Geometria do <i>nozzle</i> 0,4 mm Vulcano.....	72
Figura 43 - Ângulo de impressão não planar estimado.....	73
Figura 44 - Ângulo de impressão não planar real.....	73
Figura 45 - Reposicionamento do dissipador de calor.....	74
Figura 46 - Aplicação de insertos na nova peça de fixação do dissipador de calor.....	74
Figura 47 - Reposicionamento da ventoinha de refrigeração do dissipador de calor.....	74
Figura 48 - Reposicionamento da ventoinha de refrigeração do filamento extrudido.....	74
Figura 49 - Conduta de guiamento de ar da ventoinha do filamento extrudido.....	74
Figura 50 - <i>Design</i> da carcaça projetada.....	75
Figura 51 - Vista do lado direito da carcaça fabricada.....	75
Figura 52 - Vista do lado esquerdo da carcaça fabricada.....	75
Figura 53 - Marca inicial de referência para determinação do multiplicador de extrusão.....	76
Figura 54 - Ordem de extrusão de 100 mm de filamento.....	76
Figura 55 - Posição da marca de referência após o comando para extrudir 100 mm.....	76
Figura 56 - Atualização do multiplicador de extrusão do <i>firmware</i> da impressora.....	76
Figura 57 - Roldanas de regulação das extremidades da cama de impressão.....	77
Figura 58 - Processo de regulação manual da cama de impressão.....	77
Figura 59 - Pontos de calibração para uma <i>mesh</i> com 25 pontos de referência (5x5).....	77
Figura 60 - <i>Mesh</i> da mesa de impressão para compensação de irregularidades.....	77
Figura 61 - Comando adicional para leitura e importação dos valores da <i>mesh</i> da cama de impressão.....	78
Figura 62 - Verificação da qualidade do provete de calibração da cama de impressão.....	78
Figura 63 - Modelo CAD da torre de temperaturas [93].....	78
Figura 64 - Pós-processamento aplicado à torre de temperaturas.....	78
Figura 65 - Torre de temperaturas impressas com indicação das várias temperaturas.....	79
Figura 66 - Provete de análise dos parâmetros de retração.....	80
Figura 67 - Provete para determinação do ângulo máximo de impressão.....	81
Figura 68 - Distribuição dos provetes, com diversas alturas de camada, na cama da impressão... ..	81
Figura 69 - Metodologia de fatiamento do Slic3r.....	83
Figura 70 - Provetes "Inclinação" para medição de rugosidades.....	84
Figura 71 - Provetes "Parábola" para medição de rugosidades.....	84
Figura 72 - Gabaris de fixação de provetes, e sentido e ordem de realização dos ensaios de rugosidade aos provetes.....	86
Figura 73 - Locais de obtenção das rugosidades típicas dos provetes impressos segundo o processo de impressão planar.....	87
Figura 74 - Exemplo prático da aplicação de impressão 3D não planar ao imprimir um Suporte, para tubos de 20 mm de diâmetro.....	87
Figura 75 - Bloco de provetes de tração na orientação XY.....	88
Figura 76 - Bloco de provetes de tração na orientação Z.....	88
Figura 77 - Geometria central das camadas dos provetes XY.....	89

Figura 78 - Geometria central das camadas dos provetes Z.	89
Figura 79 - Imagem de todos os provetes de tração fabricados, com as respectivas designações... ..	90
Figura 80 - Especificação das zonas de medição da largura e da espessura dos provetes de tração.	90
Figura 81 - Exemplo de um objeto que necessita da aplicação de suportes.	91
Figura 82 - Provette de avaliação da possibilidade de aumento do ângulo de impressão.	91
Figura 83 - Distribuição das camadas para uma largura de extrusão dos perímetros exteriores de 0,4 mm.	92
Figura 84 - Distribuição das camadas para uma largura de extrusão dos perímetros exteriores de 0,6 mm.	92
Figura 85 - Provete de análise do comprimento máximo de impressão a 90° sem recurso a suportes (para uma base de 20 x 20 mm ²).	92
Figura 86 - Fatiamento não planar do provete da figura 82.	92
Figura 87 - Provetes "Inclinação" com as respectivas especificações.	95
Figura 88 - Provete "Inclinação" com 30° de inclinação e 0,3 mm de largura de extrusão.	96
Figura 89 - Provete "Inclinação" com 20° de inclinação e 0,7 mm de largura de extrusão.	96
Figura 90 - Provetes "Inclinação" impressos com padrão concêntrico.	96
Figura 91 - Provetes "Parábola" com as respectivas especificações.	97
Figura 92 - Sentido de impressão durante a impressão da camada sólida superior.	97
Figura 93 - Vista de topo dos provetes do teste 1.	98
Figura 94 - Vista de topo dos provetes do teste 3.	98
Figura 95 - Provetes "Inclinação" do teste número 5.	99
Figura 96 - Provetes "Inclinação" do teste número 6.	99
Figura 97 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.	100
Figura 98 - Exemplificação dos valores de rugosidade obtidos para zonas comuns em peças de impressão planar.	100
Figura 99 - Gráfico da rugosidade média dos provetes "Inclinação" planares.	101
Figura 100 - Gráfico da altura total dos provetes "Inclinação" planares.	101
Figura 101 - Gráfico da rugosidade média dos testes de variação de largura de extrusão.	102
Figura 102 - Gráfico da altura máxima dos testes de variação de largura de extrusão.	102
Figura 103 - Gráfico representativo dos valores das rugosidades médias obtidas nos provetes de otimização.	103
Figura 104 - Gráfico representativo dos valores das alturas totais obtidas nos provetes de otimização.	103
Figura 105 - Suporte para tubos impresso segundo a técnica planar.	104
Figura 106 - Suporte para tubos impresso segundo a técnica não planar.	104
Figura 107 - Vista de frente do suporte de tubos impresso segundo a técnica planar.	104
Figura 108 - Vista de frente do suporte de tubos impresso segundo a técnica não planar.	104
Figura 109 - Realização de um ensaio de tração.	105
Figura 110 - Provetes de tração após ensaio.	106
Figura 111 - Exemplificação de um dos gráficos 'Tensão-Deformação' obtidos.	106
Figura 112 - Exemplificação de um dos gráficos de Linhas de tendência de um gráfico Tensão/Deformação obtido, com a regressão linear de cada curva e a fiabilidade dessa mesma regressão realizada.	107
Figura 113 - Gráfico das médias das Tensões máximas, dos vários provetes tracionados.	109

Figura 114 - Gráfico das Deformações médias, dos vários provetes tracionados.	109
Figura 115 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de impressão planar.	110
Figura 116 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de transição entre impressão planar e não planar.	110
Figura 117 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de impressão não planar.	110
Figura 118 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas.	110
Figura 119 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas com ligeira quebra da própria camada.	110
Figura 120 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas e com quebra das camadas.	110
Figura 121 - Interior do provete Z planar.	111
Figura 122 - Interior provete Z 10° não planar.	111
Figura 123 - Interior provete Z 20° não planar.	111
Figura 124 - Interior provete Z 30° não planar.	111
Figura 125 - Vista de perspetiva do provete "Inclinação Não Planar".	111
Figura 126 - Vista inferior do provete "Inclinação Não Planar".	111
Figura 127 - Defeitos no fatiamento do provete "Inclinação Não Planar".	112
Figura 128 - Provetes em T para determinação do comprimento máximo de impressão sem suportes.	112
Figura 129 - Vista inferior dos provetes em T impressos.	112
Figura 130 - Degraus observados em alguns provetes "Inclinação" não planares.	115
Figura 131 - Demonstração da limitação da altura através de uma Impressão não planar de uma face de 30°.	117
Figura 132 - <i>Raster Angle</i> de uma camada de topo.	117
Figura 133 - Ângulo de impressão planar com um <i>raster angle</i> de 45°.	118
Figura 134 - Fatiamento não planar do programa Slic3r.	119
Figura 135 - Fatiamento não planar sugerido como melhoria.	119
Figura 136 - Provete "Parábola" de 30°, impresso com 0,3 mm de largura de extrusão.	120
Figura 137 - Representação da impressão segundo uma orientação de construção de camada ascendente.	121
Figura 138 - Representação da impressão segundo uma orientação de construção de camada descendente.	121
Figura 139 - Exemplificação dos dois sentidos de impressão dos provetes "Inclinação" não planares.	122
Figura 140 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,3 mm, 0,4 mm e 0,5 mm não planares.	122
Figura 141 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,6 mm não planares.	123
Figura 142 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,7 mm não planares.	123
Figura 143 - Distribuição dos esforços de tração num provete planar.	125
Figura 144 - Distribuição dos esforços de tração num provete não planar.	125
Figura 145 - Solicitações originadas pela extrusão de material no processo de impressão de uma geometria suspensa.	125

Figura 146 - Impressão planar de três provetes em T.	126
Figura 147 - Impressão não planar de quatro provetes em T.	126
Figura 148 - Imagem global de todos os provetes "Inclinação" com as respectivas especificações.	161
Figura 149 - Imagem global de todos os provetes "Parábola" com as respectivas especificações.	161
Figura 150 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,3 mm de largura de extrusão.	161
Figura 151 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,3 mm de largura de extrusão.	161
Figura 152 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,4 mm de largura de extrusão.	162
Figura 153 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,4 mm de largura de extrusão.	162
Figura 154 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,5 mm de largura de extrusão.	162
Figura 155 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,5 mm de largura de extrusão.	162
Figura 156 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,6 mm de largura de extrusão.	162
Figura 157 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,6 mm de largura de extrusão.	162
Figura 158 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,7 mm de largura de extrusão.	162
Figura 159 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,7 mm de largura de extrusão.	162
Figura 160 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com padrão concêntrico.	163
Figura 161 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com padrão concêntrico.	163
Figura 162 - Vista de topo dos provetes "Parábola" planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.	163
Figura 163 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.	163
Figura 164 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,3 mm de largura de extrusão.	163
Figura 165 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,3 mm de largura de extrusão.	163
Figura 166 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.	164
Figura 167 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.	164
Figura 168 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,5 mm de largura de extrusão.	164
Figura 169 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,5 mm de largura de extrusão.	164
Figura 170 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,6 mm de largura de extrusão.	164
Figura 171 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,6 mm de largura de extrusão.	164
Figura 172 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,7 mm de largura de extrusão.	164

Figura 173 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,7 mm de largura de extrusão.	164
Figura 174 - Vista de topo dos provetes do teste 1.	165
Figura 175 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 1.....	165
Figura 176 - Vista de topo dos provetes do teste 2.	166
Figura 177 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 2.....	166
Figura 178 - Vista de topo dos provetes do teste 3.	167
Figura 179 - Vista de topo dos provetes do teste 3.	167
Figura 180 - Vista de topo dos provetes do teste 4.	168
Figura 181 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 4.....	168
Figura 182 - Vista de topo dos provetes do teste 5.	169
Figura 183 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 5.....	169
Figura 184 - Vista de topo dos provetes do teste 6.	170
Figura 185 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 6.....	170
Figura 186 - Vista de topo dos provetes do teste 7.	171
Figura 187 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 7.....	171
Figura 188 - Vista de topo dos provetes do teste 8.	172
Figura 189 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 8.....	172
Figura 190 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.....	173
Figura 191 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 20°.....	174
Figura 192 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 30°.....	174
Figura 193 - Gráfico dos perfis rugosidade (perfis R) da camada superior do Gabari 20°.....	175
Figura 194 - Gráfico dos perfis rugosidade (perfis R) de uma superfície lateral do provete "Inclinação" planar com 30°.....	176
Figura 195 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão com 10°.....	177
Figura 196 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão com 20°.....	178
Figura 197 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 10°.....	179
Figura 198 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 20°.....	180
Figura 199 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 30°.....	180
Figura 200 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 10°.....	181
Figura 201 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 20°.....	182
Figura 202 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 30°.....	182
Figura 203 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 10°.....	183
Figura 204 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 20°.....	184

Figura 205 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 30°.....	184
Figura 206 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 1.....	185
Figura 207 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 1.....	186
Figura 208 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 1.....	186
Figura 209 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 3.....	187
Figura 210 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 3.....	188
Figura 211 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 3.....	189
Figura 212 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 4.....	189
Figura 213 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 4.....	190
Figura 214 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 4.....	191
Figura 215 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 5.....	191
Figura 216 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 5.....	192
Figura 217 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 5.....	193
Figura 218 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 6.....	193
Figura 219 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 6.....	194
Figura 220 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 6.....	195
Figura 221 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 7.....	195
Figura 222 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 7.....	196
Figura 223 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 7.....	197
Figura 224 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 8.....	197
Figura 225 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 8.....	198
Figura 226 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 8.....	199
Figura 227 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY planares.....	200

Figura 228 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY planares.	201
Figura 229 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 10° não planares.	202
Figura 230 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 10° não planares.	202
Figura 231 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 20° não planares.	203
Figura 232 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 20° não planares.	204
Figura 233 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 30° não planares.	205
Figura 234 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 30° não planares.	205
Figura 235 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z planares.	206
Figura 236 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z planares.	207
Figura 237 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 10° não planares.	208
Figura 238 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 10° não planares.	209
Figura 239 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 20° não planares.	210
Figura 240 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 20° não planares.	210
Figura 241 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 30° não planares.	211
Figura 242 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 30° não planares.	212

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de impressoras FFF (imagens [41]).	48
Tabela 2 - Materiais comuns em FFF [9].	58
Tabela 3 - Tipos de reforço existentes.	59
Tabela 4 - Casos de estudo referentes ao desenvolvimento da impressão não planar.	62
Tabela 5 - Identificação do filamento.	68
Tabela 6 - Parâmetros de impressão recomendados.	68
Tabela 7 - Equipamentos e técnicas de pós-processamento utilizadas.	69
Tabela 8 - Equipamentos de medição e ensaios utilizados.	69
Tabela 9 - Velocidades de impressão para a fabricação da torre de temperaturas.	79
Tabela 10 - Características de impressão dos provetes para determinação dos parâmetros de retração da impressora.	80
Tabela 11 - Características da impressão dos provetes para determinação do ângulo máximo de impressão.	82
Tabela 12 - Parâmetros de impressão dos provetes impressos.	85
Tabela 13 - Parâmetros de realização dos ensaios de rugosidade.	86
Tabela 14 - Parâmetros de impressão dos provetes de tração.	88
Tabela 15 - Parâmetros de impressão do provete "Inclinação não planar".	92
Tabela 16 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.	100
Tabela 17 - Valores médios dos ensaios de tração para os provetes XY.	108
Tabela 18 - Valores médios dos ensaios de tração para os provetes Z.	108
Tabela 19 - Desvio padrão relativo da média global de cada conjunto de provetes.	108
Tabela 20 - Conclusões retiradas dos objetivos propostos.	129
Tabela 21 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 1.	165
Tabela 22 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 2.	166
Tabela 23 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 3.	167
Tabela 24 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 4.	168
Tabela 25 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 5.	169
Tabela 26 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 6.	170
Tabela 27 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 7.	171
Tabela 28 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 8.	172
Tabela 29 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.	173
Tabela 30 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 20°.	174
Tabela 31 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 30°.	175
Tabela 32 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade da camada superior do Gabari 20°.	175
Tabela 33 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade de uma superfície lateral do provete "Inclinação" planar com 30°.	176
Tabela 34 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão e com 10°.	177

Tabela 35 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,4 mm de largura de extrusão e com 20°.....	178
Tabela 36 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 10°.....	179
Tabela 37 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 20°.....	180
Tabela 38 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 30°.....	181
Tabela 39 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 10°.....	181
Tabela 40 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 20°.....	182
Tabela 41 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 30°.....	183
Tabela 42 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 10°.....	183
Tabela 43 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 20°.....	184
Tabela 44 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 30°.....	185
Tabela 45 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 1.....	185
Tabela 46 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 1.....	186
Tabela 47 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 1.....	187
Tabela 48 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 3.....	188
Tabela 49 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 3.....	188
Tabela 50 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 3.....	189
Tabela 51 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 4.....	190
Tabela 52 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 4.....	190
Tabela 53 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 4.....	191
Tabela 54 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 5.....	192
Tabela 55 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 5.....	192
Tabela 56 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 5.....	193

Tabela 57 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 6.....	194
Tabela 58 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 6.....	194
Tabela 59 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 6.....	195
Tabela 60 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 7.....	196
Tabela 61 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 7.....	196
Tabela 62 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 7.....	197
Tabela 63 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 10° referente ao teste nº 8.....	198
Tabela 64 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 20° referente ao teste nº 8.....	198
Tabela 65 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 30° referente ao teste nº 8.....	199
Tabela 66 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY planares.....	201
Tabela 67 - Desvio padrão relativo dos provetes PLXY.....	201
Tabela 68 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 10° não planares.....	203
Tabela 69 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY1.....	203
Tabela 70 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 20° não planares.....	204
Tabela 71 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY2.....	204
Tabela 72 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 30° não planares.....	206
Tabela 73 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY3.....	206
Tabela 74 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração Z planares.....	207
Tabela 75 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ.....	208
Tabela 76 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração Z 10° não planares.....	209
Tabela 77 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ1.....	209
Tabela 78 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração não planares Z 20°.....	211
Tabela 79 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ2.....	211
Tabela 80 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração não planares Z 30°.....	212
Tabela 81 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ3.....	212

LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
BJT	<i>Binder Jetting</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
CLFD	<i>Curved Layer Fused Deposition</i>
CLFDM	<i>Curved Layer Fused Deposition Modeling</i>
CLFFF	<i>Curved Layer Fused Filament Fabrication</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DPR	Desvio Padrão Relativo
DC	Corrente Contínua
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DIY	Do It Yourself
DLS	<i>Digital Light Synthesis</i>
DOF	<i>Degrees of freedom</i>
EBF	<i>Electron Beam Freeform Fabrication</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
G-COFE	Linguagem de programação
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LENS	<i>Laser Enginered Net Shaping</i>
LH	<i>Layer Height</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
LPBF	<i>Laser Powder Bed Fusion</i>
MA	Manufatura aditiva
MEX	<i>Material Extrusion</i>
MS	Manufatura subtrativa
MTJ	<i>Material Jetting</i>
NASA	National Aeronautics and Space Adminisration
IPP	Instituto Politécnico do Porto
PLA	Ácido Polilático
SD	<i>Secure Digital</i>
SHL	<i>Sheet Lamination</i>

SL	Estereolitografia
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>
Slicer	Programa de fatiamento
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
UAM	<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Luz Ultravioleta

Lista de Símbolos

R_t	Altura Total
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
μm	Micrómetros
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
N	Newton
%	Porcentagem
kgf	Quilogramas força
kN	Quilonewton
R_a	Rugosidade média
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celcius

Lista de Abreviaturas

DPR	Desvio Padrão Relativo
Fig.	Figura
nº	Número
Tab.	Tabela

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do projeto

1.2 Local e período do estágio

1.3 Objetivos

1.4 Metodologia

1.5 Estrutura da dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do projeto

O processo de manufatura aditiva (MA) tem vindo a ser cada vez mais responsável por uma grande evolução na forma como os produtos são desenhados e processados. Esta é uma tecnologia que, quando comparada com os métodos de produção tradicionais, apresenta diversas vantagens, como baixos custos de produção unitária, capacidade de produção de geometrias mais complexas e a rapidez com que é possível transformar um modelo tridimensional (3D) digital num objeto físico. Por estas razões, é um processo aplicado num vasto leque de áreas, como por exemplo, na arquitetura, na eletrónica e no setor automóvel e aeroespacial [1].

O aperfeiçoamento desta tecnologia fez com que se tornasse bastante acessível financeiramente, ganhando a atenção do público em geral pela sua versatilidade. Desta forma, vulgarizou-se, tendo sido inserida em diversos conceitos como o “Do it yourself” (DIY). Esta enorme comunidade que se criou em volta da MA, originou um grande desenvolvimento a nível dos materiais e mecanismos utilizados, assim como de conceitos envolvidos [2].

Este estudo é realizado com o intuito de otimizar e proporcionar novas abordagens na MA, através de uma impressão não planar, bem como reduzir e/ou eliminar problemas e limitações dos métodos convencionais, para que desta forma, com os mesmos equipamentos base, seja possível tirar maior proveito desta tecnologia.

1.2. Local e período do estágio

O tema abordado proporcionou um estágio na empresa LaniRobotics durante um período de nove meses, com o objetivo de realização desta dissertação. Esta empresa, fundada no ano de 2019, está sediada na cidade da Maia, no concelho do Porto, Portugal. Trata-se de uma empresa responsável pela elaboração de soluções e fabrico de produtos inovadores, através de diversas tecnologias como, por exemplo, o fabrico aditivo. Capaz de fabricar componentes com recurso a vários materiais (ABS, PEEK, PC-CF, entre outros) e tecnologia (FDM, SLS e SLA), a *LaniRobotics* desenvolve e procura encontrar resposta para os diversos problemas da indústria. Para isso, implementa um eficaz modelo produtivo de fabrico de pequenos e médios lotes, de modo a otimizar os custos e os recursos.

A estrutura da *LaniRobotics* está organizanda de uma forma simples e eficiente, para que todo o processo de obtenção dos produtos finais seja executado de uma forma correta e rápida. Assim, no organograma apresentado (Fig. 28), é possível observar a organização da empresa, das suas etapas e dos seus processos de fabrico.

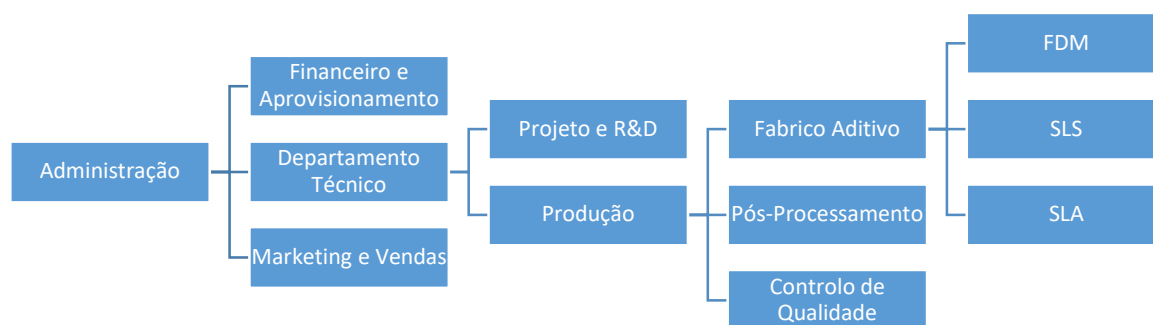


Figura 1 - Organograma da empresa *LaniRobotics*.

A empresa propôs o estudo e desenvolvimento do tema desta dissertação, como tentativa de encontrar soluções para algumas das limitações do processo de fabrico aditivo FDM, bem como, para tentar otimizá-lo da melhor forma.

Para que fosse realizado um correto entendimento do que iria ser utilizado e quais os conceitos que iriam ser abordados, foi efetuada uma apresentação aos funcionários e uma introdução ao equipamento utilizado. Esta introdução passou pela análise das fichas técnicas dos vários equipamentos e materiais, pela demonstração do funcionamento do processo produtivo e pelo estudo de alguns objetos fabricados. Juntamente, foi efetuada uma demonstração dos processos de pós-processamento utilizados, quando necessária a sua aplicação, para a obtenção de peças mais completas e com melhor qualidade.

Esta ambientação à empresa foi importante para perceber qual a metodologia de fabrico e os parâmetros associados. Desta forma, foi estudado o conceito de impressão não planar e realizada uma associação de quais as características possíveis de melhorar com a sua aplicação. Para além disso, foi realizado o levantamento das limitações da sua utilização.

Para que todo o processo de implementação da impressão não planar fosse possível, foi estudada a existência de *software* capaz de produzir um caminho (*G-CODE*) não planar, de modo que a impressora fosse capaz de fabricar as peças da forma pretendida. Uma vez obtido o *software* para produção de peças não planares, passou-se para a abordagem das limitações mecânicas, onde foi realizado um estudo das propriedades e uma otimização da impressora utilizada para os testes.

Por fim, foram produzidos diferentes provetes planares e não planares, para a realização de uma comparação direta de resultados e análise das várias alterações obtidas, pela utilização dos dois métodos de fabrico. Para além desta comparação entre técnicas de impressão, foram também realizadas comparações de provetes não planares, impressos com diferentes geometrias e parâmetros de impressão, de modo a tentar melhorar e otimizar as propriedades dos objetos impressos.

1.3. Objetivos

Numa abordagem inicial, salientou-se a importância de conhecer as características e os parâmetros base do processo de fabrico FDM utilizado, para ser possível reconhecer as suas capacidades e limitações. Desta forma, foram realizados testes ao processo de impressão 3D convencional (por camada), para ver a influência dos principais parâmetros de impressão como, por exemplo, o nivelamento da cama, a aderência da primeira camada, a influência da velocidade na estrutura e na qualidade da superfície da peça impressa, e também nas diversas posições de impressão para o mesmo componente. Estes componentes foram submetidos posteriormente a ensaios de tração, rugosidade e inspeção visual, para determinação das propriedades mais relevantes.

Consequentemente, verificou-se a importância de analisar as características físicas e mecânicas do equipamento de impressão, para aferir possíveis adaptações propícias à implementação de impressão não planar. As impressoras atuais imprimem por camadas, originando várias limitações, quer a nível estrutural, quer a nível superficial, nos provetes impressos. Já existem algumas impressoras com mais de três eixos, que são capazes de realizar impressões não planares. No entanto, são equipamentos ainda em desenvolvimento e bastante dispendiosos.

Desta forma, os objetivos fundamentais deste estudo consistem na determinação:

- das principais características mecânicas da impressora para a implementação da técnica de impressão não planar;
- dos principais parâmetros necessários para a utilização da técnica de impressão não planar;
- da influência da impressão não planar na qualidade superficial e na resistência mecânica das peças impressas;
- da possibilidade de impressão de uma maior gama de ângulos, sem recurso a suportes;
- das vantagens e das limitações da implementação desta técnica.

Para verificar a veracidade dos resultados, foram impressas e ensaiadas diversas peças e provetes de teste, tanto pelo processo de impressão planar como pelo processo de impressão não planar, para que desta forma, possa ser feita uma relação entre as duas técnicas, e assim analisados os vários parâmetros e características das duas técnicas.

1.4. Metodologia

Através de uma análise prévia sobre o âmbito global do estudo, foi delineada a seguinte metodologia de trabalho:

- Incorporação na dinâmica da empresa e dos seus colaboradores;
- Apresentação dos equipamentos e métodos de impressão utilizados na produção;
- Análise das características dos equipamentos utilizadas no estudo;
- Pesquisa sobre o conceito de MA e das diversas variantes existentes, através de *websites*, livros, artigos científicos, vídeos e dissertações;
- Compreensão do *software* de transformação de modelos digitais 3D para uma linguagem de programação, produzida através de um programa de fatiamento (*Slicer*), mais conhecida

como *G-CODE*, capaz de comandar a impressora com vista a reproduzir o objeto físico do respetivo modelo;

- Análise dos distintos parâmetros possíveis de adaptar no *Slicer* e a sua influência nas propriedades dos componentes impressos;
- Elaboração de uma metodologia de calibração dos equipamentos de impressão;
- Produção de vários ensaios para determinação da melhor combinação de parâmetros de impressão, com vista à realização de impressão planar e dos ensaios propostos;
- Produção de peças para posterior comparação com os métodos não planares;
- Estudo das características e dos requisitos para realização de uma impressão não planar;
- Análise das limitações do equipamento face às capacidades e especificações da impressão planar;
- Adaptação da uma impressora para maximização dos parâmetros de impressão não planar;
- Realização de ensaios para determinação da melhor combinação de parâmetros para impressão não planar e realização dos ensaios propostos;
- Elaboração de uma análise crítica dos resultados obtidos pelos dois métodos, por comparação das peças impressas e dos artigos abordados e referidos.

1.5. Estrutura da dissertação

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo, é feita uma breve introdução ao tema da dissertação, manufatura aditiva, abordando os aspetos mais relevantes para uma boa compreensão de todo o trabalho efetuado. É feita uma apresentação da empresa onde o estágio foi realizado, e onde a grande maioria do trabalho foi elaborado. Os objetivos do estudo, bem como a metodologia para chegar aos resultados obtidos, é também descrita.

Capítulo 2 - Caracterização teórica e estado da arte

Inicialmente são apresentados, de uma forma mais aprofundada, os diversos conceitos baseados nos processos de MA e manufatura subtrativa (MS), com particular incidência no processo FDM. Será também feita uma identificação e análise dos parâmetros que, quando alterados, podem permitir a utilização de outros tipos de impressões, diferentes da impressão planar.

Apresentar-se-ão os processos e mecanismos existentes de impressão não planar, bem como as vantagens e desvantagens, comparativamente com os processos de impressão planar e aos restantes processos de fabrico com as mesmas tipologias.

Capítulo 4 - Metodologia Experimental

No capítulo 4, descreve-se todo o processo de testes e ensaios sobre a evolução do processo para a obtenção dos produtos finais obtidos. Efetuar-se-á também uma apresentação dos diversos equipamentos utilizados ao longo de toda a linha de processamento.

Capítulo 5 – Apresentação de resultados

No capítulo 5, apresentam-se todos os resultados obtidos, referentes aos componentes fabricados pelo processo de impressão planar e não planar, e realização de uma interpretação e comparação dos mesmos, com base em todo o conhecimento reunido ao longo do estudo.

Capítulo 6 – Análise crítica

Uma vez apresentados os vários resultados experimentais obtidos através dos ensaios realizados, neste capítulo é feita uma análise crítica aos mesmos, de modo a apresentar uma linha de pensamento lógica, capaz de interpretar os mesmos e assim obter as conclusões do estudo.

Capítulo 7 – Conclusões e proposta de trabalhos futuros

Neste capítulo, destacam-se os principais resultados obtidos através deste trabalho e apresentados os comentários e opiniões sobre o mesmo, com o intuito de cumprir com os objetivos propostos no início do trabalho. São também apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros que foram consideradas relevantes para a continuidade e melhoramento deste assunto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura Aditiva

2.2 Contextualização Comercial

2.3 Tipos de Manufatura Aditiva

2.4 *Fused Deposition Modeling*

2.5 *G-CODE*

2.6 Impressão Não planar

2. CARACTERIZAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

2.1. Manufatura aditiva

É inegável que o constante desenvolvimento da indústria e dos mercados teve um papel essencial na inovação tecnológica e na evolução e criação de diversos processos de fabrico. A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, foi um processo que sofreu um grande crescimento a nível de desenvolvimento, tendo sido por isso aplicado em áreas como a arquitetura, a aeronáutica, a saúde, o setor automóvel, diversos ramos da engenharia, design, entre outros.

Este processo de fabrico surgiu comercialmente no final da década de 1980 sob o método designado por estereolitografia (SLA), através de modelos de equipamentos como o *Stereolithography Apparatus* (SLA-250) (Fig. 1). Na época, Charles Hull foi o fundador da empresa que começou a produzir estes modelos, inspirando-se no seu trabalho, que envolvia o uso de luzes ultravioleta (UV) para solidificação de resinas em peças móveis [3]. Designados como processos de fabrico aditivo, estes foram definidos pelo comité técnico da *American Society of Testing and Materials* (ATSM) como “tecnologias capazes de juntar com sucesso materiais, de forma a criar objetos físicos através de um modelo 3D, normalmente por camadas, ao contrário do que acontece na manufatura subtrativa” (ISO/ATSM 52900:2021(E)) [4].

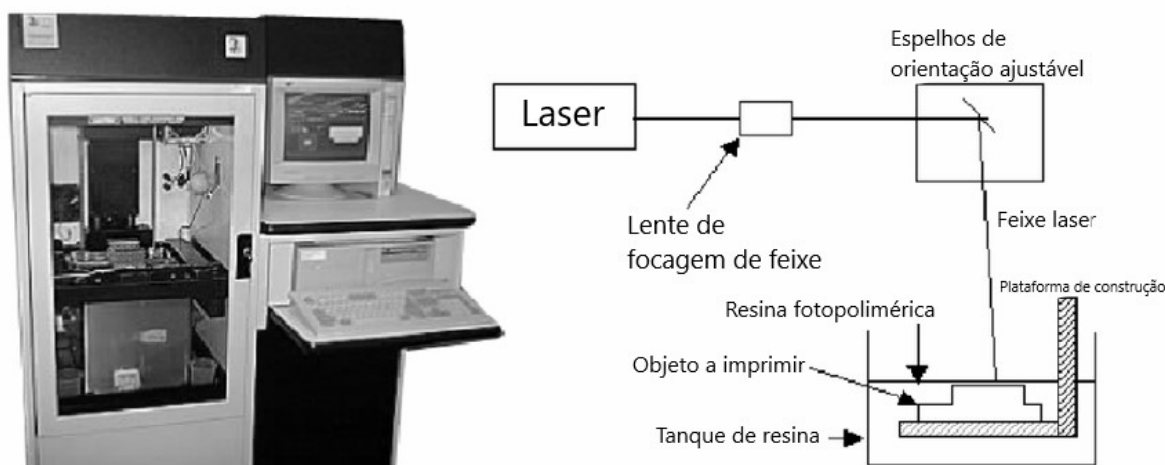


Figura 2- Representação do equipamento SLA 250 e esquematização do processamento por SL [5]

Em oposição a esta metodologia, existe a manufatura subtrativa, que consiste na produção de um objeto físico através da remoção de material, como, por exemplo, os processos de maquinaria por arranque de apara, auxiliados por Controlo Numérico Computorizado (CNC).

Tanto na manufatura aditiva como subtrativa, o processo de obtenção do produto final é bastante semelhante, visto serem processos de manufatura assistida por computador (CAM). Para que todo o processo seja executado, é necessário que sejam seguidas as seguintes etapas [6] (Fig. 2):

1. Para dar origem a todo o processo, é necessário obter um modelo de Desenho Assistido por Computador (CAD) da peça que se pretende produzir. Este modelo pode ser produzido computacionalmente, através de programas como o *SolidWorks®* e o *Fusion Autodesk 360®*, ou por *scanners* 3D, capazes de extrair informação a partir de um modelo, graças à engenharia inversa;

2. Proceder à transformação do modelo CAD do objeto para um ficheiro com o formato STL (*Standard Triangle Language*). O objetivo desta transformação é converter toda a casca externa do objeto numa malha refinada de pequenos triângulos, permitindo que o modelo seja impresso. A resolução desta formatação é tanto maior quanto o número de triângulos em que o modelo é transformado.
3. O ficheiro STL deve ser inserido num *slicer*, para que este produza as instruções de impressão, designado *G-CODE*, relativas ao modelo a imprimir. É através destas ordens de impressão que a impressora sabe quais as ações a realizar para a produção do objeto. Neste programa, é também realizada a determinação dos distintos parâmetros de impressão que variam com fatores como a impressora, o material e qualidade desejada.
4. Após a elaboração do *G-CODE*, este tem de ser transferido para o equipamento, por ligação direta, ou por meios como cartões *Secure Digital* (SD) ou *pendrive Universal Serial Bus* (USB).
5. Estando o programa inserido na impressora, deve ser carregado o material, no qual se deseja imprimir o objeto, e dar início ao programa.
6. Em algumas situações, por questões geométricas ou requisitos de impressão, é necessário proceder ao pós-processamento da peça impressa. O pós-processamento neste tipo de processos é constituído por técnicas como a lixagem, colocação de enxertos, remoção de suportes, lavagem e cura (em resinas).
7. Aplicação do objeto impresso na função requerida. É usual serem inseridos componentes adicionais como excertos, rolamentos ou parafusos, com o intuito de tornar o seu funcionamento e/ou montagem mais fácil e eficaz.

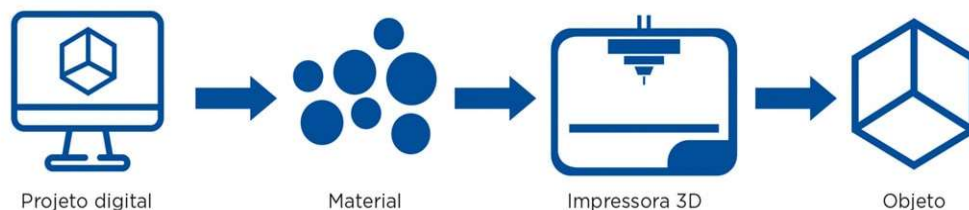


Figura 3- Processamento da impressão 3D [7]

2.2. Contextualização comercial

Este processo de fabrico foi inicialmente introduzido no mercado com custos de aquisição elevados que, juntamente com o facto de ser uma tecnologia emergente, restringiu a sua aquisição a um reduzido número de pessoas e a grandes empresas.

Desde o seu lançamento que foi um conceito inovador e muito abrangente, possuindo muitas vantagens quando comparado com os processos de fabrico convencionais. No início do século XXI, observou-se um aumento significativo do uso desta tecnologia. A patente das impressoras FDM passou para domínio público, originando uma onda de inovação e uma brutal redução no preço dessas impressoras. Por estas razões, este tipo de impressoras são as mais populares e as mais vendidas nos últimos anos [2].

A revista “*EY Global Integrity Report 2019*” realizou uma análise mais profunda sobre a MA, onde Glenn Steiburg afirma que a evolução da MA podia ser comparada à evolução da utilização de vapor para eletricidade pela indústria. Nesse estudo, está também referido que 65% das empresas inquiridas já experimentaram a impressão 3D (Fig. 3), revelando um crescimento significativo desta tecnologia [1].

Conhecimento sobre tecnologias de MA, 2016 e 2019 (%)*

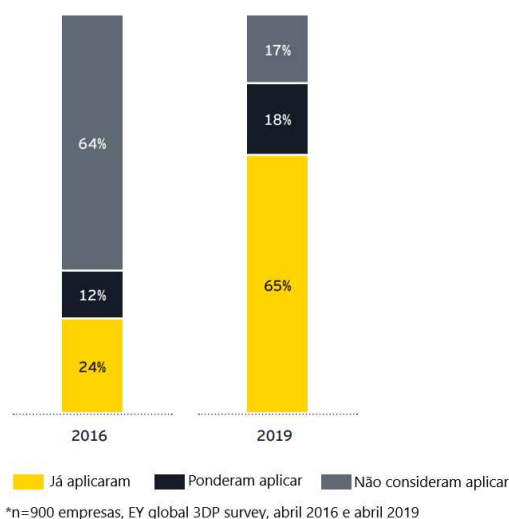


Figura 4 - Gráfico da evolução do conhecimento sobre MA [1]

Sendo uma tecnologia bastante flexível e com uma vasta gama de materiais utilizados, a MA está presente nas mais diversas áreas do nosso mercado (Fig. 4). Apesar de estar mais presente na área da engenharia, também é bastante utilizada em áreas como a arquitetura, para produção de maquetes, na medicina, para produção de órgãos de geometrias complexas, na indústria química, na produção de filamento para as impressoras, na construção civil e na construção de casas [8].

Experiência de tecnologias de fabricação aditiva por indústria 2019 (%)*

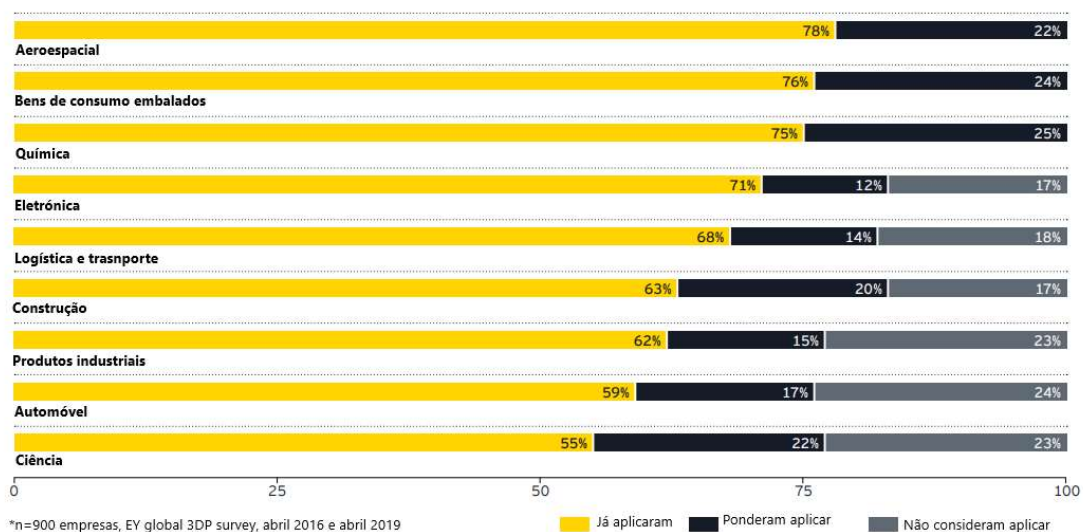


Figura 5 - Gráfico da utilização da MA por indústria [1].

Devido à necessidade de obtenção de soluções rápidas, esta tecnologia foi aplicada para a produção de diversos acessórios, como suportes para máscaras e viseiras faciais. No entanto, apesar da rapidez e eficiência dos produtos, a impressão 3D, ao contrário dos processos de fabrico convencionais, não beneficia da redução do custo unitário consoante a quantidade, apresentando custos por peça produzida quase constantes (Fig. 5).

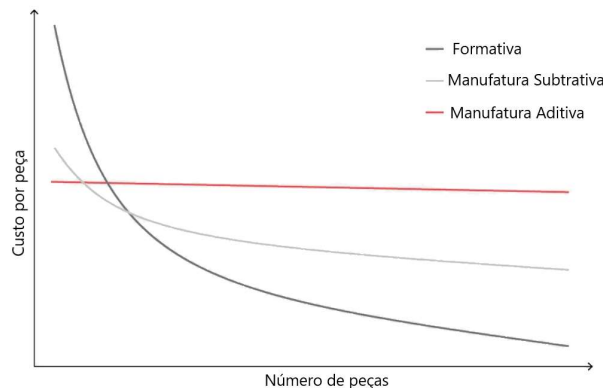


Figura 6 - Gráfico de custo unitário por volume de produção, para cada processo de fabrico [9]

Esta tecnologia foi também muito bem integrada na indústria 4.0, devido à capacidade das impressoras 3D serem facilmente ligadas a uma rede de equipamentos e a um sistema de produção. Desta forma, as empresas são capazes de criar redes inteligentes que permitem comandar e controlar os processos de produção remotamente [10].

Considerando o potencial da impressão 3D pelas características abordadas, é irrefutável que é um tema em constante crescimento e desenvolvimento. Esta evolução, de um modo geral, beneficiou o mercado global, proporcionando um acréscimo do valor do mercado da MA (Fig. 6).

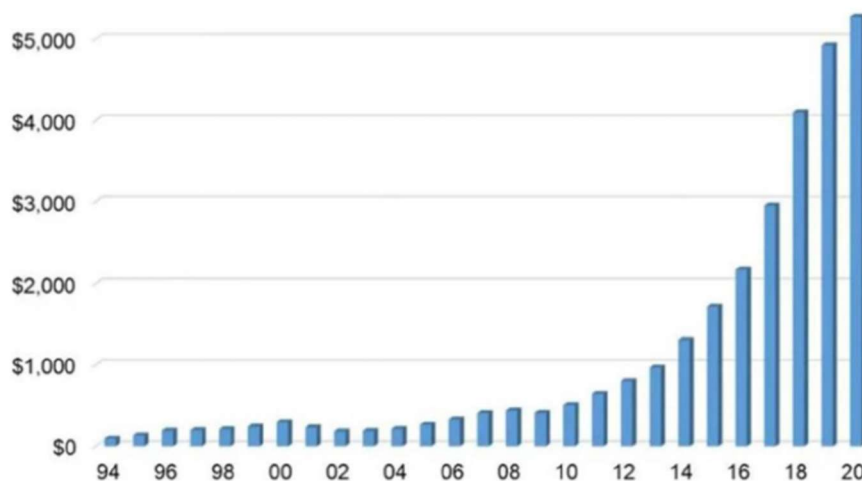


Figura 7 - Gráfico do relatório anual global da produção de peças AM de prestadores de serviços independentes (em milhões de dólares) por Wohler [11]

Como se pode observar no gráfico da Figura 6, o *software* foi o componente que menos evolução sofreu ao longo do tempo. Apesar de terem ocorrido diversas melhorias em termos de parametrização da impressão, o modo de impressão tem-se mantido. O conceito de impressão não planar assenta, em grande parte, na capacidade de um *software* produzir uma ordem de comandos num espaço tridimensional, em vez de sucessivas camadas bidimensionais (2D) [12], [13].

2.3. Tipos de Manufatura aditiva

Foram desenvolvidas diversas metodologias ao longo do tempo, com base na manufatura aditiva e, com o intuito de padronizar a linguagem utilizada, estabeleceram-se termos, acrónimos e siglas, que podem ser encontrados na norma ISO/ASTM 52900:2021 [14]. A utilização deste vocabulário específico visa proporcionar uma correta passagem de informação, bem como categorizar os vários processos de fabrico existentes [15].

Com o intuito de perceber os conceitos e as metodologias envolvidas na manufatura aditiva, serão apresentados alguns dos principais tipos de impressão 3D mais comuns.

2.3.1. Fotopolimerização em tanque (*Vat Photopolymerization*)

Este tipo de impressão 3D cria objetos físicos através da cura seletiva de resina líquida fotopolimerizável (Fig.7) com recurso a uma luz com um dado comprimento de onda [9][16]. Este foi o conceito pioneiro na impressão 3D, sendo apresentado como o SLA. No entanto, processos como o *Digital Light Synthesis* (DLS), também se encontram nesta categoria.

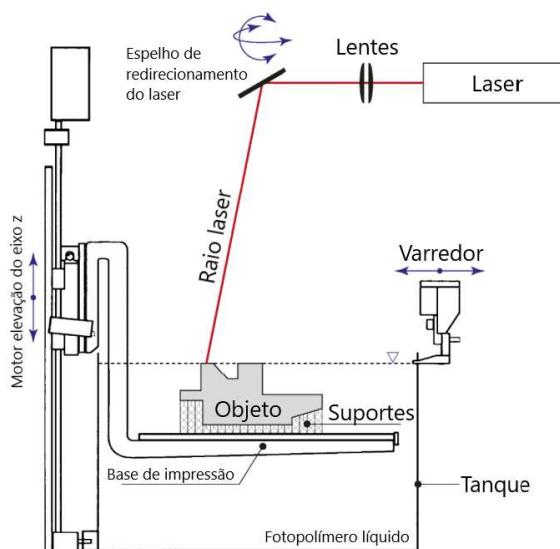


Figura 8 - Representação de impressão por *Vat Polimerization* [17]

O DLS tem a mesma metodologia de funcionamento, no entanto, ao contrário da SLA, utiliza um ecrã digital que projeta cada camada de uma só vez. Dado que o ecrã é composto por diversos pixels quadrangulares, quando a imagem da camada é projetada, vai ocorrer a formação de pequenos “tijolos” retangulares designados por *voxels* (Fig. 8) [18].

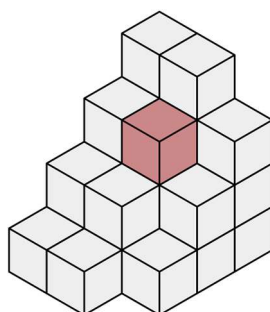


Figura 9 - Representação de um *voxel* num conjunto [18].

Este tipo de impressão 3D é mais utilizada quando é requerida uma melhor qualidade superficial e detalhe, maior precisão, e para obter uma maior quantidade de peças num mesmo espaço de tempo [9].

2.3.2. Fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion*)

Este tipo de processo tem bastantes semelhanças ao abordado anteriormente. Todavia, este faz incidir um *laser* sobre o material, que se encontra na forma de pó, em sucessivas camadas [19]. No final da passagem do *laser* por cada camada, é sobreposta uma fina camada de material no topo da área de impressão e, quando o *laser* incide nos locais programados, faz com que o pó funda e se ligue ao objeto que está a ser impresso (Fig. 9) [20]

A tecnologia *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) é das mais avançadas e fiáveis que se pode encontrar na MA de metais. Através do sistema *Selective Laser Melting* (SLM), é possível fundir o metal em pó, obtendo-se objetos metálicos com geometrias complexas, que apenas podem ser obtidas por este processo de fabrico.

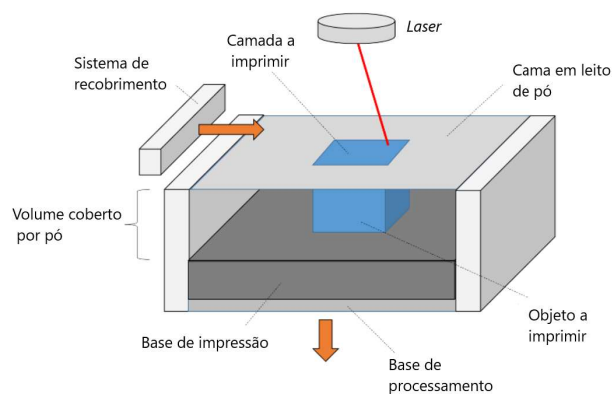


Figura 10 – Representação do processo de impressão por *Powder Bed Fusion* [20]

Uma das indústrias que tem beneficiado deste processo é a indústria automóvel pois, através de análises computacionais (otimização topológica), é possível reduzir a geometria de uma peça apenas ao necessário, atendendo aos esforços impostos, criando um modelo geométrico complexo de componentes que inicialmente possuíam uma geometria simples (Fig. 10) [21].

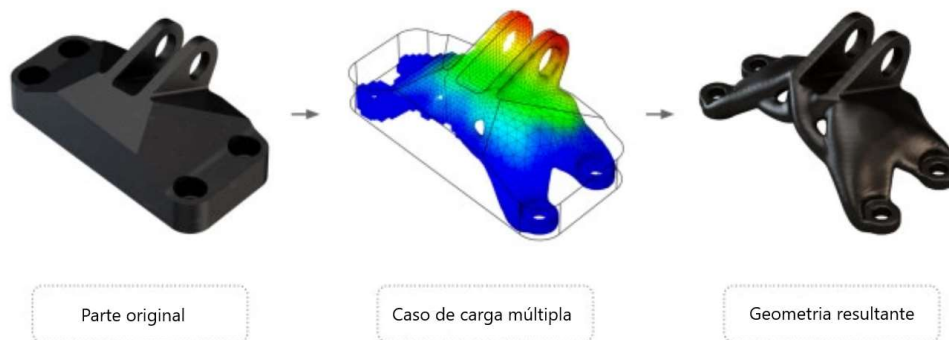


Figura 11 - Representação do processo de otimização da topologia da peça [22]

Este processo de fabrico também é aplicado a polímeros, possuindo a designação de *Selective Laser Sintering* (SLS), sendo bastante semelhante ao SLM, no entanto, enquanto o SLS não aquece o pó

acima da temperatura de fusão do material, e produz objetos sólidos com uma densidade quase ideal [23].

2.3.3. Jateamento de material ligante (*Binder Jetting*)

Tal como o processo anterior, o *Binder Jetting* (BJT) também utiliza uma cama de material em pó [24]. Este método utiliza o jateamento de um material ligante como, por exemplo, um adesivo na forma líquida, que é depositado seletivamente em locais/pontos programados para que, nesses locais/pontos, seja realizada a união do material em pó.

Apesar desta metodologia de impressão poder utilizar qualquer tipo de material que esteja disponível na forma de pó, os mais utilizados são os de base metálica ou cerâmica [25].

2.3.4. Laminação em folha (*Sheet Lamination*)

Os processos por *Sheet Lamination* (SHL), consistem na ligação de sucessivas camadas constituídas por uma folha de um dado material. Através da planificação geométrica de cada folha que é sobreposta, o objeto vai sendo criado através da junção por um agente ligante, como o processo *Laminated Object Manufacturing* (LOM), ou então por meio de soldadura, como o processo *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) [26].

2.3.5. Jateamento de material (*Material Jetting*)

Semelhante a uma impressora de papel 2D (bidimensional), o *material jetting* (MTJ) consiste na deposição contínua, ou por gotas, de um material na forma líquida, para que possa curar por fotopolimerização (por luz UV), arrefecimento, etc. Este processo pode imprimir materiais como resinas fotossensíveis, termoplásticos, e até mesmo materiais reativos [27]. Este processo tem vindo a ganhar muita popularidade, devido à sua capacidade de produzir componentes com vários materiais [28].

2.3.6. Deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition*)

Neste tipo de manufatura aditiva, é utilizada uma fonte de calor concentrada para fundir materiais, fundindo-os à medida que eles vão sendo depositados. Este material é normalmente depositado sobre a forma de pó ou fio [29] e fundido por meio de um *laser* (*Direct Laser Deposition*) [30]. Desta forma, à medida que a cabeça de impressão percorre o caminho definido pelo *G-CODE*, o material vai sendo soldado ao objeto a imprimir [31].

A *Direct Energy Deposition* (DED) pode ser dividida em duas categorias, baseadas em matérias-primas. A primeira categoria envolve a utilização da técnica tradicional de soldadura por fio, e a segunda utiliza pó [32]. O método designado por *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) [33] incorpora-se nesta última categoria.

O processo *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF), desenvolvido pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) [34], engloba-se na primeira categoria, porque utiliza matéria em fio, em vez de pó. Neste processo, a ponta do fio é aquecida por fonte *laser* ou de eletrões, para ser seletivamente pulverizada em cada camada [32].

2.3.7. Extrusão de material (*Material Extrusion*)

Normalmente conhecidos por *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou *Fused Filament Fabrication* (FFF), o fabrico por material extrusão (MEX) consiste na deposição seletiva de material por um orifício ou um bico de impressão (*nozzle*). Esta seleção é feita por um conjunto de linhas de programação computacional (*G-CODE*), que a impressora consegue interpretar e utilizar para realizar as ordens nele especificadas [35].

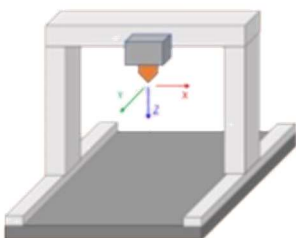
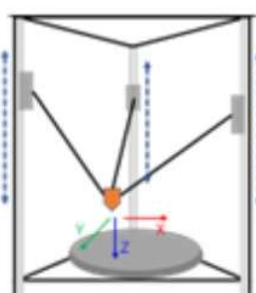
Este processo de fabrico permite imprimir peças com diversos materiais. Os materiais mais conhecidos para este tipo de fabrico são o ácido polilático (PLA) e o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)[36]. No entanto, com o contínuo estudo dos materiais e a evolução dos diversos processos associados à manufatura aditiva, têm sido referenciados outros materiais como o *nylon*® [37], diversas ligas metálicas [38], madeira, e até mesmo materiais cerâmicos [39].

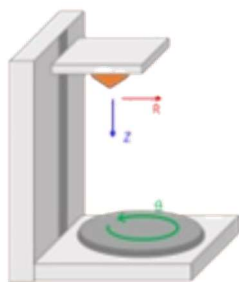
2.4. *Fused Deposition Modeling*

O FDM é um processo de fabrico por extrusão, que utiliza material de base termoplástica, normalmente na forma de filamento armazenado em bobinas. Este armazenamento deve ser feito de forma cautelosa, visto que a humidade do material terá um grande impacto na impressão realizada [40].

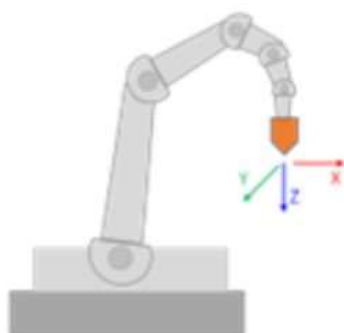
Existem diversos tipos de impressoras FDM, cada uma com a sua metodologia de funcionamento e de impressão. Podemos averiguar, na tabela seguinte (Tab. 1), quais os tipos de impressoras existentes, bem como a sua designação, e algumas das suas principais características.

Tabela 1 - Tipos de impressoras FFF (imagens [41]).

Tipo de impressora	Representação	Características
Cartesiana		Este tipo de impressora é das mais comuns no mercado e imprimem recorrendo a movimentos lineares nos 3 eixos. Normalmente, a cabeça de impressão move-se sobre os eixos X e Z, e a cama no eixo Y. No entanto, existem também versões onde a cabeça se move sobre o eixo X e Y, e a cama sobre o eixo Z [42].
Delta		Esta metodologia de impressão baseia-se no mecanismo cinemático delta, e na plataforma de Stuart [43]. Estas impressoras, apesar de não serem muito conhecidas, apresentam baixos custos e elevadas velocidades de movimento, devido aos movimentos lineares ascendentes e descendentes dos casquilhos nas três hastes [44].

Polar

As impressoras Polar possuem essa designação devido à utilização do sistema de coordenadas polar para imprimir. Nestas impressoras, a cabeça de impressão move-se nos eixos X e Z, enquanto a base roda sobre si. A produção de peças circulares e o maior volume de produção para o mesmo espaço, são algumas das vantagens deste processo de impressão.

Braço Robótico

Os braços robóticos já estão implementados na indústria para diversas aplicações como soldar, transportar, entre outros. Quando aplicados ao FDM, permitem beneficiar de um maior número de graus de liberdade (DOF), isto é, podem realizar um maior número de movimentos para além dos movimentos lineares sobre três eixos [45]. Muitos estudos e metodologias têm sido desenvolvidos à volta deste sistema, com o intuito de desenvolver uma impressão não planar, capaz de ultrapassar limitações como a aplicação de suportes, que ocorrem numa impressão FDM convencional [46].

Dado que será utilizada uma impressora cartesiana na parte experimental para a produção de provetes e amostras, esta irá ser caracterizada mais detalhadamente, de modo a perceber-se quais os seus componentes e mecânicas de funcionamento. Deste modo, será feita uma análise das suas propriedades e da sua capacidade e adaptabilidade à realização de impressões não planares.

Para começar uma impressão, a/as bobina/as, no caso de uma impressão com vários materiais, devem ser colocadas em suportes da impressora, ou ao seu redor, e o filamento deve ser levado até à entrada da extrusora. A extrusora é o componente da impressora responsável por fazer o controlo do material que é fornecido e retraído ao longo da impressão, por meio de uma ou mais engrenagens. Pode ser montada na estrutura da máquina e ligada à cabeça de impressão através de um tubo guia (*boden tube extrusion*), ou então montado na própria cabeça de impressão, fornecendo o filamento diretamente (*direct drive*) (Fig. 11) [47].

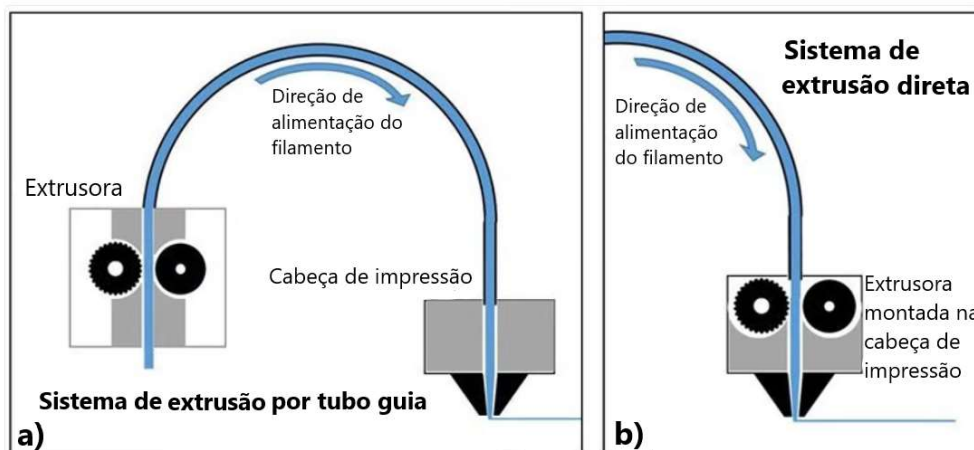


Figura 12 - Representação do sistema de extrusão por tubo guia a) e direta b) [12]

Comparando as duas metodologias de impressão, a extrusão direta apresenta uma maior precisão nos movimentos de avanço e retração do filamento, possui um maior leque de materiais para impressão e reduz o esforço no motor da extrusora, possuindo, no entanto, uma cabeça de impressão mais pesada [47]. Quanto ao sistema de extrusão por tubo, este apresenta maior precisão nos movimentos efetuados, permite aumentar as velocidades de impressão e reduzir as vibrações. Por outro lado, necessita de motores mais potentes devido ao atrito entre o tubo e o filamento, requer maior tempo e distância de retração, e reduz o número de materiais possíveis de utilizar [48].

Nos dois tipos, após o filamento chegar à cabeça de impressão (Fig.12), entra no dissipador de calor que garante que o filamento apenas é aquecido ao chegar ao bloco de aquecimento onde é aquecido até uma temperatura superior à temperatura de fusão [49], saindo pelo *nozzle* segundo as ordens do *G-CODE* [50].

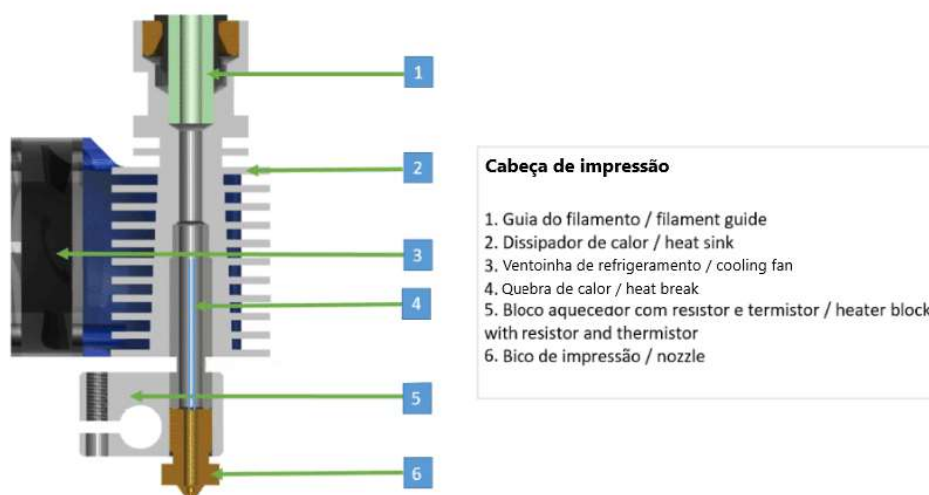


Figura 13 - Representação dos componentes de uma cabeça de impressão [50].

Para a realização dos movimentos associados a uma impressão 3D (movimentos dos eixos e da extrusora), são utilizados motores de passo (*stepper motors*). Estes motores são constantemente utilizados, não só em impressoras 3D, mas também em máquinas CNC (*Computerized Numerical Control*), corte e gravação a *laser*, entre outras [51].

Um *stepper motor* consiste num motor elétrico de corrente contínua (DC), no entanto, ao contrário de um típico motor elétrico DC, este é um motor onde cada rotação está dividida num número igual de etapas. Desta forma, é possível realizar movimentos controlados (variando as etapas de acordo com o movimento pretendido), sem recurso a qualquer sensor de posição, desde que o seu dimensionamento seja feito corretamente [52].

Apesar de não serem necessários sensores de posição para o controlo dos *stepper motors*, eles são essenciais numa impressora, para zerar o *nozzle* em todos os eixos, para que esta possa efetuar a impressão em relação à origem do referencial de coordenadas da impressora. Visto que o utilizador pode mover manualmente a cabeça de impressão segundo todos os eixos, estes sensores são bastantes importantes para proporcionar o reposicionamento do referencial.

2.4.1. Vantagens e desvantagens

A metodologia de impressão, segundo o processo FDM, ganhou muita popularidade em diversos setores, sendo aplicada em inúmeros conceitos. O facto de apresentar um grande leque de vantagens, quando comparadas com os restantes processos de fabrico, é o motivo do seu crescimento e grande adesão pelo mercado.

As principais vantagens que apresenta são:

- ✓ **Baixos desperdícios de material** - sendo um processo de MA por deposição de material, o FDM apresenta reduzidos desperdícios, pois é apenas depositado o material necessário. Os desperdícios que existem resumem-se a suportes, abas, torres de limpeza, entre outros [53][54].
- ✓ **Fabrico de geometrias complexa** – o FDM permite produzir objetos de geometrias muito complexas. Dada a sua metodologia de funcionamento camada por camada, é possível produzir peças que seriam muito difíceis, ou até mesmo impossíveis de produzir, através de outros processos de fabrico. Esta característica favoreceu a indústria a níveis estéticos, funcionais, ergonómicos e económicos [54][55][56].
- ✓ **Custos reduzidos** – de entre as várias impressoras disponíveis, as FDM apresentam custos de obtenção inicial e manutenção relativamente baixos. Para além deste fator, os materiais utilizados também não apresentam valores elevados, tornando todo o processo bastante acessível [56][57].
- ✓ **Processo favorável para pequenos lotes** – comparando com os processos de fabrico convencionais, o FDM apresenta custos unitários muito competitivos para pequenas produções. Isto acontece, pois, os restantes processos beneficiam da amortização dos custos na produção de maiores quantidades [9][58].
- ✓ **Flexibilidade e rapidez de produção** – Este processo veio ajudar a prototipagem rápida de peças e também a produção de peças finais. Tendo estas impressoras a capacidade de implementação num ambiente de trabalho, como por exemplo num escritório, a obtenção de produção de um protótipo real, rápido e relativamente barato, facilita todo o processo de melhoramento e otimização dos componentes ou conjuntos a projetar [59][57].

- ✓ **Utilização de diversos materiais** – Este é um processo que possibilita a utilização de diversos tipos de filamentos na mesma impressão. É possível utilizar um filamento solúvel para impressão de suporte para uma melhor qualidade e para uma maior facilidade de remoção dos mesmos [53][60].

De facto, é inegável que o FDM apresenta um amplo conjunto de benefícios, quando comparado com os restantes processos de fabrico. No entanto, apresenta também as suas limitações, fazendo com que este processo continue a ser substituído pelos processos de fabrico convencionais, sendo algumas delas apresentadas abaixo:

- ❖ **Efeito escada na superfície** – Este fenómeno ocorre devido à distância entre extremos de camadas subsequentes. Desta forma, as impressões apresentam uma maior rugosidade superficial, diminuindo a qualidade e precisão das impressões. Este efeito pode ser diminuído pela redução da altura das camadas [61].
- ❖ **Necessidade de suportes** – Alguns objetos possuem geometrias que, para serem impressos por FDM, necessitam de suporte. A criação de suportes vai levar a desperdício de material, maior tempo de impressão, e a uma má qualidade superficial na superfície de contacto entre a peça e o suporte [11],[53].
- ❖ **Processo de fabrico complexo** – O processo FDM é bastante complexo, apresentando uma grande dificuldade na determinação dos parâmetros ideais para cada equipamento e ambiente. Estes parâmetros têm influência em características como a qualidade superficial, eficiência da impressão e propriedades mecânicas da peça impressa [57][62].
- ❖ **Estrutura não uniforme** – Uma das características do FDM é que apresenta uma estrutura heterogénea. Isto dá-se devido à criação inevitável de poros característicos do processo de fabrico, ou diferenças de temperatura na extrusão. Estes defeitos podem ser minimizados com uma correta otimização dos parâmetros de impressão [63], [64]. Verificamos também uma disparidade nas características de provetes impressos segundo orientações de construção diferentes [9][11], [65].

2.4.2. Principais parâmetros de impressão

Uma das desvantagens da metodologia de impressão FDM é ser caracterizado como um processo complexo, devido à grande quantidade de variáveis e parâmetros a ele associados, tornando difícil manter o controlo de tudo. No entanto, observando com mais atenção, a possibilidade de parametrização tão pormenorizada da impressão FDM, faz com que seja um processo flexível, com uma elevada margem para evolução e desenvolvimento [28].

Uma boa parametrização é essencial para que os objetos impressos possam ser fabricados corretamente e com uma boa qualidade. Os parâmetros devem ser estabelecidos consoante fatores como as características da impressora utilizada, tipo, estado e propriedades do material a imprimir, entre outros.

Para uma melhor perceção desta parametrização, serão apresentados e caracterizados alguns dos principais parâmetros a considerar na impressão FDM:

➤ **Altura de camada (*layer hight*)**

A altura a que o *nozzle* em cada camada se encontra, constitui um dos parâmetros mais importantes e mais influentes no tempo e na qualidade de impressão. Quanto menor for esta medida, mais camadas serão necessárias para o fabrico do objeto. No entanto, verificamos uma redução na qualidade superficial do objeto [66], pois quanto maior for a altura de camada, maior será o efeito escada provocado (Fig. 13) [65].

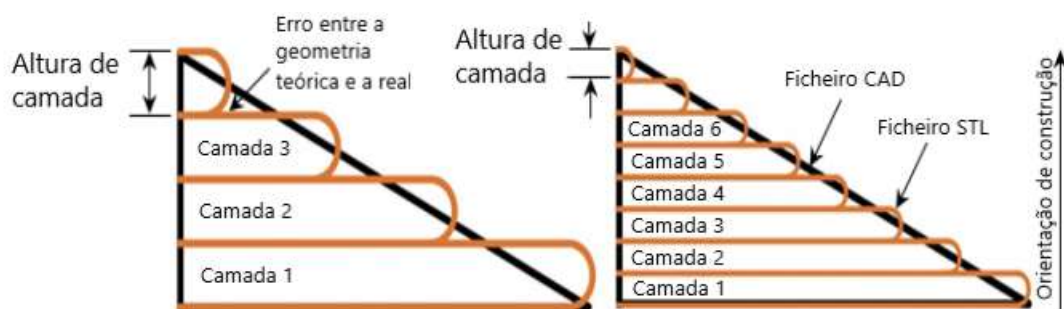


Figura 14 - Representação da influência da altura da camada de uma impressão [66].

➤ **Largura de extrusão (*layer width*)**

A largura de extrusão, juntamente com o parâmetro anterior, determinam a forma como o material vai sendo depositado (Fig. 14). Este parâmetro pode variar durante a impressão de cada camada, e influencia bastante a qualidade e tempo de impressão [65],[67].

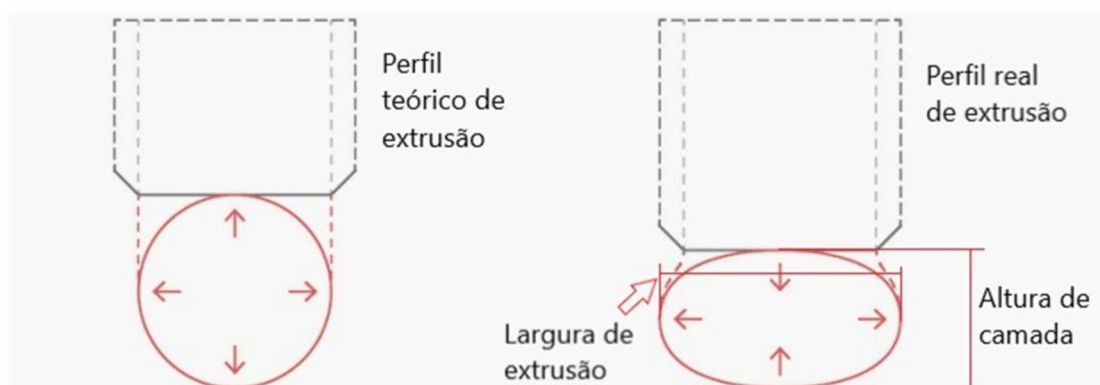


Figura 15 - Caracterização do perfil de extrusão por FDM [9].

➤ **Diâmetro do *nozzle***

Este parâmetro é relativo ao diâmetro do *nozzle* por onde o material é depositado, estando diretamente relacionado com a altura de camada de impressão, pois a altura da camada não deve ser superior ao diâmetro do *nozzle*. Aumentando o diâmetro do *nozzle*, é possível reduzir o tempo de impressão, apesar de diminuir a qualidade da mesma [66],[65].

➤ **Velocidade de impressão**

A velocidade é um parâmetro que possui um papel importante na qualidade e no tempo de impressão. Tem também um grande impacto na deformação do objeto, visto que quanto maior for a velocidade de impressão, maior serão as tensões residuais [65].

➤ **Padrão e densidade do preenchimento (*infill*)**

O preenchimento é o material que compõem o interior do objeto (material dentro dos perímetros internos e das camadas inferiores e superiores). Este preenchimento pode tomar vários formatos (triangular, retangular, cubico, *gyroid*, entre outro), e densidades. Estes dois parâmetros vão ter uma grande influência nas propriedades mecânicas do componente impresso. A densidade pode variar entre 0% e 100% (quanto maior a densidade, maior o peso) [9].

➤ **Orientação de construção**

As peças produzidas por FDM são caracterizadas como anisotrópicas devido às diferentes propriedades que adquirem, consoante a orientação de impressão. Dada a metodologia de impressão planar, este parâmetro pode ser controlado consoante a colocação do objeto na base de impressão para imprimir (Fig. 15), [11],[35],[65].

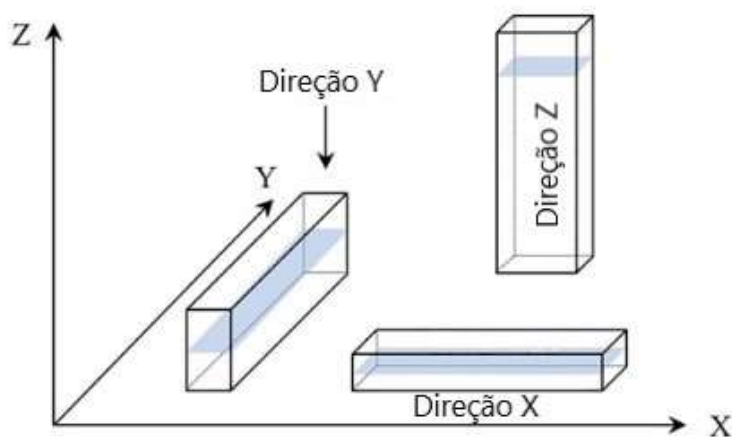


Figura 16 - Representação da orientação de construção consoante o posicionamento do objeto [65].

➤ **Temperatura de impressão**

Este é um dos parâmetros com mais influencia na impressão em geral. Definir qual a temperatura ideal de funcionamento é muito importante, pois o material necessita de possuir viscosidade suficiente para poder ser extrudido corretamente. Caso o material não flua como esperado, pode ocorrer o aparecimento de vazios, e pode criar um espaçamento entre perímetros [11],[68],[69].

2.4.3. Defeitos comuns de uma impressão

Existem bastantes problemas que normalmente acontecem no decorrer de uma impressão FDM, visto tratar-se de um processo muito complexo, sendo difícil manter o controlo dos diversos parâmetros que afetam uma impressão. Estes problemas normalmente podem ser caracterizados por problemas de extrusão, problemas de adesão, problemas de qualidade superficial, problemas mecânicos, entre outros. Relativamente às causas, estas não são fáceis de detetar, pois cada componente é afetado por mais do que um parâmetro de impressão. Seguidamente serão apresentados os defeitos mais comuns no decorrer de uma impressão.

2.4.3.1. Problemas da impressora

➤ Reduzida adesão da primeira camada

Este problema é dos mais correntes, e é o que necessita de maior atenção, pois uma primeira camada é fundamental para uma boa impressão. Caso isto não aconteça, a peça pode soltar-se da cama de impressão a qualquer momento e interromper a correta impressão do objeto. Existem também materiais que dependem fortemente de uma correta temperatura da cama de impressão para agarrar corretamente [70]. Esta fraca adesão pode dar-se devido a:

- I. *Layer hight* superior ao esperado, possivelmente por causa de uma má calibração (Fig. 16). Neste caso, o *nozzle* irá estar a depositar material a uma altura que não proporciona o contacto suficiente entre o material e a cama de impressão, para que este agarre [69].

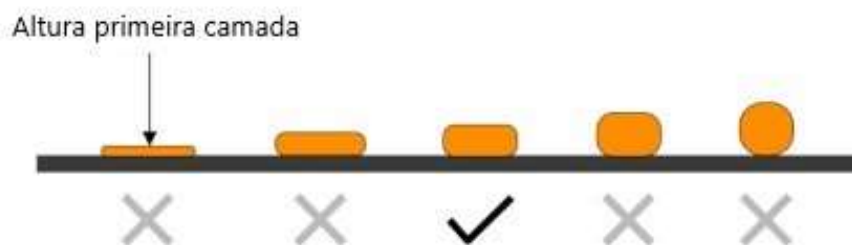


Figura 17 - Altura da primeira camada ideal [69].

- II. Sujidade na cama de impressão - A cama de impressão é um componente que está sempre sujeito ao contacto com o meio ambiente, sendo por isso necessário limpá-lo recorrentemente, para garantir uma boa adesão [69],[71];
- III. Elevadas velocidades de impressão - Muitas vezes é necessário baixar a velocidade da primeira camada para que o material depositado possa permanecer agarrado à cama [69].

➤ Desgaste e ajustes de componentes mecânicos

Uma impressora é constituída por componentes em constante desgaste, e que necessitam ser substituídos ou ajustados com regularidade. Componentes como as correias (que transmitem o movimento dos motores à cabeça e à cama de impressão), as guias ou rodas de borracha, a engrenagem que empurra o filamento, entre outros [72].

2.4.3.2. Problemas de qualidade superficial

➤ Efeito pegada de elefante (*elephant foof*)

Ao contrário do que acontece no caso da fraca adesão acima mencionada, quando o *nozzle* está demasiado próximo da cama de impressão, origina o efeito ‘pegada de elefante’, devido à elevada proximidade entre estes dois componentes. Neste caso, o material é esmagado contra a cama, criando uma primeira camada mais larga, originando um defeito geométrico da peça (Fig. 17). Fazer uma calibração da impressora e dos parâmetros de extrusão pode resolver este problema [69],[72].



Figura 18 - Representação efeito 'elephant foot' [72].



Figura 19 - Representação efeito de warping [72].

➤ **Warping**

Este defeito é muito conhecido por provocar um empeno dos cantos e arestas da base da peça impressa (Fig. 18). Apesar de poder acontecer em qualquer impressão, é mais provável nos materiais de alto desempenho, porque necessitam de uma temperatura de extrusão superior, criando uma maior diferença térmica com o meio ambiente, originando a criação de tensões residuais. Para solucionar este problema, deverá manter-se a temperatura ambiente constante e também criar uma aba de fixação na primeira camada de impressão (posteriormente terá de ser removida) [61],[69].

➤ **Delaminação**

Tal como o nome indica, este defeito é relativo à delaminação do objeto (Fig. 19), mais propriamente entre camadas consecutivas. Ocorrendo devido a uma fraca ligação do material, este defeito está relacionado com a capacidade de fusão, tendo influência parâmetros como a altura de camada, a capacidade de arrefecimento e a temperatura de extrusão. A aplicação de uma baixa temperatura de fusão pode causar a formação de aberturas e cortes [69],[72].

➤ **Stringing ou oozing**

O efeito de *stringing* ou *oozing*, é um defeito que acontece na impressão durante as deslocações. Ocorre devido ao vazamento de pequenas quantidades de filamento na viagem entre dois pontos, formando fios finos de material na impressão (Fig. 20). Este fenómeno dá-se por várias razões como, por exemplo, o filamento estar demasiado húmido, a temperatura do bico estar muito alta, os parâmetros de retração não estarem corretos, entre outros [61],[69].



Figura 20 - Representação do efeito delaminação [73].



Figura 21 - Representação efeito stringing [72].

➤ **Difícil remoção de suportes**

Algumas geometrias, para serem impressas por FDM, necessitam da formação de suportes. Estes suportes servem para sustentar partes desamparadas do objeto a imprimir e, para isso, é construída uma estrutura sobre a qual irá ser impresso o objeto (Fig. 21). Muitas vezes, a distância entre a interface do suporte e o objeto não está corretamente definida, o que provoca a fusão dos dois,

dificultando a sua posterior remoção. Uma boa solução para este problema é a utilização de suportes solúveis, solução que é difícil de aplicar em algumas impressoras, ou então aumentar a distância entre a interface e a superfície do objeto [61],[69].



Figura 22 - Objeto com suportes aplicados [9].

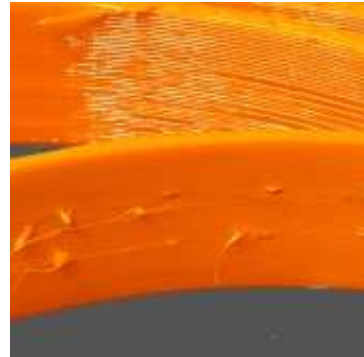


Figura 23 - Blobs e Zits numa superfície impressa [69].

➤ **Blobs e Zits**

Este defeito consiste na formação de bolhas (*blobs*) e espigões (*zits*) na superfície do objeto impresso (Fig. 22), normalmente nas paredes verticais. Estas deformações estão usualmente posicionadas nos locais de início e de fim de extrusão, sendo importante determinar em qual desses pontos são formadas. Uma correta parametrização da retração pode solucionar este problema. No entanto, selecionar um bom local de início e fim de deposição também pode ajudar [69].

2.4.3.3. Problemas de deposição

➤ **Incorreta extrusão**

A extrusão depende dos parâmetros de impressão e do estado dos componentes da impressora. Sucede que a impressora pode extrudir material a mais (Fig. 23) ou a menos (Fig. 24), levando a deformações geométricas e à deterioração das propriedades (formação de vazios), respetivamente. Para evitar este problema, é necessário garantir uma boa calibração do equipamento, um bom estado dos componentes do sistema de extrusão, e uma boa parametrização [69],[72].

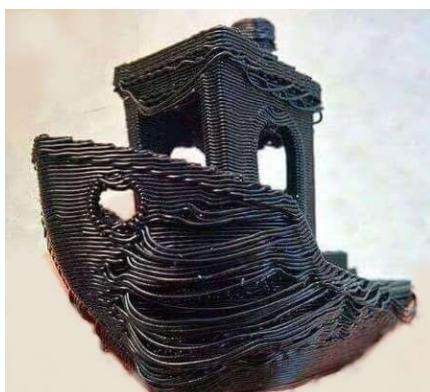


Figura 24 - Efeito de excesso de extrusão [72].



Figura 25 - Efeito de falta de extrusão [72].

➤ Precisão dimensional

No processo de modelação 3D, todas as medidas devem ser especificadas, para que o objeto possa ser produzido com o maior rigor possível. No entanto, no processo FDM, a capacidade de obter uma elevada precisão dimensional é difícil de atingir. Esta falta de precisão cria problemas de montagem com outros componentes [69],[72].

2.4.4. Materiais utilizados

A busca para ultrapassar uma das maiores limitações do processo FDM, baixa resistência mecânica dos protótipos, tem levado à descoberta e desenvolvimento de diversos tipos de materiais e suas combinações. Na grande maioria das ocasiões, este processo utiliza materiais termoplásticos, como o PLA. No entanto, podem também ser impressas peças em metal, areia, madeira, entre outros [74].

Atualmente, podemos encontrar no mercado filamentos dos materiais mencionados. No entanto, imprimir estes materiais é possível, quando combinados com um material polimérico de base termoplástica. Desta forma, o material é capaz de fluir de forma adequada e garantir uma correta impressão [75]. Como exemplo, podemos encontrar no mercado bobinas de filamento metálico (como por exemplo o *BASF Ultrafuse 316L*), com elevados teores de metal, capazes de produzir peças que, com o correto pós-processamento, podem acabar por se tornar peças puramente metálicas [76].

Para uma melhor perceção, serão apresentados os materiais e compósitos principais utilizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais comuns em FFF [9].

Material	Características
Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	- Boas propriedades mecânicas - Boa resistência à temperatura - Suscetível a deformações na impressão
Poliácido Láctico (PLA)	- Material mais comum na impressão de plásticos - Fácil de imprimir - Baixa resistência à temperatura, ao alongamento à rotura e ao impacto, quando comparado com o ABS
Poliamida (PA)	- Sustentável na produção de peças finais - Boa flexibilidade - Excelente resistência química
Polietileno Tereftalato Glicol Modificado (PETG)	- Elevada resistência química e ao impacto - Boas propriedades térmicas - Suscetível a deformações na impressão
Poliuretano (TPU)	- Fabrico de componentes flexíveis - Bom alongamento à rotura - Elevada dificuldade de impressão rigorosa

O processo FDM é capaz de imprimir diversos tipos de materiais. No entanto, continua com limitações relativamente às propriedades mecânicas dos componentes impressos. Com o intuito de ultrapassar esta limitação, têm sido desenvolvidos materiais poliméricos reforçados com fibras. Estes materiais consistem na combinação de dois ou mais materiais, melhorando as propriedades finais dos componentes impressos.

Existem várias formas de introduzir as fibras numa impressão. Algumas permitem que sejam utilizadas em impressoras normais, outras implicam modificações ou adição de novos mecanismos e componentes na impressora. As formas de inserir fibras numa peça impressa estão descritas na Fig. 25.



Figura 26 - Formas de colocar fibras numa impressão FDM [77].

Esta combinação consiste na junção de um material de reforço (na forma de fibras curtas), como por exemplo fibras de carbono ou vidro, a um material base, normalmente polimérico [78]. Desta forma, o material base tem como função ligar o material de reforço, para que as forças de solicitação possam ser transmitidas ao material de reforço. De entre diversos tipos de fibras, na Tabela 3, estão apresentadas duas categorias de fibras que podemos normalmente encontrar no mercado [77],[78]:

Tabela 3 - Tipos de reforço existentes.

Categoria	Tipo de fibra	Características
Fibras Naturais	Fibra de Madeira	Estas fibras são de carácter natural, sendo por isso biodegradáveis, recicláveis e possuem custos relativamente reduzidos. No entanto, apresentam baixa resistência mecânica, requerem tratamento, são descontínuas, e nem todas elas podem ser encontradas no mercado para compra.
	Fibra de Vidro	Estes tipos de fibras necessitam ser manufacturadas e, por isso, possuem um custo elevado de obtenção, não sendo ecológicas. Apesar destes aspetos, são fibras que podem ser contínuas ou descontínuas (alargando o seu leque de aplicação), beneficiando de uma elevada resistência mecânica, resistência à corrosão e ação química, podendo ser adquiridos com muita facilidade no mercado.
Fibras Sintéticas	Fibra de Carbono	
	Fibra de Kevlar	

2.5. G-CODE

O *G-CODE*, ou por outras palavras código G, é uma linguagem de programação utilizada para comandar diversas máquinas, como máquinas CNC, máquinas de corte *laser* ou impressoras 3D. Através deste código, é possível manipular e automatizar os diversos movimentos e operações realizadas pela impressora, fazendo com que sejam efetuados trabalhos específicos, como corte, fresagem ou deposição de material. Para tal, é necessário um conjunto de comandos e instruções, de modo a informar a máquina para que esta possa interpretar as ordens, e assim realizar as operações pretendidas para a obtenção do produto final.

Cada linha do código G corresponde a um comando ou ação específica que a máquina deve executar. Esses comandos, normalmente consistem em letras (geralmente G, M e um valor numérico) e por vezes, podem surgir acompanhados por outros parâmetros. De seguida, encontram-se alguns elementos mais comuns, que podem ser encontrados neste tipo de códigos:

- Linhas de código que começam pela letra G: sempre que é necessário especificar um movimento ou uma ação que a máquina deve realizar, como por exemplo, movimentos circulares, movimentos lineares, movimentos rápidos, entre outros, é utilizada a letra G. Exemplificando a lógica de trabalho desta linguagem, o comando G0 é utilizado para o posicionamento rápido. Já o comando G1 [79] é utilizado para movimentos lineares e o G28 é utilizado para zerar todos os eixos da máquina [80].
- Linhas de código que começam pela letra M: este tipo de comandos é utilizado para executar várias funções da máquina. Por exemplo, os comandos M106 e M107 são responsáveis por ativar ou desativar o sistema de refrigeração (M106 e M107), o comando M104 define a temperatura do bloco de aquecimento e o comando M190 caracteriza a temperatura da cama e impressão [80].
- Linhas que possuem variáveis numéricas: são utilizados variáveis numéricas para que possa ser feita uma parametrização das ações realizadas pela máquina (e.g., evitar cruzar perímetros = 1). Esta parametrização passa por definir variáveis como a velocidade de impressão, largura de extrusão, parâmetros de retração, parâmetros específicos (evitar cruzar perímetros), entre outros [81].

Este código é escrito em texto simples e é geralmente gerado por *software* CAM, dependendo da máquina e da parametrização do utilizador, baseando-se num modelo CAD. Uma vez gerado, este código poderá ser levado para a máquina pretendida, para que esta o possa interpretar e executar os respetivos comandos para a obtenção do produto final.

Para que possa ser feita uma melhor análise deste tipo de código, segue abaixo um exemplo de um *G-CODE* comentado, de impressão 3D:

```

; Gerado pelo Slic3r 1.3.0-dev em 2023-07-30 às 12:58:57

; largura de extrusao dos perimetros externos = 0.40mm (3.02mm^3/s)
; largura de extrusao dos perimetros = 0.40mm (4.03mm^3/s)
; largura de extrusao do preenchimento = 0.50mm (5.23mm^3/s)
; largura de extrusão das camadas solidas = 0.30mm (1.41mm^3/s)
; largura de extrusão das camadas superiores = 0.30mm (1.41mm^3/s)

M107
M190 S60 ; definir a temperatura da cama e esperar que ela seja atingida
M104 S200 ; definir temperatura
G28 ; zerar todos os eixos
G1 Z5 F5000 ; levantar o bico de impressão

; g-code do filamento

M109 S200 ; definir a temperatura e esperar que ela seja atingida
G21 ; definir milímetros como unidade
G90 ; utilizar coordenadas absolutar
M82 ; utilizar distancia absoluta para extrusão
G92 E0
G1 E-2.00000 F2400.00000
G92 E0
G1 Z4.000 F9000.000
G1 X106.186 Y88.010 Z0.200 F9000.000
G1 E2.00000 F2400.00000
G1 F1200
G1 X106.430 Y87.864 Z0.200 E2.00845
G1 X106.344 Y87.503 Z0.200 E2.01949
G1 X105.884 Y84.658 Z0.200 E2.10507
G1 X105.707 Y81.340 Z0.200 E2.20372
G1 X105.859 Y78.463 Z0.200 E2.28930
G1 X106.340 Y75.398 Z0.200 E2.38142
G1 X107.214 Y72.190 Z0.200 E2.48016
G1 X108.277 Y69.476 Z0.200 E2.56674
G1 X109.681 Y66.750 Z0.200 E2.65779
G1 X111.384 Y64.159 Z0.200 E2.74988

;
;
;

G1 X70.581 Y88.877 Z9.647 E236.04210
G1 X68.590 Y90.573 Z9.647 E236.11903
G1 X68.429 Y90.735 Z9.647 E236.12575
G1 F7200;_WIPE
G1 X68.590 Y90.573 E236.05339
G1 F7200;_WIPE
G1 X70.581 Y88.877 E235.22509
G1 F7200;_WIPE
G1 X70.702 Y88.795 E235.17896
G1 F7200;_WIPE
G1 X68.573 Y90.924 E234.22575
G1 E234.12575 F2400.00000
G92 E0
G1 Z13.647 F9000.000
; fim especifico do g-cpde do filamento
; fim g-code para o filamento

M104 S0 ; desligar a temperatura
G28 X0 ; zerar todos os eixos
M84 ; desativar motores

; filamento utilizado = 9549.0mm (23.0cm3)
; filamento utilizado = 28.5g
; custo total do filamento = 0.0

; evitar cruzar perimetros = 1
; formato da cama = 0x0,220x0,220x220,0x220
; temperatura da cama = 60
; g-code antes da camada =
; g-code entre objetos =
; aceleração em pontes = 0
; velocidade da ventoinha em pontes = 100
; largura de coneccao da aba = 0
; largura da aba = 5
; objetos completos = 0
; refrigeração = 1
;
;
;

```

Figura 27 - Exemplo de *G-CODE* com comentários.

2.6. Impressão FDM não planar

O processo de impressão FDM é complexo, possuindo diversas vantagens relativamente aos restantes processos de fabrico. Apesar de já ser um processo bastante utilizado, possui as suas limitações. Com o avanço da tecnologia e com o alargamento da comunidade que utiliza o processo FDM, tem-se vindo a verificar um constante desenvolvimento e procura de soluções para otimizar este processo, no sentido de ultrapassar as suas limitações [13][82].

A metodologia de impressão FDM não planar é uma área em desenvolvimento, com bastante potencial para superar limitações existentes e alcançar uma maior otimização. Consiste na impressão de camadas não planares, com possibilidade de variar a sua espessura. Este método de impressão possui diversas designações: *Curved Layer Fusion Deposition* (CLFD) [83], *Curved Layer Fusion Deposition Modeling* (CLFDM) [13], *Curved Layer Fusion Filament Fabrication* (CLFFF) [84].

Vários estudos têm sido desenvolvidos ao redor deste tema, e daí terem surgido várias abordagens interessantes para a aplicação da impressão não planar. As principais conquistas a nível de melhoria, residem em técnicas para melhoramento do acabamento superficial [85] (Fig. 27.b) e da resistência mecânica [86], bem como a eliminação da utilização de suportes [87] (Fig.27.a).

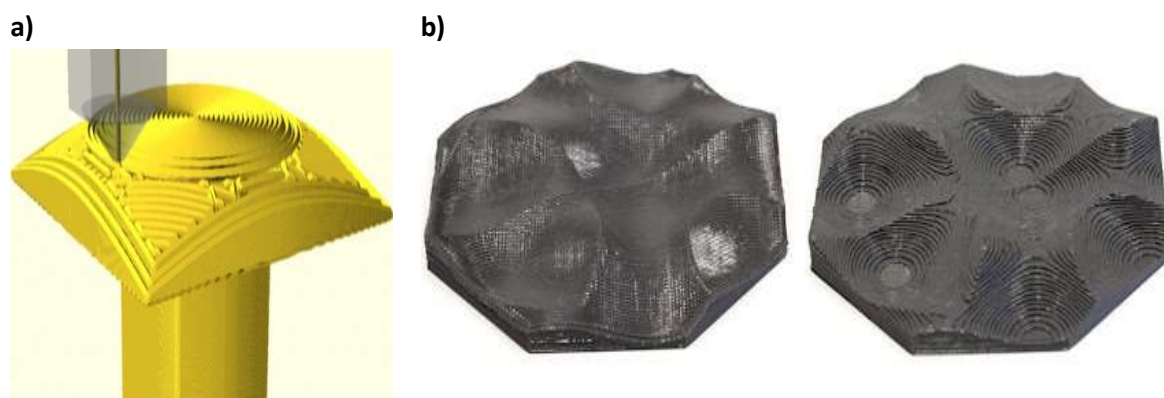


Figura 28 - a) Exemplificação da utilização de camadas não planares para eliminação da necessidade de utilização de suportes [88]. b) Comparação do efeito escada entre uma impressão não planar (lado esquerdo) e uma impressão planar (lado direito) [89].

Com o intuito de reduzir o efeito de escada e aumentar as propriedades mecânicas nos objetos impressos, foram desenvolvidas técnicas de fatiamento adaptativo. Estas técnicas consistem em dividir o modelo CAD em diferentes zonas, alternando a altura da camada, dependendo da zona. Peças produzidas por esta técnica apresentam uma redução do efeito de escada e do tempo de impressão, bem como um aumento da resistência do objeto [86].

Este é um conceito em constante desenvolvimento devido à necessidade de ultrapassar as diversas limitações oferecidas pelo FDM, e também como meio de otimizar ao máximo este processo de fabrico. Têm surgido estudos sobre as várias abordagens e metodologias de funcionamento para este melhoramento, como os que a seguir se apresentam.

Tabela 4 - Casos de estudo referentes ao desenvolvimento da impressão não planar.

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
Chakraborty, D. et al [85]	Este artigo reside essencialmente na produção de um caminho de extrusão não planar para aplicação de uma nova técnica de prototipagem rápida, designado por “ <i>Curved Layer Fused Deposition Modeling</i> ” (CLFDM). Foram definidos três fatores chave para a capacidade de impressão, geração de um caminho de impressão adequado, correta ligação do material, e uma adequada orientação do filamento. Através de uma superfície paramétrica, são gerados caminhos não planares desde a superfície exterior até ao interior do objeto. Concluiu-se que este método tem o potencial de produzir peças com maior resistência, devido ao maior comprimento dos caminhos formados, e à área de contacto maior entre camadas, devido ao formato não planar das camadas, redução do efeito de escada e do número de camadas e tempo de impressão.

Micali, M. K. et al [90]	Com o intuito da eliminação do efeito de escada, provocado pela impressão planar comum, Micali, M. K. et al [90] criou um caminho 3D capaz de acompanhar a superfície do objeto a imprimir. Esta técnica foi desenvolvida para impressoras de três eixos, as mais comuns, e é baseada no planeamento de caminhos do processo CNC. É desenvolvida uma abordagem das limitações mecânicas da impressora, com o intuito de evitar colisões. Esta metodologia de impressão permite aumentar a resolução dos objetos impressos, sem realizar qualquer alteração ou modificação aos componentes ou tipologia da impressora. Outra vantagem desta técnica reside na possibilidade de utilização por uma grande variedade de impressoras, dado que o caminho é gerado para um algoritmo <i>G-CODE</i> .
Khurana. J. B. et al [84]	Visto que as impressões planares são caracterizadas por baixa resistência a esforços aplicados perpendicularmente à interface das camadas, este estudo desenvolve uma ideia de impressão não planar, aplicável a impressoras de três eixos para colmatar esta limitação. Designada por impressão <i>active-z</i> , este tipo de impressão não planar consiste no movimento dos eixos <i>x</i> , <i>y</i> e <i>z</i> em simultâneo. Para o fatiamento dos objetos é utilizado um <i>software open-source</i> , programa onde é permitida a sua alteração, estudo e distribuição. Este processo originou a formação de uma grande quantidade de deslocações desnecessárias, nas quais poderia ocorrer a colisão da cabeça de impressão contra o objeto. Por isso, recorreram a um <i>MATLAB script</i> para realizar um pós-processamento, otimizando esta característica. Após diversos ensaios, a autora concluiu que a impressão não planar é capaz de produzir objetos com maior resistência mecânica quando aplicadas forças perpendiculares à interface da camada (força aplicada segundo o eixo <i>Z</i> da peça impressa).
Huang, B. et al [86]	Este estudo utilizou uma combinação de camadas planares (na base) com camadas não planares (no exterior), para melhorar a qualidade superficial do objeto, eliminando o efeito escada. Para isso, cada superfície da <i>mesh</i> do STL foi caracterizada como uma parte da superfície inferior, lateral ou superior. Para fazer a distinção das faces laterais e superiores, o utilizador pode estabelecer um ângulo de referência. A camada superior é deslocada para baixo ao longo do eixo normal à superfície, até atingir o número desejado de camadas. Para obter as camadas planares, o STL é dividido em duas partes. A casca superior (feita segundo uma impressão não planar) é retirada, e com o restante é criado um STL, que será fateado segundo uma impressão planar. O fabrico do objeto consiste na impressão de uma primeira parte planar, sendo posteriormente coberta pela parte não planar.

Jin, Y. et al [83]

Incidindo na obtenção de superfícies com maior qualidade, este estudo analisou e otimizou a geração de caminhos de impressão não planares. O principal foco do artigo foi estudar a forma como as camadas não planares são geradas adequadamente, a partir da superfície exterior. Para isso, a cabeça de impressão deverá estar sempre perpendicular à superfície. Garantir esta condição é impossível numa impressora normal de três eixos, podendo ocorrer colisões da cabeça de impressão com o *nozzle*. Para evitar esta interação, devem ser tomados em consideração três fatores: altura de impressão, o ângulo relativamente à camada não planar, e também o diâmetro do *nozzle*. Foi concluído que em movimentos descendentes, a altura de camada deve ser maior do que nos movimentos ascendentes. Apesar de não terem sido apresentados objetos impressos no trabalho, o resultado desta metodologia de impressão resulta numa superfície com redução do efeito de escada.

Após a análise dos diversos estudos apresentados na Tabela 4, é evidente que a impressão FDM com recurso a uma metodologia de impressão não planar é bastante vantajosa, apresentando soluções eficazes para as limitações deste processo de fabrico. No entanto, as suas capacidades ainda não estão bem exploradas e otimizadas. Existem bastantes abordagens teóricas, mas a falta de um *software* capaz de otimizar a geração de caminhos, tomando como recurso a possibilidade de utilização de camadas não planares, não permite uma completa otimização do FDM. Estas abordagens foram muito importantes para a aquisição de diversos conceitos que irão ser abordados nos próximos capítulos, para a caracterização da metodologia, tecnologia e conceitos utilizados.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Equipamento e Material de Impressão

3.2 Equipamentos e Técnicas de Pós-processamento

3.3 Equipamentos de Teste e Medição

3.4 Análise das Limitações Mecânicas da Impressora

3.5 Calibração da Impressora

3.6 Programa de Fatiamento Não-Planar

3.7 Procedimento Experimental

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo foi elaborado com o intuito de apresentar os diversos recursos utilizados (equipamentos, materiais, acessórios, entre outros), e a metodologia que foi implementada para a obtenção dos objetos de estudo fabricados. Assim, os tópicos abordados estão organizados de forma lógica e segundo a linha de raciocínio feita no decorrer do estudo.

3.1. Equipamento e material de impressão

Para a produção dos provetes e peças de teste, foi utilizada uma impressora cartesiana *Ender 3 V2* (Fig. 29). Esta é uma máquina de custo acessível, que fabrica objetos com recurso ao processo FDM. Através deste método de fabrico aditivo, é possível a produção de peças num volume de impressão de 220 x 220 x 250 mm³. Possui também um volume exterior de 475 x 470 x 620mm³ e um peso de 7,8 kg. Quanto às temperaturas máximas de funcionamento, a cabeça de impressão 3D consegue atingir os 250°C e a cama de impressão pode trabalhar a 100°C. Utiliza uma velocidade normal de funcionamento que ronda os 30-60 mm/s, sendo que a velocidade máxima de impressão é de 180 mm/s.

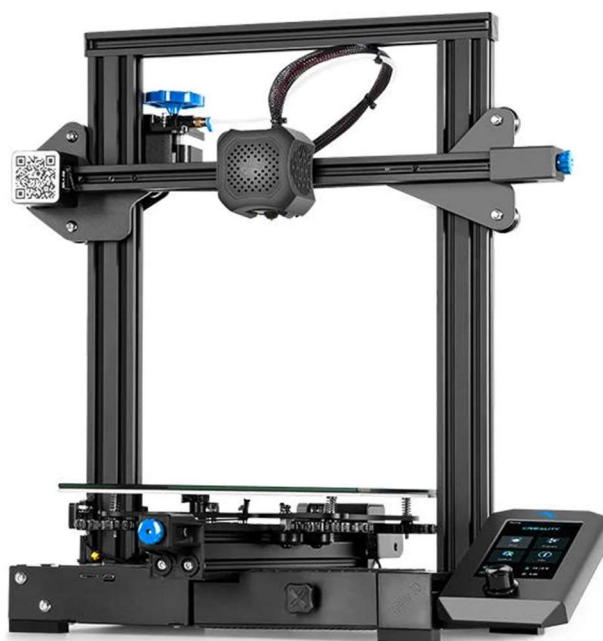


Figura 29 - Impressora 3D Ender 3 V2 [91].

A impressora de teste apresenta algumas modificações, em relação à versão original, para um melhoramento das impressões realizadas. Nestas alterações consta uma modificação do sistema de extrusão, de extrusão por *bowden tube* (Fig. 29) para extrusão direta (Fig. 30), e a adaptação da cama de impressão de vidro, para camas de impressão magnéticas com diversos revestimentos. De um lado possui uma superfície suave e do outro lado, possui uma superfície texturada (Fig. 31).

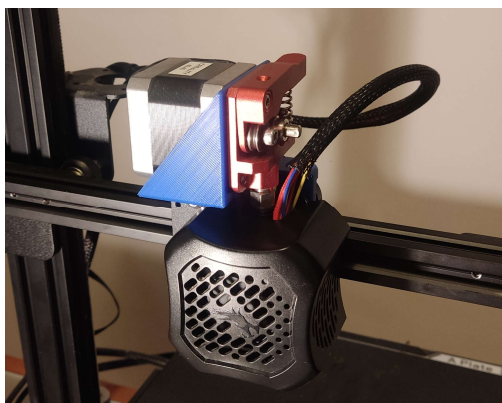


Figura 30 - Adaptação do sistema de extrusão para extrusão direta.

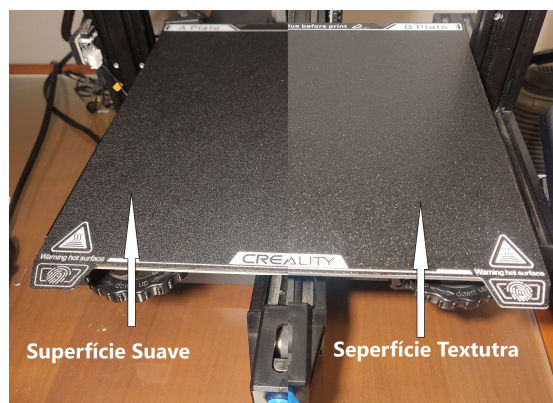


Figura 31 - Texturas da cama de impressão magnética aplicada.

É uma máquina que pode operar com diversos programas de fatiamento 3D, como por exemplo o *Ultimaker Cura*®, o *Prusa Slicer*® ou o *Slic3r*®, que foram os programas utilizados para a produção dos diversos provetes e objetos estudados. Na impressão destes sólidos de teste, foi utilizado o filamento PLA do fabricante SUNLU. É um filamento feito de PLA premium, que possui uma capacidade de biodegradação completa e menor temperatura de fusão. Para que o filamento das bobinas seja mantido em boas condições após o seu fabrico, é armazenado em embalagens herméticas seladas a vácuo, para uma melhor preservação das propriedades do material. Nas Tabelas 5 e 6, podem ser analisadas algumas especificações deste filamento [92].

Tabela 5 - Identificação do filamento.

Identificação do filamento	
Modelo	PLA
Designação do material	Poliácido Láctico (PLA)
Utilização	Impressoras 3D FDM/FFF
Diâmetro	1,75 ± 0,02mm
Fabricante	Zhuhai Sunlu Industrial Co., Ltd.

Tabela 6 - Parâmetros de impressão recomendados.

Parâmetros de impressão	
Temperatura do <i>nozzle</i>	215 ± 15 °C
Condições da cama de impressão	Utilização de cola no caso de uma cama não aquecida, ou cama a 50 - 65 °C sem utilização de cola
Velocidade de impressão	50 – 100 mm/s
Velocidade da ventoinha de arrefecimento	100 %
Resistência à tração	11 – 16 Kgf

3.2. Equipamentos e técnicas de pós-processamento

Para a produção e aprimoramento dos vários provetes projetados, foram utilizados vários equipamento e técnicas de pós-processamento. Na Tabela 7, são apresentados os equipamentos analisados e a sua utilidade no processo de obtenção dos provetes que foram analisados ao longo deste estudo.

Tabela 7 - Equipamentos e técnicas de pós-processamento utilizadas.

Equipamentos	Aplicação
Pistola de calor	Utilizada para remover ligeiros defeitos superficiais, como o <i>stringing</i> .
Lixadeira de cinta e disco	Com o intuito de uniformizar as faces dos objetos seccionados na esquadrejadora, estes equipamentos foram utilizados para lixar as faces dos vários provetes de tração.
Lixas (G 150 e G 320)	
Laminas de corte	Foram utilizadas lâminas de corte para remoção de material em excesso, como por exemplo, abas, e também para aprimoramento das arestas dos objetos impressos.
Esquadrejadora	Esta máquina foi utilizada para seccionar os conjuntos que deram origem aos provetes de tração.
Scripts	Para facilitar a análise de alguns provetes impressos, foram aplicados <i>scripts</i> de pós processamento ao <i>G-CODE</i> .

3.3. Equipamentos de teste e medição

Os objetos impressos foram fabricados com o intuito de serem analisadas e verificadas as suas principais características e propriedades. Com a finalidade de cumprir este objetivo, foram utilizados diversos equipamentos, para realizar o levantamento destes dados. Na Tabela 8, encontram-se os equipamentos utilizados e qual o seu propósito.

Tabela 8 - Equipamentos de medição e ensaios utilizados.

Equipamentos	Aplicação
Paquímetro digital	Foram utilizados os paquímetros digitais Toolland 3472 e o Mitutoyo Absolute Digimatic, com um curso de 150 mm e com resolução de 0,01 mm, para a realização de diversas medições ao longo de todo o estudo, de modo a garantir um maior rigor e uma melhor avaliação das medições efetuadas.

Máquina de ensaios mecânicos	Para avaliação e determinação das propriedades de caráter mecânico, foi utilizada a máquina da marca <i>Shimadzu</i> , modelo <i>AG-I / 50N-10kN</i> . Apesar deste equipamento ter sido utilizado para realizar ensaios de tração, também permite efetuar ensaios de flexão e compressão com diversos tipos de materiais (metais, plásticos, compósitos, entre outros), utilizando uma célula de carga de 10 kN.
Rugosímetro	Os ensaios de rugosidade realizados aos vários provetes fabricados foram efetuados com recurso ao rugosímetro <i>HOMMEL TESTER T800</i> com a sonda <i>HOMMELWERKE TKL300/17</i> .

3.4. Análise das limitações mecânicas da impressora

Para que uma impressão não planar possa ser executada, a cabeça da impressora necessita de se deslocar sobre os três eixos, em simultâneo, sem que colida com o objeto a imprimir. A carcaça da cabeça de impressão da *Ender 3 V2*, (Fig. 32), restringe bastante a zona de impressão não planar, deixando apenas um ângulo e uma altura de impressão não planar de aproximadamente $6,6^\circ$ e 22,3 mm, respetivamente (Fig. 33). Desta forma, foi estudada a possibilidade de reposicionamento dos componentes da cabeça de impressão, de modo que fosse otimizada a área de impressão não planar, para posterior estudo dos parâmetros associados.



Figura 32 - Cabeça de impressão da *Ender 3 V2*.

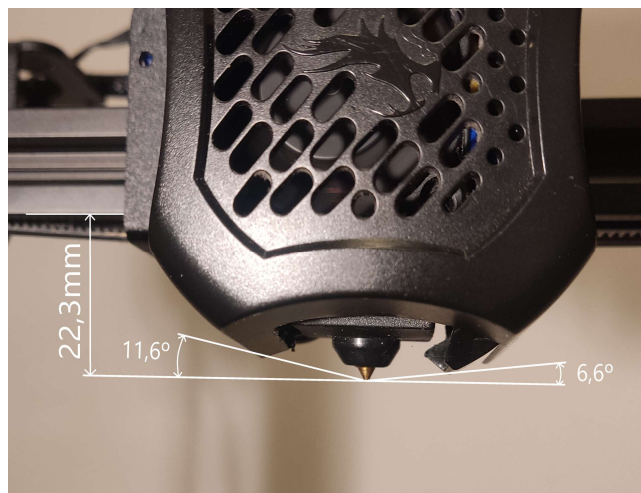


Figura 33 - Propriedades não planares da *Ender 3 V2*.

3.4.1. Desenvolvimento de uma solução para otimizar o espaço de impressão não planar

Uma vez que a cabeça de impressão original desta impressora apresenta uma reduzida área de impressão não planar, como grande parte das impressoras FDM de três eixos, foram estudadas soluções para superar esta limitação e tentar fazer um estudo a uma maior variedade de amostras. Para isso, foi considerado o reposicionamento e substituição dos componentes da cabeça de impressão, de modo a otimizar o espaço de impressão não planar.

3.4.1.1. *Nozzle* e bloco de aquecimento

Inicialmente, foram analisados o *nozzle* e o bloco de aquecimento, uma vez que estes componentes são os mais próximos do objeto impresso. Posteriormente, foi feito um estudo de mercado, em busca de soluções alternativas. Nesta primeira análise, verificou-se que a geometria do bico é um parâmetro a ter em consideração para que se obtenha uma maior zona de impressão não planar. O *nozzle* comum (Fig. 34) apresenta um grande rebordo em volta do orifício de extrusão, e baixa altura (Fig. 35), relativamente ao bloco de aquecimento, reduzindo o ângulo de impressão não planar.

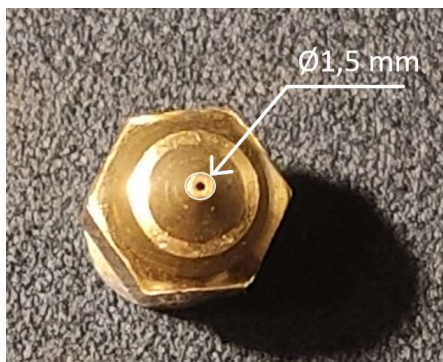


Figura 34 - Rebordo do *nozzle* pequeno.

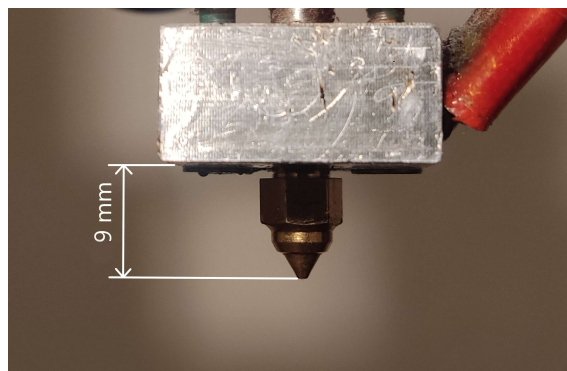


Figura 35 - Altura do *nozzle* pequeno.

De seguida, foi analisado o *nozzle* do tipo *Vulcano* (Fig. 36), visto que quando aplicado no bloco de aquecimento em estudo, é possível obter uma maior altura de impressão não planar, apesar de possuir um rebordo semelhante ao *nozzle* comum. Foi possível ainda observar que apenas parte da rosca ficava dentro do bloco de aquecimento, originando uma zona de arrefecimento entre o bloco de aquecimento e o fim da zona roscada do *nozzle*, semelhante à utilização de alhetas de arrefecimento (Fig. 37) (como, por exemplo, o dissipador de calor da impressora). Foi também estudada a possibilidade de utilização de fêmeas roscadas na zona exposta (Fig. 38), com o intuito de conduzir a temperatura do bloco de aquecimento. Ainda assim, a solução não parecia ir de encontro ao pretendido, sendo por isso analisado outro tipo de *nozzle*.



Figura 36 - *Nozzle* Vulcano.

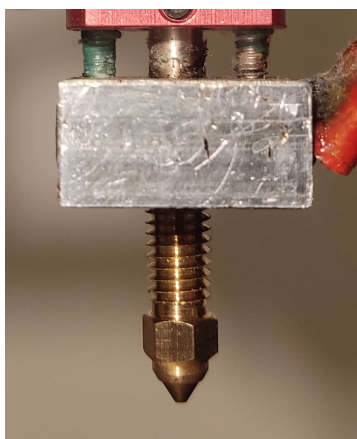


Figura 37 - Análise da aplicação do *nozzle* Vulcano.



Figura 38 - Aplicação de fêmeas roscadas no bico de extrusão Vulcano.

Finalizando a procura pelo melhor *nozzle*, foi realizado o levantamento das características de um *nozzle* com uma ponta em aço inoxidável (Fig. 39). A utilização deste *nozzle* permite obter um

aumento da altura do bico, relativamente ao bloco de aquecimento, bem como uma roscagem quase completa no bloco de aquecimento (Fig. 40).



Figura 39 - *Nozzle* com ponta em aço inoxidável.

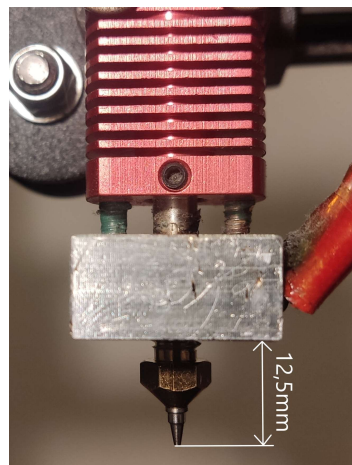


Figura 40 - Altura do bico com ponta em aço inoxidável.

Outra razão para a preferência deste *nozzle* foi o reduzido rebordo em volta do orifício de extrusão. Devido a este aspeto, é possível obter e analisar mais ângulos de impressão não planar. Comparando a geometria dos dois bicos de impressão em análise, o bico com a ponta em aço inoxidável permite realizar uma impressão não planar até um ângulo de cerca de 30° (Fig. 41), sem que o bico colida com o objeto impresso, enquanto o *nozzle Vulcano* apenas permite um ângulo de impressão não planar até cerca de 20° (Fig. 42).

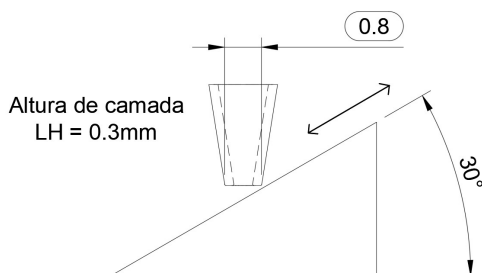


Figura 41 - Geometria do *nozzle* 0,4mm com a ponta em aço inoxidável.

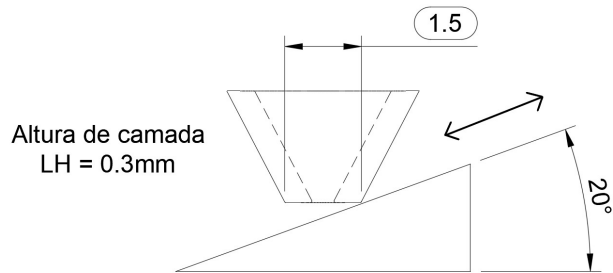


Figura 42 - Geometria do *nozzle* 0,4 mm Vulcano.

Uma vez definido o *nozzle* a utilizar e qual o ângulo e altura de impressão não planar máximos, foi feita uma análise ao bloco de aquecimento. Através do programa de modelação 3D *SolidWorks*®, foi feito um modelo tridimensional do conjunto e realizada uma medição do ângulo máximo de impressão não planar. Para uma correta medição deste ângulo, foi considerado que no bloco de aquecimento está aplicada uma proteção de silicone. Para isso, foi tido em conta o ponto mais afastado da proteção do bloco de aquecimento e retirado o valor do ângulo de impressão não planar (Fig. 43). Posteriormente, o conjunto destes componentes foi montado e, através de uma fotografia da zona a analisar, verificou-se a veracidade dos valores apurados no *software* de modelação 3D. Foi concluído que o ângulo máximo de impressão não planar é cerca de 30,7°, como demonstrado na (Fig. 44).

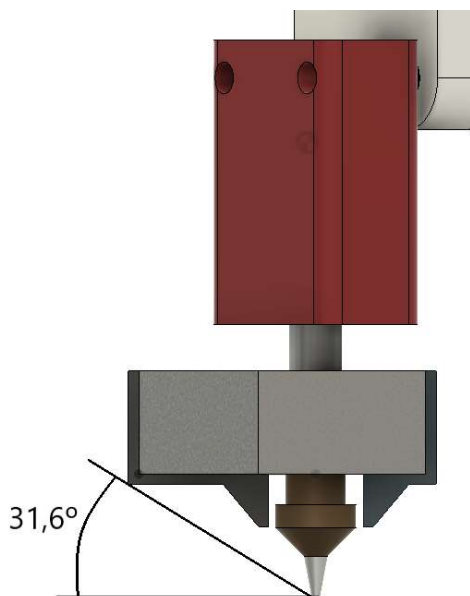


Figura 43 - Ângulo de impressão não planar estimado.

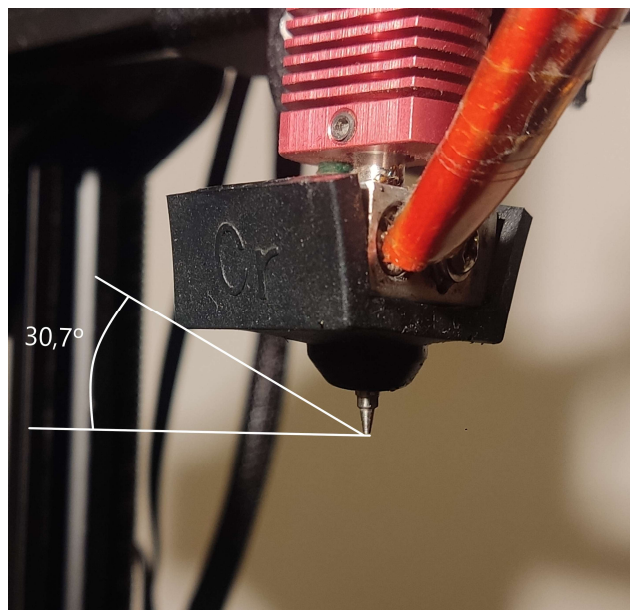


Figura 44 - Ângulo de impressão não planar real.

3.4.1.2. Reposicionamento dos componentes da cabeça de impressão

Realizada a otimização do ângulo de impressão não planar do bloco de aquecimento e do *nozzle*, analisou-se a disposição de todos os componentes. Verificou-se a necessidade de serem reposicionados, na tentativa de aumentar, ainda mais, a zona de impressão não planar.

Foi feito um levantamento da geometria das dimensões e pontos de fixação dos componentes presentes na cabeça de impressão, para que pudessem ser replicados no *software SolidWork®*. Uma vez replicados, foi possível proceder à análise de diversas disposições e assim obter uma solução capaz de ser implementada de uma forma eficaz. Para que houvesse uma maior capacidade de projeção e para que as peças pudessem ser produzidas rapidamente e sem custos muito avultados, foi concedida a possibilidade de produção dos diversos componentes, com recurso a uma impressora SLS e ao material PA12 (SLS).

A solução passou pela descida do dissipador de calor do bloco de aquecimento e do *nozzle*, pela ligeira subida do sistema de refrigeração, e pela atualização da carcaça que albergava todos estes componentes. Dado que o ângulo de impressão não planar estava delimitado anteriormente, os componentes foram colocados de modo que esse ângulo fosse preservado.

Para realizar a descida dos vários componentes, foram analisadas quais as suas fixações ao sistema de movimentação do eixo X. Esta fixação era realizada através do dissipador de calor. Assim, foi projetada uma peça para fixar o dissipador de calor numa posição inferior (Fig. 45). Para que o dissipador de calor fosse fixado nesta peça auxiliar, foram aplicados insertos (Fig. 46).



Figura 45 - Reposicionamento do dissipador de calor.

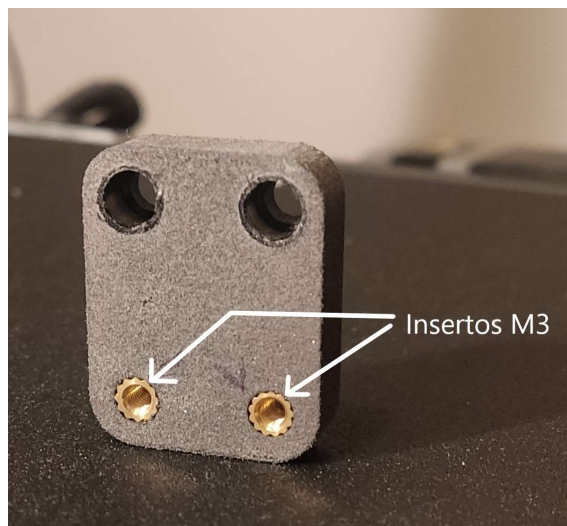


Figura 46 - Aplicação de insertos na nova peça de fixação do dissipador de calor.

Uma vez definida a nova posição do bloco e do *nozzle*, foi analisado o reposicionamento de todo o sistema de refrigeração e, conseqüentemente, o *design* da carcaça da cabeça de impressão. Primeiramente foi analisada a ventoinha de refrigeração do dissipador de calor, que necessitou de descer ligeiramente (Fig. 47). De seguida, foi também efetuada uma ligeira descida da ventoinha de refrigeração do filamento (Fig. 48), no instante de saída pelo orifício de extrusão. No entanto, para que esta ventoinha continuasse a ter eficiência na refrigeração, foi necessário redesenhar a conduta de guiamento do ar (Fig. 49).

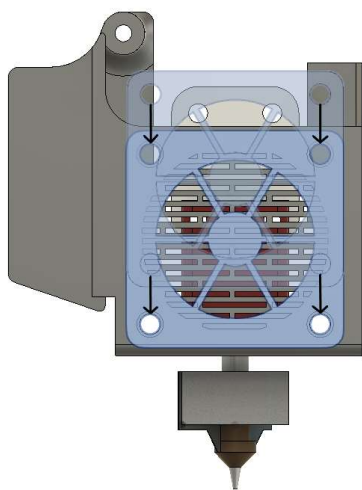


Figura 47 - Reposicionamento da ventoinha de refrigeração do dissipador de calor.

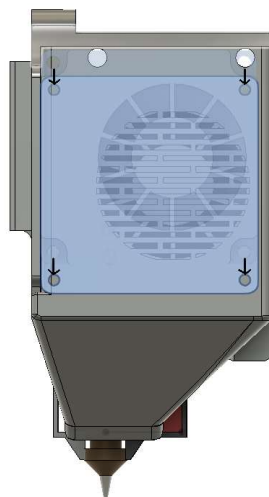


Figura 48 - Reposicionamento da ventoinha de refrigeração do filamento extrudido.

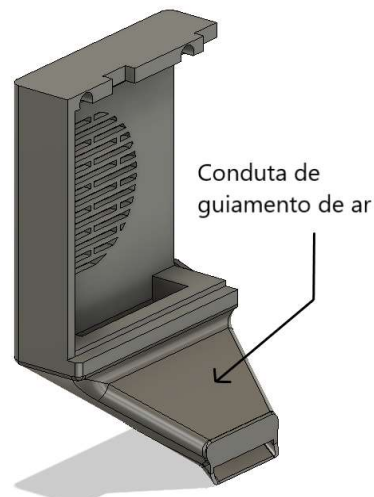


Figura 49 - Conduta de guiamento de ar da ventoinha do filamento extrudido.

Após a definição do novo local de todos os componentes, foi necessário idealizar uma carcaça que os fixasse e que permitisse o seu correto funcionamento (Fig. 50). Partindo dos pontos de fixação da carcaça, tentou-se desenvolver uma solução simples, prática e leve. Após algumas tentativas e experiências, foi obtido um *design* final (Fig. 51 e 52) que, perante a aplicação de todos os componentes, é capaz de realizar impressões não planares até um ângulo de 30°, aproximadamente, e uma altura máxima não planar de 50 mm.

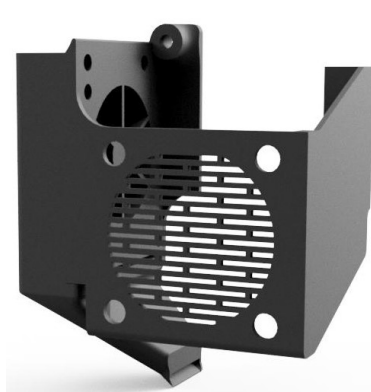


Figura 50 - *Design* da carcaça projetada.

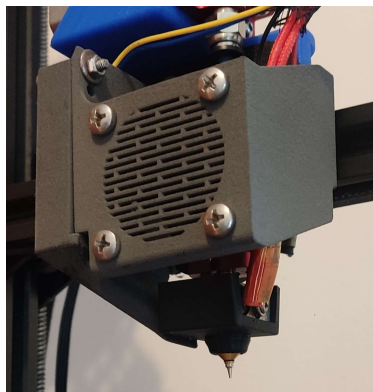


Figura 51 - Vista do lado direito da carcaça fabricada.



Figura 52 - Vista do lado esquerdo da carcaça fabricada.

3.5. Calibração da impressora

Uma vez aplicada a nova cabeça de impressão, é necessário garantir uma boa e correta calibração, para que os objetos sejam impressos sem problemas e defeitos. A calibração da impressora é uma etapa fundamental em qualquer impressora. Esta calibração também serve para determinar alguns dos parâmetros base da cabeça de impressão aplicada.

Foram então selecionados alguns objetos para serem impressos de modo a calibrar a impressora e averiguar quais os melhores parâmetros para uma correta impressão. Para isso, foi estabelecida uma sequência lógica das etapas de calibração, a qual começa pelo correto nivelamento da cama de impressão.

3.5.1. Determinação do multiplicador de extrusão

Várias modificações foram feitas à impressora utilizada e, como tal, foi necessário obter os parâmetros que mais se adequam, para que as peças impressas possam ser fabricadas com uma boa qualidade e com consistência.

Para perceber se o *firmware* da impressora estava em sintonia com o próprio sistema de extrusão, foi avaliado o multiplicador de extrusão. Ou seja, foi verificado se a quantidade de filamento que é mandado extrudir era de facto, a quantidade que estava a ser extrudida pela extrusora.

Neste sentido, foi utilizado um paquímetro para medir 130 mm no curso do filamento, e marcar essa medida com recurso a um marcador (Fig. 53). De seguida, a impressora foi ligada, aquecida e uma vez quente, comandada para extrudir 100 mm de filamento (Fig. 54), para que fosse possível verificar se a quantidade de filamento que estava a ser mandado extrudir era a quantidade real de filamento que estava a ser extrudido.

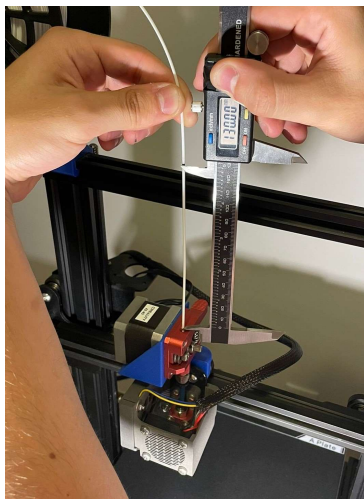


Figura 53 - Marca inicial de referência para determinação do multiplicador de extrusão.

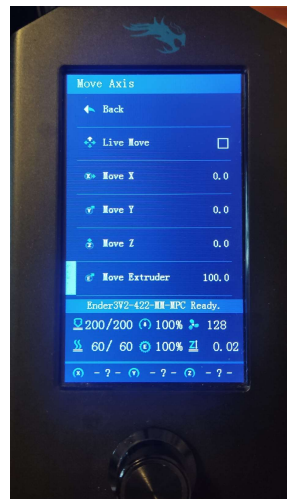


Figura 54 - Ordem de extrusão de 100 mm de filamento.

Verificou-se que o multiplicador de extrusão estava um pouco acima do pretendido, pois foram extrudidos 103,66 mm de filamento (Fig. 55), quando aplicado um multiplicador de extrusão de 1 no *firmware* da impressora. Foi então necessário obter o novo multiplicador de extrusão. Utilizando uma 'regra de três simples', foi calculado o novo multiplicador de extrusão de 0,96 e colocado no *firmware* da impressora (Fig. 56). Posteriormente, através de um segundo teste já com o multiplicador atualizado, observou-se que o curso de filamento extrudido foi de 99.6mm o que valida o multiplicador utilizado.

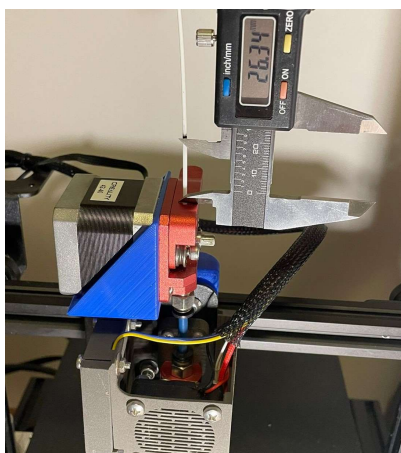


Figura 55 - Posição da marca de referência após o comando para extrudir 100 mm.

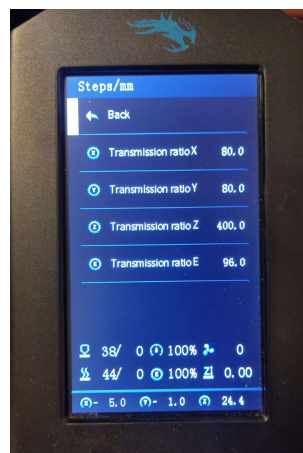


Figura 56 - Atualização do multiplicador de extrusão do *firmware* da impressora.

3.5.2. Nivelamento da cama de impressão

O nivelamento da cama de impressão da impressora *Ender 3 V2* é efetuado através de quatro reguladores manuais de altura, localizados nas quatro extremidades da cama (Fig. 57). Para garantir que toda a cama se encontra à mesma altura, são analisadas estas quatro extremidades.

Com recurso a uma folha de papel, os pontos definidos foram analisados, até todos se encontrarem à mesma altura. Subindo lentamente o regulador da extremidade em análise, e movendo a folha de papel em simultâneo, foi definido, como limite de altura, o momento em que se começa a sentir uma ligeira fricção ao movimentar o papel (Fig. 58).

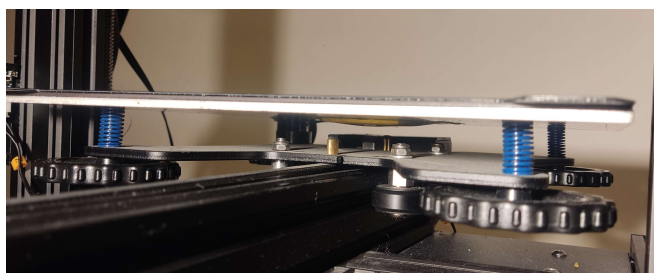


Figura 57 - Roldanas de regulação das extremidades da cama de impressão.

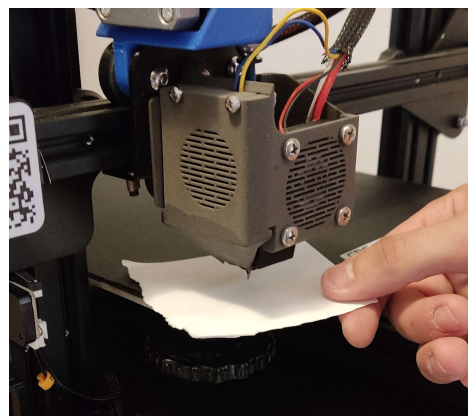


Figura 58 - Processo de regulação manual da cama de impressão.

Uma vez feita a nivelção da cama em relação ao *nozzle*, é efetuada uma análise à cama de impressão. Muitas vezes, a cama de impressão não se encontra completamente plana, devido a empenos, entre outros, havendo ligeiros desvios que podem influenciar a qualidade de impressão. Para ultrapassar este problema, o *firmware* mais recente instalado na impressora, permite realizar uma *mesh* da cama de impressão através da regulação manual de altura de 25 pontos (5x5), distribuídos uniformemente ao longo de toda a cama de impressão (Fig. 59). O objetivo da realização desta *mesh* (Fig. 60) é permitir à impressora realizar a primeira camada sempre à mesma altura da cama de impressão, realizando uma compensação de possíveis irregularidades.

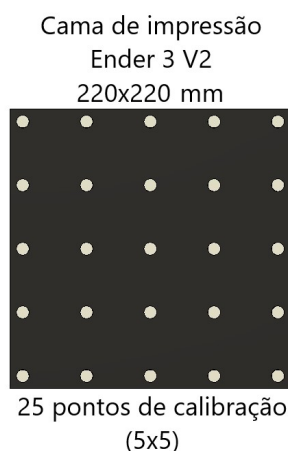


Figura 59 - Pontos de calibração para uma *mesh* com 25 pontos de referência (5x5).

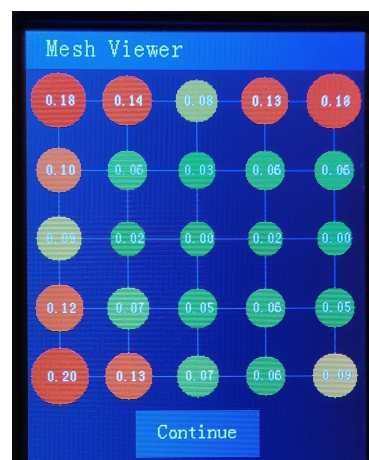


Figura 60 - *Mesh* da mesa de impressão para compensação de irregularidades.

Após verificar que a cama da impressão e a *mesh* da mesma estavam determinadas, foi necessário introduzir um novo comando no *G-CODE* inicial de impressão, para que seja feita a leitura da *mesh* obtida e utilizada durante a impressão (Fig. 61). Posteriormente, foi efetuada uma impressão de teste para garantir que tudo estava a funcionar da melhor maneira. Para tal, foi projetado um teste de calibração da cama de impressão, que permite analisar alguns dos pontos mais importantes. Assim, depois de calibrar a cama de impressão e determinar a respetiva *mesh*, foi feita uma impressão de teste, para verificar a veracidade da calibração efetuada, imprimindo o provete de teste projetado, e sobrepondo-o sobre uma folha de papel branco para que se pudessem ver, com mais exatidão, todos os detalhes da impressão (Fig. 62).


```

; gerado pelo Slic3r 1.3.0-dev em 2023-08-23 às 22:16:06

; largura de extrusão dos perimetros externos = 0.60mm (3.21mm^3/s)
; largura de extrusão dos perimetros = 0.50mm (2.61mm^3/s)
; largura de extrusão do preenchimento = 0.50mm (5.23mm^3/s)
; largura de extrusão do preenchimento das camadas superiores = 0.70mm (5.72mm^3/s)
; largura de extrusão das camadas de superiores = 0.70mm (5.72mm^3/s)

M107
M190 S60 ; definir a temperatura da cama e esperar que atinja essa temperatura
M104 S200 ; definir temperatura
G28 ; zerar todos os eixos
M420 S1 ; importar os valores da mesh da cama
G1 Z5 F5000 ; elevar o bico de impressão

; gcode do filamento

```

Figura 61 - Comando adicional para leitura e importação dos valores da *mesh* da cama de impressão.

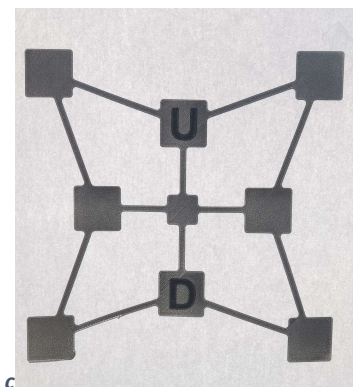


Figura 62 - Verificação da qualidade do provete de calibração da cama de impressão.

3.5.3. Calibração da temperatura de extrusão

Após ter sido verificado que a impressora já reunia condições para iniciar as impressões e a determinação de parâmetros de impressão, foi feito um teste a uma gama de temperaturas de extrusão ao redor da temperatura definida pelo fabricante. Este teste foi importante para determinar qual a temperatura de extrusão mais adequada para as diversas características do equipamento, do seu meio ambiente e do PLA utilizado.

Este teste foi executado utilizando um modelo CAD (Fig. 63) retirado da *internet* [93], capaz de analisar diversas temperaturas de extrusão numa só impressão, desde os 190°C até aos 240°C. Para realizar esta impressão, foi utilizado o programa de fatiamento *UltiMaker Cura*® que, utilizando um *script* de pós-processamento, foi possível comandar a temperatura de extrusão para que a altere consoante as necessidades do objeto a imprimir (Fig. 64).

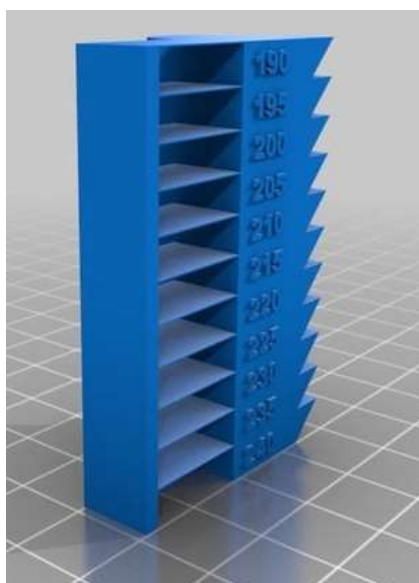


Figura 63 - Modelo CAD da torre de temperaturas [93].

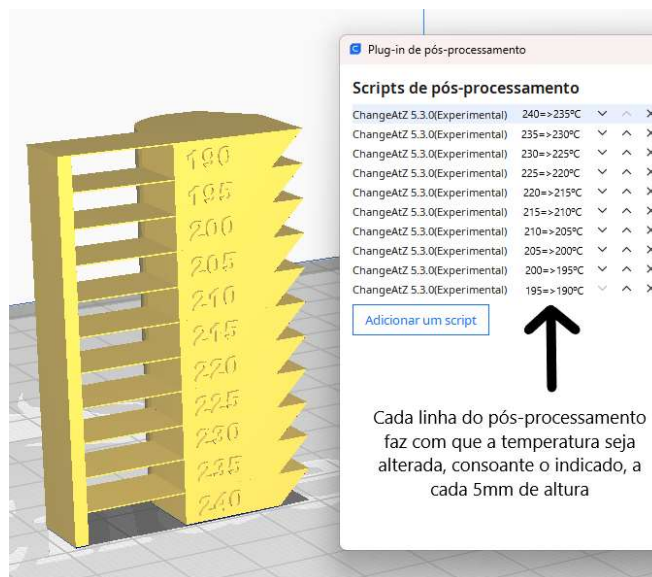


Figura 64 - Pós-processamento aplicado à torre de temperaturas.

Nesta impressão, foi utilizado um perfil de parâmetros padrão para impressões de objetos com altura de camada de 0,3 mm (Tab. 9). Assim, a partir deste ensaio, é possível também analisar como estes parâmetros se adaptam à impressão, e assim modificar aqueles onde se verificar alguma anormalidade ou capacidade de melhoria.

Tabela 9 - Velocidades de impressão para a fabricação da torre de temperaturas.

Velocidades de impressão	
Primeira camada	20 mm/s
Perímetros	30 mm/s
Perímetros pequenos	20 mm/s
Perímetros externos	30 mm/s
Enchimento	40 mm /s
Camadas superiores	30 mm/s
Viagem	100 mm/s
Retração	40 mm/s

No final, o provete de teste foi retirado da cama de impressão e sujeito a uma inspeção visual para apurar quais as melhorias e modificações a fazer. Com base na consistência e qualidade de impressão, concluiu-se que a temperatura com melhores resultados se situava em torno dos 200°C (Fig.65). Desta forma, definiu-se esse valor como a temperatura de extrusão para os ensaios a realizar. Verificou-se ainda a aparição de *stringing* e *blobs* em grande parte das temperaturas.

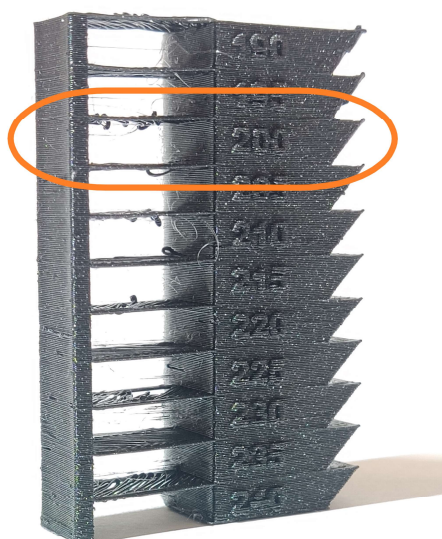


Figura 65 - Torre de temperaturas impressas com indicação das várias temperaturas.

Uma vez que este teste foi realizado utilizando um perfil padrão para a impressora *Ender 3 V2*, que possui um sistema de extrusão por *bowden tube* de origem, é necessário que sejam apurados os parâmetros de extrusão mais adequados para a modificação do sistema para extrusão direta.

3.5.4. Calibração dos parâmetros de retração

Estando já a temperatura de extrusão definida com o valor de 200°C e a cama de impressão nivelada, iniciou-se o processo de determinação dos vários parâmetros de impressão, tomando por base um perfil padrão. Devido às observações efetuadas no ensaio de temperatura, mostrou-se relevante proceder a uma análise aos parâmetros de retração por causa do efeito de *stringing* observado.

São várias as vezes em que a impressora tem de retraindo o filamento durante a impressão de um objeto. Por isso, é importante que a velocidade de retração e a quantidade de filamento retraído estejam bem parametrizadas, para que as impressões possam ser realizadas sem defeitos. Para fazer esta avaliação, foi projetado um provete de teste (Fig. 66), capaz de avaliar o impacto destes dois parâmetros na impressão de um objeto através da retração de filamento no deslocamento entre as duas torres.

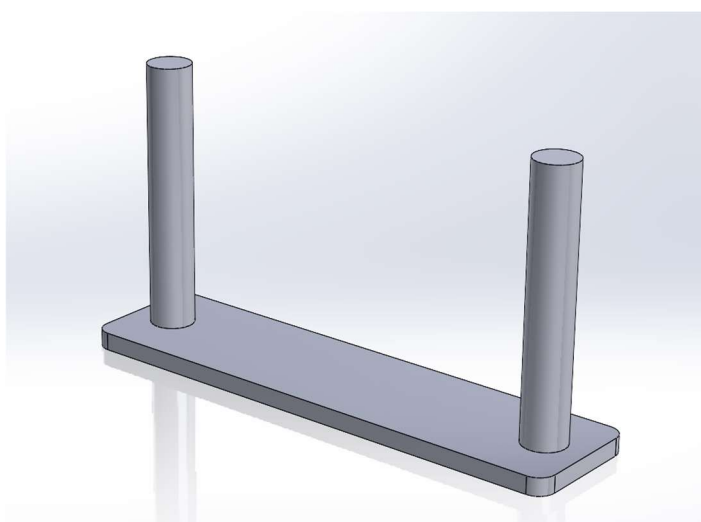
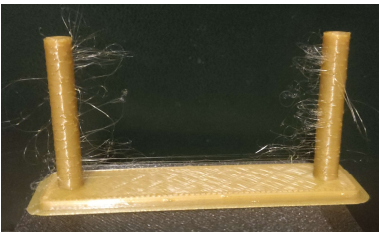
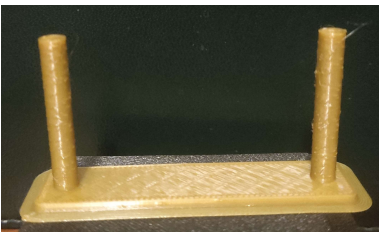


Figura 66 - Provete de análise dos parâmetros de retração.

Tomando por base o perfil padrão de impressão do equipamento Ender 3 S1 Pro [94], impressora do mesmo modelo (Ender 3) com extrusão direta, foram realizados vários ensaios. Entre estes ensaios, foi apenas alterando um parâmetro por impressão, para estudar o verdadeiro efeito da alteração dessa variável na impressão. Este procedimento foi repetido até serem obtidos valores capazes de realizar impressões com uma boa qualidade (Tab. 10).

Tabela 10 - Características de impressão dos provetes para determinação dos parâmetros de retração da impressora.

Velocidade de retração	Filamento retraído	Resultado	Observações
50 mm/s	1 mm		Verificou-se a ocorrência de um <i>stringing</i> um pouco denso e fino, com a aparição de <i>blobs</i> nos locais de início de impressão de perímetros, após deslocamento.

50 mm/s	2 mm		Continuou a verificar-se a existência de <i>stringing</i> , no entanto, menos denso. As <i>blobs</i> continuaram a aparecer, mas com menos relevo.
40 mm/s	1 mm		Analisando o efeito da redução da velocidade, verificou-se uma melhoria no efeito de <i>stringing</i> , apesar de continuar a existir. Quanto às <i>blobs</i> , continuaram semelhantes ao ensaio anterior.
40 mm/s	2 mm		No final, verificou-se que estes parâmetros apresentam um efeito <i>stringing</i> quase inexistente. As <i>blobs</i> persistem, mas com um relevo reduzido.

3.5.5. Ângulo máximo de impressão planar

Sendo um dos objetivos deste trabalho a implementação de impressão não planar para otimização do processo de impressão FDM, foi feito um teste para analisar o ângulo máximo de impressão planar. Visto que a impressão 3D utiliza a sobreposição de camadas para o fabrico de um objeto, é essencial determinar o desfasamento máximo entre camadas, originado pela inclinação da parede. Efetivamente, tem que estar prevista qualquer situação que implique valores acima desse e necessite de outras ferramentas, como por exemplo suportes, para que o objeto possa ser impresso até ao fim sem obstáculos. Com o propósito de estudar este comportamento e quantificar este valor, foi ensaiado um provete (Fig. 67) que possui várias inclinações, desde 10° até 80°. Para além das várias inclinações analisadas, foram também verificadas as diversas inclinações para as alturas de camada de 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3 mm (Fig. 68).

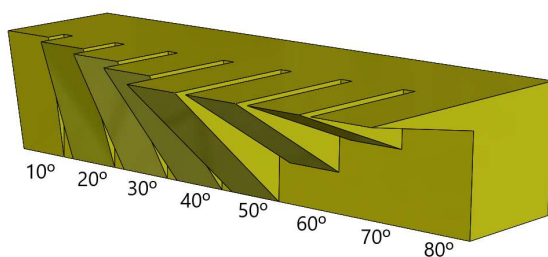


Figura 67 - Provete para determinação do ângulo máximo de impressão.

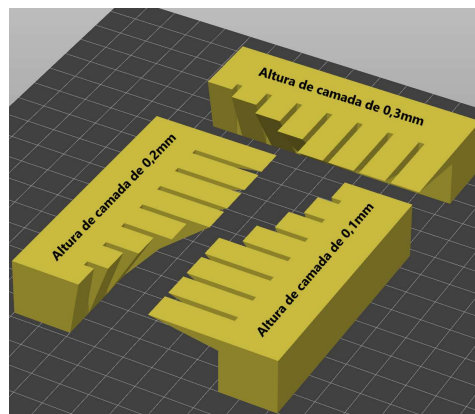
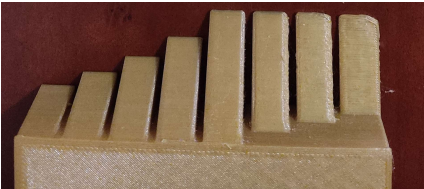
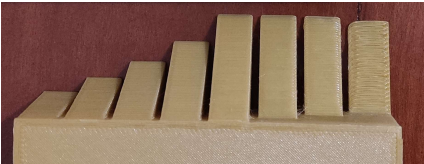
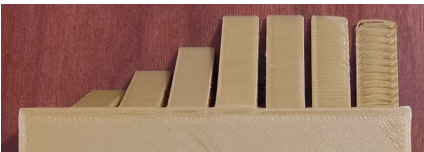


Figura 68 - Distribuição dos provetes, com diversas alturas de camada, na cama da impressão.

A impressão deste provete em várias alturas de camada, permitiu observar o efeito da altura de camada no ângulo máximo de impressão, e assim definir quais os valores limite para o ângulo de impressão. Na Tabela 11, pode-se observar os resultados destes ensaios, bem como as conclusões tiradas sobre cada um deles.

Tabela 11 - Características da impressão dos provetes para determinação do ângulo máximo de impressão.

Altura de camada	Resultado	Observações
0,1 mm		Observando o provete de ensaio, verifica-se que todas as inclinações foram bem impressas, com exceção das inclinações de 70° e 80°, que possui um ligeiro defeito do lado direito da largura dessas rampas. Ângulo máximo de impressão 80°.
0,2 mm		Neste provete, é possível observar que apenas a inclinação de 80° possui alguns defeitos na formação da rampa. Ângulo máximo de impressão 70°.
0,3 mm		À semelhança do provete com altura de camada de 0,2 mm, este provete apenas apresenta defeitos na formação da rampa com 80°. Ângulo máximo de impressão 70°.

3.6. Programa de fatiamento não planar

Uma vez calibrada a impressora para que os objetos a estudar pudessem ser impressos, foi feito um estudo dos diversos programas e metodologias de fatiamento não planar. De modo a encontrar um programa que fosse capaz de reproduzir resultados consistentes e passíveis de serem estudados através do método de impressão não planar, foi feita uma busca dentro de uma vasta gama de programas e códigos de pós-processamento disponíveis, para utilização de impressão não planar.

De entre muitos programas utilizados no mundo da impressão 3D atualmente, o fatiador *Slic3r*® é dos mais antigos e possui um modo de impressão não planar. Este método de fatiamento não planar, consiste em reproduzir camadas não planares com base na camada superior do objeto fateado. Ou seja, o objeto é impresso segundo a metodologia de impressão planar até atingir as camadas superiores, onde começa a reproduzir camadas não planares (Fig. 69).

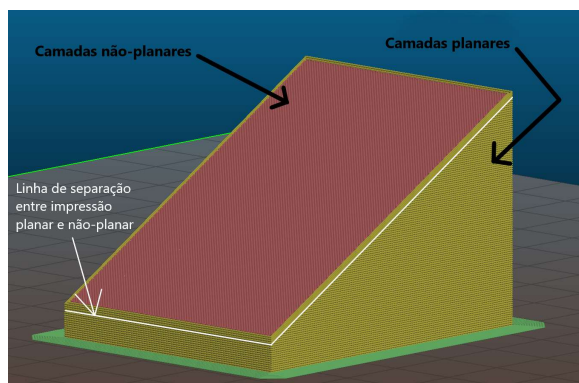


Figura 69 - Metodologia de fatiamento do Slic3r.

Este é um fatiador *open-source* o que permite a modificação do código do programa pelos utilizadores contribuindo para um desenvolvimento comunitário do programa. Considerando os objetivos deste trabalho e as propriedades que se pretende analisar, o fatiador *Slic3r*® foi a opção escolhida para o fatiamento não planar dos objetos a estudar.

3.7. Procedimento experimental

Visando analisar as diversas características e propriedades da técnica de impressão não planar, foram produzidos vários provetes de teste, com recurso a um *nozzle* de 0,4 mm, com a finalidade de estudar e cumprir os objetivos estabelecidos no início deste trabalho.

De forma a procurar uma melhoria para a qualidade superficial das peças produzidas pelo método de impressão planar, foram produzidos provetes de rugosidade e peças práticas que permitissem estudar o efeito da inclinação e da largura de extrusão nas camadas superior dos objetos obtidos através da técnica de impressão não planar.

De seguida, foram produzidos provetes de tração, com o intuito de analisar a influência da geometria interna de impressão, na resistência dos provetes impressos. Estes ensaios foram elaborados com o objetivo de tentar melhorar as propriedades mecânicas das peças impressas e atenuar o efeito da orientação de impressão, segundo o eixo Z.

Para finalizar, foram efetuados ensaios para abordar a possibilidade e a capacidade de, através de uma impressão não planar, serem impressos objetos que, normalmente, teriam de ser impressos com recurso a suportes para sustentar certas geometrias de peças impressas. Para que desta forma, fosse possível analisar a possibilidade de utilização desse espaço, que seria utilizado para a colocação de suportes, para a impressão de outras peças.

Utilizando esta capacidade de impressão de objetos sem recurso a suportes, foram também efetuadas impressões de teste, procurando otimizar a área de impressão. Esta otimização passa por tentar imprimir uma maior quantidade de objetos, na mesma área de impressão, melhorando a capacidade produtiva da impressão de vários objetos em simultâneo.

A produção de todos os objetos impressos foi realizada na cama de impressão magnética, com as duas texturas disponíveis e dentro de uma sala fechada, mantida à temperatura ambiente e sempre com um desumidificador ligado, para tentar garantir um ambiente constante e favorável à conservação das propriedades do filamento e dos objetos fabricados.

3.7.1. Provetes para análise superficial

Para iniciar o estudo da técnica de impressão não planar, foram fabricados provetes simples, para que fosse feita uma análise aos parâmetros mais influentes neste tipo de impressão, bem como o impacto da geometria do objeto no produto final. Para tal, após ser definido um *design* para os provetes a testar, foram fabricados provetes planares e não planares para que, não só fosse realizado um levantamento dos parâmetros de impressão não planares, mas também para que fossem feitas comparações diretas dos resultados obtidos através das duas técnicas de impressão.

Foram então projetados dois tipos de provetes para realizar esta análise, e investigar os vários aspetos envolvidos nesta metodologia de impressão. Os provetes “Inclinação” (Fig. 70) e “Parábola”, (Fig. 71) foram impressos com parâmetros padrão do programa de fatiamento, e pensados para ter uma geometria simples, facilitando assim a análise e o estudo dos parâmetros.

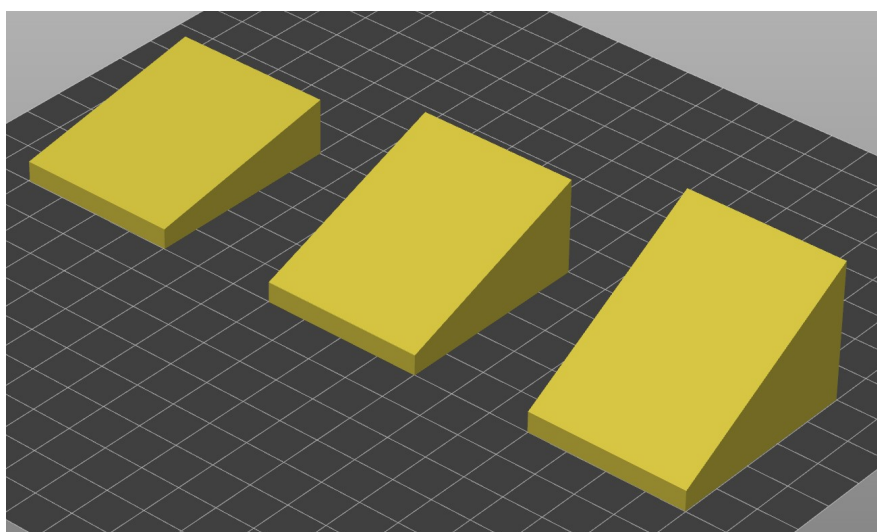


Figura 70 - Provetes "Inclinação" para medição de rugosidades.

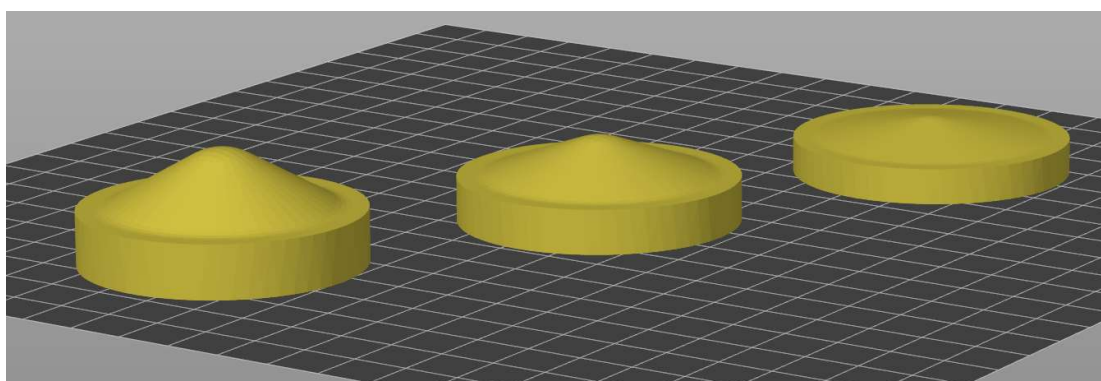


Figura 71 - Provetes "Parábola" para medição de rugosidades.

- Ângulo de impressão não planar - Após a alteração ao *design* da cabeça de impressão, para que esta fosse capaz de imprimir objetos até um ângulo de impressão não planar de 30°, foi importante analisar o desempenho da impressão em toda a gama de inclinações possíveis. Desta forma, foram impressos provetes com diversas inclinações e parâmetros (Tab. 12), de modo a encontrar a melhor combinação.

- Largura de extrusão - Para cada um dos graus de inclinação estudados, foi analisado o impacto da largura de extrusão na qualidade final da superfície dos objetos impressos. Para tal, foram testadas várias larguras de impressão (Tab. 12).
- Qualidade superficial - Visando cumprir com um dos objetivos deste trabalho, foi avaliada a capacidade de implementação da impressão não planar para melhoramento da qualidade superficial dos objetos impressos. Para tal, foram efetuadas medições da rugosidade superficial dos vários provetes planares impressos e comparados com os provetes não planares.
- Efeito do nozzle arrastar ou empurrar o filamento extrudido - Na impressão não planar, o filamento é sempre depositado num plano paralelo ao plano da cama de impressão. Deste modo, ao realizar movimentos que não sejam paralelos a este plano, como, por exemplo, movimentos no plano XZ ou Z, verifica-se que, em certas ocasiões, o filamento foi arrastado ou empurrado pelo *nozzle* (Tab. 12). Para que tal avaliação pudesse ser feita, foram impressos os mesmos provetes, mas com um padrão de camada superior diferente, originando essas ações.

Tabela 12 - Parâmetros de impressão dos provetes impressos.

Inclinação	Largura de extrusão	Padrão da camada superior
10°	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 mm	Retilíneo
20°	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 mm	Retilíneo
30°	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 mm	Retilíneo
10°	0,5 mm	Concêntrico
20°	0,5 mm	Concêntrico
30°	0,5 mm	Concêntrico

Uma vez verificados os melhores resultados obtidos, foi realizado um estudo mais aprofundado sobre os restantes parâmetros utilizados, como por exemplo, a sobreposição do enchimento sólido e dos perímetros, e as diversas velocidades. Com base nos trabalhos de Huang, B. [86] e Micali, M. K. [90]., este estudo foi realizado com o objetivo de determinar quais os parâmetros que oferecem melhor qualidade superficial para as impressões não planares.

Para que fosse feito um estudo mais detalhado às superfícies dos provetes “Inclinação” não planares, foram realizadas medições da rugosidade superficial a cada um dos provetes. Com esse objetivo, foram projetados e fabricados gabaritos de fixação para cada conjunto de provetes, de modo que a face a estudar ficasse paralela à face da base do equipamento. Foram efetuadas três medições ao longo das superfícies dos provetes (Fig. 72), e retirados os valores médios de rugosidade.

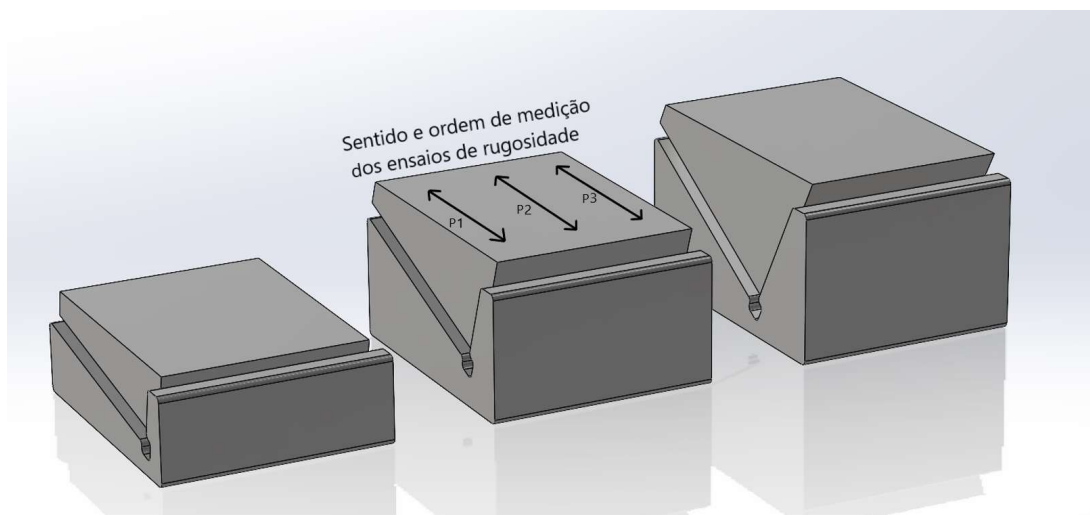


Figura 72 - Gabaritis de fixação de provetes, e sentido e ordem de realização dos ensaios de rugosidade aos provetes.

Dado que o fabrico dos provetes foi realizado através de um processo de impressão 3D, foram obtidas faces providas de alguma rugosidade. Tendo em consideração esta característica, foram considerados os parâmetros da Tabela 13 para a realização dos ensaios.

Tabela 13 - Parâmetros de realização dos ensaios de rugosidade.

Intervalo de medição	400 μ m
Comprimento de ensaio	15 mm
Velocidade	0,5 mm/s
Filtro	ISO 1156(M1)
Cut off (L_c)	2,5 mm

Para que fosse feita uma comparação direta entre as duas técnicas de impressão planar e não planar, foi feito o levantamento das rugosidades das camadas superiores dos provetes “Inclinação”, impressas segundo a técnica não planar, e também da camada superior de um gabari impresso pela técnica planar. Foi também feito o levantamento da rugosidade de uma parede vertical, para que fosse realizado um estudo global das rugosidades presentes nas várias zonas e geometrias impressas (Fig. 73).

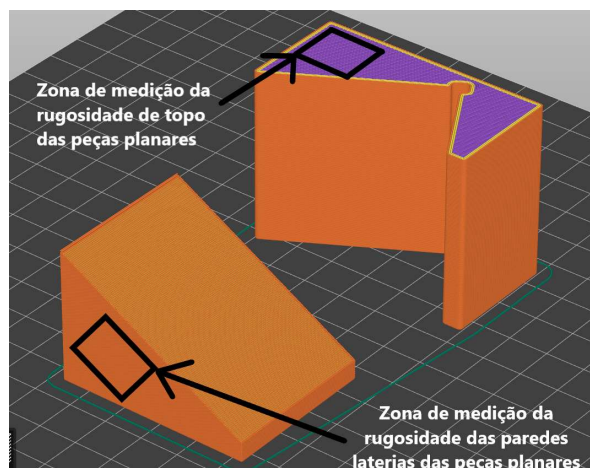


Figura 73 - Locais de obtenção das rugosidades típicas dos provetes impressos segundo o processo de impressão planar.

Esta análise foi efetuada com o intuito de melhorar a qualidade superficial dos objetos impressos através da metodologia de fabrico FDM de três eixos, relativamente aos equipamentos da empresa onde foi realizado este trabalho. Para tal, foi também fabricado um “Suporte de Tubo” (Fig. 74), com o intuito de analisar a possibilidade de implementação da impressão não planar para uso comercial em produtos de uso corrente na indústria.

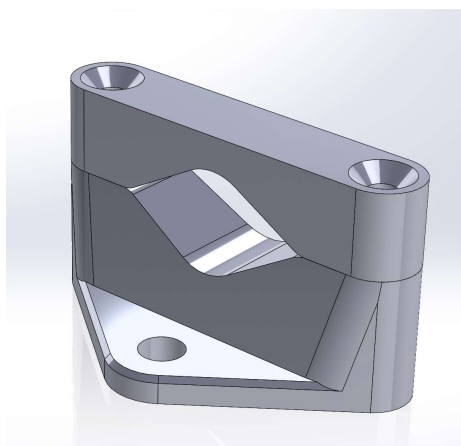


Figura 74 - Exemplo prático da aplicação de impressão 3D não planar ao imprimir um Suporte, para tubos de 20 mm de diâmetro.

3.7.2. Provetes de tração não planares

Tomando em consideração o estudo realizado por Khurana. J. B. [84], que analisou as propriedades mecânicas de provetes impressos, através da técnica de impressão não planar, foram projetados provetes para analisar o efeito da impressão não planar na resistência mecânica e nas propriedades dos provetes impressos.

Para tal, foram analisados dois tipos de provetes, os provetes XY e os provetes Z. Os provetes XY foram pensados para obter as propriedades das peças impressas segundo a orientação dos eixos X e Y (Fig. 75) e os provetes Z foram pensados para analisar as propriedades das peças impressas segundo a orientação do eixo Z (Fig. 65). Foram então impressos provetes com 10°, 20° e 30° segundo a técnica de impressão não planar, e foram fabricados os mesmos provetes segundo a metodologia de impressão planar.

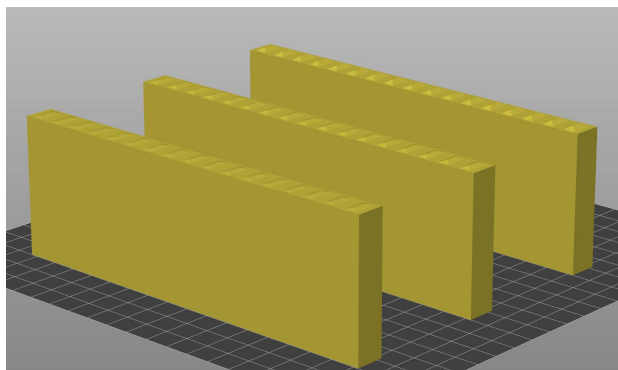


Figura 75 - Bloco de provetes de tração na orientação XY.

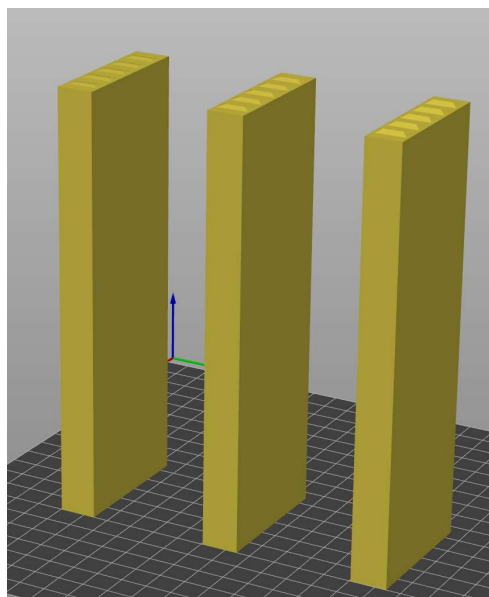


Figura 76 - Bloco de provetes de tração na orientação Z.

Todos estes provetes de teste foram impressos com os parâmetros de impressão da Tab. 14, para que pudesse ser efetuada uma comparação direta entre os vários provetes, sendo que as únicas diferenças são a metodologia de impressão e a geometria das camadas. Desta forma, pretendeu-se analisar o impacto da geometria das camadas impressas na resistência do objeto impresso.

Tabela 14 - Parâmetros de impressão dos provetes de tração.

Parâmetros de impressão não planares	
Ângulo máximo de impressão não planar	30°
Altura máxima de colisão não planar	50 mm
Parâmetros de impressão para os provetes planares e não planares	
Altura de camada	0,3 mm
Perímetros	2
Velocidades	
Perímetros	40 mm/s
Enchimento sólido das camadas superiores	20 mm/s
Primeira camada	20mm/s
Viagem	100 mm/s
Larguras de extrusão	
Primeira camada	0,4 mm
Perímetros	0,4 mm
Enchimento sólido das camadas superiores	0,5 mm

Dada a metodologia de funcionamento do programa de fatiamento, que executa uma replicação da superfície superior, os provetes XY e Z foram impressos apenas com recurso a camadas superiores. Para isso, foi analisado o provete com maiores dimensões em altura, provetes Z com 165 mm, e divididos pela altura de camada para obter o número de camada superiores necessárias para o seu fabrico. Definiu-se então um valor de 600 camadas superiores, para que todos os provetes fossem impressos apenas com camadas superiores, ficando com 100% de preenchimento.

Com o objetivo de facilitar a impressão dos provetes, estes foram impressos em grupos de cinco unidades, através de blocos com $60 \times 12 \times 165 \text{ mm}^3$, sendo posteriormente seccionados com recurso a uma esquadrejadora, em cinco provetes de teste. Os blocos foram seccionados em locais específicos, para que os provetes finais possuissem a geometria interna das Fig. 77 e Fig. 78. Nestas figuras estão representadas, com a cor azul, as linhas de fatiamento de cada camada não planar executada, de modo que, o provete possua uma geometria interna não planar. Os ensaios realizados serão efetuados para verificar o impacto desta geometria interna da resistência dos provetes impressos e comparar com os provetes planares.

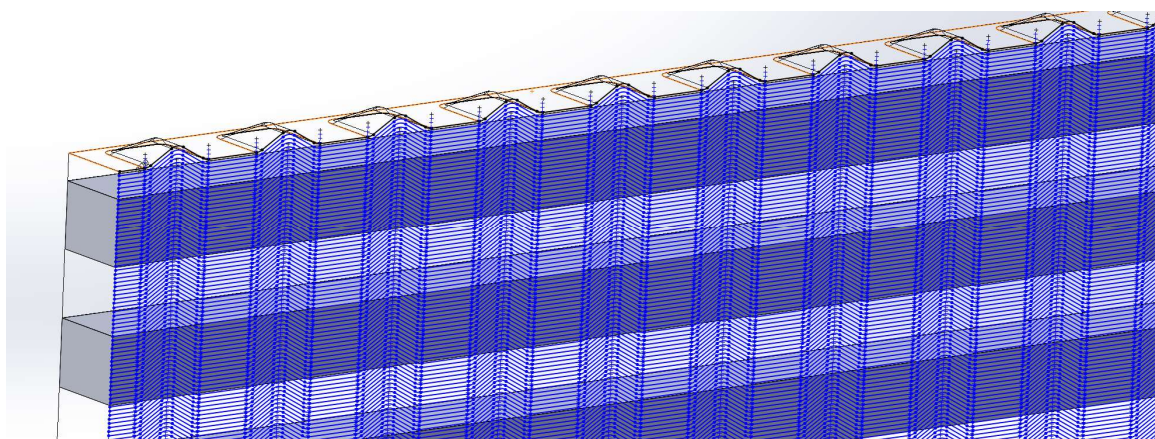


Figura 77 - Geometria central das camadas dos provetes XY.

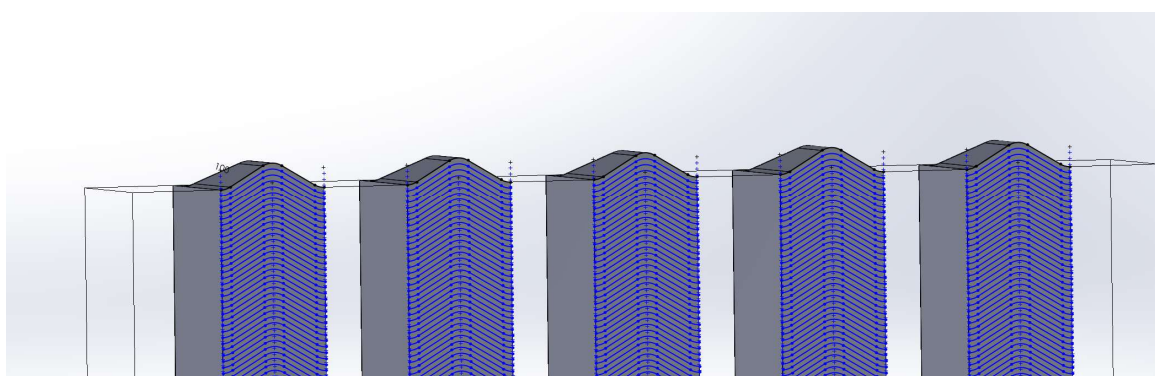


Figura 78 - Geometria central das camadas dos provetes Z.

Para garantir uma maior homogeneidade dos vários provetes, foram passadas várias lixas, G 150 e G 320, com diferentes granulometrias, nas suas superfícies superiores e, de seguida, foram retificadas as arestas dos provetes, com recurso a uma lâmina. Concluído este pós-processamento, foram obtidos 40 provetes de teste (Fig. 79), com $12 \times 5 \times 160 \text{ mm}^3$, que foram utilizados para a realização de ensaios de tração.

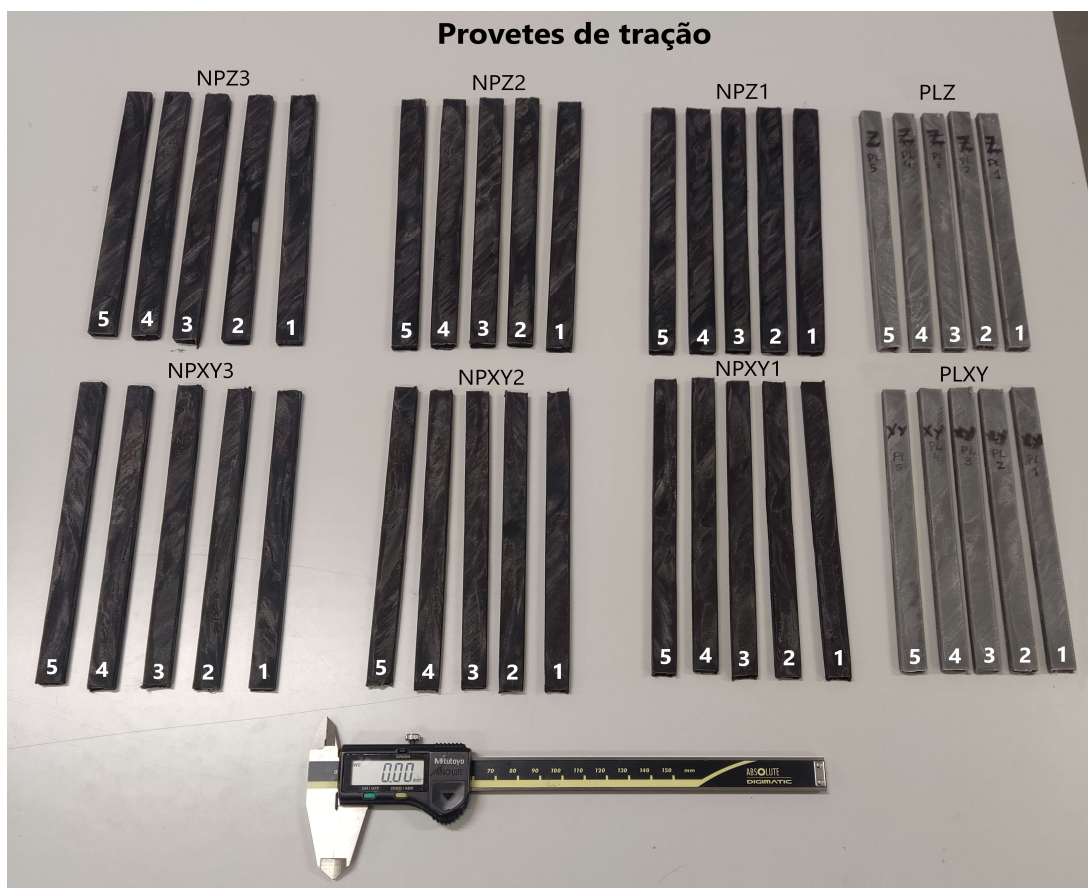


Figura 79 - Imagem de todos os provetes de tração fabricados, com as respetivas designações.

Antes de serem ensaiados, foi atribuída uma designação a cada provete, registada numa das faces dos provetes, e foi realizada uma medição da largura e da espessura dos mesmos, em três zonas de medição ao longo do seu comprimento (Fig. 80). Esta medição foi feita com recurso a um paquímetro digital.

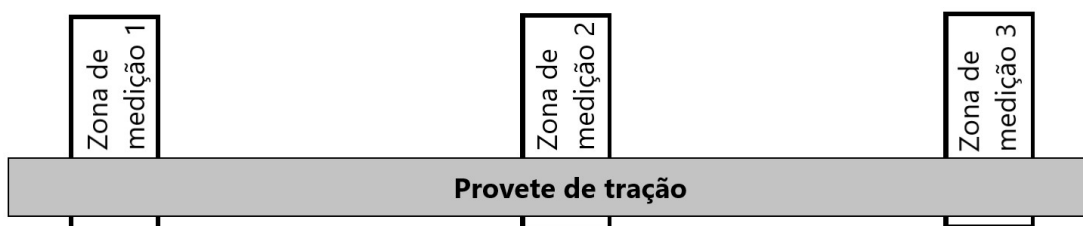


Figura 80 - Especificação das zonas de medição da largura e da espessura dos provetes de tração.

Os valores obtidos nestas medições foram tabelados e posteriormente utilizados para fazer uma análise de diversos parâmetros associados aos ensaios realizados, como, por exemplo, a tensão máxima, o módulo de elasticidade, ou então o local de rotura de cada provete testado.

3.7.3. Otimização do ângulo máximo de impressão

Geralmente, no processo de impressão planar, existe a necessidade de recorrer a suportes para a sustentação de certas geometrias de peças. Na Figura 81 podemos observar um objeto que necessita da aplicação de suportes para que possa ser impresso corretamente (linhas representadas com a cor verde), utilizando a técnica de impressão planar. Uma vez finalizada a impressão do objeto, os suportes são removidos, sendo que todo esse material é descartado, verificando-se um elevado desperdício de material e de volume de impressão.

Dado que o ângulo máximo de impressão planar é cerca de 70° , valor retirado dos provetes de calibração do ângulo máximo de impressão, tudo o que tenha de ser impresso acima desse valor, necessita da aplicação de suportes, para que as peças possam ser impressas corretamente e na sua totalidade. De salientar também que as faces de contacto do objeto impresso com suporte, normalmente possuem uma qualidade superficial bastante inferior às restantes superfícies.

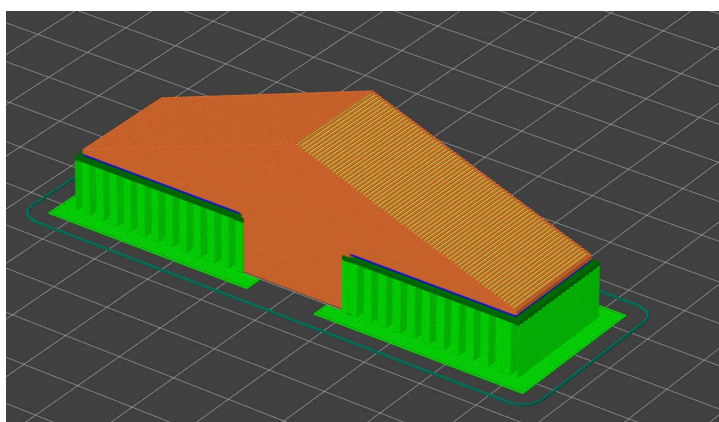


Figura 81 - Exemplo de um objeto que necessita da aplicação de suportes.

Com o intuito de superar esta limitação e encontrar uma solução, foram fabricados provetes “Inclinação Não planar” (Fig. 82) para que, através do método de impressão não planar, pudesse ser estudada a possibilidade de aumentar o ângulo máximo de impressão, e assim poupar o material que iria ser utilizado na criação de suportes.

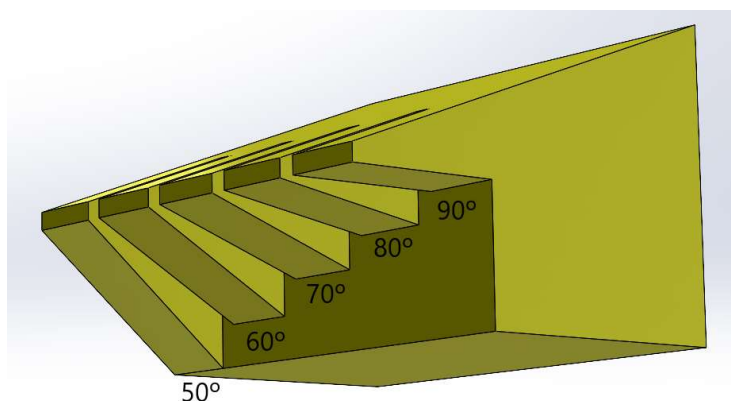


Figura 82 - Proвете de avaliação da possibilidade de aumento do ângulo de impressão.

O levantamento dos parâmetros de impressão deste provete foi feito com recurso ao fatiador *Slic3r*®, que permitiu analisar as várias sobreposições de camadas, de modo que o material impresso pudesse ficar agregado com a peça impressa (Fig. 83 e Fig. 84). Desta forma, foi definido que os parâmetros de impressão deste provete seriam valores expressos na Tabela 15.

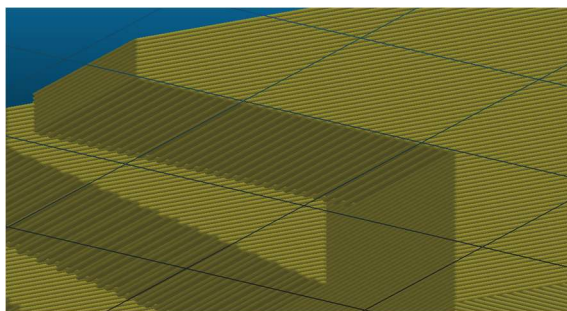


Figura 83 - Distribuição das camadas para uma largura de extrusão dos perímetros exteriores de 0,4 mm.

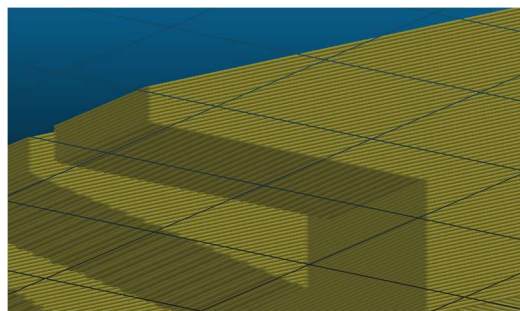


Figura 84 - Distribuição das camadas para uma largura de extrusão dos perímetros exteriores de 0,6 mm.

Tabela 15 - Parâmetros de impressão do provete “Inclinação não planar”.

Parâmetros de impressão do provete “Inclinação não planar”	
Altura de camada	0,2 mm
Ângulo de impressão não planar	20°
Largura de extrusão dos perímetros externos	0,6 mm
Perímetros	3
Camadas superiores	115
Velocidades	
Perímetros externos	10 mm/s
Perímetros internos	20 mm/s

Verificando-se que existe a possibilidade de imprimir faces paralelas à cama de impressão, foram impressos “Provete em T” (Fig. 85), para que fossem analisadas mais algumas características e parâmetros da impressão não planar, como o comprimento máximo de impressão sem suportes. Este provete possui as faces superiores inclinadas, para que o programa de fatiamento possa reconhecer a face segundo a qual deve fatiar o objeto em questão (Fig. 86).

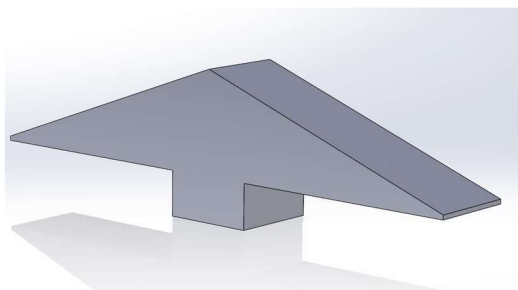


Figura 85 - Provete de análise do comprimento máximo de impressão a 90° sem recurso a suportes (para uma base de 20 x 20 mm²).

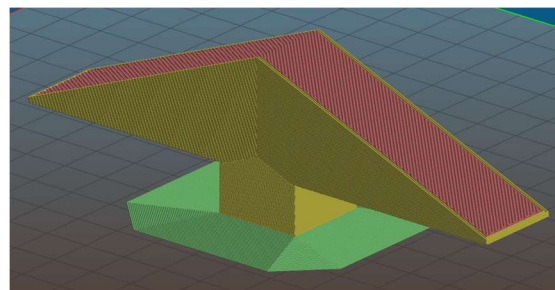


Figura 86 - Fatiamento não planar do provete da figura 82.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise Superficial

4.2 Ensaaios de Tração

4.3 Otimização do ângulo máximo de impressão

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Após o fabrico de todas as peças e provetes, foram feitos vários ensaios e medições aos mesmos, sendo que neste capítulo, são apresentadas as características mais importantes desses ensaios. Toda a informação referente aos provetes e resultados obtidos nos diversos ensaios, pode ser encontrada nos anexos deste trabalho. Desta forma, será apenas apresentada a informação mais relevante para as diversas análises.

4.1. Análise superficial

Através dos vários provetes impressos, foi possível observar o efeito da inclinação de impressão da largura de camada e do sentido de impressão na qualidade superficial das peças impressas. Em todas as peças impressas, estes dois parâmetros foram os únicos que variaram, para que fosse possível fazer uma correta comparação direta dos resultados obtidos. Os provetes foram impressos em grupos de três unidades, consoante as várias inclinações e o tipo de provete.

4.1.1. Provetes “Inclinação”

Estes provetes foram realizados para analisar a metodologia de impressão não planar através do fabrico de faces planas que não estejam no plano XY (Fig. 87), como na impressão planar. Ao longo dos ensaios realizados, foi verificado que quando é utilizada uma baixa largura de extrusão (inferior a 0,5 mm), as faces impressas possuem uma espécie de saliências (Fig. 88). Quando é utilizada uma elevada largura de extrusão, dá-se a formação de espaços vazios entre caminhos de material extrudido (superior a 0,6 mm) (Fig. 89).

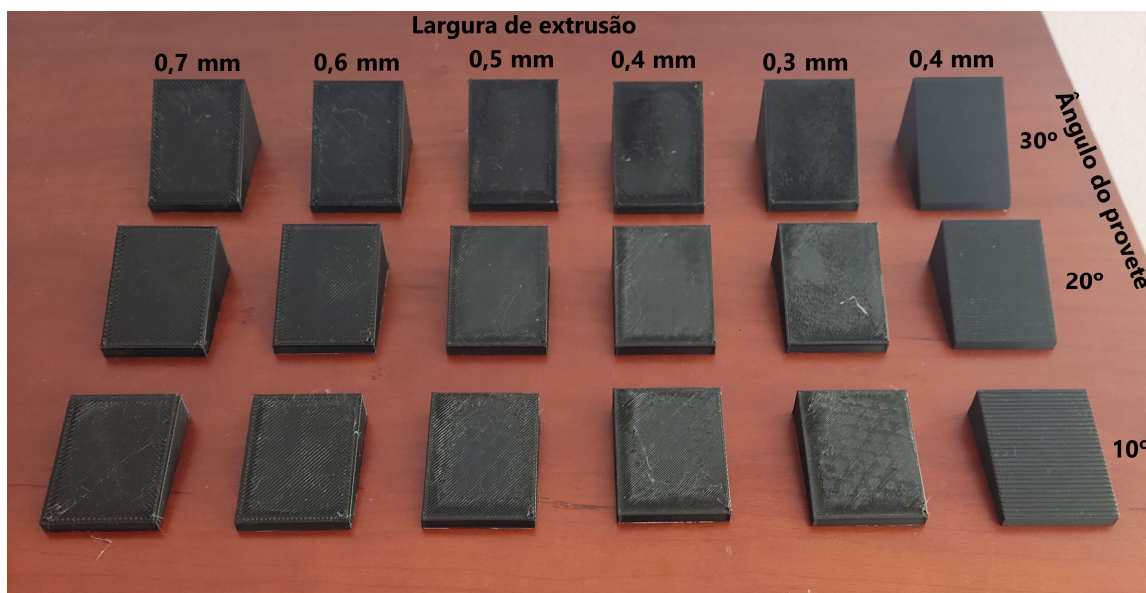


Figura 87 - Provetes "Inclinação" com as respetivas especificações.



Figura 88 - Provete "Inclinação" com 30° de inclinação e 0,3 mm de largura de extrusão.



Figura 89 - Provete "Inclinação" com 20° de inclinação e 0,7 mm de largura de extrusão.

Uma vez feito o estudo do impacto das diversas larguras de extrusão nas várias inclinações, foi efetuado um estudo ao efeito da deposição de material nas subidas e descidas. Para tal, foram impressos os provetes "Inclinação" com uma camada superior, com um padrão concêntrico (Fig. 90).



Figura 90 - Provetes "Inclinação" impressos com padrão concêntrico.

Nestes provetes, foi possível observar o impacto destes movimentos na qualidade superficial da peça impressa. Do lado esquerdo de cada provete, encontra-se a zona de subida do *nozzle*, podendo ser visualizada uma zona bem impressa com caminhos de extrusão normais. Por sua vez, no lado direito, lado em que o *nozzle* desce (causando um efeito de arrasto do material), verificou-se que ao longo da descida ocorre uma acumulação de material.

4.1.2. Provete "Parábola"

Com o intuito de analisar as características da impressão não planar em geometrias não planares, foram projetados e impressos os provetes "Parábola" (Fig. 91), para a mesma gama de inclinações de provete e larguras de extrusão dos provetes "Inclinação". Estes provetes foram impressos com os mesmos parâmetros de impressão que os provetes "Inclinação".



Figura 91 - Provetes "Parábola" com as respectivas especificações.

Através destes provetes, constatou-se que a ordem pela qual o filamento é extrudido tem muito impacto na qualidade superficial da peça (Fig. 92), verificando-se que, enquanto o *nozzle* realiza o movimento ascendente, os provetes possuem uma boa superfície. No entanto, quando inicia o movimento descendente, começam a desenvolver-se defeitos na superfície do provete.



Figura 92 - Sentido de impressão durante a impressão da camada sólida superior.

Esta consequência do sentido de impressão é visível em todos os provetes e o seu efeito manifesta-se de diversas formas, consoante a largura de extrusão e inclinação do provete. À medida que vamos aumentando a largura de extrusão, vai diminuindo este efeito.

É também de notar que, apesar dos provetes com largura de extrusão mais baixa possuírem os defeitos previamente relatados no sentido descendente, são os provetes que apresentam melhores acabamentos no sentido ascendente. Verificou-se ainda que, à medida que é aumentada a largura de extrusão, ocorre o aparecimento de vazios entre os caminhos de extrusão.

4.1.3. Otimização dos provetes “Inclinação”

Com o intuito de otimizar os parâmetros de impressão das camadas superficiais para melhoramento da qualidade superficial das peças impressas, foram impressos diversos provetes “Inclinação” (com as várias inclinações) com variação de outros tipos de parâmetros de impressão, como por exemplo, velocidade, multiplicador de extrusão, entre outros. Visto que foram obtidos piores resultados no sentido de construção descendente, a análise incidiu sobre a impressão dos provetes neste sentido.

Após análise dos vários provetes impressos, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos para o intervalo de larguras de extrusão entre 0,4 mm e 0,6 mm. De modo a otimizar os restantes parâmetros envolventes na impressão não planar dos diversos provetes, foi feito um estudo mais aprofundado para as larguras de camada desse intervalo, considerando uma altura de camada de 0,3 mm, para que pudessem ser analisadas todas as inclinações.

Uma vez finalizada esta etapa, todos os provetes foram fotografados e analisados visualmente. Foram descritas as características de cada um, e referidos os aspetos mais importantes de cada parametrização. De todos os ensaios realizados, podemos salientar os provetes das Fig. 93 a Fig. 96, que apresentaram bons resultados em comparação com os restantes provetes impressos.

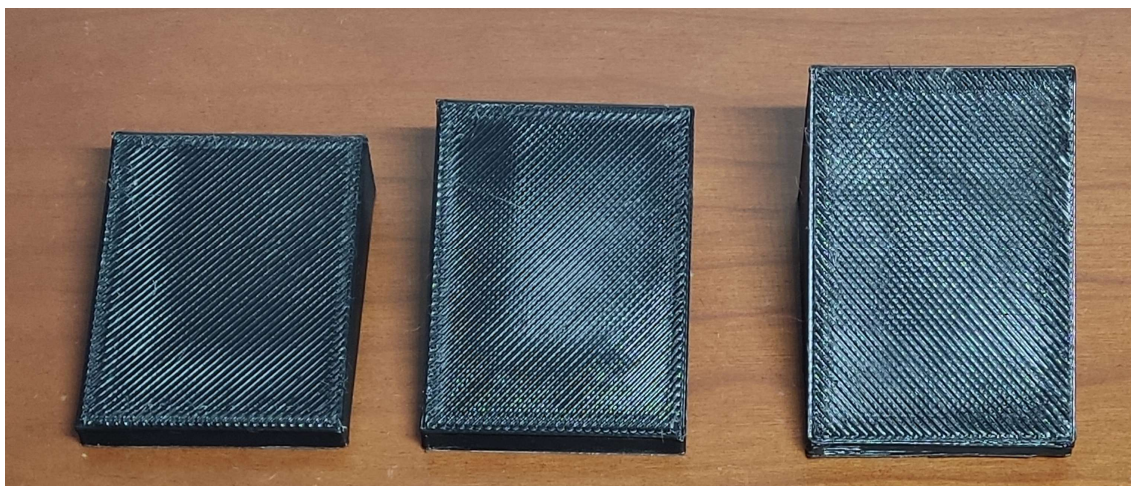


Figura 93 - Vista de topo dos provetes do teste 1.



Figura 94 - Vista de topo dos provetes do teste 3.

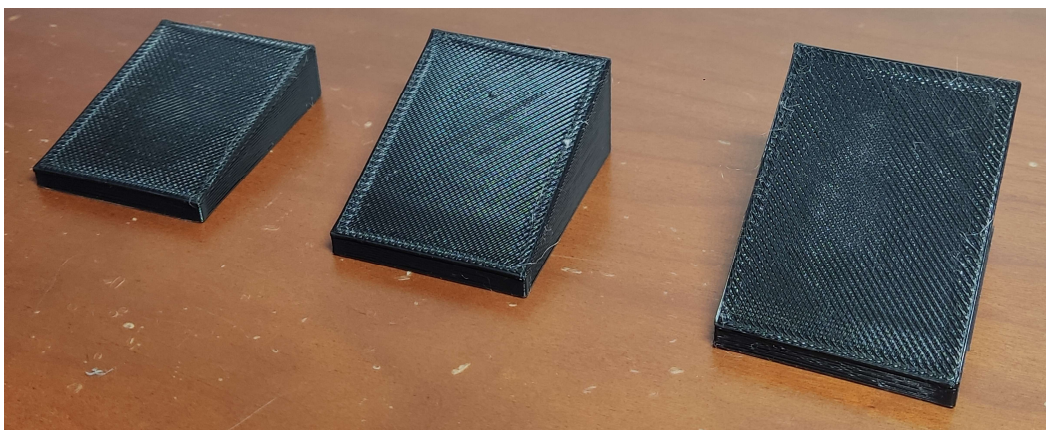


Figura 95 - Provets "Inclinação" do teste número 5.

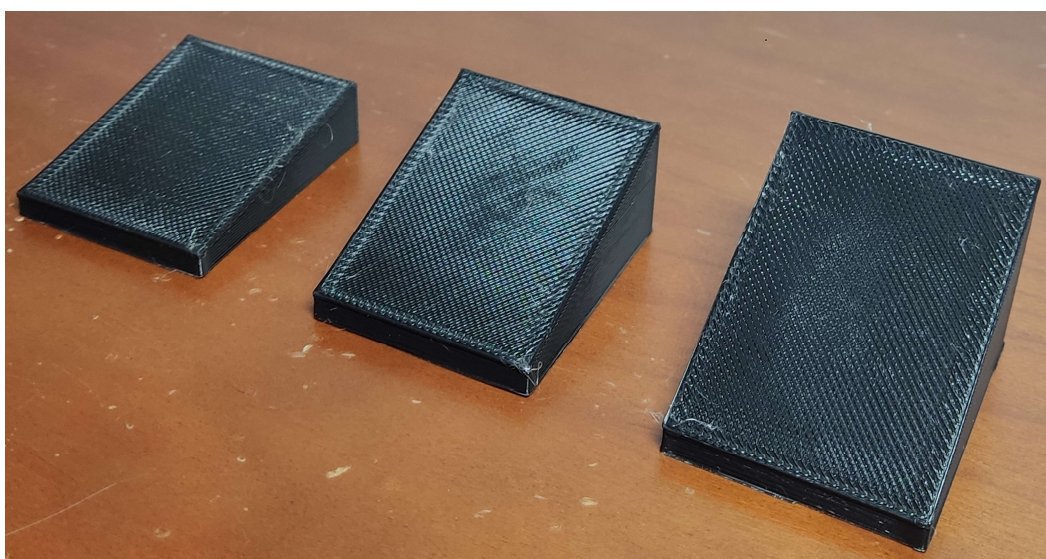


Figura 96 - Provets "Inclinação" do teste número 6.

4.1.4. Ensaios de Rugosidade

Uma vez efetuada uma análise visual e feito o levantamento das características mais importantes de todos os provetes "Inclinação" impressos, foram realizados diversos ensaios de rugosidade às superfícies superiores, com o intuito de fazer uma análise mais aprofundada sobre a qualidade superficial das faces impressas.

Após a realização dos ensaios de rugosidade, todos os resultados foram colocados sobre a forma de tabela e gráficos dos perfis de rugosidade, no sentido de possibilitar uma melhor análise e comparação de resultados. Foi também feito o cálculo das rugosidades médias (R_a) e da altura total (R_t) através dos três perfis de rugosidade R , retirados de cada provete. Para uma correta validação dos valores obtidos, foi calculado também o desvio padrão relativo (DPR) de cada média.

Visto que todos os resultados dos ensaios de rugosidade podem ser encontrados nos anexos, podemos visualizar na Fig. 97 e na Tabela 16, um exemplo de como os dados estão formatados e apresentados.

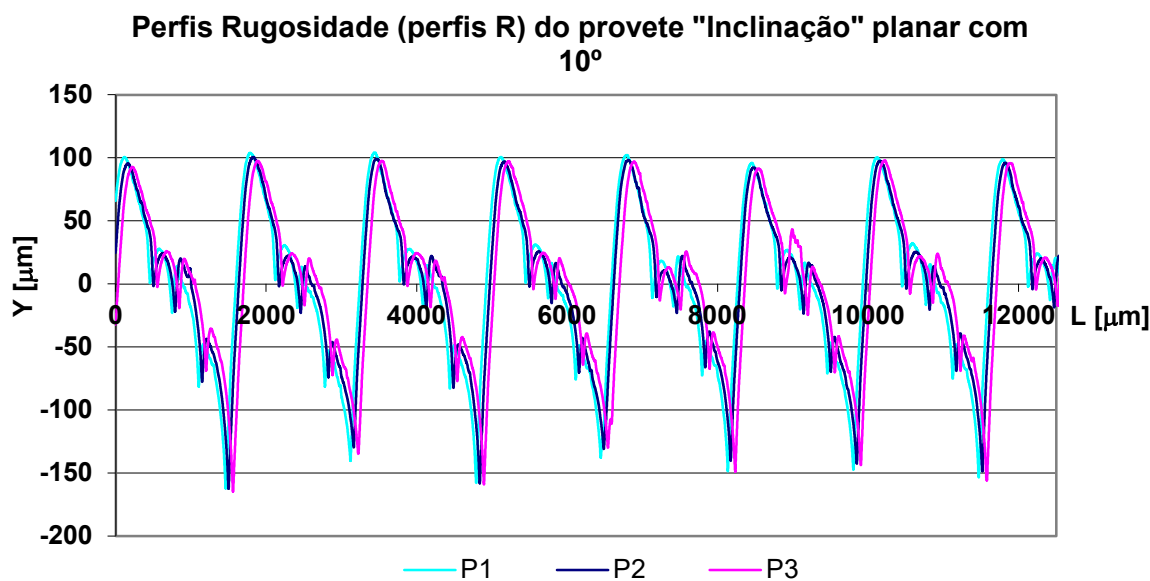


Figura 97 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.

Tabela 16 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 10°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_Planar_10°	49,68	2,63	294,43	0,90
P2_Planar_10°	46,95		290,08	
P3_Planar_10°	46,75		286,98	
Planar_10°	47,79	2,63	290,50	0,90

Através dos ensaios realizados às superfícies laterais e superiores impressas segundo a técnica de impressão planar, foi possível averiguar alguma rugosidade presente numa peça de impressão planar (Fig. 98).

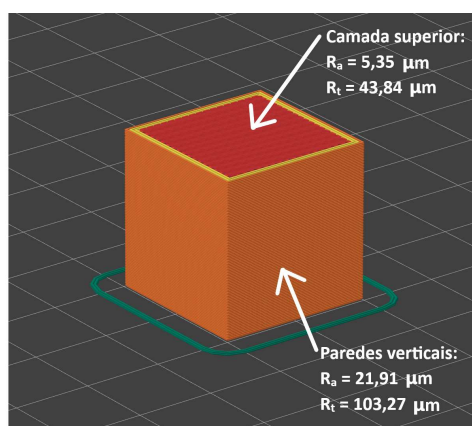


Figura 98 – Exemplificação dos valores de rugosidade obtidos para zonas comuns em peças de impressão planar.

Uma vez formatados todos os dados referentes aos ensaios de rugosidade, procedeu-se a uma análise dos mesmos. Para que fosse possível fazer uma análise mais intuitiva, foram esboçados vários gráficos para possibilitar uma comparação direta entre os resultados dos ensaios realizados. Em primeiro lugar, foram esboçados os gráficos de rugosidade média e de altura total dos provetes planares, para uma posterior comparação (Fig. 99 e Fig. 100).

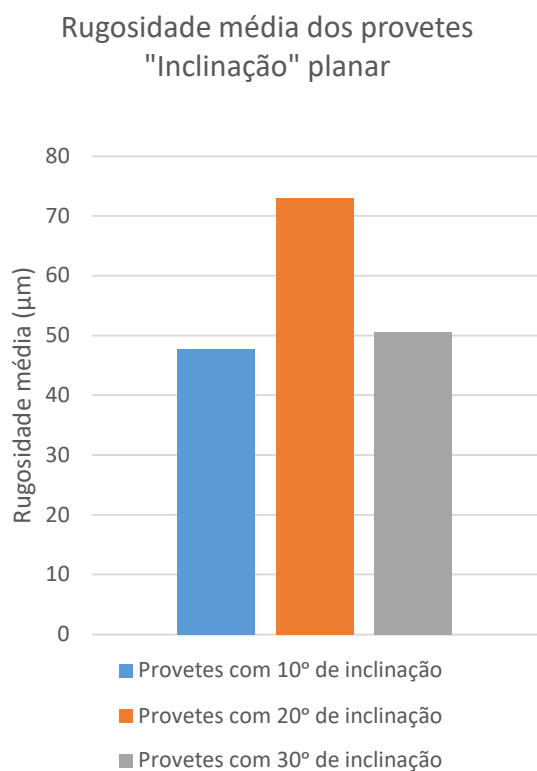


Figura 99 - Gráfico da rugosidade média dos provetes "Inclinação" planares.

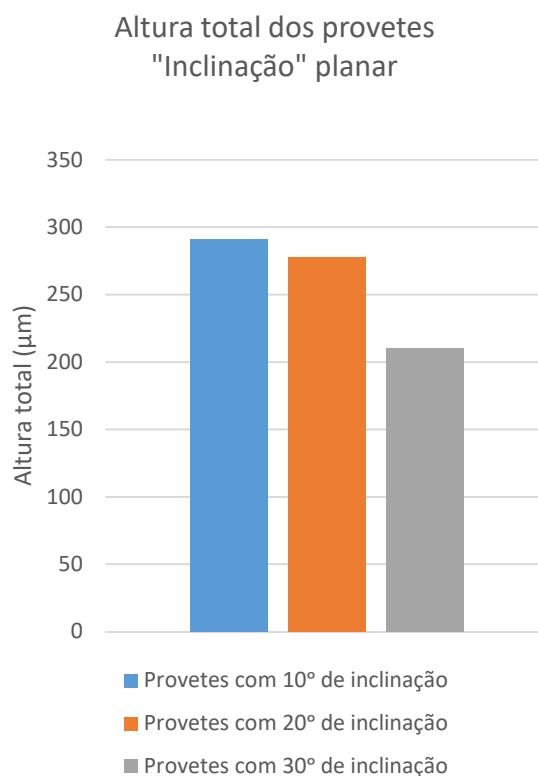


Figura 100 - Gráfico da altura total dos provetes "Inclinação" planares.

De seguida, foram elaborados os gráficos rugosidade média (Fig. 101) e de altura total (Fig. 102) dos provetes "Inclinação" não planares com várias larguras de extrusão, sendo possível observar que os provetes com maior rugosidade foram os provetes impressos com uma largura de extrusão de 0,5 e 0,6 mm. Verificou-se que, geralmente, à medida que o ângulo de inclinação aumenta, a rugosidade média e a altura total também aumentam.

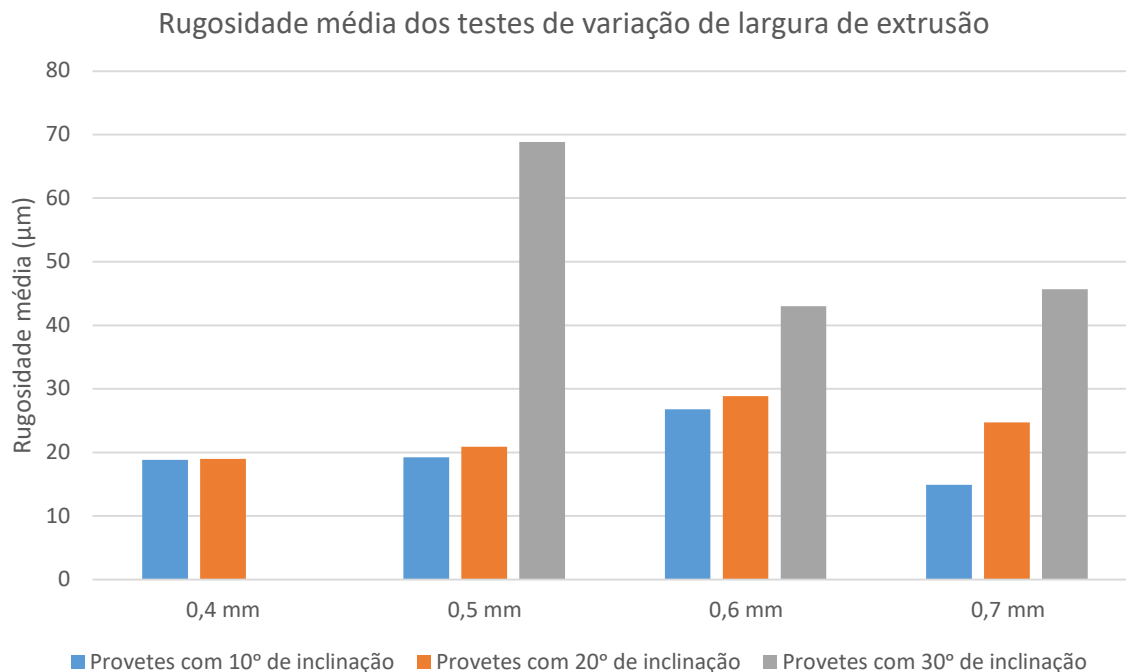


Figura 101 - Gráfico da rugosidade média dos testes de variação de largura de extrusão.

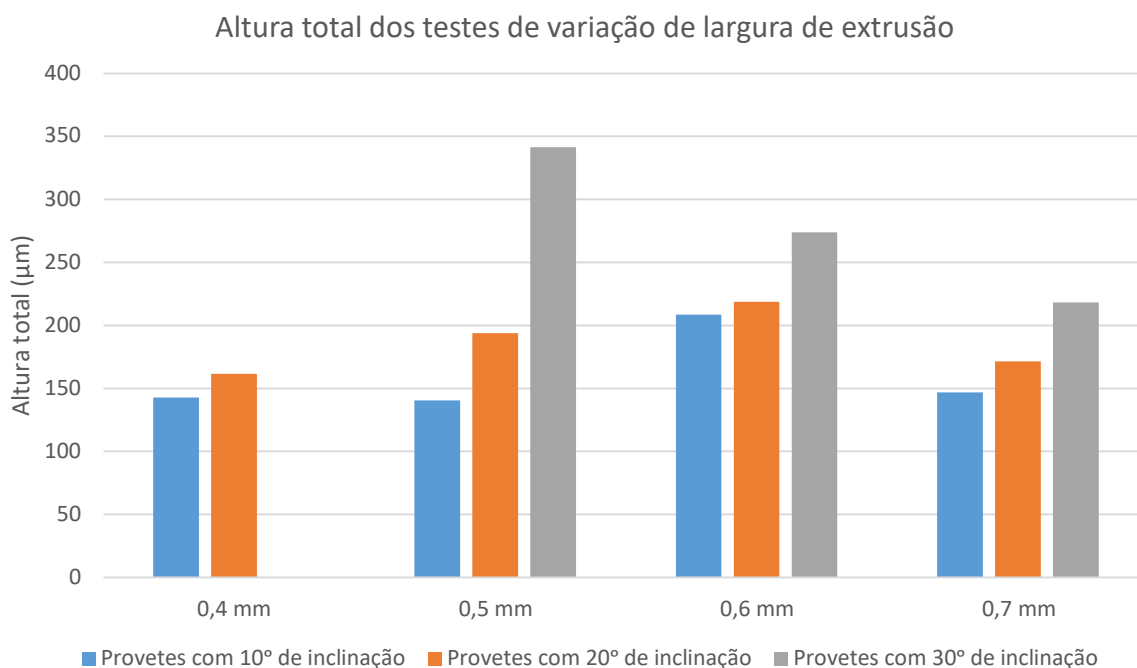


Figura 102 - Gráfico da altura máxima dos testes de variação de largura de extrusão.

Após a elaboração dos gráficos referentes aos ensaios de rugosidade dos provetes planares, foi elaborado o mesmo tipo de gráficos para os testes do número 1 ao 8. Esses dados podem ser encontrados nos gráficos das Fig. 103 e Fig. 104.

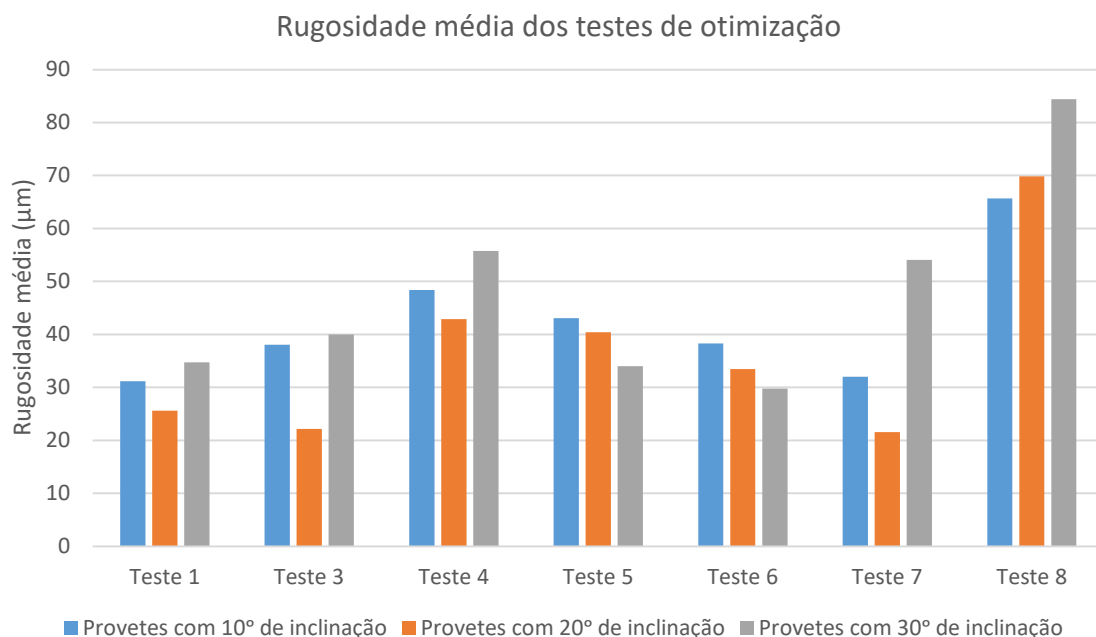


Figura 103 - Gráfico representativo dos valores das rugosidades médias obtidas nos provetes de otimização.

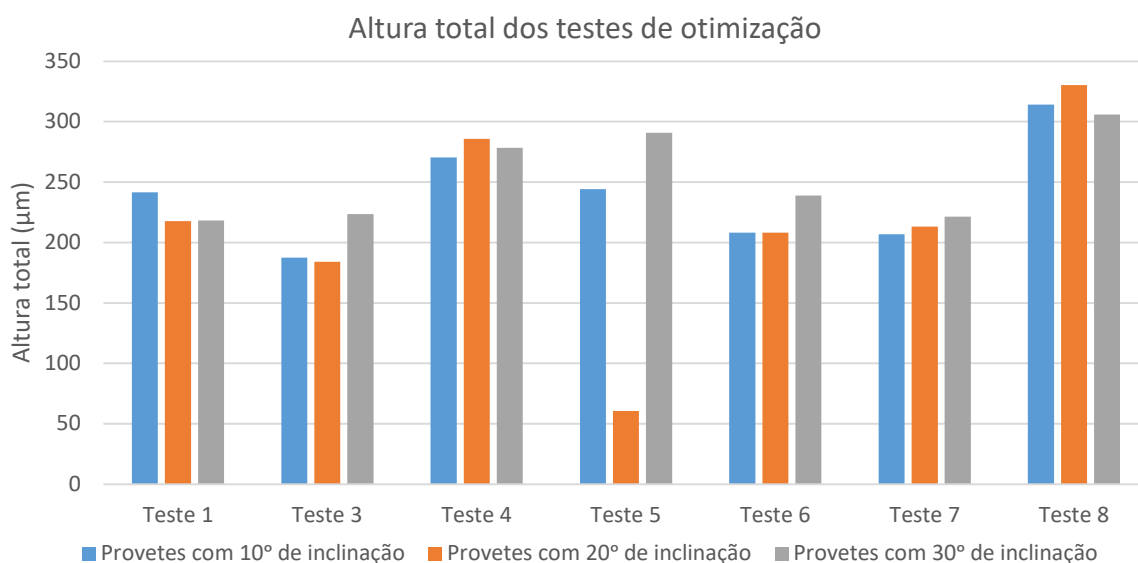


Figura 104 - Gráfico representativo dos valores das alturas totais obtidas nos provetes de otimização.

Nestes ensaios, pode-se verificar que o teste com os valores de rugosidade mais baixos foram os resultados dos testes número 1, 3, 4 e 5. Pode-se ainda verificar que não existe nenhum teste que apresente predominância, em comparação com os restantes. Observa-se que para a inclinação de 10°, o valor de rugosidade média mais baixo é do teste número 1, para uma inclinação de 20° foi o teste número 7, e para uma inclinação de 30° foi o teste número 6.

4.1.5. Aplicação prática

Uma vez que este estudo foi dirigido com o intuito de melhorar a característica do processo de impressão não planar de três eixos para uso comercial, foi impresso um suporte para tubo segundo a técnica de impressão planar (Fig. 105) e, posteriormente, segundo a metodologia de impressão não planar (Fig. 106), com os parâmetros de impressão do teste número 6.

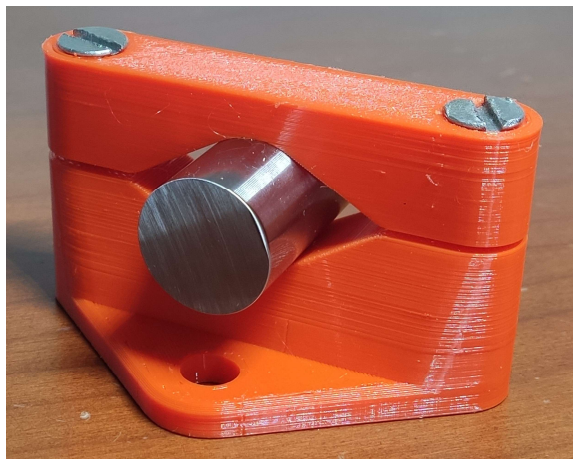


Figura 105 - Suporte para tubos impresso segundo a técnica planar.



Figura 106 - Suporte para tubos impresso segundo a técnica não planar.

Desta forma, foi possível efetuar uma comparação direta entre as duas técnicas, numa peça de uso comercial. Através desta comparação, conseguiu-se perceber a vantagem de produzir uma camada superior mais uniforme, segundo a técnica de impressão não planar, dado que, no provete não planar, o tubo assenta na perfeição nas duas faces de contacto (Fig. 107). O mesmo já não sucede no provete de impressão planar, devido ao efeito de escada produzido pela metodologia de impressão planar (Fig. 108).

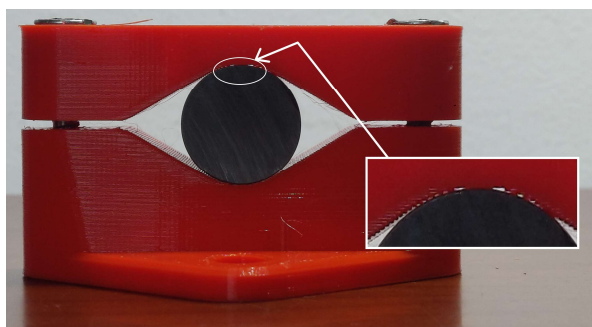


Figura 107 - Vista de frente do suporte de tubos impresso segundo a técnica planar.

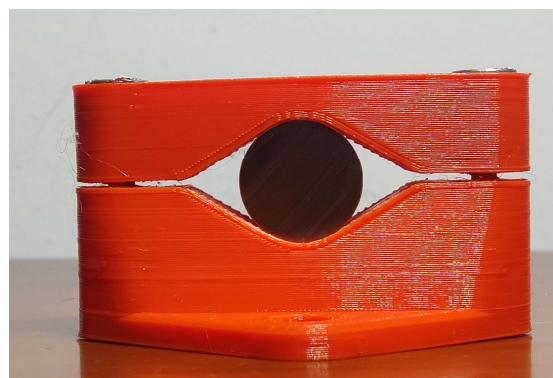


Figura 108 - Vista de frente do suporte de tubos impresso segundo a técnica não planar.

4.2. Ensaio de tração

Após todo o processo de produção e processamento dos provetes de tração, estes foram embalados cuidadosamente, e levados até ao Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, para a realização dos ensaios de tração pretendidos. Através destes ensaios, foi possível analisar algumas propriedades mecânicas dos provetes testados, como o módulo de elasticidade, o alongamento e a tensão máxima.

Todos os ensaios de tração foram efetuados utilizando uma velocidade de deformação de 1 mm/min., com uma distância entre maxilas de 110 mm, utilizando uma célula de carga de 10 kN (Fig. 109). Para fazer o levantamento do módulo de elasticidade dos provetes, foi utilizada a norma ISO 527 para determinação do intervalo de deformações utilizado no cálculo do módulo de elasticidade de cada provete.

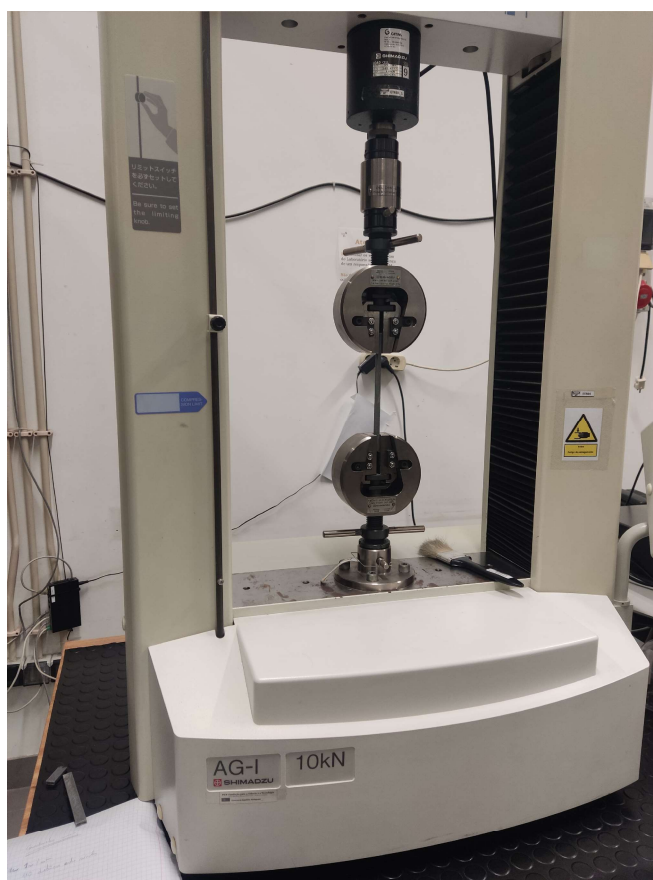


Figura 109 - Realização de um ensaio de tração.

Os primeiros ensaios a serem realizados foram aos provetes XY, começando pelos provetes planares e de seguida os não planares. Os provetes Z seguiram a mesma sequência. Uma vez finalizados os ensaios, foi feita uma análise a todos os provetes para determinação do local de rotura e do tipo de rotura ocorrida. Para finalizar, todas as partes restantes dos provetes foram recolhidas e colocadas sobre uma mesa para uma última análise geral (Fig. 110).

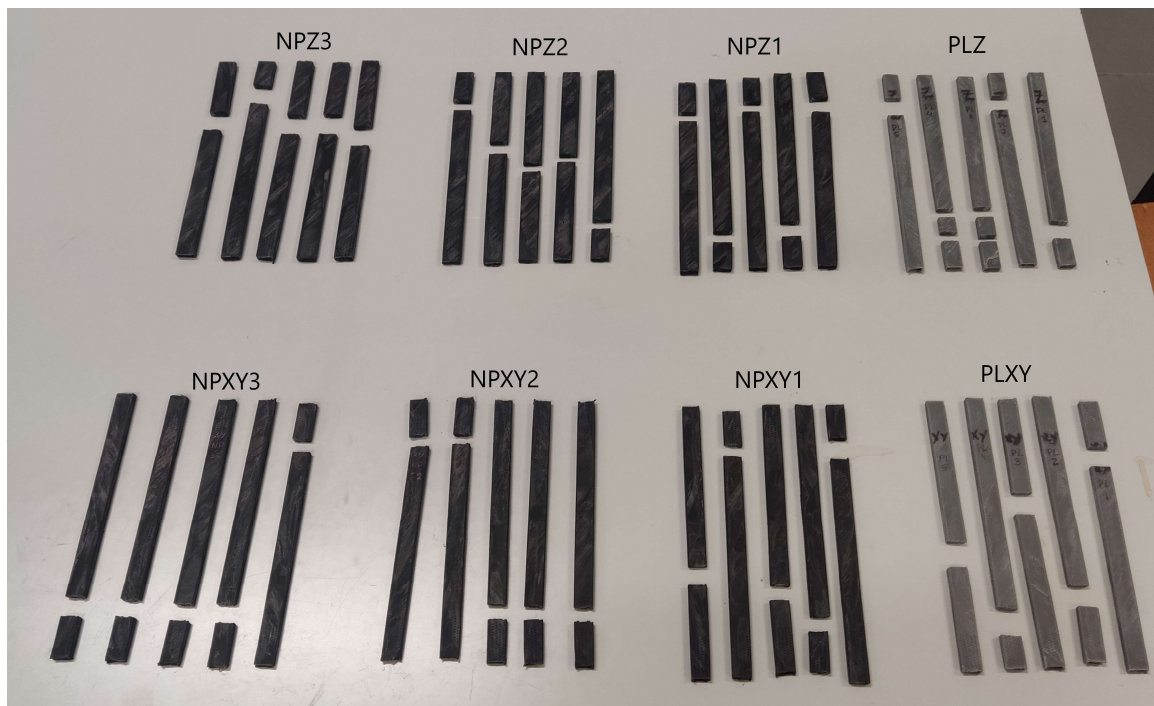


Figura 110 - Provete de tração após ensaio.

Posteriormente, todos os resultados e medições retiradas foram introduzidas numa folha *MS Excel®*, para que pudessem ser processadas e analisadas. Nesta folha, foi feito o cálculo da deformação e da tensão em cada ponto especificado nos ensaios, para que dessa forma, pudessem ser retirados gráficos 'Tensão-Deformação' dos vários provetes ensaiados. Para exemplificar, no gráfico da Figura 111, podemos observar o gráfico 'Tensão-Deformação' dos provetes Z planares.

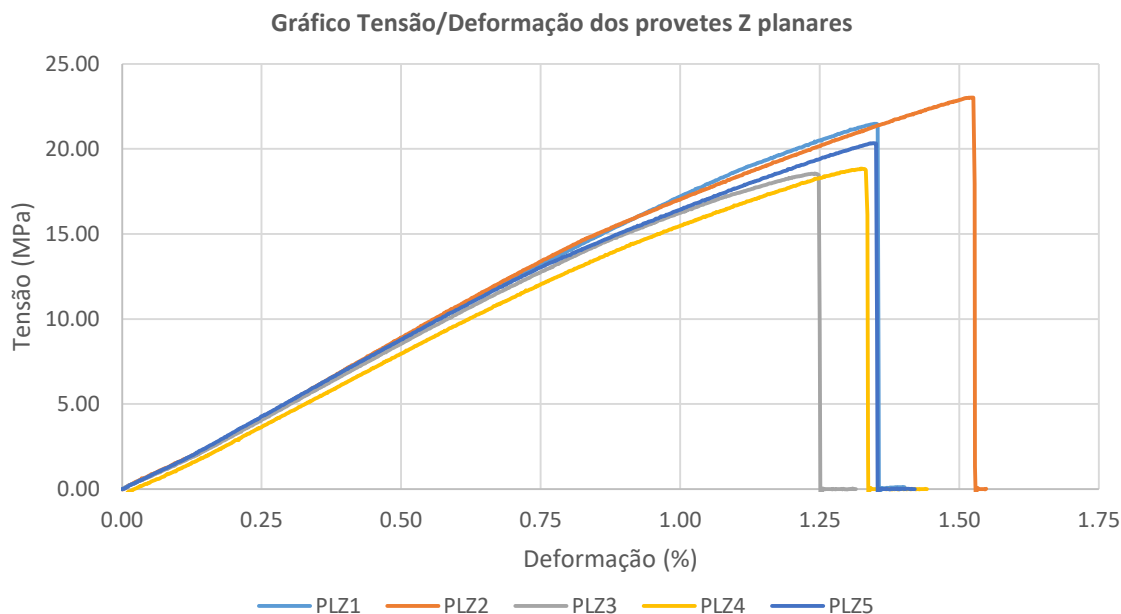


Figura 111 - Exemplificação de um dos gráficos 'Tensão-Deformação' obtidos.

Através destas curvas obtidas, foi utilizada a norma ISO 527 para avaliação do intervalo de deformações com vista ao cálculo do módulo de elasticidade ($0,05\% \leq \epsilon \leq 0,25\%$). Deste modo, foram selecionados os respetivos valores de cada provetes e efetuados gráficos de linhas de

tendência, para que fosse feita uma regressão linear. Foi através desta regressão linear que se obteve o valor do módulo de elasticidade e da fiabilidade do mesmo. Este procedimento está representado na Fig. 112, através do gráfico de linhas de tendência dos provetes Z planares, obtido através do gráfico da Fig. 111, para o intervalo estabelecido pela norma.

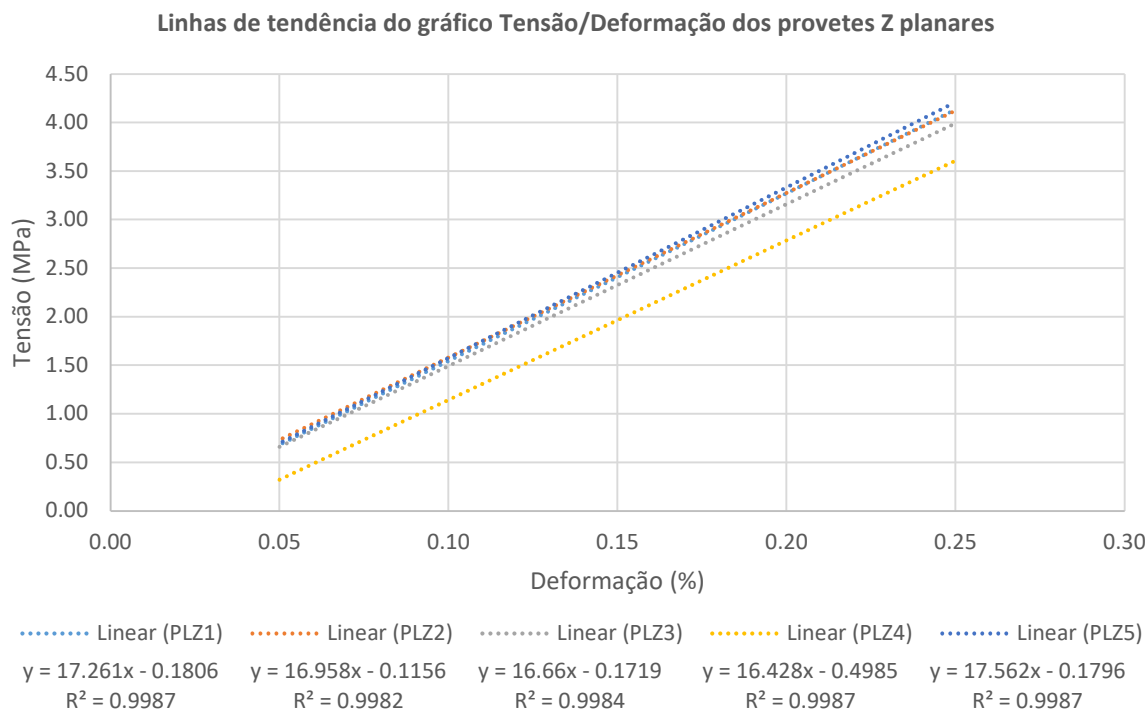


Figura 112 - Exemplificação de um dos gráficos de Linhas de tendência de um gráfico Tensão/Deformação obtido, com a regressão linear de cada curva e a fiabilidade dessa mesma regressão realizada.

Após a realização dos ensaios de tração e elaborados os gráficos dos respetivos provetes ensaiados, foram produzidas tabelas para conter esta informação e feita uma análise dos vários dados obtidos. Nessas tabelas dos ensaios realizados, que se encontram no anexo E, podem ser encontrados os seguintes parâmetros referentes a cada provete:

- Tensão máxima (MPa);
- Deformação máxima (%);
- Módulo de elasticidade de cada provete (GPa) – obtido através do declive das linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação para o intervalo $0,05 \% \leq \epsilon \leq 0,25 \%$;
- Fiabilidade da regressão linear (%);
- Tipo de rotura ocorrida.

Nas Tabelas 17 e 18 encontram-se representados os valores médios dos cinco provetes ensaiados para cada tipologia geométrica para os provetes XY e Z, respetivamente, das várias propriedades mecânicas estudadas no ensaio de tração. Para analisar a precisão dos ensaios realizados, foi também calculado o desvio padrão relativo (DPR) para a tensão máxima e para a deformação máxima (Tab. 19).

Tabela 17 - Valores médios dos ensaios de tração para os provetes XY.

Designação do Teste	Ângulo de Impressão Não Planar (°)	Tensão Máxima (MPa)	DPR Tensão Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)	DPR Deformação (%)
PLXY	---	32,60	1,69	1,80	2,30	11,38
NPXY1	10°	36,19	3,21	1,84	3,44	9,26
NPXY2	20°	30,14	4,01	1,82	2,07	7,37
NPXY3	30°	25,74	2,13	1,80	1,97	7,75

Tabela 18 - Valores médios dos ensaios de tração para os provetes Z.

Designação do Teste	Angulo de Impressão Não Planar (°)	Tensão Máxima (MPa)	DPR Tensão Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)	DPR Deformação (%)
PLZ	---	20,45	8,14	1,70	1,36	6,62
NPZ1	10°	25,38	8,04	1,60	1,95	10,33
NPZ2	20°	22,13	4,69	1,68	1,58	12,34
NPZ3	30°	21,48	5,82	1,57	1,68	10,33

Tabela 19 - Desvio padrão relativo da média global de cada conjunto de provetes.

Designação do Teste	Tensão Máxima	Deformação
PLXY	1,70 %	11,38 %
NPXY1	3,21 %	9,26 %
NPXY2	4,01 %	7,37 %
NPXY3	2,13 %	4,74 %
PLZ	8,14 %	6,62 %
NPZ1	8,04 %	10,33 %
NPZ2	4,69 %	12,37 %
NPZ3	5,82 %	10,33 %

Com o intuito de representar estes valores obtidos e tornar a sua análise mais fácil e intuitiva, foram realizados os gráficos das Figuras 113 a 114, onde é possível visualizar a evolução da tensão máxima e da deformação, à medida que se vai aumentando o ângulo de inclinação, e também comparar os valores dos provetes XY e Z.

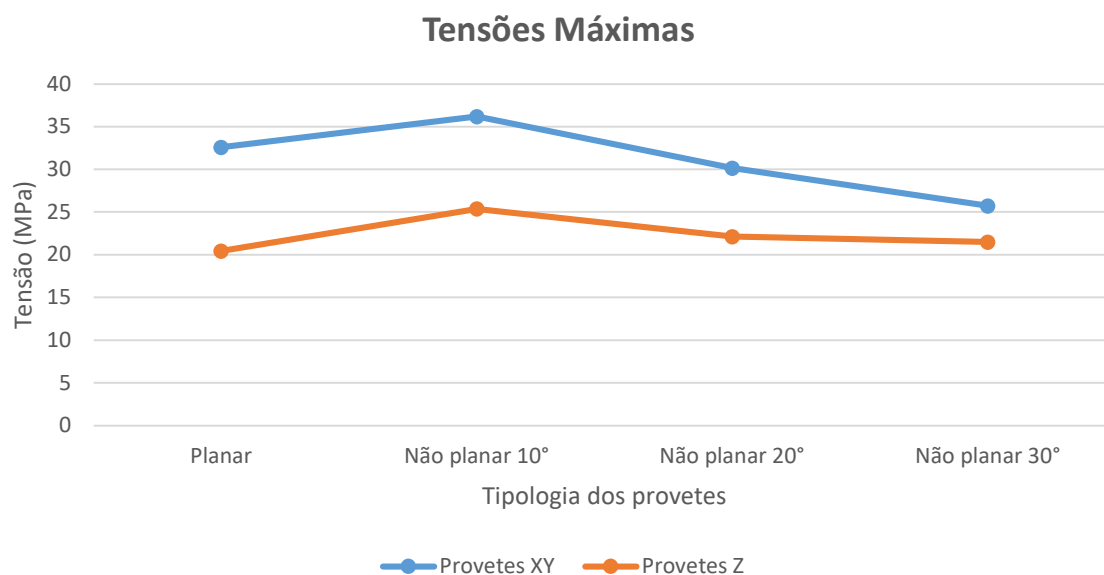


Figura 113 – Gráfico das médias das Tensões máximas, dos vários provetes tracionados.

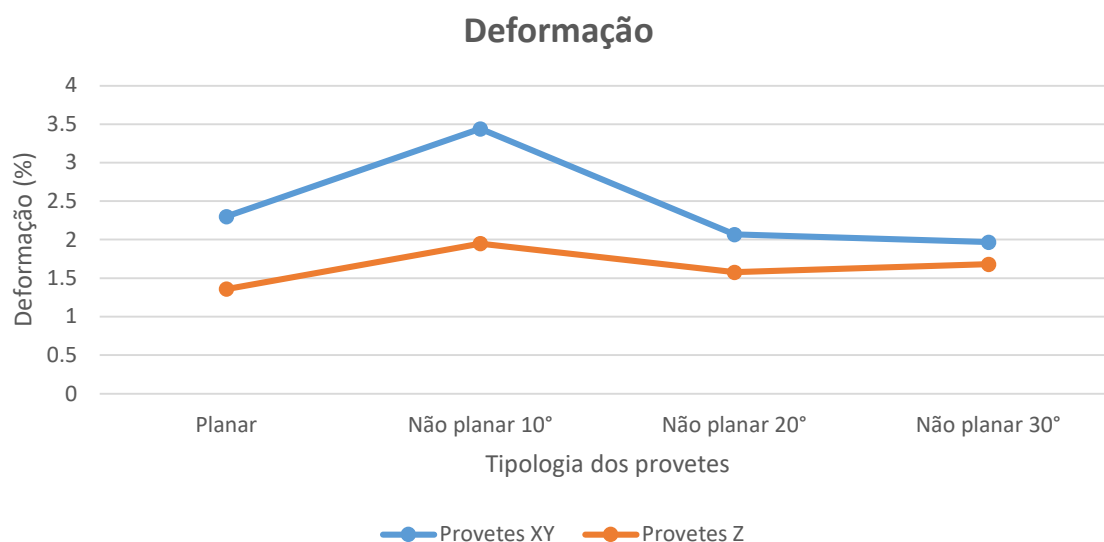


Figura 114 - Gráfico das Deformações médias, dos vários provetes tracionados.

Uma vez retirados os valores pretendidos dos ensaios de tração efetuados, realizou-se uma análise aos provetes com o intuito de aferir o tipo de rotura ocorrida nos provetes Z, e o local de rotura nos provetes XY. Este estudo foi importante para perceber e associar o comportamento do provete ao seu desempenho no ensaio de tração de cada provete. Desta forma, nas imagens seguintes, (Fig. 115 a 120), podem ser encontrados tipo e zonas de rotura visualizados.

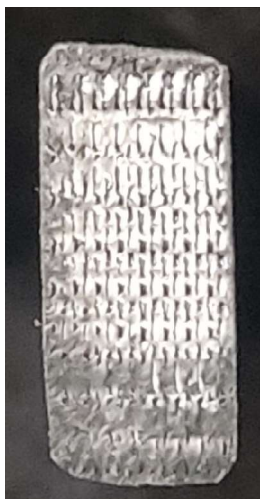


Figura 115 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de impressão planar.



Figura 116 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de transição entre impressão planar e não planar.

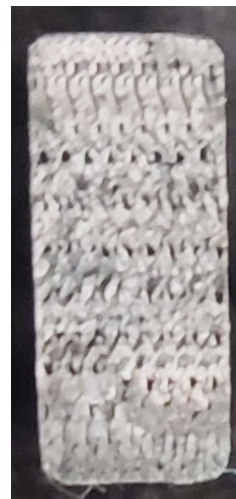


Figura 117 - Rotura de um provete XY não planar, em zona de impressão não planar.



Figura 118 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas.



Figura 119 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas com ligeira quebra da própria camada.

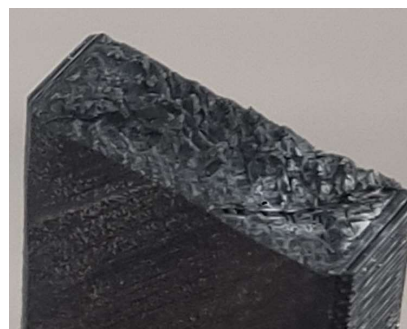


Figura 120 - Rotura de um provete Z não planar por separação de camadas e com quebra das camadas.

Durante a análise dos dois parâmetros anteriores, verificou-se que a uniformidade interna do provete variava consoante o tipo de provete em questão. Por isso, foi também estudada a distribuição interna de cada tipologia de provetes Z impressos. Este estudo foi relevante para permitir uma análise mais concreta sobre a resistência e a integridade do provete nos ensaios. Nas figuras 121 a 124, pode ser observado o interior das várias peças ensaiadas.



Figura 121 - Interior do provete Z planar.



Figura 122 - Interior do provete Z 10° não planar.



Figura 123 - Interior do provete Z 20° não planar.



Figura 124 - Interior do provete Z 30° não planar.

4.3. Otimização do ângulo máximo de impressão

Tendo em conta que o ângulo máximo de impressão planar rondava os 70°- 80°, consoante a altura de camada selecionada, foi feito um estudo sobre a possibilidade de aumentar este valor, e assim permitir a impressão de um novo leque de geometrias, sem recurso a suportes. Para validar este conceito, foi realizada a impressão de um provete "Inclinação Não Planar" (Fig. 125 e Fig. 126) que, através de um ângulo não planar, estudasse essa possibilidade.

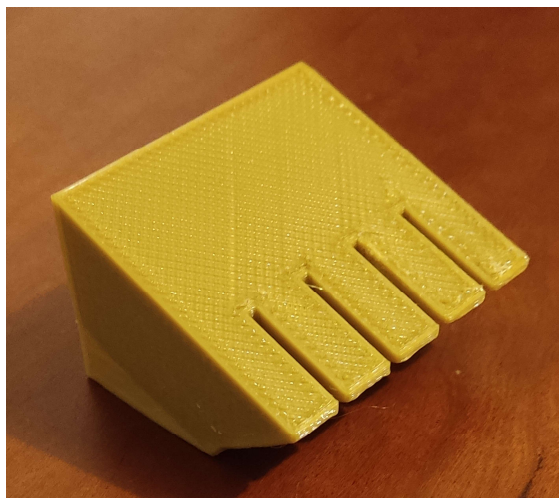


Figura 125 - Vista de perspectiva do provete "Inclinação Não Planar".

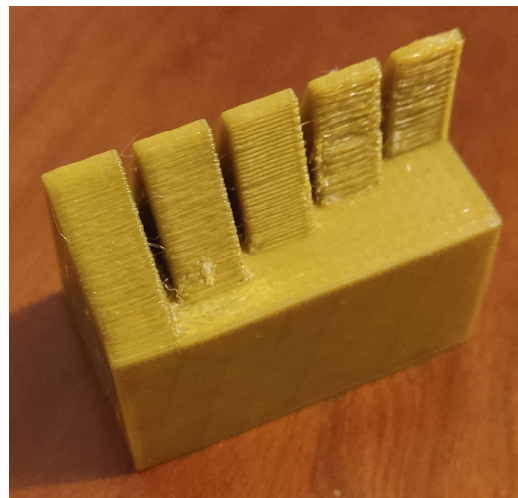


Figura 126 - Vista inferior do provete "Inclinação Não Planar".

Através deste ensaio, foi possível confirmar os pressupostos iniciais sobre a capacidade de aumento do ângulo de impressão, com recurso à utilização da técnica de impressão não planar. Pode-se também verificar que as faces impressas não são muito uniformes. Isto acontece, pois, o próprio programa de fatiamento não produz uma geometria uniforme ao realizar as ordens de impressão (Fig. 127).

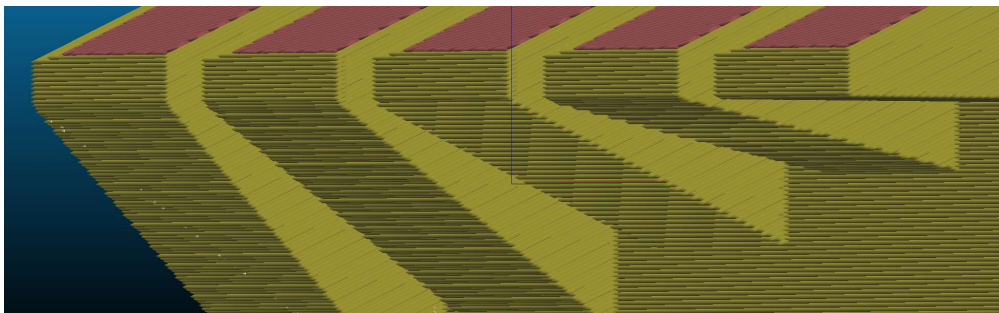


Figura 127 - Defeitos no fatiamento do provete "Inclinação Não Planar".

Uma vez validada a possibilidade de imprimir faces até 90° , foi feita uma análise mais aprofundada das propriedades da impressão de faces com esta inclinação, nomeadamente o comprimento máximo de impressão. Para verificar e quantificar este parâmetro, foram idealizados e impressos vários modelos do “Provete em T” (Fig. 128 e Fig. 129), com os mesmos parâmetros de impressão do provete anterior.

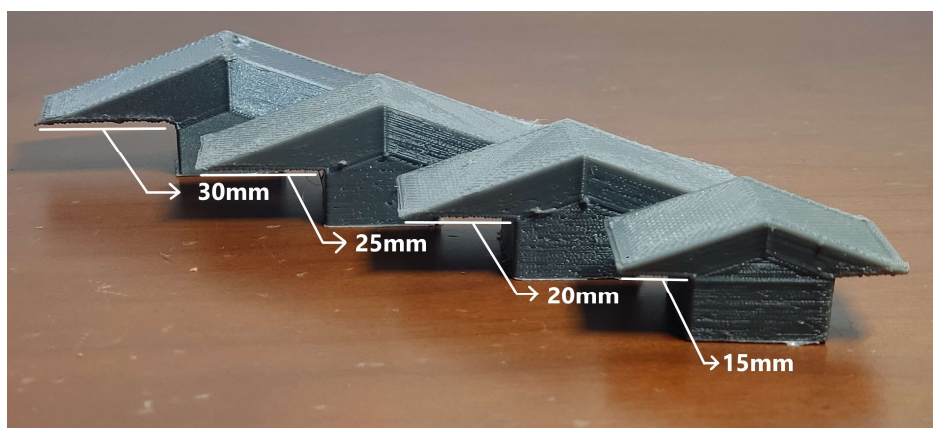


Figura 128 - Provete em T para determinação do comprimento máximo de impressão sem suportes.

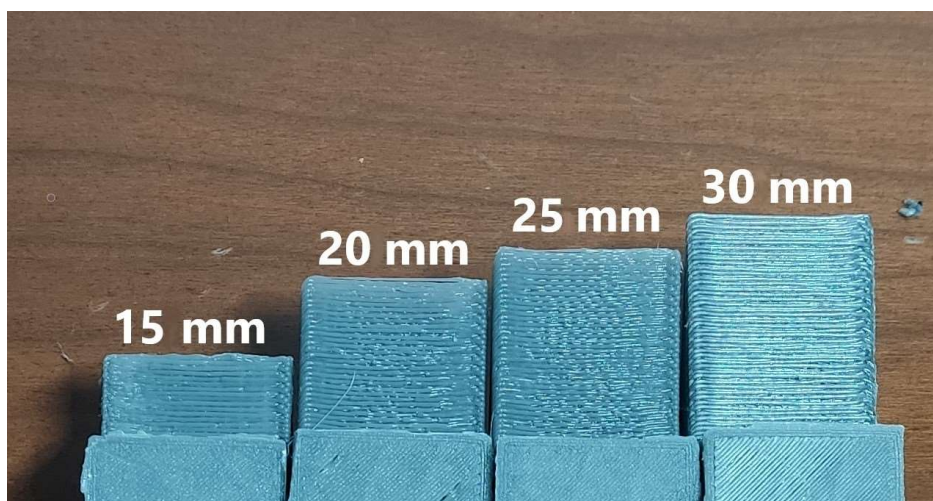


Figura 129 - Vista inferior dos provetes em T impressos.

Nesta análise, verificou-se que, para uma base de provete de $20 \times 20 \text{ mm}^2$, o comprimento máximo de impressão sem suportes é de 30 mm, visto que todos os provetes com comprimento superior a 30 mm se descolaram da cama de impressão durante a impressão.

5. ANÁLISE CRÍTICA

5.1 Qualidade Superficial

5.2 Ensaios de tração

5.3 Otimização do ângulo máximo de impressão

5. ANÁLISE CRÍTICA

Após o fabrico, testagem e recolha de dados dos vários provetes impressos, foi feita uma análise e interpretação dos mesmos. Neste capítulo, podem ser encontradas análises críticas a todos os dados obtidos, para que possam ser recolhidas as informações mais relevantes que vão ao encontro dos objetivos deste trabalho.

5.1. Qualidade superficial

Para o estudo da qualidade superficial das peças impressas pela técnica de impressão não planar, foram impressos vários provetes com diversas geometrias e parâmetros de impressão. Deste modo, foi possível verificar quais eram as características geométricas e parâmetros de impressão com maior impacto na qualidade superficial das faces das peças impressas.

5.1.1. Provetes “Inclinação”

Com os provetes “Inclinação”, foi possível observar quais os valores mais adequados para a largura de extrusão da impressão não planar, de modo a obter uma peça com uma boa qualidade superficial, eliminando o efeito de escada presente nas peças de impressão planar. Após os diversos ensaios realizados, constatou-se que a gama de larguras de extrusão entre os 0,4 mm e os 0,6 mm, apresentava os melhores resultados.

5.1.1.1. Efeito de escada

Para além desta primeira análise, constatou-se também que, o facto de o *nozzle* estar sempre paralelo à camada de impressão, origina a criação de pequenos degraus ao longo dos caminhos de extrusão da peça (Fig. 130). Foi possível também observar que estes degraus podem ser diminuídos das seguintes formas:



Figura 130 - Degraus observados em alguns provetes "Inclinação" não planares.

- Diminuindo o multiplicador de extrusão – Através dos testes 1, 3 e 4 de otimização de parâmetros de impressão, foi possível verificar que o efeito deste degrau é reduzido à medida que o multiplicador de extrusão é reduzido. Desta forma, através da manipulação do multiplicador de extrusão, o efeito degrau da impressão não planar pode ser controlado.

É importante salientar que este multiplicador não pode ser reduzido demasiado, pois pode originar a aparição de falhas das faces impressas;

- Aumento da largura de extrusão – Nos provetes impressos com variação da largura de extrusão, foi observado que, para os mesmos parâmetros de impressão, o aumento da largura de extrusão fez reduzir este efeito de escada. Tal como no multiplicador de extrusão, é importante ter em atenção que o aumento exagerado da largura de extrusão pode levar à aparição de falhas entre os caminhos de impressão.
- Aumento da velocidade de impressão – Nos testes de otimização 4 e 5, foi possível observar a influência do aumento da velocidade de extrusão na qualidade superficial das faces impressas. Sendo que apenas a velocidade foi modificada, contemplamos uma situação em que, para a mesma temperatura, o *nozzle* deposita mais material (devido ao aumento de velocidade), alterando o fluxo do mesmo, pois o material tem menos tempo para aquecer e fundir, sendo extrudido numa quantidade ligeiramente inferior.

5.1.1.2. Otimização dos parâmetros de impressão

Uma vez impressos os provetes com as várias larguras de extrusão a analisar, foi selecionada uma gama de larguras de extrusão, com base na qualidade superficial dos resultados obtidos. Foi possível observar que os melhores resultados foram obtidos para a gama de larguras de extrusão entre 0,4 mm e 0,6 mm. Então, foi realizado um estudo aprofundado incidindo sobre estes valores, analisando vários parâmetros com influência direta na qualidade superficial das peças impressas. Foi possível observar que a velocidade de impressão, a largura e o multiplicador de extrusão, têm uma elevada influência na qualidade final das superfícies impressas.

Através desta análise, foi averiguado que os melhores resultados foram obtidos para os parâmetros dos testes 5 e 6. Outros ensaios também apresentaram resultados bastante promissores e, possivelmente, com um ajuste mais intenso dos parâmetros de impressão, poderiam ser obtidos melhores resultados.

5.1.1.3. Efeito de arrasto do *nozzle*

A posição do *nozzle* origina também zonas de arrasto de material. Como o bico permanece sempre horizontal à cama de impressão, ao realizar certos movimentos não planares na impressão dos provetes, cria zonas de acumulação de material que vai sendo empurrado ao longo dos caminhos de impressão (Fig. 89, apresentada no capítulo anterior).

Isto ocorre devido ao facto de o *nozzle* extrudir uma dada quantidade de material, para a altura de camada estabelecida e, na verdade, essa altura está limitada pela inclinação da superfície impressa (Fig. 131). Analisando esta característica, verificou-se que a altura de camada é medida do centro do bico até à peça, e na extremidade do bico existia uma altura bastante inferior à medida realmente estabelecida para o parâmetro da altura de camada.

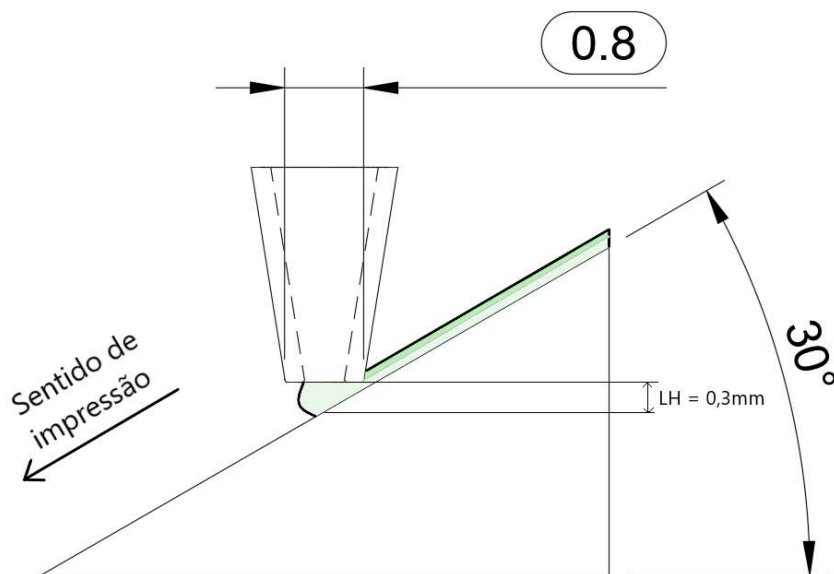


Figura 131 – Demonstração da limitação da altura através de uma Impressão não planar de uma face de 30°.

Visto que este efeito apenas ocorreu com maior intensidade na impressão do perímetro dos provetes, optou-se por reduzir ao máximo o número de perímetros utilizados, já que as camadas superiores foram impressas com um padrão retilíneo, que utiliza um *raster angle* de 45° (Fig. 131).

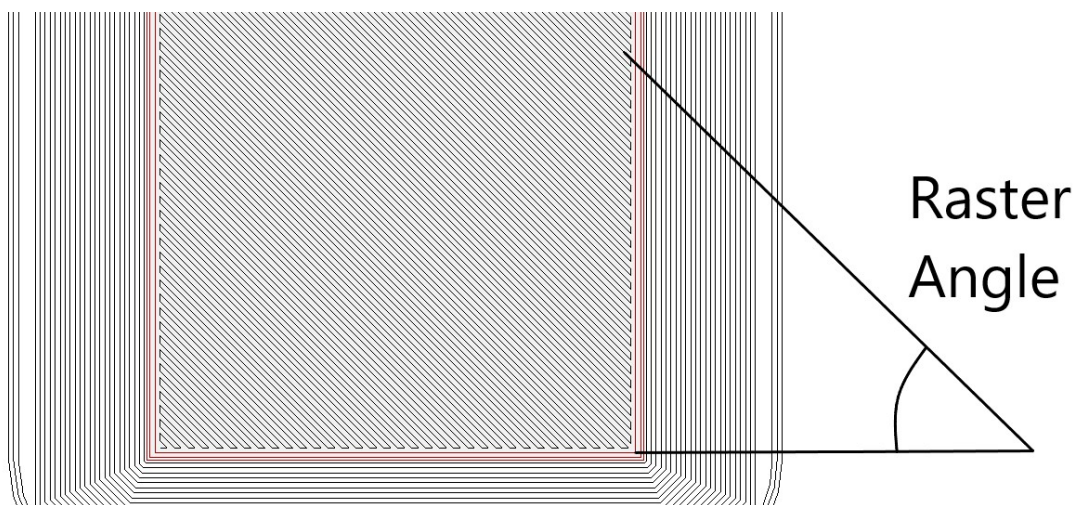


Figura 132 - *Raster Angle* de uma camada de topo.

Desta forma, o ângulo real de impressão planar não é dado pela inclinação da face do provete, pois o *raster angle*, ao estar definido com um valor de 45°, faz com que o ângulo de impressão não planar não seja o ângulo do provete, mas sim a combinação dos dois ângulos. Dessa forma, apesar de, por exemplo, o provete de inclinação ter 30°, o ângulo efetivo de impressão não planar para o preenchimento da camada superior será de, aproximadamente, 20,7° (Fig. 132).

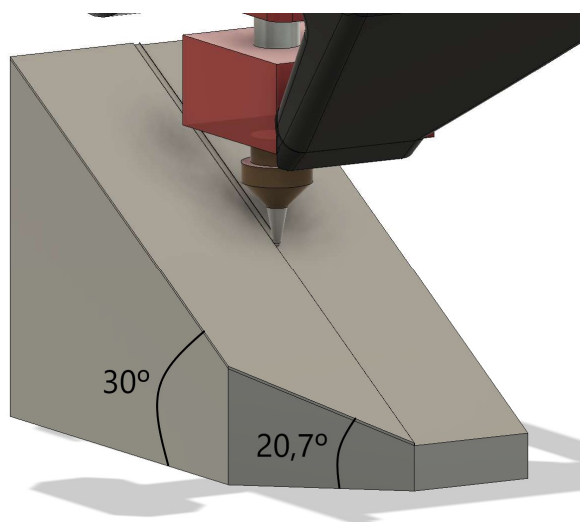


Figura 133 - Ângulo de impressão planar com um *raster angle* de 45°.

5.1.1.4. Variação dos parâmetros de impressão

Uma característica interessante que ocorreu em alguns ensaios, foi que, independentemente de os parâmetros de impressão serem sempre iguais, o conjunto dos três provetes, para cada tipologia geométrica, foram produzidos com qualidades superficiais diferentes.

O teste efetuado para o provete “Inclinação” com 0,4 mm de largura de extrusão, verificou-se que os provetes com 10° e 20° possuíam uma qualidade superficial bastante superior ao provete com 30°. Por outro lado, este provete, quando impresso com uma largura de extrusão de 0,5 mm apresentou uma boa qualidade superficial. Através deste caso, pode-se observar que, para manter uma boa qualidade superficial em todas as geometrias e inclinações da peça, é necessário adaptar os parâmetros às especificações da peça.

Esta adaptação recorre a variação de parâmetros como a largura de extrusão e o multiplicador de extrusão ao longo da impressão dos caminhos de impressão de cada camada impressa. Normalmente, numa impressão planar, todos os parâmetros são definidos no fatiamento da peça sendo que permanecem iguais durante toda a impressão.

Atualmente, grande parte dos parâmetros de impressão são definidos no início da impressão, e assim se mantêm até ao final. Através dos provetes “inclinação”, foi possível averiguar que, para que uma superfície obtida por impressão não planar com várias inclinações possa ser fabricada de uma forma consistente e uniforme, é necessário que haja esta adaptação dos parâmetros de impressão à geometria de cada ponto de impressão da peça.

Neste caso em específico, para que fosse obtido um resultado similar em todas as impressões, as inclinações de 10° e 20° deveriam ser impressas com uma largura de camada de 0,4 mm, e a inclinação de 30° deveria de ser impressa com uma largura de camada de 0,5 mm.

Este é só um exemplo de que uma adaptação dos parâmetros de impressão ao longo da mesma, consoante as características da peça a fabricar, é essencial para que o processo de impressão FDM não planar de eixos possa ser melhorada e otimizada. Outro exemplo de um parâmetro que seria interessante variar ao longo da impressão, consoante a geometria da peça, seria a altura de camada. O programa de fatiamento não planar utilizado, *Slic3r*®, produz toda a peça com camadas

planares, sendo que executa camadas superiores não planares por cima de uma base planar (Fig. 133). Seria interessante se esta transição entre as duas técnicas de impressão, planar e não planar, fosse feita de uma forma gradual (Fig. 134), reduzindo a disparidade da transição entre as duas técnicas de impressão.

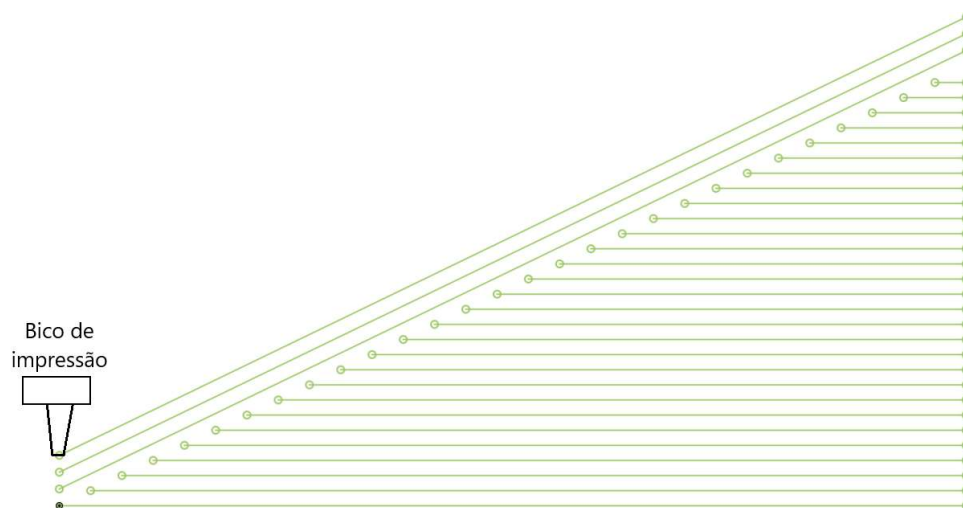


Figura 134 - Fatiamento não planar do programa Slic3r.

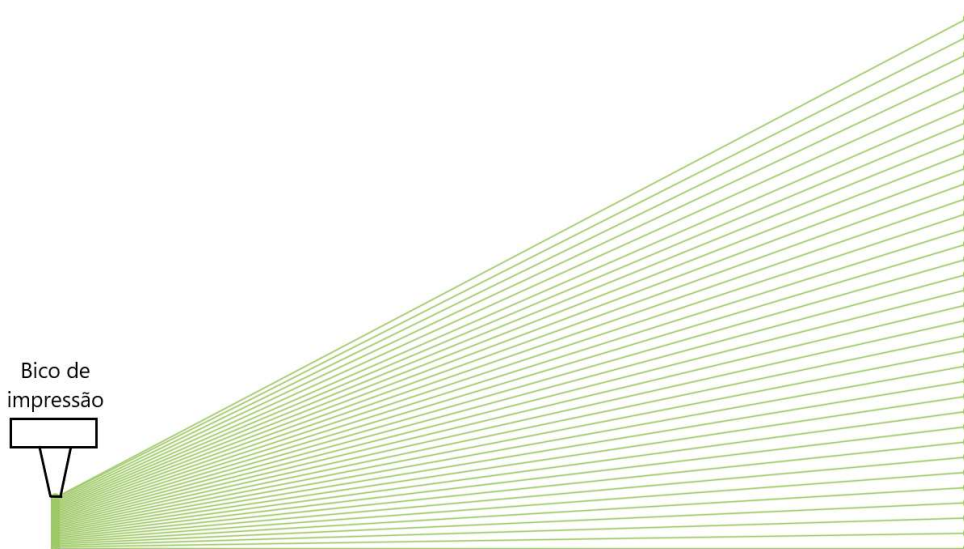


Figura 135 - Fatiamento não planar sugerido como melhoria.

Neste fatiamento, foi importante tomar conhecimento da altura de camada máxima e mínima de cada inclinação, para que a transição de planos de fatiamento possa ser feita entre esses valores. Estes valores delimitam os extremos de impressão planar e não planar da impressora 3D, para que não haja qualquer defeito ou irregularidade durante o processo de impressão.

5.1.2. Provetes “Parábola”

Efetuada o estudo dos vários provetes “inclinação”, foram impressos os provetes “Parábola”, com várias larguras de extrusão, para analisar o comportamento da impressão não planar em geometrias um pouco mais complexas. Visto que nos provetes anteriores, a análise partiu da impressão de uma face plana, que não coincidissem com os planos de origem (XY, XZ e ZY), foi importante analisar o comportamento desta técnica em geometrias diferentes.

Mais uma vez, foi possível observar que as larguras de extrusão entre os 0,4 mm e os 0,6 mm foram os valores que apresentaram melhores resultados. De entre os vários aspetos analisados, o sentido de impressão sobressai, visto demonstrar ter um grande impacto na qualidade superficial. Analisando o comportamento da impressora ao realizar estas faces superiores, verificou-se que a sequência de impressão tem um grande peso na qualidade das peças impressas. Isto acontece devido à condição de deposição de material no movimento ascendente e descendente de construção de uma camada não planar.

Partindo desta análise, observou-se que quando o *nozzle* realiza a construção de uma camada superior de baixo para cima, a superfície fica lisa e consistente (lado esquerdo da figura 135). Em oposição, ao realizar a construção de cima para baixo, em comparação, a qualidade superficial demonstra bastante relevo (lado direito da figura 135).

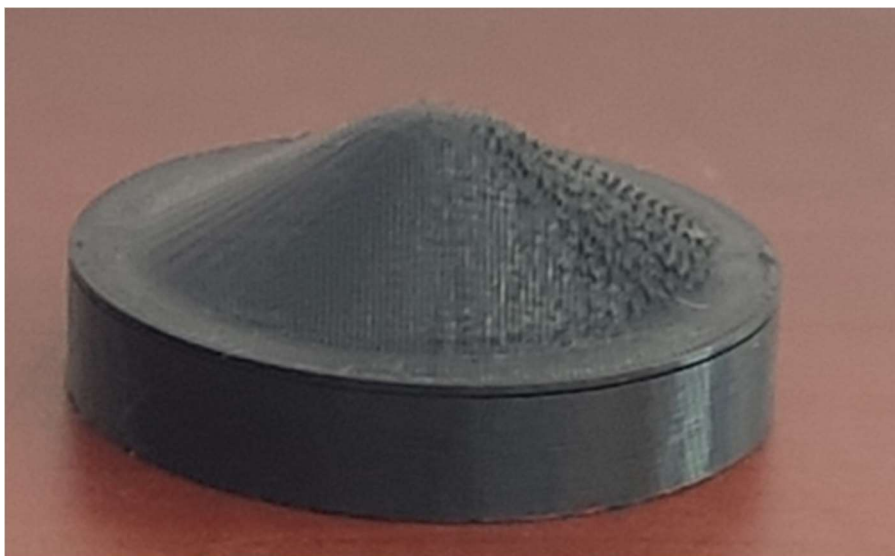


Figura 136 - Proвете "Parábola" de 30°, impresso com 0,3 mm de largura de extrusão.

Analisando mais intensamente esta ocorrência, verifica-se que, quando a construção da camada é feita de baixo para cima, o material depositado é assente no caminho previamente feito e na camada inferior (Fig. 136). Por outro lado, quando a construção é efetuada de cima para baixo, o material depositado é apenas assente na camada inferior. Para além de apenas ser assente na camada inferior, o *nozzle* também acaba por contactar com o caminho anterior, formando um ligeiro efeito de escada (Fig. 137).

Sentido de construção de camada ascendente

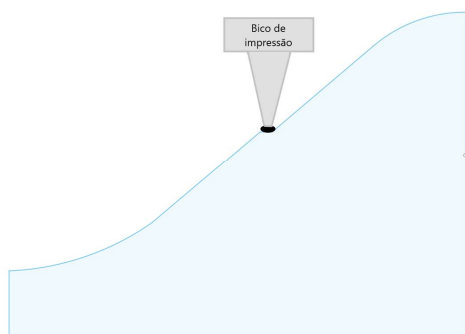


Figura 137 - Representação da impressão segundo uma orientação de construção de camada ascendente.

Sentido de construção de camada descendente

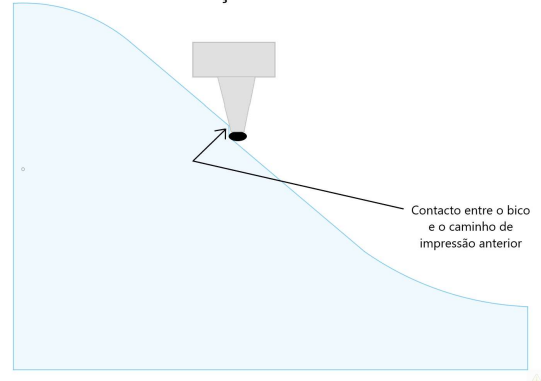


Figura 138 - Representação da impressão segundo uma orientação de construção de camada descendente.

5.1.3. Suporte para tubos

Uma vez feita uma análise dos diversos ensaios nos provetes, foram selecionados alguns parâmetros que apresentaram bons resultados de impressão não planar dos provetes inicialmente fabricados, e foi criado um suporte de tubo com os respetivos parâmetros. Nessa peça, conseguiu-se analisar a produção de um objeto que possuía faces planares e não planares.

Através desse suporte para tubo impresso, foi possível verificar que a face de contacto com o tubo estava muito melhor executada, sendo que na versão não planar se observou um contacto completo entre a face do suporte e a face do tubo, enquanto na versão planar existiam falhas na zona de contacto.

Foi também possível observar que, apesar de os parâmetros de impressão serem adequados para a impressão das zonas não planares, originaram algumas falhas na impressão das zonas planares. Para que o objeto pudesse ser completamente impresso sem imperfeições, seria necessária a adaptação dos parâmetros de impressão ao longo da mesma, consoante a geometria da peça.

5.1.4. Ensaios de rugosidade

Com origem nos resultados obtidos nos ensaios de rugosidade, foi possível ter uma melhor percepção da topografia das superfícies das peças que foram fabricadas, permitindo assim analisar o impacto das modificações feitas a nível de parâmetros de impressão.

Começando pelos provetes planares, verificou-se que os gráficos obtidos foram muito semelhantes e consistentes, sendo que os três perfis de rugosidade são quase coincidentes. Observou-se também que o maior valor da rugosidade média foi obtido no provete "Inclinação" com 20° de inclinação, e que a altura de camada vai reduzindo ao longo do tempo.

Foi notável em todos os provetes o impacto do sentido de impressão dos caminhos de extrusão sendo que, foi feita uma distinção dos dois sentidos de impressão (E1 e E2), para que fosse feito um estudo do seu comportamento nos vários provetes impressos. Para tal foi considerado que o sentido E1 é o sentido descendente ascendente e o sentido E2 é o sentido duplo descendente (Fig.

138). Verificou-se que quando são realizados movimentos segundo o sentido E1 o material é depositado e arrastado pelo bico de impressão e segundo o sentido E2 o material é depositado e de seguida empurrando. Isto está relacionado com o facto de os movimentos não planares serem executados sempre com o bico de impressão paralelo á cama de impressão.

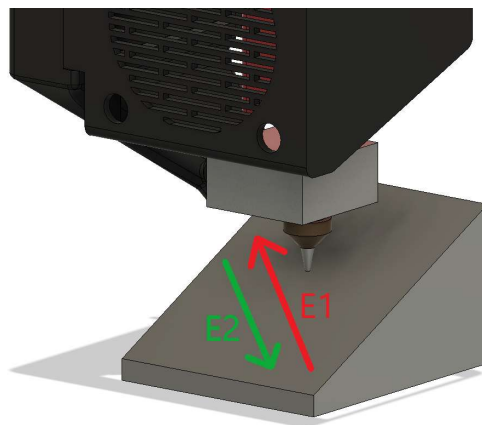


Figura 139 - Exemplificação dos dois sentidos de impressão dos provetes "Inclinação" não planares.

Analisando os provetes com variação de largura de extrusão, constatou-se uma transição de excesso de extrusão para falta de extrusão, que originou fendas entre os caminhos de extrusão. Através do estudo visual dos provetes e dos perfis de rugosidade, foi possível determinar que a rugosidade obtida para as larguras de extrusão mais baixas (0,3mm, 0,4 mm e 0,5 mm) foi originada por pequenas saliências visíveis a olho nu, ao longo da superfície da peça (Fig. 139).

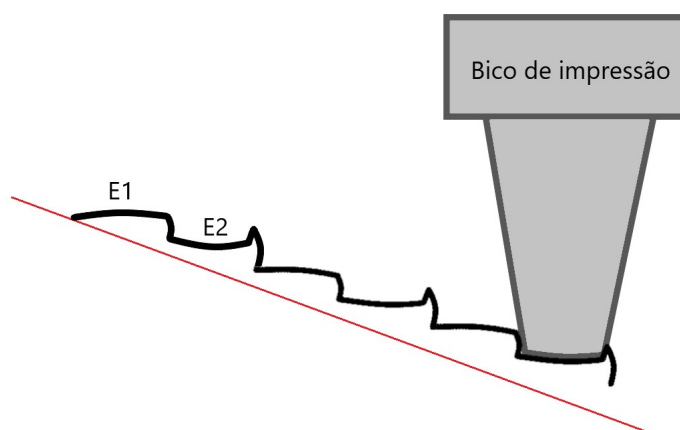


Figura 140 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,3 mm, 0,4 mm e 0,5 mm não planares.

Relativamente aos provetes com largura de extrusão de 0,6 mm, a rugosidade superficial foi originada por um ligeiro excesso de material extrudido, produzindo reduzidas saliências, e um ligeiro afastamento dos caminhos de extrusão, originando a formação de pequenas fendas (Fig. 140), daí possuir os valores de rugosidade mais elevados. Para a largura de extrusão de 0,7 mm, a rugosidade da peça é dada pelas fendas formadas pela falta de extrusão (Fig. 141).

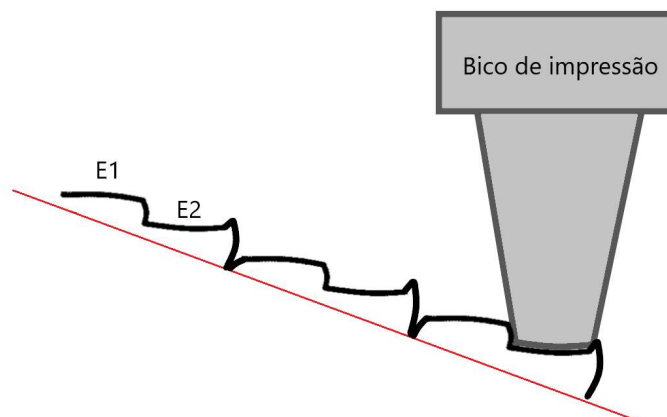


Figura 141 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,6 mm não planares.

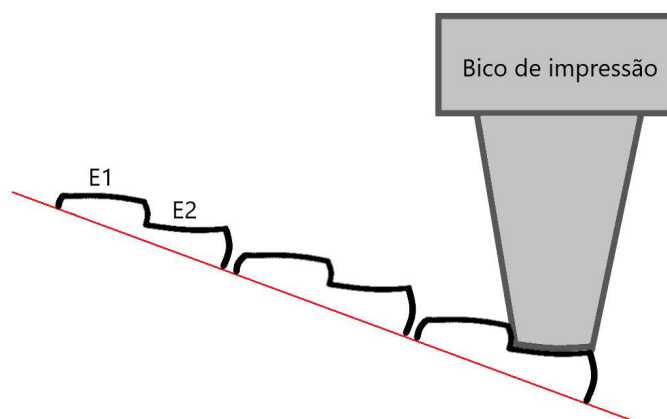


Figura 142 - Representação esquemática da impressão que origina a rugosidade superficial dos provetes 0,7 mm não planares.

Com base nos testes de otimização de qualidade superficial, foi possível perceber o impacto da velocidade de extrusão e do multiplicador de extrusão na qualidade superficial das peças. Através dos testes número 4 e 5, foi possível verificar que o aumento da velocidade originou um melhoramento da rugosidade média. Através dos perfis de rugosidade, foi possível perceber que esta mudança nos valores da rugosidade deu-se pelo facto de, no teste 4, a rugosidade presente na superfície ser devida a um ligeiro excesso de extrusão, enquanto no teste 5 apareceram ligeiras fendas na superfície da peça. Resultante desta modificação, a superfície ficou bastante mais uniforme, e um bom exemplo desta modificação foi o provete com 30° de inclinação.

Entre os testes 1 e 2, foi realizado também um aumento da velocidade. No entanto, o resultado não foi semelhante, observando-se umas superfícies com um grande excesso de material extrudido. Contudo, o multiplicador de extrusão utilizado nestes testes era bastante superior.

Analisando os testes 1, 3 e 4, observamos que a diminuição do multiplicador de extrusão originou um aumento da rugosidade média para as inclinações de 10° e 30°. Quanto à altura total, observamos que do ensaio do provete de 10° para o de 20°, houve uma redução e, de seguida, da inclinação de 20° para a de 30°, houve um aumento possivelmente ligado à transição entre excesso

de extrusão e a criação de fendas, mencionada acima e possíveis de serem observadas através das fotografias dos provetes apresentadas e através dos perfis de rugosidade obtidos através dos ensaios de rugosidade.

Para finalizar, através do estudo dos desvios padrões relativos associados a cada uma das médias calculadas, foi possível verificar que os provetes impressos segundo a técnica de impressão não planar, apresentam valores bastante superiores aos dos provetes impressos segundo a técnica de impressão planar. Desta forma, verificamos que a implementação da impressão não planar possibilita o aumento da resistência mecânica das peças impressas.

5.2. Ensaio de tração

Relativamente aos ensaios de tração realizados, observámos que tanto nos provetes XY como nos provetes Z, os resultados obtidos, para uma inclinação de impressão não planar de 10° foram melhores, em comparação com os provetes planares. Para além de terem apresentado valores das propriedades mecânicas superiores, verificamos uma mudança de comportamento na rotura dos provetes XY. Enquanto os restantes provetes apresentaram uma rotura frágil, onde o provete atinge a rotura na tensão máxima, estes provetes apresentaram uma zona onde os provetes atingem a tensão máxima, começa a ocorrer a redução da tensão ao longo da deformação e, posteriormente, dá-se a rotura do provete numa tensão inferior à tensão de rotura, como se as camadas se estivessem a desdobrar, devido a terem sido impressas com um ângulo não planar de 10°.

Nos provetes de inclinação de 20° e 30°, observou-se uma redução dos valores das propriedades mecânicas. Feita uma análise à zona de rotura do provete, verificou-se que o interior dos provetes, apesar de ter sido impresso com 100% de preenchimento, apresentava falhas, inconsistência e defeitos de impressão. O facto de o interior destes provetes apresentar estas discrepâncias, pode ser a razão pela qual os valores apresentaram uma redução significativa, nos ensaios destas inclinações. Através dos ensaios de rugosidade efetuados aos provetes “Inclinação” não planares, foi possível observar a quantidade de provetes que possuem excesso de material ou fendas na sua camada superior, originando uma face irregular que, quando impressa uma camada no seu topo, não garante uma ligação total devido à existência de vazios no interior do provete.

De modo a verificar a consistência dos valores obtidos e calculados, foi feita uma análise através do desvio padrão relativo e dos perfis de rugosidade, que reforçou ainda mais a ideia da irregularidade destas faces, comparativamente a faces planares sobrepostas, devido ao facto de, para o mesmo provete, existirem perfis de rugosidade e valores de rugosidade média bastante diferentes, originado um desvio padrão relativo elevado.

Ainda assim, todos os provetes não planares Z apresentaram valores das propriedades mecânicas superiores aos provetes utilizando impressão planar. Visto que no provete planar as camadas são apenas sobrepostas umas sobre as outras (Fig. 142), era esperado que os provetes Z não planares apresentassem valores superiores. Visto terem uma área de contacto maior entre camadas, estes provetes beneficiam de uma melhor distribuição dos esforços na ligação entre camadas, originando uma divisão dos esforços numa componente de tração perpendicular ao sentido da camada, e uma componente de corte entre as camadas (Fig. 143).

Distribuição de esforços
provete Z planar

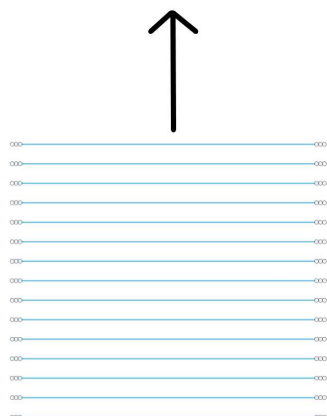


Figura 143 - Distribuição dos esforços de tração num provete planar.

Distribuição de esforços
provete Z não-planar

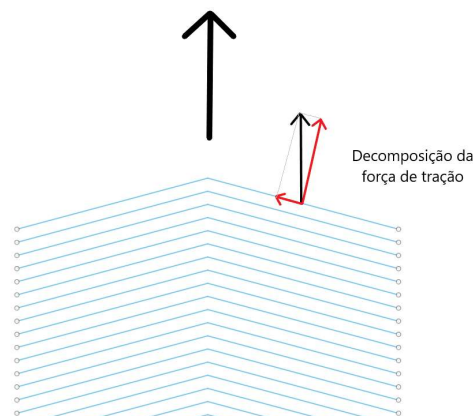


Figura 144 - Distribuição dos esforços de tração num provete não planar.

5.3. Otimização do ângulo máximo de impressão

Analisando os diversos provetes de otimização do ângulo máximo de impressão fabricados, verificou-se que seria possível aumentar o ângulo máximo de impressão, recorrendo à técnica de impressão não planar. Este aumento do ângulo de impressão possibilita um aumento do número de geometrias que podem ser impressas sem recurso a suportes, originando uma poupança na quantidade de material que seria necessário utilizar.

Com a confirmação da capacidade do aumento do ângulo máximo de impressão, foi possível analisar qual o comprimento máximo passível de ser impresso sem recurso a suportes. Esta análise permitiu observar que, à medida que o comprimento da impressão suspensa aumenta, ocorre a formação e o aumento de um momento fletor sobre a aresta sobre a qual a impressão suspensa está a ser realizada (Fig. 144).

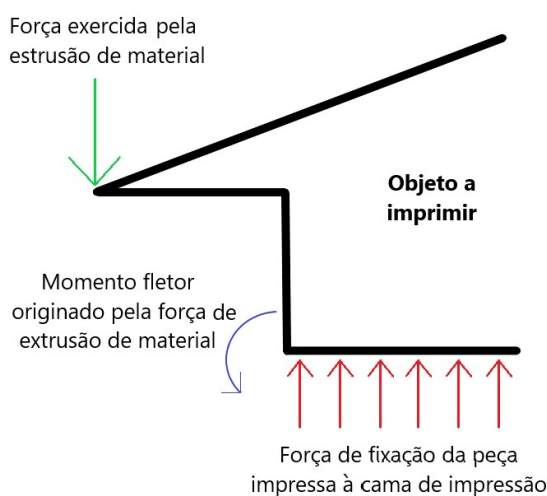


Figura 145 - Solicitações originadas pela extrusão de material no processo de impressão de uma geometria suspensa.

Verificou-se que, para comprimentos de impressão suspensa superiores a 30 mm, apesar de a força de extrusão do material ser sempre constante, o momento fletor originado faz com que o objeto se desprenda, impossibilitando a continuação da impressão do objeto pretendido, sendo necessário parar a impressão.

A capacidade de impressão de objetos sem recurso a suportes origina a possibilidade de utilização desse espaço de impressão, que normalmente seria ocupado pelas bases dos suportes, para a fabricar uma maior quantidade de objetos. Outro objetivo deste trabalho é verificar a capacidade que a técnica de impressão não planar possui para uma otimização do espaço de impressão.

Como já foi analisado, o processo de fabrico aditivo FDM não possui muitos benefícios para produções em grande escala, no entanto, esta otimização pode ser favorável, caso seja necessário fazer uma otimização da área e do tempo de ciclo de impressão. Uma vez que a impressora não necessita de nenhum operador durante o processo de impressão, esta otimização pode originar a criação de ciclos de produção superiores, dando margem para que o operador possa realizar outro tipo de tarefas.

Para que pudesse ser feita uma análise prática desta característica, foi simulado no programa *SolidWorks*® a possibilidade de otimização de espaço e recursos. Esta simulação foi efetuada com recurso aos provetes em T, uma vez que foram fabricados vários destes provetes (Fig. 145) para determinar o comprimento máximo de impressão suspensa. Desta forma, foi feito um estudo de várias disposições para verificar se é possível imprimir um número superior de objetos no mesmo volume de impressão. Para este ensaio, a geometria dos provetes será adaptada (Fig. 146), para que possam ser impressos segundo a metodologia não planar, e assim verificada a aplicabilidade desta técnica.

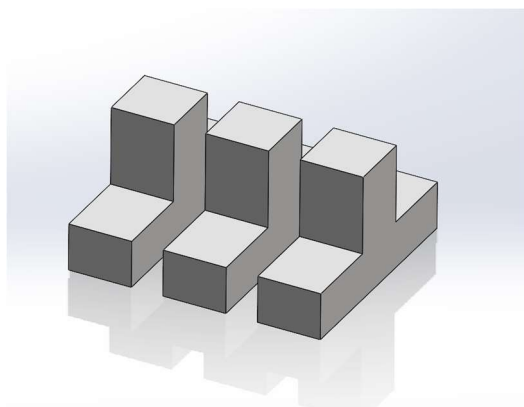


Figura 146 - Impressão planar de três provetes em T.

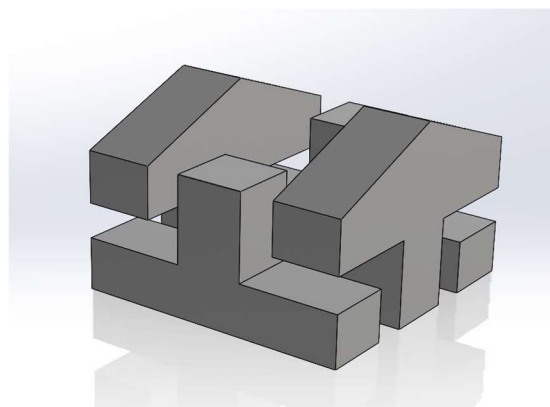


Figura 147 - Impressão não planar de quatro provetes em T.

Esta análise foi feita apenas utilizando o programa de modelação *SolidWorks*®. Visto que os provetes em T foram previamente impressos, foi apenas feita uma possível organização de impressão, com o intuito de verificar o conceito da otimização de espaço. Desta forma evitou-se realizar uma nova impressão dos mesmos provetes.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

6.2 Propostas de trabalhos futuros

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Depois de todo o processo de análise e interpretação de todos os resultados obtidos e conceitos abordados, neste capítulo podem ser encontradas as conclusões retiradas e algumas sugestões e preocupações relativamente a trabalhos futuros que possam ser realizados sobre este tema.

6.1. Conclusões

Esta dissertação foi elaborada tendo como principais objetivos, analisar e estudar as principais propriedades e capacidades da implementação da técnica de impressão não planar em impressoras FDM de três eixos, e também otimizar essa tipologia de impressão, bem como os parâmetros a ela associados.

Analizando a lista de tarefas e os objetivos que tinham sido estipulados no início deste trabalho, verificou-se que todos foram cumpridos, iniciando-se na análise e no melhoramento das propriedades mecânicas da impressora, para que todo o estudo pudesse ser mais amplo e mais abrangente. O trabalho prosseguiu através da impressão de provetes com diversas geometrias e com diversos parâmetros de impressão, para que fosse feita uma análise das propriedades da técnica de metodologia de impressão não planar, e também para perceber o impacto dos parâmetros na mesma.

De modo a analisar mais intensamente os provetes impressos, foram efetuados ensaios de tração e rugosidade com o intuito de abordar a possibilidade de melhoramento da resistência e a qualidade superficial das peças impressas. Para finalizar este estudo, foi feita uma análise sobre a possibilidade de aumentar o ângulo máximo de impressão e condensar as vantagens e limitações desta técnica de impressão. Para que seja feita um melhor entendimento das conclusões retiradas, foi feita a Tabela 20, representada abaixo.

Tabela 20 - Conclusões retiradas dos objetivos propostos.

Objetivos	Resultados Obtidos
Influência das principais características mecânicas para a implementação da técnica de impressão não planar	Após analisar a metodologia de impressão não planar, foi verificado que, para a sua implementação, a cabeça de impressão iria necessitar de bastante espaço ao seu redor, para que a peça pudesse ser impressa sem que ocorresse uma colisão entre a cabeça de impressão e a peça. Foi então determinado que a altura de impressão planar e o ângulo de impressão planar seriam os parâmetros mais importante a otimizar, para que se conseguisse efetuar uma impressão planar com menos limitações, visto que a carcaça da cabeça de impressão limitava a implementação da impressão não planar. Com o intuito de aumentar a capacidade destes dois parâmetros, foi feito um reposicionamento dos componentes da cabeça de impressão e, de imediato, foi feita uma nova carcaça. Através desta alteração foi possível otimizar o

Objetivos	Resultados Obtidos
Determinação dos principais parâmetros necessários para a utilização da técnica de impressão não planar	ângulo de impressão não planar de cerca de 6°, ângulo máximo com a carcaça original da impressora, para cerca de 30°. Foi também possível aumentar a altura de impressão não planar de 22,6 mm para 50 mm. Com o intuito de analisar a metodologia de impressão não planar, foram impressos os provetes “Inclinação” e “Parábola” com diversos parâmetros, para determinar quais seriam os mais importantes para a impressão não planar de objetos. Através destes parâmetros, foi possível verificar que, para os mesmos parâmetros, geometrias diferentes apresentam resultados diferentes, sendo que a parametrização deve ser feita consoante a geometria da peça. Foi também possível concluir que os parâmetros com maior impacto na qualidade superficial são a velocidade da camada superior, o multiplicador de extrusão e a largura de extrusão. Para além destes parâmetros previamente mencionados, o sentido de construção das camadas superiores apresentou também muito impacto na qualidade dos provetes “Parábola”. Através destes ensaios, foi possível perceber que as faces impressas segundo a metodologia não planar, apresentam melhor qualidade quando impressas no sentido ascendente do que no sentido descendente.
Determinação dos principais parâmetros necessários para a utilização da técnica de impressão não planar	Com o intuito de analisar a metodologia de impressão não planar, foram impressos os provetes “Inclinação” e “Parábola” com diversos parâmetros, para determinar quais seriam os mais importantes para a impressão não planar de objetos. Através destes parâmetros, foi possível verificar que, para os mesmos parâmetros, geometrias diferentes apresentam resultados diferentes, sendo que a parametrização deve ser feita consoante a geometria da peça. Foi também possível concluir que os parâmetros com maior impacto na qualidade superficial são a velocidade da camada superior, o multiplicador de extrusão e a largura de extrusão. Para além destes parâmetros previamente mencionados, o sentido de construção das camadas superiores apresentou também muito impacto na qualidade dos provetes “Parábola”. Através destes ensaios, foi possível perceber que as faces impressas, segunda a metodologia não planar,

Objetivos	Resultados Obtidos
Influência da impressão não planar na qualidade superficial das peças impressas	apresentam melhor qualidade quando impressas no sentido ascendente do que no sentido descendente. Utilizando os provetes “Inclinação” foram efetuados diversos ensaios de rugosidade onde pudemos verificar o impacto dos diversos parâmetros de impressão anteriormente mencionados. Através destes ensaios, foi possível concluir que, à medida que ocorre um aumento da largura de extrusão, existe também uma variação na topologia das peças impressas. Para peças com largura de extrusão inferior verificou-se, através dos perfis de rugosidade, a existência de ligeiras saliências devidas à posição do bico de extrusão, e de um ligeiro excesso de material extrudido. À medida que a largura de extrusão vai aumentando, este efeito vai sendo reduzido, e vai começando a surgir a aparição de fendas entre os caminhos de extrusão. Desta forma, conclui-se que o facto de o <i>nozzle</i> estar sempre paralelo à cama de impressão, vai originar o incorreto e a instável formação dos caminhos de impressão, devido ao efeito de arrastamento do material extrudido. Ainda assim, grande parte dos provetes não planares ensaiados, apresentou valores de rugosidade inferiores aos provetes planares e, inspecionando visualmente, também foi possível observar melhorias na qualidade superficial em relação aos provetes planares. Com recurso à impressão planar e não planar do suporte de tubo foi, mais uma vez, possível observar que a parametrização deveria ser variável e adaptável à geometria da peça, para que esta possa ter um bom acabamento superficial.
Influência da impressão não planar na resistência mecânica das peças impressas	Com recurso aos provetes de tração XY e Z, foi possível analisar o impacto da geometria interna e da inclinação da mesa na resistência mecânica dos provetes impressos, e concluir que estas duas propriedades possuem um grande impacto na resistência da peça impressa. Através dos ensaios efetuados, foi possível observar que a inclinação de 10° foi a inclinação que apresentou melhores resultados, superando os provetes planares em todos os parâmetros, com uma tensão de 36,19 MPa para os provetes XY, 25,38 MPa para os provetes Y, e uma deformação máxima de 3,44% para os provetes XY e 1,95% para os provetes Y.

Objetivos	Resultados Obtidos
	Relativamente aos provetes “Inclinação” com 20° e 30°, apresentaram resultados bastantes inferiores ao provete de 10°. Para além de apresentarem resultados diferentes, apresentam ruturas de zonas de roturas diferentes. Verificou-se que nos provetes XY e de 10° cederam, em grande parte na zona planar do provete. Os de 20° já começaram a ceder mais na zona de transição, entre zona planar e não planar, ou então em zona não planar, e os provetes de 30° cederam maioritariamente em zonas não planares. Recorrendo aos ensaios de rugosidade, foi possível observar que, na maioria dos casos, a rugosidade aumenta com o aumento da inclinação da face a imprimir. Esta característica pode estar relacionada com a resistência dos provetes, dado que, devido à superfície ser mais rugosa, a probabilidade de ocorrer a formação de vários defeitos na peça é maior. Visto que inclinações diferentes possuem parâmetros ótimos de impressão diferentes, os resultados poderiam ter sido diferentes se, para cada inclinação de cada provetes fossem aplicados parâmetros de impressão mais favoráveis para a mesma.
Análise da capacidade de impressão de uma maior gama de ângulos, sem recurso a suportes	Com base no provete “Inclinação não planar”, conseguiu-se testar e validar uma gama mais alargada de ângulos de impressão. Através deste teste, foi possível realizar a impressão de faces paralelas à base de impressão, sem recurso a qualquer suporte. Através dos provetes em T, elaborados para estudar qual o comprimento máximo de impressão planar para uma base de 20 mm x 20 mm, foi possível analisar a força que o material faz ao ser extraído contra a peça. Este efeito fez-se notar nos provetes com comprimento de impressão suspensa superior a 30 mm, devido ao facto de o objeto se descolar da cama da impressão. A capacidade de imprimir faces paralelas à base de impressão sem recurso a suportes, permitiu também concluir que, para além de ocorrer uma poupança de material utilizado e desperdiçado, o espaço que normalmente seria utilizado para a colocação de suportes, poderia ser utilizado para imprimir outros objetos. Através de uma simulação, com recurso ao programa <i>SolidWorks</i>®, verificou-se que, devido a esta propriedade, é possível aumentar a capacidade de impressão, possibilitando também uma maior gestão sobre a área útil de impressão e sobre o tempo de cada ciclo de impressões.

Objetivos	Resultados Obtidos
Principais vantagens e limitações da implementação da metodologia de impressão não planar	Uma vez feito o estudo de todos os pontos estabelecidos no início deste trabalho, foi realizada uma análise e um levantamento das principais vantagens e limitações da utilização da metodologia de impressão não planar. Começando pelas vantagens, verificou-se que a utilização da metodologia de impressão não planar pode favorecer a qualidade superficial das peças fabricadas, e pode aumentar a resistência mecânica dessas mesmas peças, como um todo, ou então de certas zonas específicas da peça. Para além destas duas vantagens, a impressão não planar permite aumentar o ângulo de impressão, evitando a utilização de suportes para o fabrico de certas geometrias que, quando impressas segundo a técnica de impressão planar, seriam utilizados. Este fator também contribui para uma melhor gestão dos tempos e ciclos de produção e para o aumento da capacidade produtiva. Como contrapartida, a impressão não planar também apresenta as suas limitações, começando pelo facto de o <i>nozzle</i> estar sempre paralelo à cama de impressão, originando faces um pouco rugosas, em comparação com a rugosidade da face de uma camada superior planar. Para além disso, a impressão planar é um processo complexo, que envolve uma grande quantidade de comandos <i>G-CODE</i>, sendo necessário bastante tempo para o fatiamento das peças, produzindo ficheiros <i>G-CODE</i> mais pesados. Após muita pesquisa, é inegável que esta técnica ainda não foi muito aprofundada, pois os programas de fatiamento que existem são poucos e não permitem uma grande parametrização de características não planares como, por exemplo, padrão de enchimento não planar, zonas de aplicação de impressão não planar, análise da geometria da peça e adaptação dos melhores parâmetros de impressão para essa geometria, entre outros. Em comparação, os programas de fatiamento planar acrescentam, a cada dia que passa, novas opções e funcionalidades, permitindo parametrizações mais detalhadas das peças impressas. Para que a impressão não planar possa ser aplicada com uma vasta amplitude, como realizado neste trabalho, é necessário modificar e calibrar a impressora para essas alterações, visto que, grande parte das impressoras do mercado possuem um <i>nozzle</i> padrão com um largo rebordo à volta do orifício de

Objetivos	Resultados Obtidos
	extrusão, e uma altura e ângulo de impressão não planar reduzidos.

6.2. Propostas de trabalhos futuros

Na impressão do suporte para tubo verificou-se a necessidade de variar os parâmetros de impressão consoante a geometria do local onde a mesma é realizada. Seria interessante se fosse feito um algoritmo, capaz de analisar a geometria de cada local da peça e assim utilizasse os parâmetros mais adequados para essa localização.

Ainda que tenham sido obtidos resultados positivos nos provetes de tração não planares, seria interessante analisar outros tipos de geometrias internas e quais os melhores parâmetros de impressão para os mesmos, para que desta forma, fosse possível determinar qual o seu impacto na resistência da peça impressa e assim determinar quais as geometrias e parâmetros mais adequados para cada situação.

A possibilidade de realização de uma parametrização não planar mais pormenorizada é uma característica que daria muito a ganhar às peças impressas pelo processo FDM, por isso seria muito interessante se fosse feito um estudo da capacidade de realização de um programa de fatiamento que permitisse parametrizar propriedades como o padrão não planar interno, caracterizar quais as zonas de aplicação da impressão não planar e que realizasse a adaptação das melhores parâmetros de impressão consoante a geometria que estivesse a ser impressa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “3D printing: hype or game changer?,” *EY Global*, 2019. Accessed: Jan. 10, 2023. [Online]. Available: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/advisory/ey-3d-printing-game-changer.pdf
- [2] Tiago Marin, “A revolução da impressora 3D.” Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-da-impressora-3d-tiago-oltramari-marin>
- [3] F. P. W. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, “A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering,” *Biomaterials*, vol. 31, no. 24, pp. 6121–6130, Aug. 2010. doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
- [4] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, Elsevier Ltd, pp. 172–196, Jun. 15, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [5] I. Ebert-Uphoff, C. M., D. W., and T. Laliberte, “Rapid Prototyping for Robotics,” in *Cutting Edge Robotics*, Pro Literatur Verlag, Germany, 2005. doi: 10.5772/4639.
- [6] “IannGibsonn· DaviddRosen BrenttStucker Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition.”
- [7] MECALUX, “A impressão 3D leva a logística a uma nova dimensão.” Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.mecalux.pt/blog/impressao-3d-logistica>
- [8] P. Wu, J. Wang, and X. Wang, “A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry,” *Automation in Construction*, vol. 68, Elsevier B.V., pp. 21–31, Aug. 01, 2016. doi: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
- [9] D. S. Hermiyanty, Wandira Ayu Bertin, “The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications,” *J Chem Inf Model*, vol. 8, no. 9, pp. 1–58, 2017.
- [10] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Business and Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [11] K. Rajan, M. Samykano, K. Kadirgama, W. S. W. Harun, and M. M. Rahman, “Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 3–4, 2022. doi: 10.1007/s00170-022-08860-7.
- [12] D. Ahlers, “3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation,” 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/335542650>
- [13] G. Fang, T. Zhang, S. Zhong, X. Chen, Z. Zhong, and C. C. L. Wang, “Reinforced FDM: Multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength,” *ACM Trans Graph*, vol. 39, no. 6, Nov. 2020, doi: 10.1145/3414685.3417834.
- [14] ISO/TC 261, “ISO/ASTM 52900:2021.” Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- [15] “Additive manufacturing-General principles-Fundamentals and vocabulary Fabrication additive-Principes généraux-Fondamentaux et vocabulaire INTERNATIONAL STANDARD ISO/ASTM 52900 ISO/ASTM 52900:2021(E) COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT.” [Online]. Available: www.sis.se/Buytheentirestandardviahttps://www.sis.se/std-80032370Website:www.iso.orgWebsite:www.astm.org
- [16] DICIO, “Significado de Polimerização.” Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.dicio.com.br/polimerizacao/>
- [17] F. Calignano *et al.*, “Overview on additive manufacturing technologies,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 4, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.

- [18] WIKIPÉDIA, "Voxel." Accessed: Jan. 11, 2023. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Voxel>
- [19] S. Gorsse, C. Hutchinson, M. Gouné, and R. Banerjee, "Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 18, no. 1. 2017. doi: 10.1080/14686996.2017.1361305.
- [20] M. Grasso and B. M. Colosimo, "Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: A review," *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 4. 2017. doi: 10.1088/1361-6501/aa5c4f.
- [21] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, "3D printing of high-strength aluminium alloys," *Nature*, vol. 549, no. 7672, 2017, doi: 10.1038/nature23894.
- [22] Michael Mlitch-Hou, "Frustum Topology Optimization Integrated into Siemens NX for 3D Printing." Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.engineering.com/story/frustum-topology-optimization-integrated-into-siemens-nx-for-3d-printing>
- [23] T. M. Mower and M. J. Long, "Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials," *Materials Science and Engineering A*, vol. 651, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.10.068.
- [24] K. Rajkumari, P. Chandra, and P. Balaji, "Three-dimensional printing-a revolutionary technology," *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, vol. 12, no. 12. Journal of Clinical and Diagnostic Research, pp. 12–18, Dec. 01, 2018. doi: 10.7860/JCDR/2018/37752.12410.
- [25] P. K. Gokuldoss, S. Kolla, and J. Eckert, "Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines," *Materials*, vol. 10, no. 6. MDPI AG, 2017. doi: 10.3390/ma10060672.
- [26] M. R. Khosravani and T. Reinicke, "On the environmental impacts of 3D printing technology," *Appl Mater Today*, vol. 20, 2020, doi: 10.1016/j.apmt.2020.100689.
- [27] L. J. Tan, W. Zhu, and K. Zhou, "Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 43. 2020. doi: 10.1002/adfm.202003062.
- [28] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing," *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15. American Chemical Society, pp. 10212–10290, Aug. 09, 2017. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [29] J. C. Heigel, P. Michaleris, and E. W. Reutzel, "Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V," *Addit Manuf*, vol. 5, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2014.10.003.
- [30] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics," *Additive Manufacturing*, vol. 8. 2015. doi: 10.1016/j.addma.2015.07.001.
- [31] Z. Wang, T. A. Palmer, and A. M. Beese, "Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing," *Acta Mater*, vol. 110, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.
- [32] Y. Zhang *et al.*, "Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, no. 1. 2018. doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [33] R. P. Mudge and N. R. Wald, "Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair," *Welding Journal (Miami, Fla)*, vol. 86, no. 1, 2007.

- [34] M. S. Domack, K. M. B. Taminger, and M. Begley, "Metallurgical mechanisms controlling mechanical properties of aluminum alloy 2219 produced by electron beam freeform fabrication," in *Materials Science Forum*, 2006. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1291.
- [35] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polym Test*, vol. 69, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
- [36] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [37] S. Kumar, "Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach," *JOM*, vol. 55, no. 10, 2003, doi: 10.1007/s11837-003-0175-y.
- [38] J. P. Kruth, L. Froyen, J. van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, and B. Lauwers, "Selective laser melting of iron-based powder," in *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
- [39] Z. Liu, Q. Lei, and 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, no. 5, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.034.
- [40] C. de Kergariou, H. Saidani-Scott, A. Perriman, F. Scarpa, and A. le Duigou, "The influence of the humidity on the mechanical properties of 3D printed continuous flax fibre reinforced poly(lactic acid) composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 155, 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.106805.
- [41] fabWeaver, "Types of 3D Printing : FFF, Most Popular 3D Printer." Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://blog.fabweaver.com/3d-printing-method-fff-most-popular-3d-printer-0>
- [42] 3DSourced, "The 4 Types of FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar & Scara)," 3dsourced.com.
- [43] Y. Li, D. Shang, and Y. Liu, "Kinematic modeling and error analysis of Delta robot considering parallelism error," *Int J Adv Robot Syst*, vol. 16, no. 5, 2019, doi: 10.1177/1729881419878927.
- [44] O. v. Zakharov, K. G. Pugin, and T. N. Ivanova, "Modeling and Analysis of Delta Kinematics FDM Printer," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2182/1/012069.
- [45] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, and P. Morel, "Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders," *Mater Des*, vol. 100, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.097.
- [46] C. Wu, C. Dai, G. Fang, Y. J. Liu, and C. C. L. Wang, "RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989140.
- [47] Tobias Hullette, "Direct Drive vs Bowden Extruder: The Differences." Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>
- [48] 3DJAKE, "Direct-drive extruder vs. Bowden extruder." Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.3djake.com/info/guide/direct-drive-extruder-vs-bowden-extruder>
- [49] Lauro Fava, "PLA | O filamento mais usado em impressão 3D." Accessed: Dec. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.filipeflop.com/blog/pla-o-filamento-mais-usado-em-impressao-3d/>

- [50] 3DLAB, "Afinal, como funciona uma impressora 3D FDM?" Accessed: Dec. 20, 2022. [Online]. Available: <https://3dlab.com.br/afinal-como-funciona-uma-impressora-3d-fdm/>
- [51] Lauren Fuentes, "3D Printer Stepper Motor: All You Need to Know." Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/3d-printer-stepper-motor-what-to-consider-and-which-to-choose-2/>
- [52] WIKIPEDIA, "Stepper motor." Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
- [53] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Mater Des*, vol. 83, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- [54] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [55] V. Mazzanti, L. Malagutti, and F. Mollica, "FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties," *Polymers*, vol. 11, no. 7. 2019. doi: 10.3390/polym11071094.
- [56] M. A. Caminero, J. M. Chacón, I. García-Moreno, and J. M. Reverte, "Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," *Polym Test*, vol. 68, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.04.038.
- [57] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Adv Manuf*, vol. 3, no. 1, pp. 42–53, Mar. 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
- [58] R. Anitha, S. Arunachalam, and P. Radhakrishnan, "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling," in *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3.
- [59] S. Wahab, A. Wagiman, and M. Ibrahim, "Development of wood-based composites material for 3D printing process," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.315.987.
- [60] F. Zhang *et al.*, "3D printing technologies for electrochemical energy storage," *Nano Energy*, vol. 40. 2017. doi: 10.1016/j.nanoen.2017.08.037.
- [61] K. Bryll, E. Piesowicz, P. Szymański, W. Slaczka, and M. Pijanowski, "Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing Technology," in *MATEC Web of Conferences*, 2018. doi: 10.1051/mateconf/201823702006.
- [62] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, and N. Jayanth, "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 1. 2017. doi: 10.1080/17452759.2016.1274490.
- [63] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 110. 2017. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [64] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, "Material issues in additive manufacturing: A review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25. 2017. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006.
- [65] I. J. Solomon, P. Sevel, and J. Gunasekaran, "A review on the various processing parameters in FDM," in *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.
- [66] M. S. Alsoufi, M. W. Alhazmi, D. K. Suker, M. Yunus, and R. O. Malibari, "From 3D models to FDM 3D prints: Experimental study of chemical treatment to reduce stairs-stepping of semi-sphere profile," *AIMS Mater Sci*, vol. 6, no. 6, 2019, doi: 10.3934/MATERSCI.2019.6.1086.

- [67] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "Influence of 3D printing FDM process parameters on tensile property of ultem 9085," in *Procedia Manufacturing*, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.047.
- [68] S. Hwang, E. I. Reyes, K. sik Moon, R. C. Rumpf, and N. S. Kim, "Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process," *J Electron Mater*, vol. 44, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3425-6.
- [69] G. H. Loh, E. Pei, J. Gonzalez-Gutierrez, and M. Monzón, "An overview of material extrusion troubleshooting," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 14. 2020. doi: 10.3390/app10144776.
- [70] M. Spoerk, J. Gonzalez-Gutierrez, J. Sapkota, S. Schuschnigg, and C. Holzer, "Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, Jan. 2018, doi: 10.1080/14658011.2017.1399531.
- [71] M. Spoerk *et al.*, "Optimisation of the adhesion of polypropylene-based materials during extrusion-based additive manufacturing," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 5, 2018, doi: 10.3390/polym10050490.
- [72] Alastair Jennings, "3D Printing Troubleshooting: All Problems & Solutions." Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>
- [73] Acelera3D, "Guia de Erros Comuns de Impressão 3D." Accessed: Jan. 09, 2023. [Online]. Available: <https://acelera3d.com/erros-3d/>
- [74] R. Patel, C. Desai, S. Kushwah, and M. H. Mangrola, "A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials," *Mater Today Proc*, vol. 60, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.385.
- [75] J. Beniak, P. Krizan, and M. Matus, "Conductive material properties for fdm additive manufacturing," *MM Science Journal*, vol. 2020, no. March, 2020, doi: 10.17973/MMSJ.2020_03_2019135.
- [76] bitfab, "Impressão 3D em metal na tua própria impressora." Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://bitfab.io/pt-pt/blog/impressao-3d-metal/>
- [77] K. I. Ismail, T. C. Yap, and R. Ahmed, "3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 4659, Nov. 2022, doi: 10.3390/polym14214659.
- [78] W. Ahmed, F. Alnajjar, E. Zanelidin, A. H. Al-Marzouqi, M. Gochoo, and S. Khalid, "Implementing FDM 3D printing strategies using natural fibers to produce biomass composite," *Materials*, vol. 13, no. 18. 2020. doi: 10.3390/ma13184065.
- [79] Marlin, "G-code Index." Accessed: Aug. 22, 2023. [Online]. Available: <https://marlinfw.org/meta/gcode/>
- [80] Lucas Carolo, "3D Printer G-code Commands: Main List & Quick Tutorial," 23.
- [81] LinuxCNC, "G Code Overview." Accessed: Aug. 22, 2023. [Online]. Available: <https://linuxcnc.org/docs/html/gcode/overview.html>
- [82] H. T. Idogava, D. M. S. do Couto, L. Santana, J. L. Alves, and Z. C. Silveira, "AltPrint: new filling and slicing process planning based on deposited material with geometry variation," *Rapid Prototyp J*, vol. 29, no. 8, pp. 1702–1714, Aug. 2023, doi: 10.1108/RPJ-06-2022-0208.
- [83] Y. Jin, J. Du, Y. He, and G. Fu, "Modeling and process planning for curved layer fused deposition," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 1–4, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9743-5.
- [84] J. B. Khurana, S. Dinda, and T. W. Simpson, "ACTIVE - Z PRINTING: A NEW APPROACH TO INCREASING 3D PRINTED PART STRENGTH," 2017.

- [85] D. Chakraborty, B. Aneesh Reddy, and A. Roy Choudhury, "Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling," *CAD Computer Aided Design*, vol. 40, no. 2, 2008, doi: 10.1016/j.cad.2007.10.014.
- [86] B. Huang and S. Singamneni, "A mixed-layer approach combining both flat and curved layer slicing for fused deposition modelling," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 229, no. 12, pp. 2238–2249, Dec. 2015, doi: 10.1177/0954405414551076.
- [87] I. Mitropoulou, M. Bernhard, and B. Dillenburger, "Print Paths Key-framing: Design for non-planar layered robotic FDM printing," in *Proceedings - SCF 2020: ACM Symposium on Computational Fabrication*, Association for Computing Machinery, Inc, Nov. 2020. doi: 10.1145/3424630.3425408.
- [88] Danie Conradie, "3D PRINTING 90° OVERHANGS WITH NON-PLANAR SLICING." Accessed: Jan. 11, 2023. [Online]. Available: <https://hackaday.com/tag/non-planar-3d-printing/>
- [89] Carlos Martins, "Impressão 3D não-planar melhora acabamentos." Accessed: Jan. 11, 2023. [Online]. Available: <https://abertoatedemadrugada.com/2019/08/impressao-3d-nao-planar-melhora.html>
- [90] M. K. Micali and D. Dornfeld, "FULLY THREE-DIMENSIONAL TOOLPATH GENERATION FOR POINT-BASED ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS," 2016.
- [91] Worten, "Impressora 3D CREALITY Ender-3 V2." Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: https://www.worten.pt/produtos/impressora-3d-creality-ender-3-v2-mrkean-6902601873318?gclid=CjwKCAjwh8mlBhB_EiwAsztdBKbvrhqEIV6UOErvHvPkiNy5SYZNd27I-TWnF2zfX8K2FRmwOqIPmMhoCuY8QAvD_BwE
- [92] SUNLU, "{Over 6KG Bundle Sales} 1.75mm SUNLU PLA Meta (Macaron Colors) 3D Printer Filament 1KG/Roll." Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.sunlu.com/collections/pla-meta/products/over-6kg-bundle-sales-1-75mm-sunlu-pla-metamacaron-colors-3d-printer-filament-1kg-roll?variant=45484547014938>
- [93] Albin Kiland, "Heat tower (190-240) 5mm steps." Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2223651>
- [94] Creality, "Ender-3S1(Plus), Ender-3S1 Pro: PLA/TPU/ABS Filament Setting." Accessed: Aug. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.creality3dofficial.com/fr/blogs/unboxing-product-comparison/best-cura-settings-&-profile-for-ender-3-s1>

Anexos

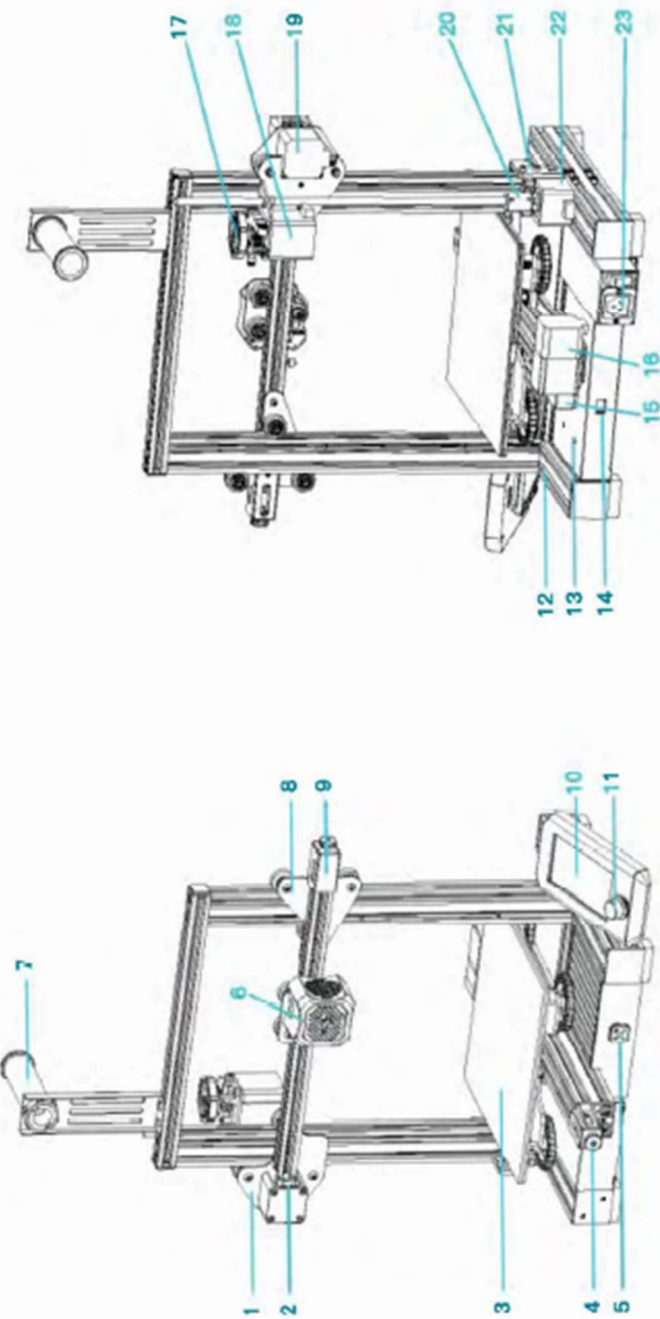
8. ANEXOS

8.1. ANEXO A – Ficha técnica da impressora 3D *Ender 3 V2*



Product introduction

设备简介



- 1 XE-axis kit XE轴组件
- 2 X-axis limit switch X轴限位开关
- 3 Print platform 打印平台
- 4 Y-axis tensioner Y轴张紧器
- 5 Tool box 工具箱
- 6 Extruded kit 挤出组件
- 7 Material rack and spool holder 料架及料管筒
- 8 Z-axis passive block Z轴被动块

- 9 X-axis tensioner X轴张紧器
- 10 Screen 显示器
- 11 Knob switch 旋钮开关
- 12 Machine base 机基底座
- 13 Power supply 电源
- 14 Voltage regulator 电压调节箱
- 15 Y-axis limit switch Y轴限位开关
- 16 Y-axis motor Y轴电机

- 17 Indication knob 指示旋钮
- 18 E-axis motor E轴电机
- 19 X-axis motor X轴电机
- 20 Coupling 联轴器
- 21 Z-axis limit switch Z轴限位开关
- 22 Z-axis motor Z轴电机
- 23 Power switch and socket 电源开关及插座

Equipment parameters

设备参数

Basic Parameters 基本参数	
Model 型号	Ender-3 V2
Print size 成型尺寸	220*220*150mm
Forming technology 成型技术	FDM
Number of nozzle 喷头数量	1
Layer thickness 打印层厚	0.1mm-0.4mm
Nozzle diameter 喷嘴直径	Standard 标配 0.4mm
XY axis precision 精度	±0.1mm
Filament 打印材料	Φ1.75mm PLA
File format 支持格式	STL/OBJ/AMF
Working mode 打印方式	Memory card offline printing or online printing 存储卡脱机打印或联机打印
Compatible slicing software 可兼容切片软件	
3D Creator Slicer, Repetier-Host, Cura, Simplify3D 创想三维切片软件、Repetier-Host、Cura、Simplify3D	
Power specification 电源规格	Input 输入: AC 115-230V 50/60Hz Output 输出: DC 24V
Total power 总功率	350W
Hotbed temperature 热床温度	≤100°C
Nozzle temperature 喷嘴温度	≤250°C
Resume printing function 断电续打	Yes 有
Filament sensor 断料检测	No 不支持
Dual z-axis screws 双Z轴丝杆	No 不支持
Language switch 语言切换	English 中文
Computer operating system 电脑操作系统	
Windows XP/Vista/7/10/MAC/Linux	
Print speed 打印速度	≤180mm/s, 30-60mm/s normally ≤180mm/s, 正常为30-60mm/s

8.2. Anexo B – Ficha técnica do filamento



Description

Model : PLA/PLA+

Diameter Format: 1.75mm

Print Temp.: 200-210°C(PLA), 205-215°C(PLA+)

Tolerance: $\pm 0.02\text{mm}$

Print Speed: 50-100mm/s

Platform Temp: Depends on the platform: No need or 50-65°C

N.W.: 1kg

G.W.: 1.3kg

Packing Size: 209*209*73mm

Length: 330m

Tensile Strength: 6-11kgf

Melt Flow Rate: 7-9g/10min(190°C,2.16kg)

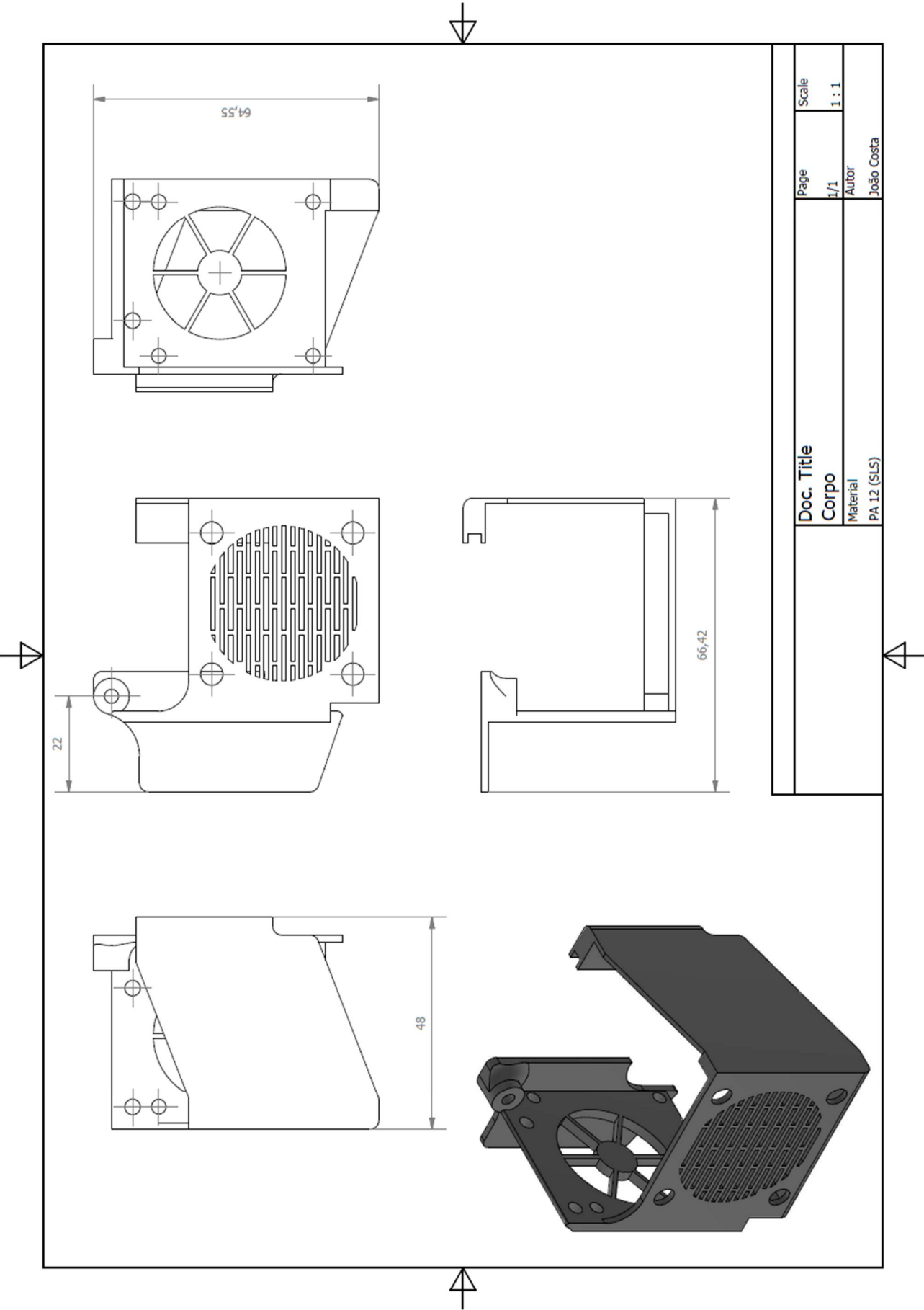
Colors: 32

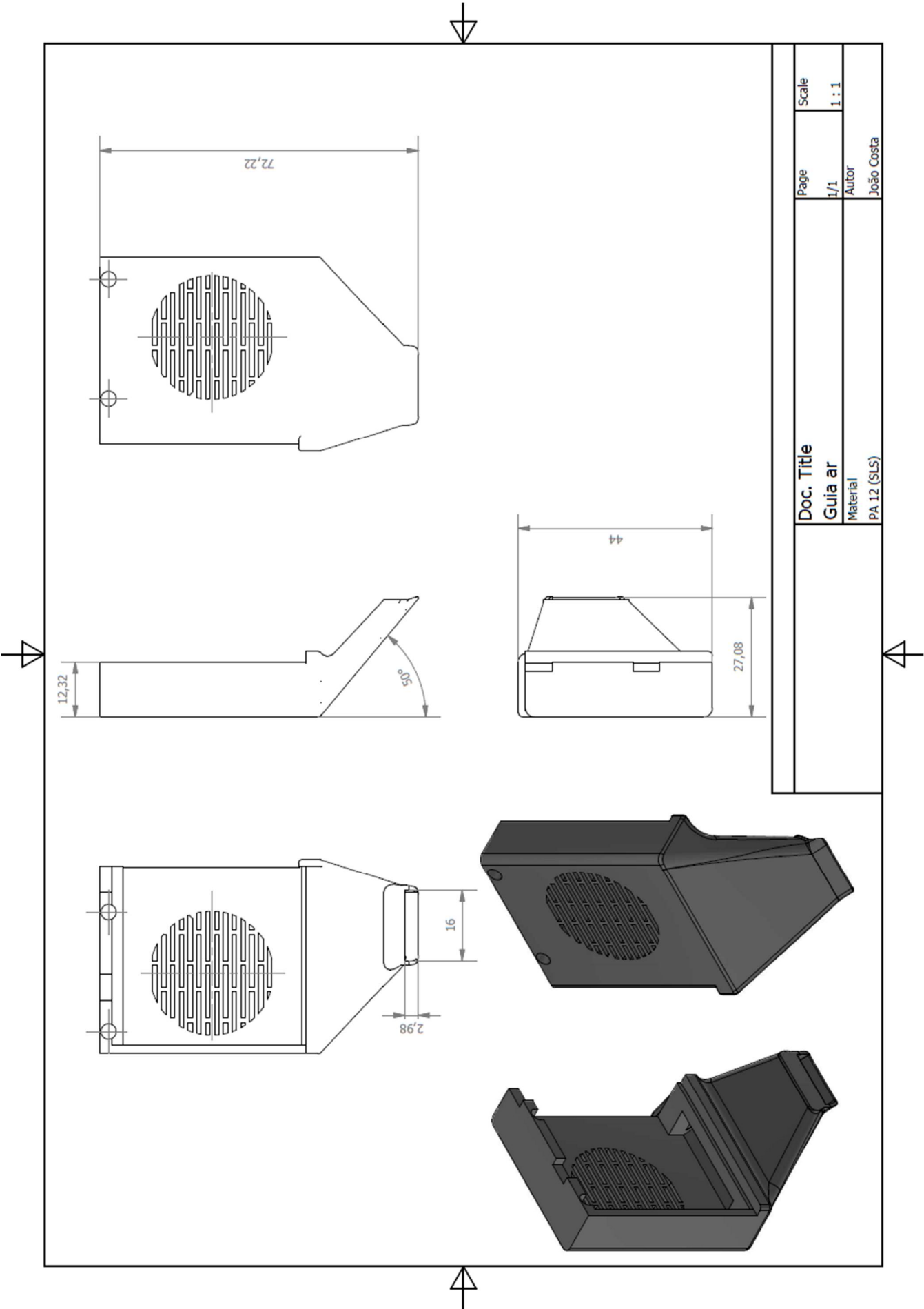
Certificate: RoHS, Reach-CN

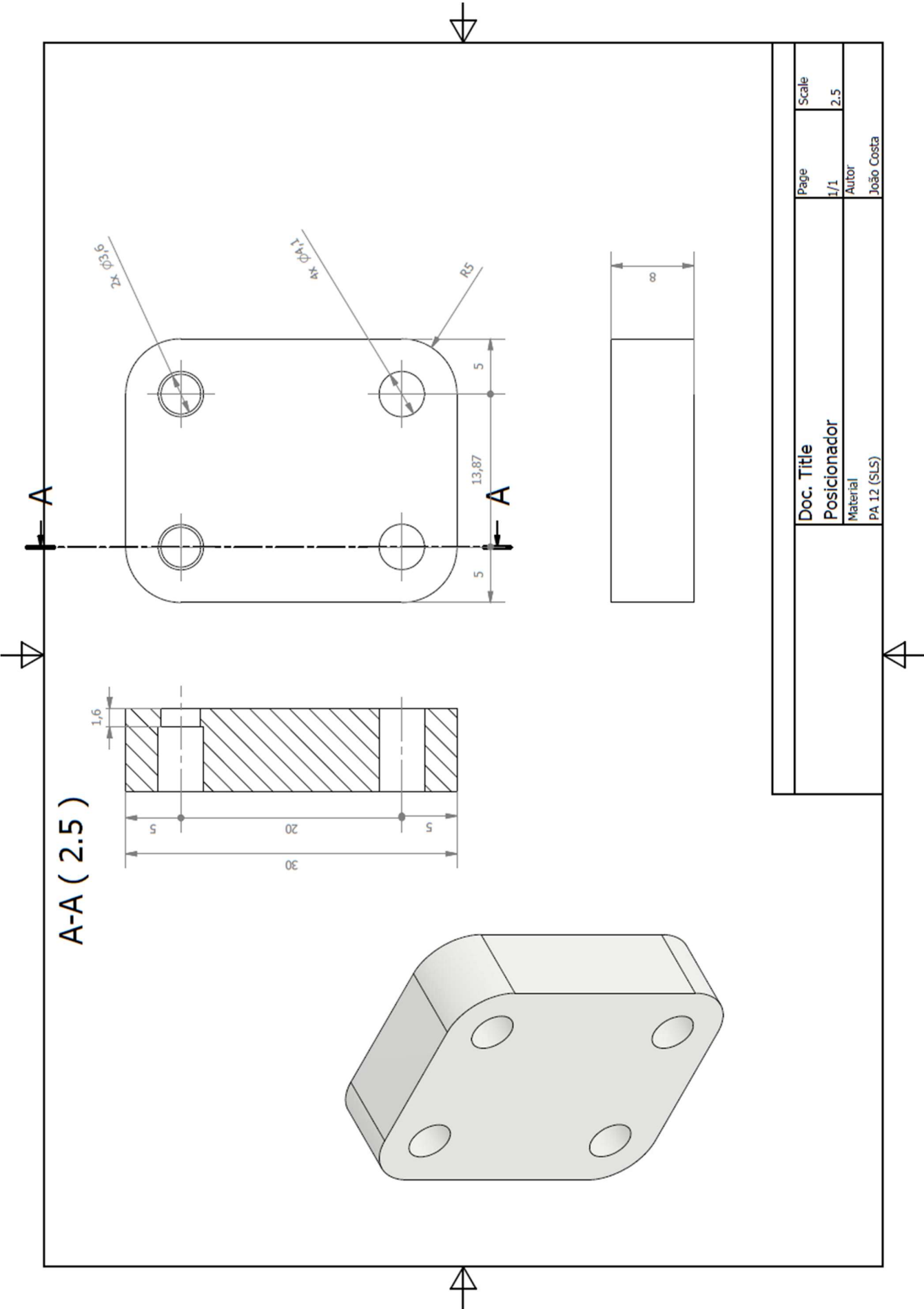
Compatible for SUNLU/Creality/Anycubic. Fit Most of FDM Printer

Website de obtenção da informação sobre o filamento: <https://www.sunlu.com/products/pla-pla-plus-3d-filaments-1kg-2-2lbs-fit-most-of-fdm-printerpla-pla-plus-3d-filaments-1kg-2-2lbs-fit-most-of-fdm-printer?variant=44864865009946>

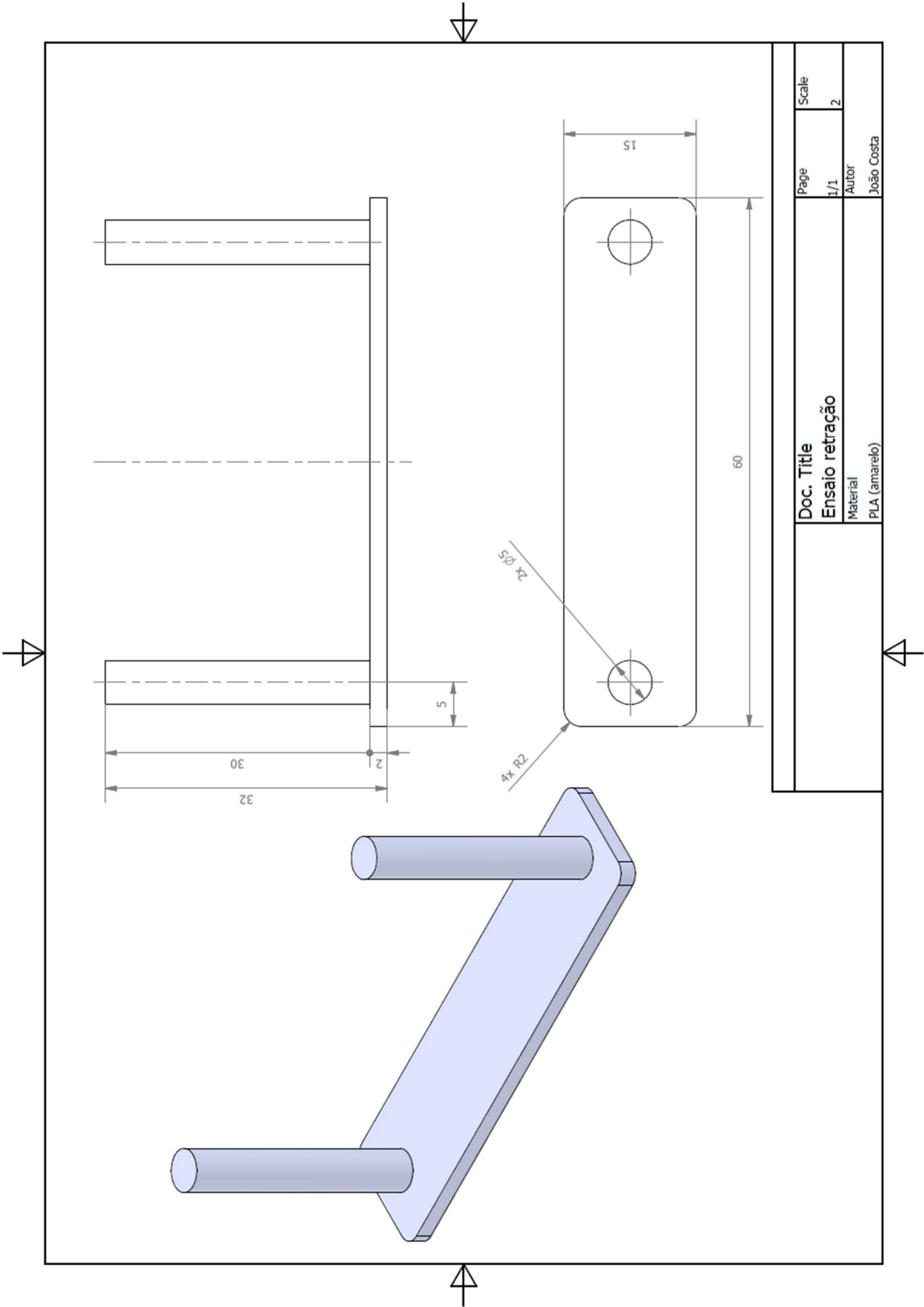
8.3. Anexo C – Desenhos Técnicos

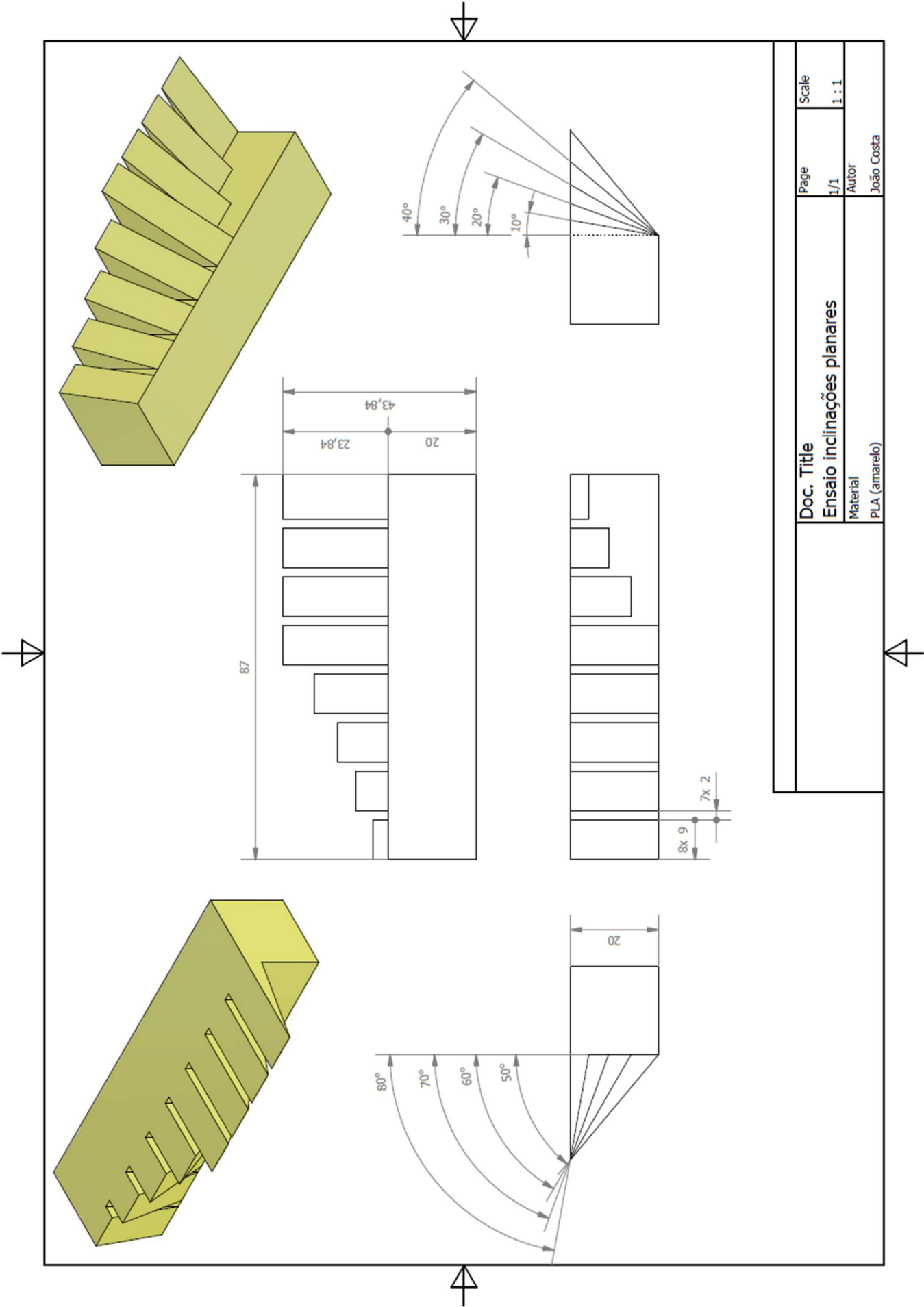


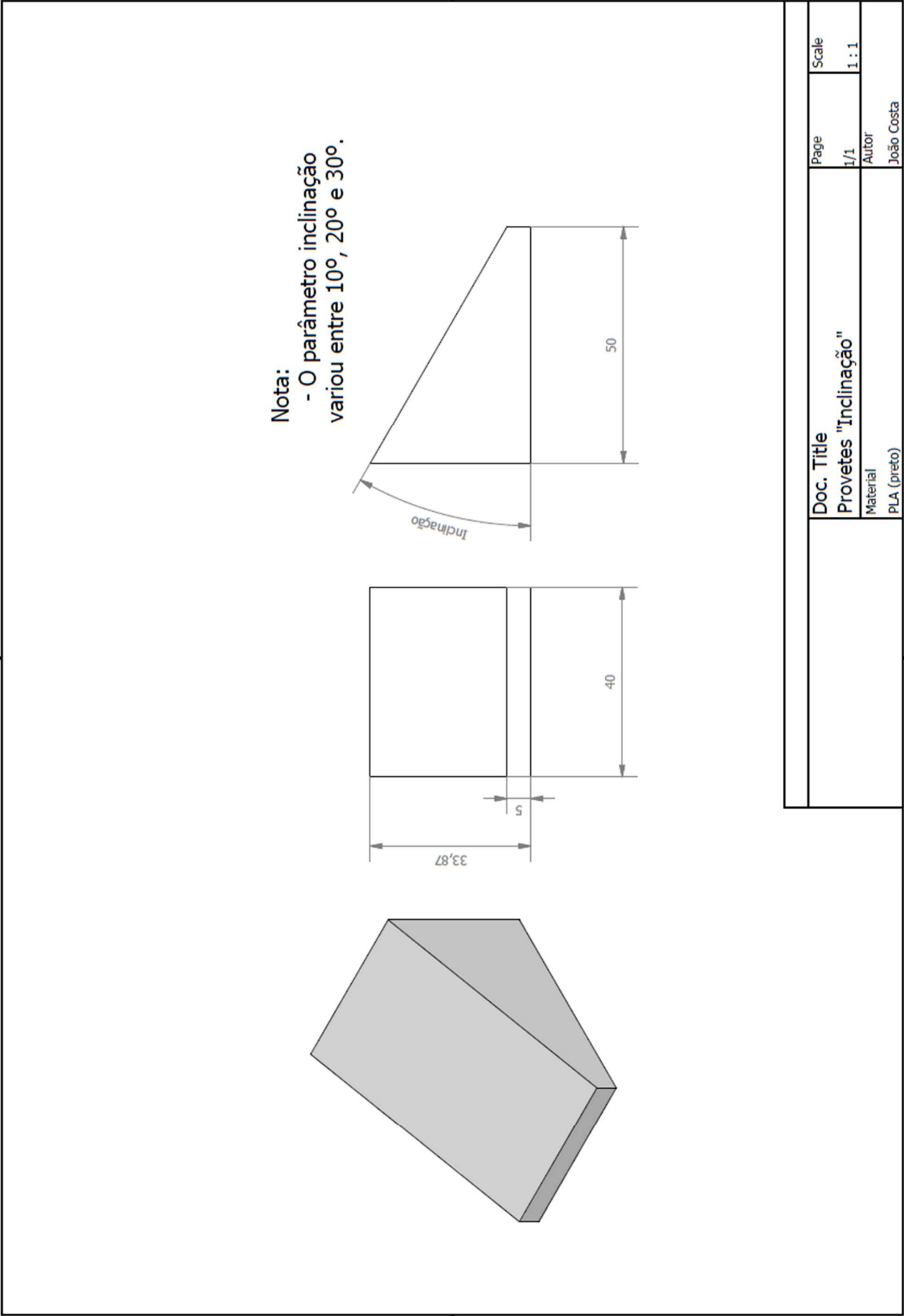


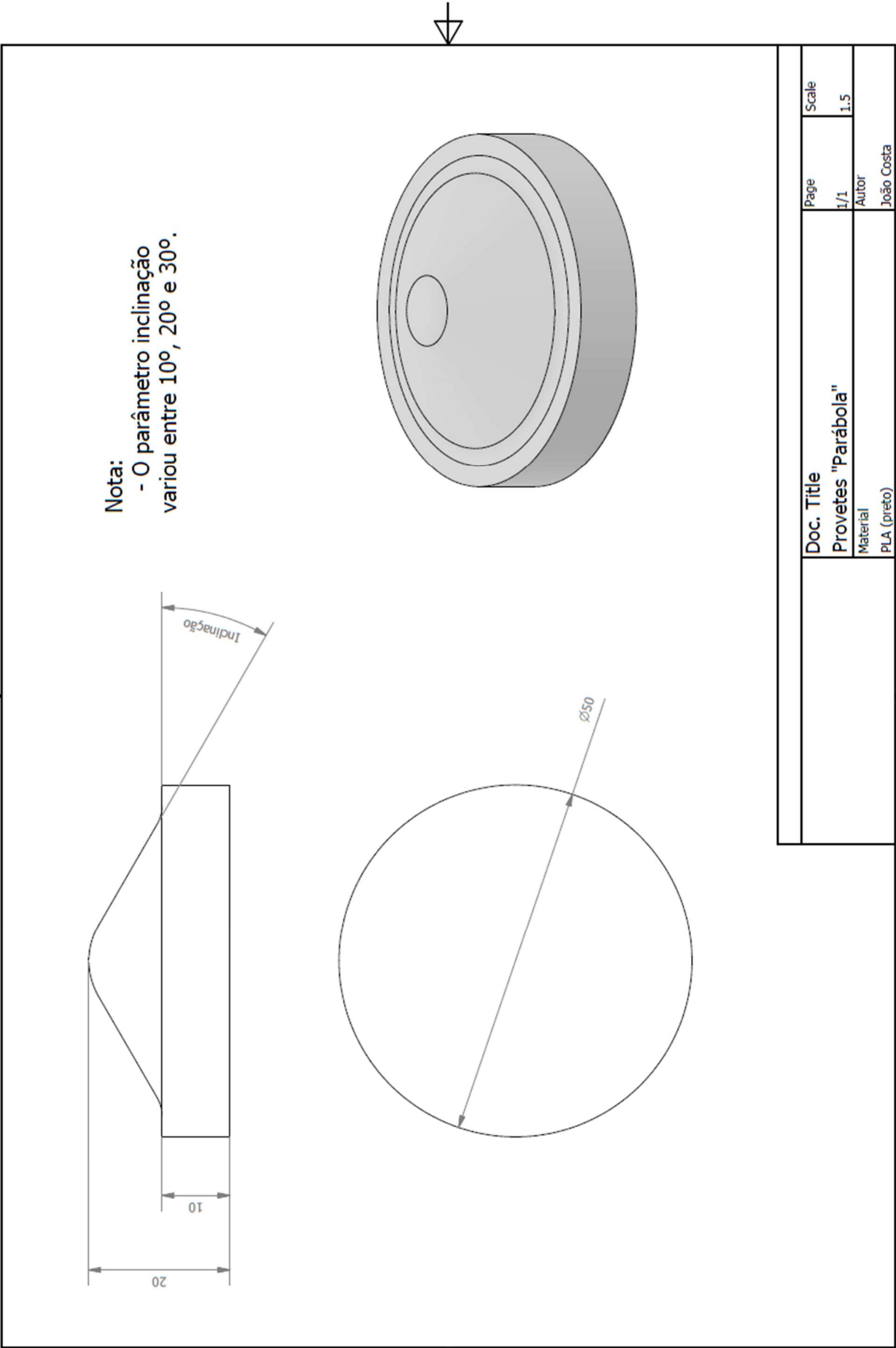


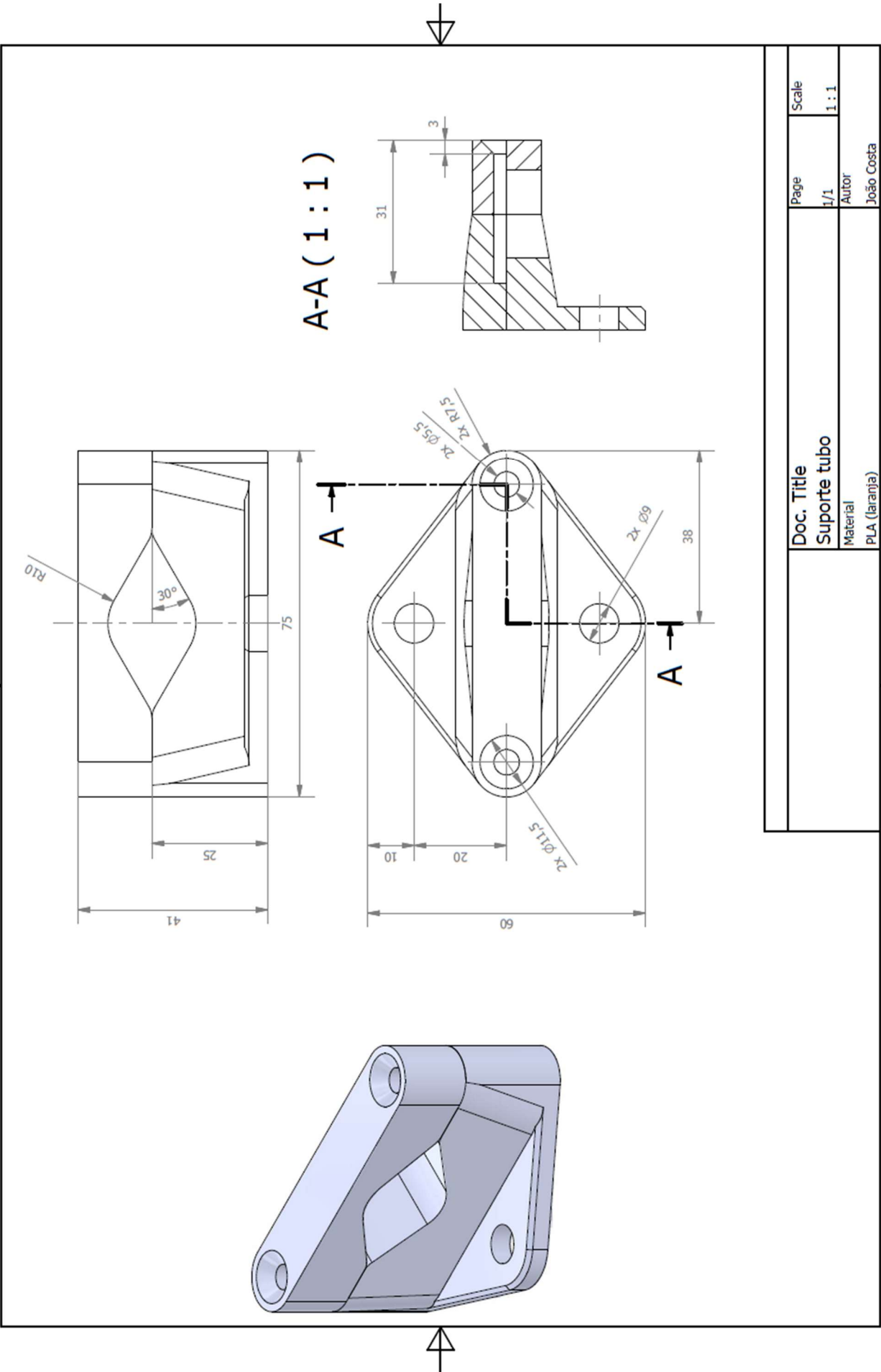
Doc. Title		Page	Scale
Posicionador		1/1	2.5
Material		Autor	
PA 12 (SLS)		João Costa	

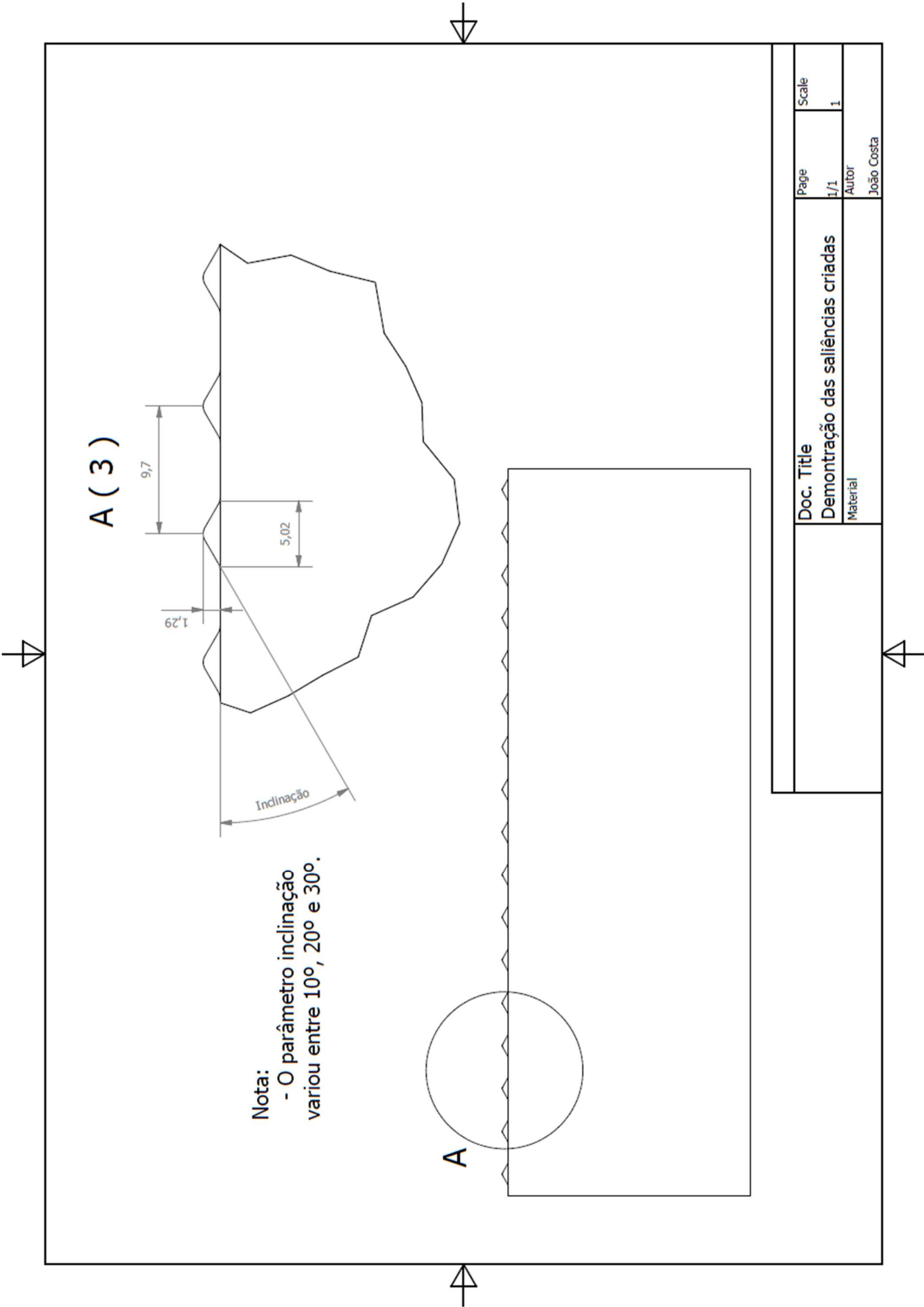


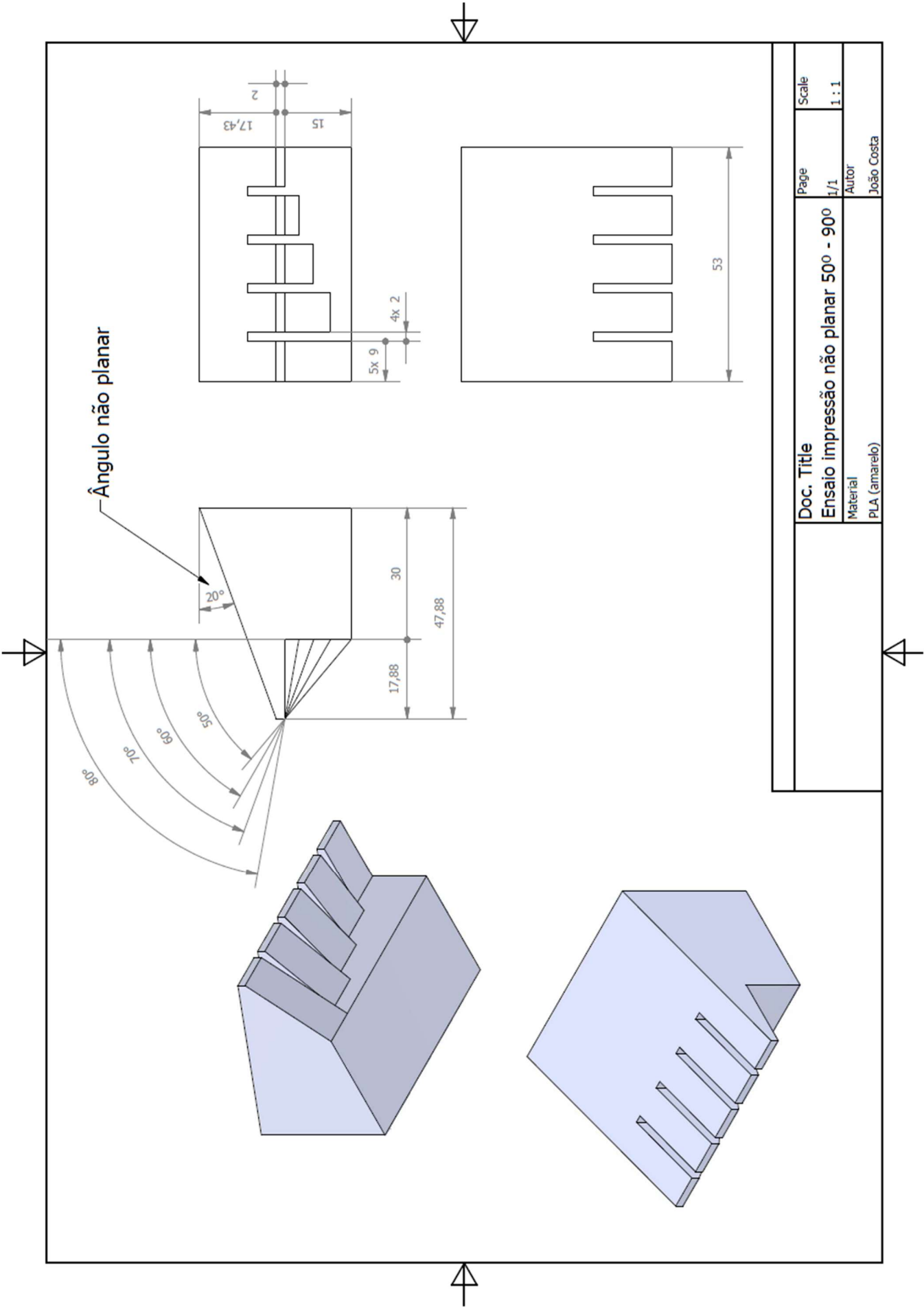


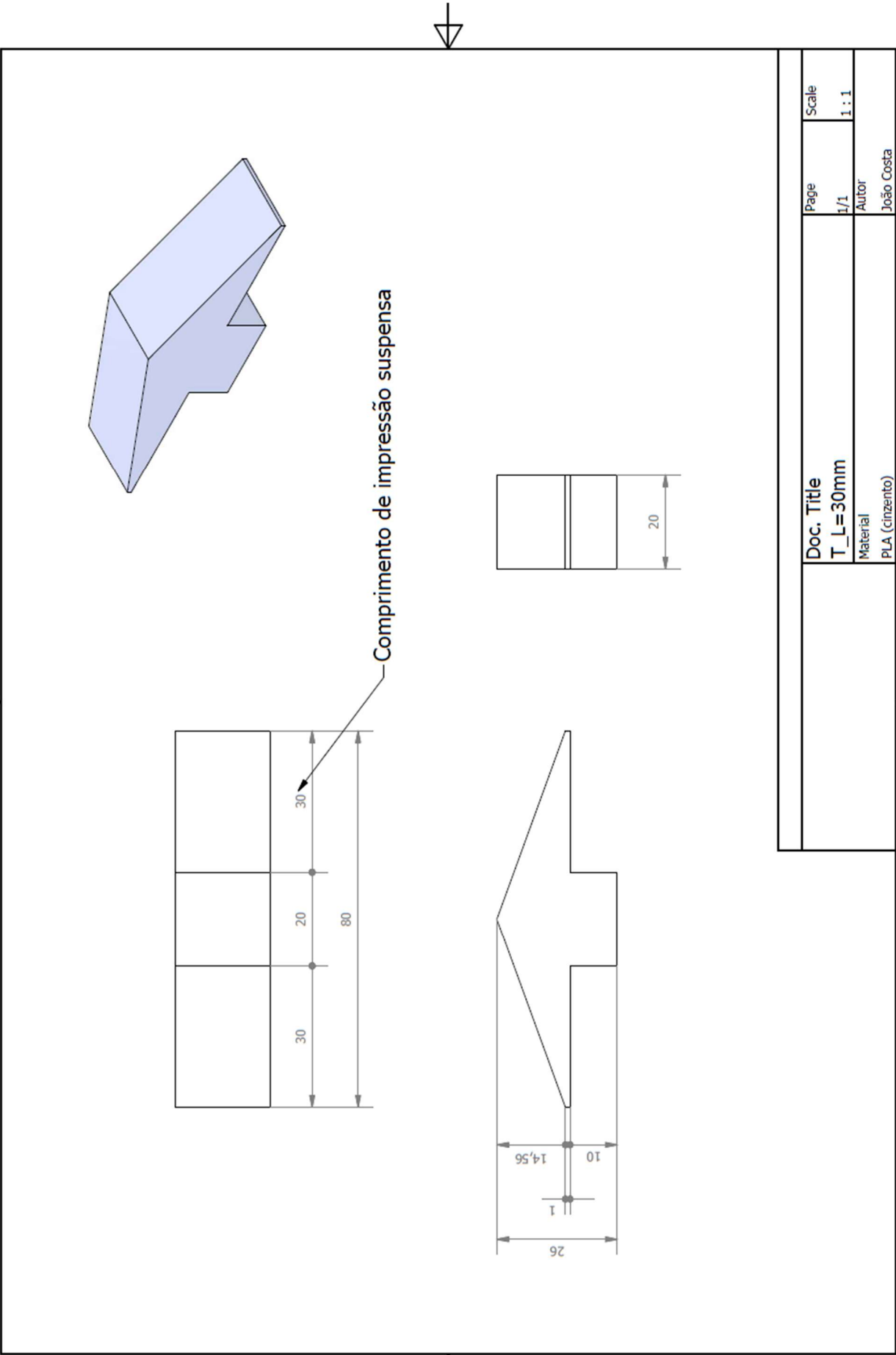












8.4. Anexo D – Imagens dos provetes “Inclinação” e “Raio”

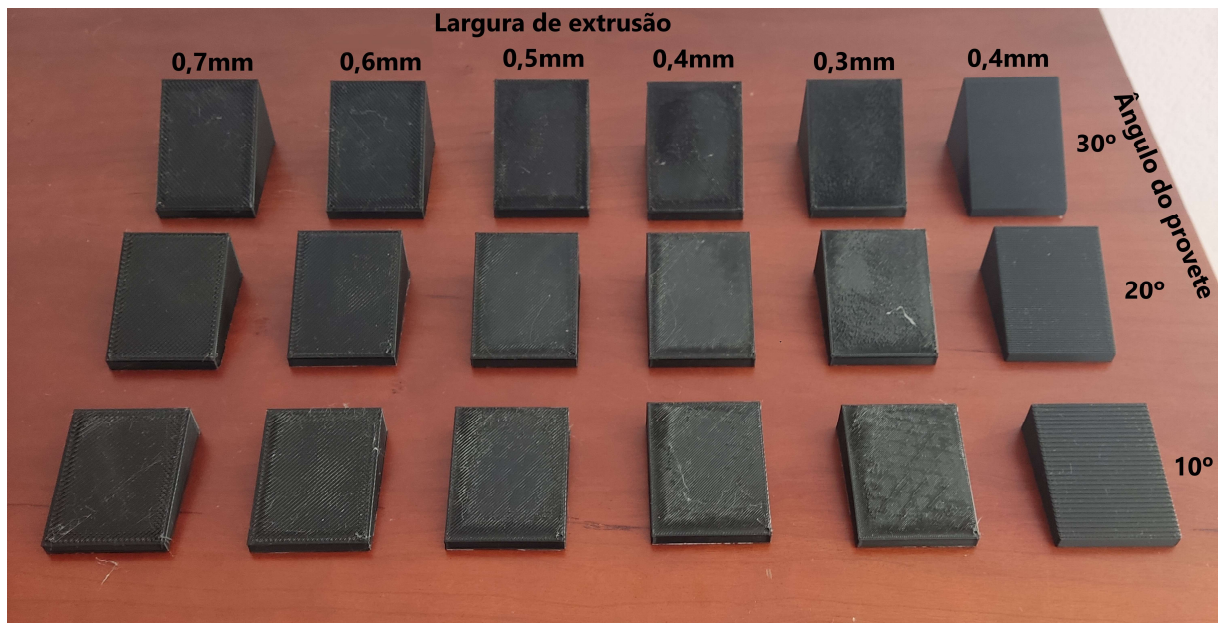


Figura 148 - Imagem global de todos os provetes "Inclinação" com as respectivas especificações.



Figura 149 - Imagem global de todos os provetes "Parábola" com as respectivas especificações.

8.4.1. Imagens dos provetes “Inclinação” (com padrão retilíneo)



Figura 150 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,3 mm de largura de extrusão.

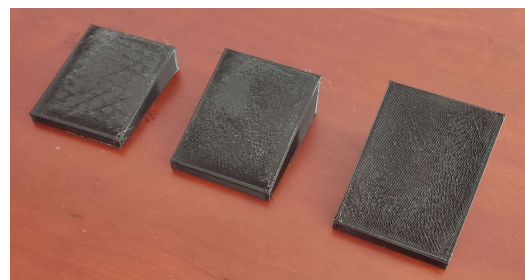


Figura 151 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,3 mm de largura de extrusão.

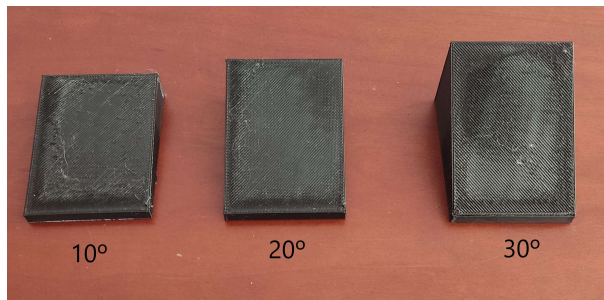


Figura 152 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,4 mm de largura de extrusão.

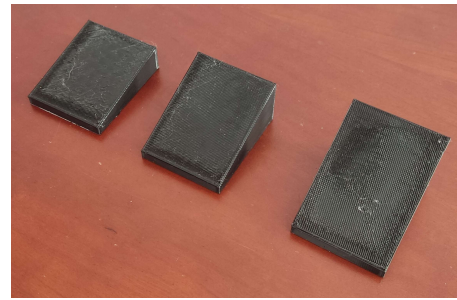


Figura 153 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,4 mm de largura de extrusão.



Figura 154 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,5 mm de largura de extrusão.

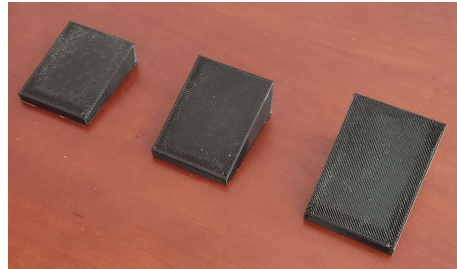


Figura 155 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,5 mm de largura de extrusão.

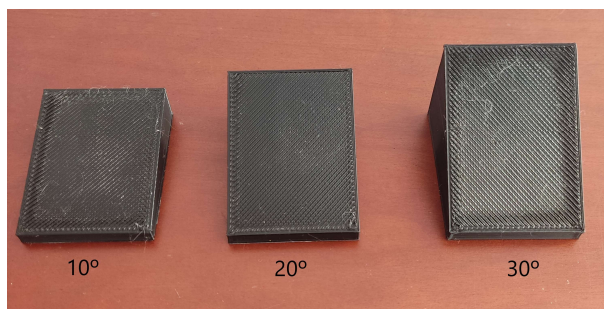


Figura 156 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,6 mm de largura de extrusão.

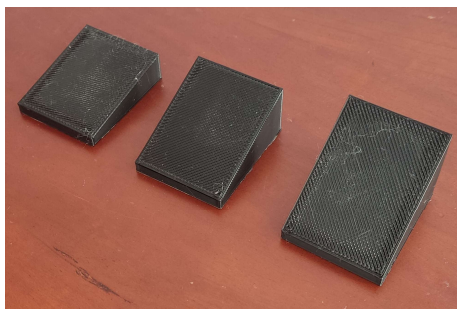


Figura 157 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,6 mm de largura de extrusão.

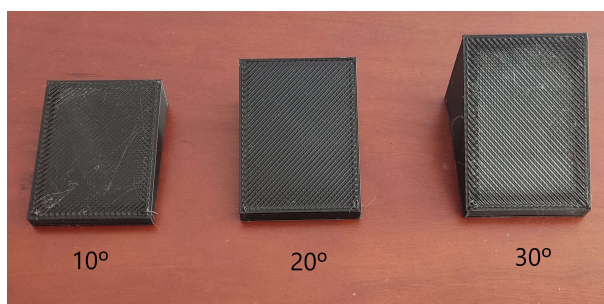


Figura 158 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com 0,7 mm de largura de extrusão.



Figura 159 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com 0,7 mm de largura de extrusão.

8.4.2. Imagens dos provetes "Inclinação" (com padrão concêntrico)



Figura 160 - Vista de topo dos provetes "Inclinação" com padrão concêntrico.

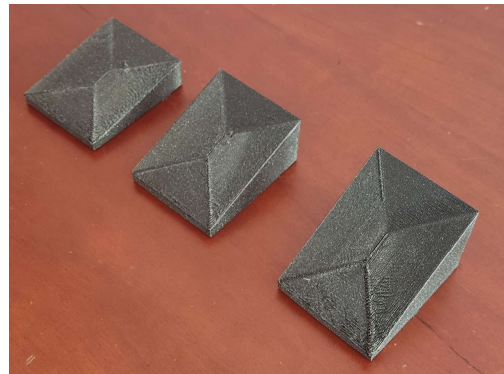


Figura 161 - Vista em perspectiva dos provetes "Inclinação" com padrão concêntrico.

8.4.3. Imagens dos provetes "Parábola"



Figura 162 - Vista de topo dos provetes "Parábola" planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.



Figura 163 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.

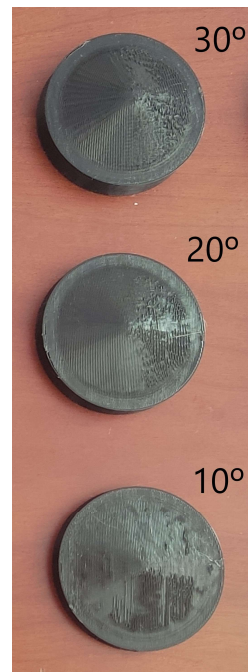


Figura 164 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,3 mm de largura de extrusão.



Figura 165 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,3 mm de largura de extrusão.

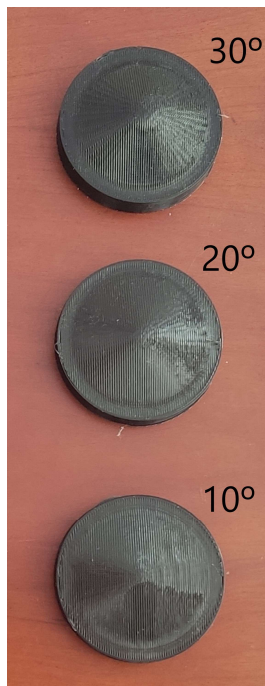


Figura 166 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.



Figura 167 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,4 mm de largura de extrusão.

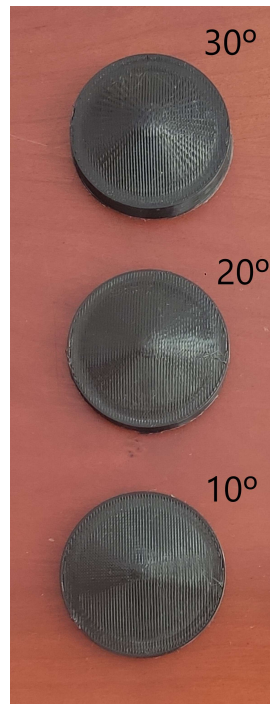


Figura 168 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,5 mm de largura de extrusão.



Figura 169 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,5 mm de largura de extrusão.

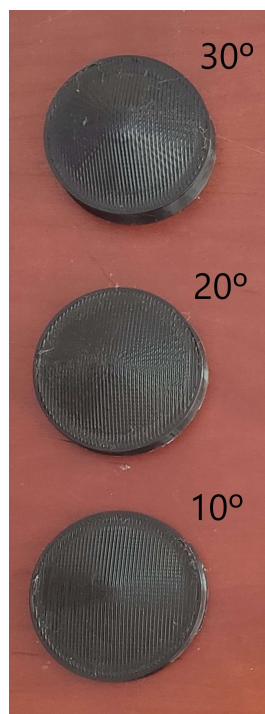


Figura 170 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,6 mm de largura de extrusão.



Figura 171 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,6 mm de largura de extrusão.

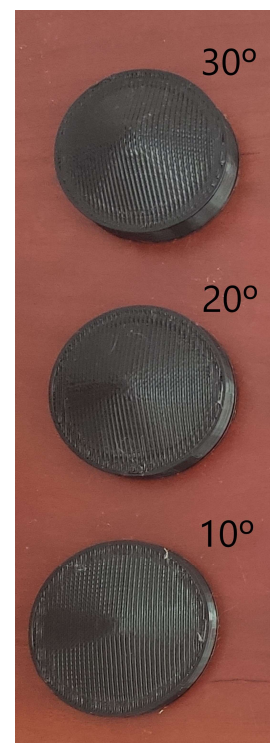


Figura 172 - Vista de topo dos provetes "Parábola" não planares, com 0,7 mm de largura de extrusão.



Figura 173 - Vista em perspectiva dos provetes "Parábola" não planares, com 0,7 mm de largura de extrusão.

8.4.4. Características dos provetes “Inclinação” (otimização de parâmetros)

Após a impressão e caracterização dos diversos provetes impressos procedeu-se à análise específica dos provetes para larguras de extrusão de 0,4 a 0,6 mm, visto serem os valores que apresentaram melhores resultados e possibilidade de melhoria. Nas tabelas seguintes, podemos observar os parâmetros de impressão de cada provete testado, bem como a correspondente imagem os provetes. Os provetes serão apresentados por ordem de inclinação crescente, sendo que á esquerda encontram-se os de 10°, no meio os de 20° e na direita os de 30°.

Tabela 21 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 1.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,5 mm
Velocidade do enchimento sólido	20 mm/s
Sobreposição	10%
Multiplicador de extrusão	1,00



Figura 174 - Vista de topo dos provetes do teste 1.



Figura 175 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 1.

Nestes provetes verificou-se uma ligeira ocorrência da extrusão de material em excesso originando uma ligeira rugosidade nos provetes, com maior impacto no provete de inclinação de 30°.

Tabela 22 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 2.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,5 mm
Velocidade do enchimento sólido	30 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	1,00



Figura 176 - Vista de topo dos provetes do teste 2.

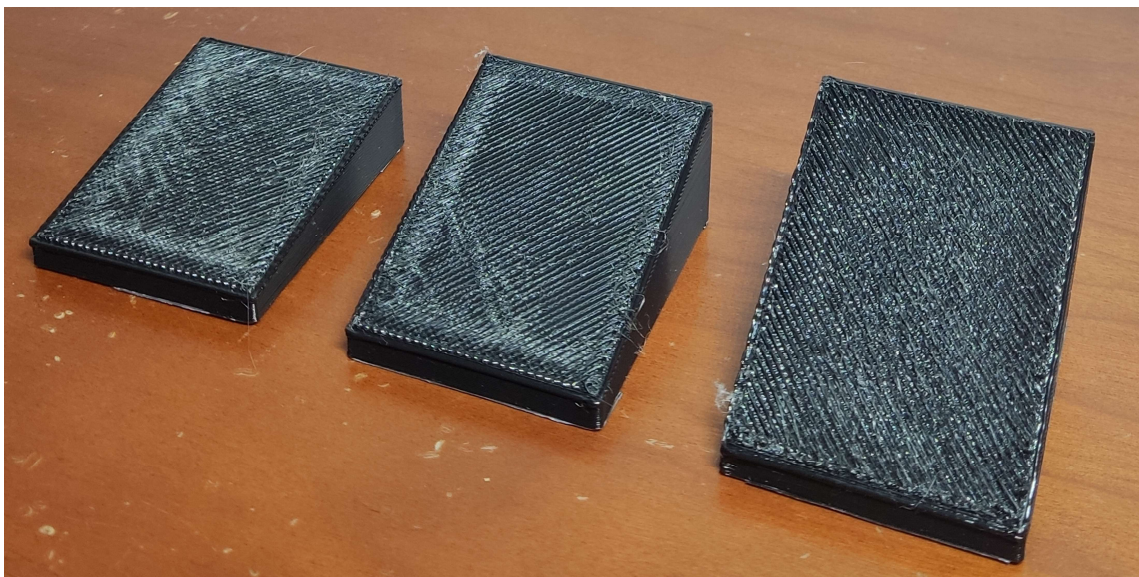


Figura 177 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 2.

Os provetes impressos no teste 2 apresentaram o resultado mais fraco de todos os testes realizado apresentando material em excesso por toda a superfície de todos os provetes.

Tabela 23 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 3.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,55 mm
Velocidade do enchimento sólido	20 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,90



Figura 178 - Vista de topo dos provetes do teste 3.



Figura 179 - Vista de topo dos provetes do teste 3.

Relativamente aos provetes do teste 3, observou-se que todos os provetes possuíam uma boa qualidade superficial, no entanto, é de salientar que o provete com inclinação de 10° possuía uma qualidade muito boa. Apesar de terem uma boa qualidade os provetes de inclinação 20° e 30° demonstraram um ligeiro excesso de material no contacto entre o preenchimento sólido e os perímetros.

Tabela 24 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 4.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,55 mm
Velocidade do enchimento sólido	20 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,80



Figura 180 - Vista de topo dos provetes do teste 4.

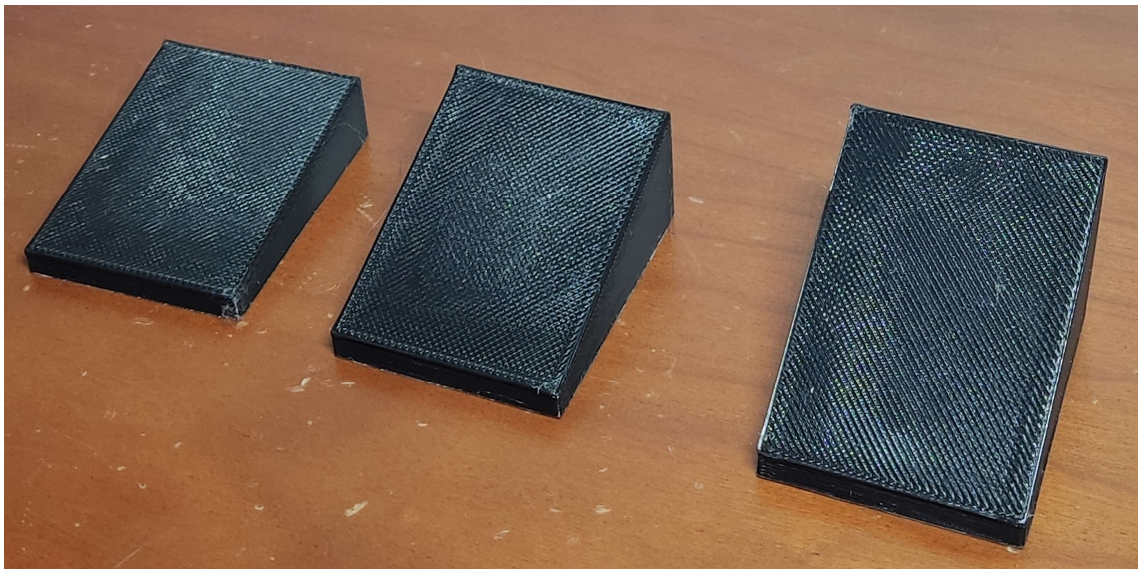


Figura 181 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 4.

Nos provetes do teste número 4 foi visualizada uma melhoria na qualidade superficial dos provetes ainda que as suas faces tenham ficado ligeiramente rugosas.

Tabela 25 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 5.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,55 mm
Velocidade do enchimento sólido	30 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,80



Figura 182 - Vista de topo dos provetes do teste 5.

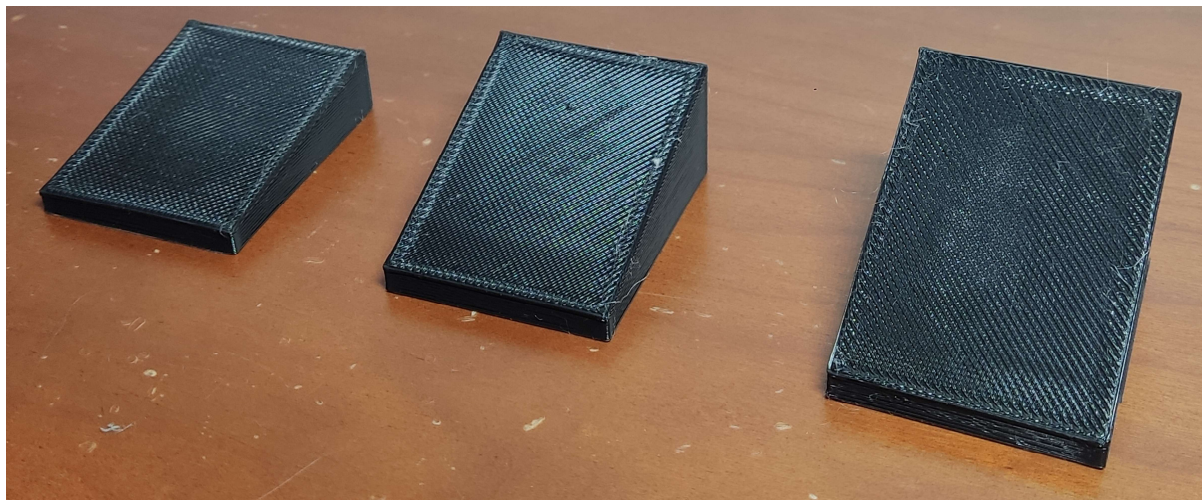


Figura 183 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 5.

As superfícies dos provetes do teste 5 foram dos melhores resultados obtidos num total de 8 teste com parâmetros diferenciados. Todas as faces das inclinações apresentaram uma qualidade superficial muito boa e uniforme, ainda que pudesse ser observada uma, muito ligeira, falta de material nos caminhos de impressão.

Tabela 26 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 6.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,5 mm
Velocidade do enchimento sólido	10 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,90



Figura 184 - Vista de topo dos provetes do teste 6.

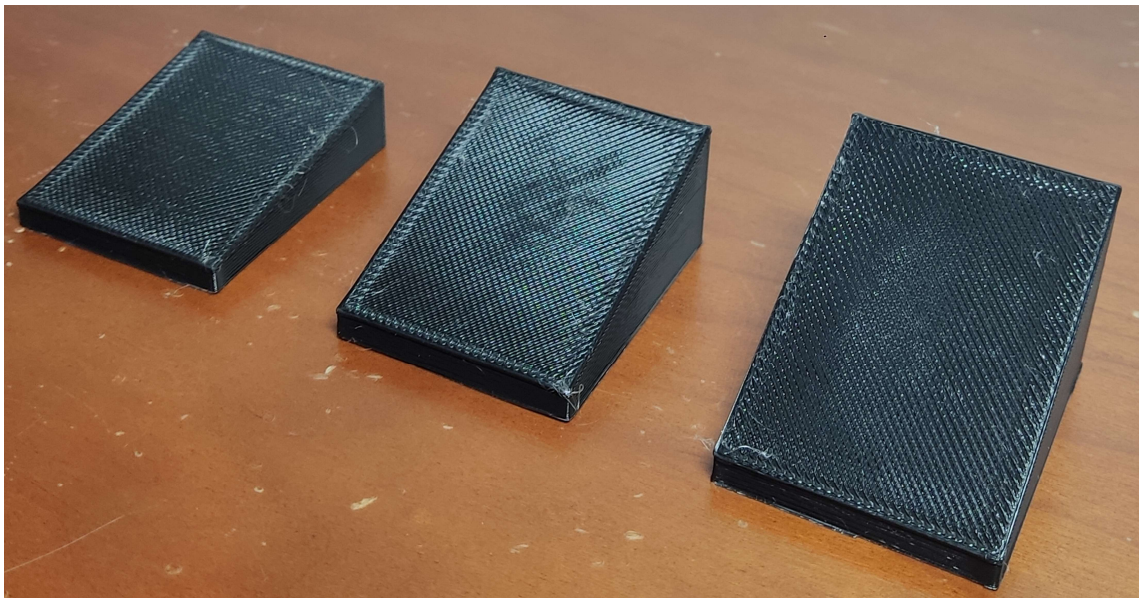


Figura 185 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 6.

Neste teste 6, voltamos a observar dos melhores resultados obtidos, com faces consistentes e suaves. Tal como no teste 5 observou-se uma ligeira falta de material nos caminhos de impressão dos provetes de inclinações 20° e 30°.

Tabela 27 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 7.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,45 mm
Velocidade do enchimento sólido	20 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,90



Figura 186 - Vista de topo dos provetes do teste 7.

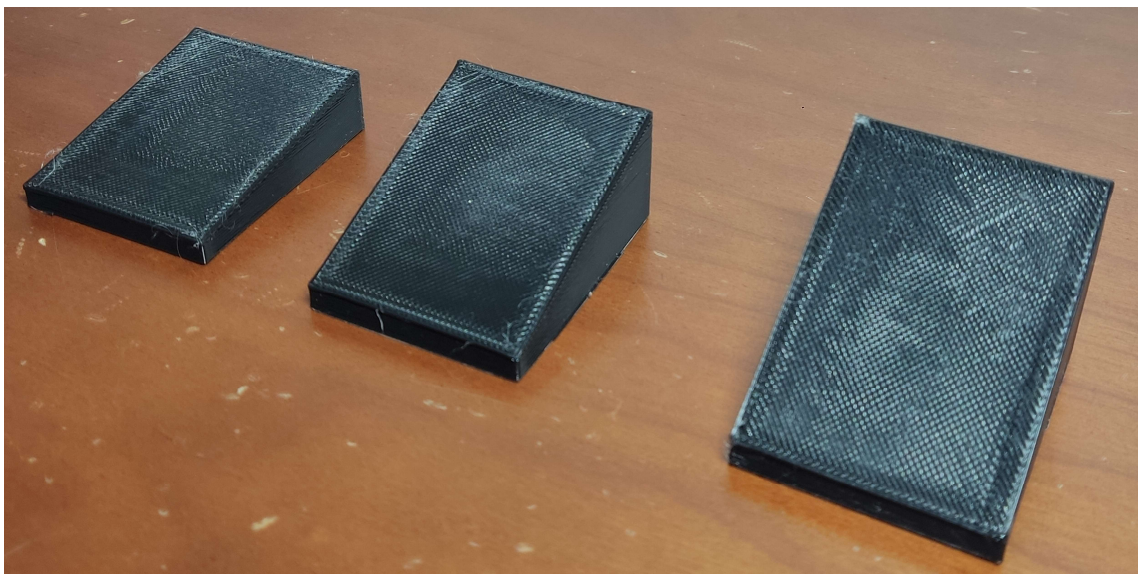


Figura 187 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 7.

Relativamente ao teste 7, as faces dos provetes impressos ficaram com boa qualidade apresentando um reduzido excesso de material, nos caminhos de impressão originando faces ligeiramente rugosas.

Tabela 28 - Parâmetros de impressão do teste de otimização número 8.

Largura de extrusão do enchimento sólido	0,40 mm
Velocidade do enchimento sólido	10 mm/s
Sobreposição	5%
Multiplicador de extrusão	0,85



Figura 188 - Vista de topo dos provetes do teste 8.

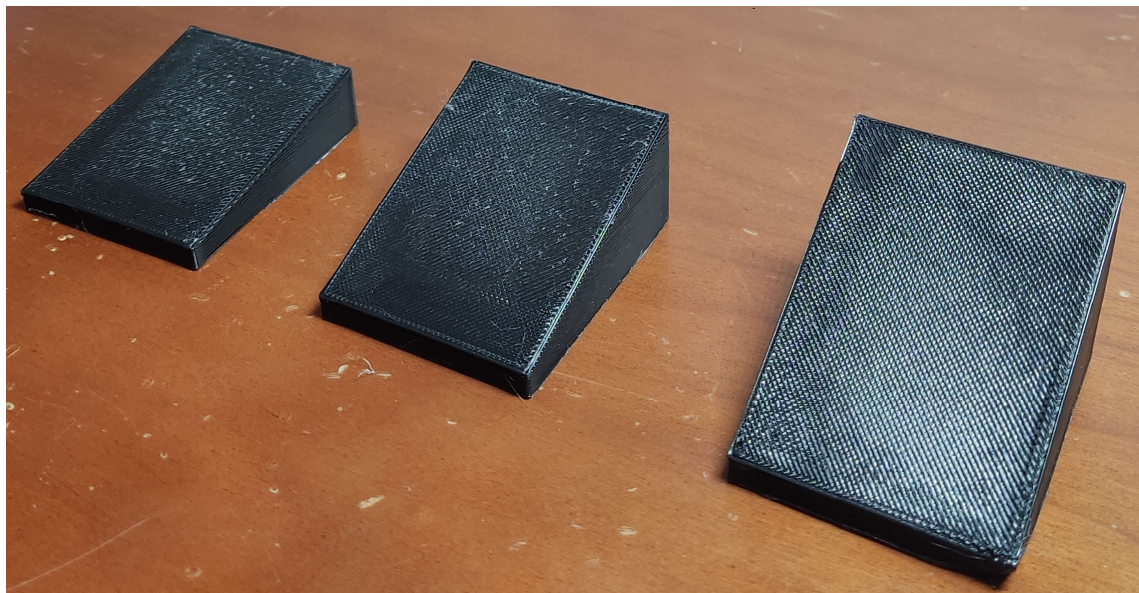


Figura 189 - Vista em perspectiva dos provetes do teste 8.

Os provetes referentes ao teste 8 apresentaram uma muito boa qualidade superficial, no entanto os caminhos de impressão foram impressos com pouco material ocorrendo a aparição de falhas entre os caminhos.

8.5. Anexo E – Ensaios de rugosidade

Com o objetivo de fazer uma análise mais intensiva á possibilidade de aumento da qualidade superficial dos provetes “Inclinação” impressos foram realizados vários ensaios de rugosidade às superfícies superiores destes provetes. O resultado destes ensaios pode ser encontrado neste anexo na forma de gráficos dos perfis de rugosidade obtidos e de tabelas com a respetiva rugosidade média (R_a) e a altura total (R_t), de cada ensaio efetuado.

8.5.1. Provetes planares

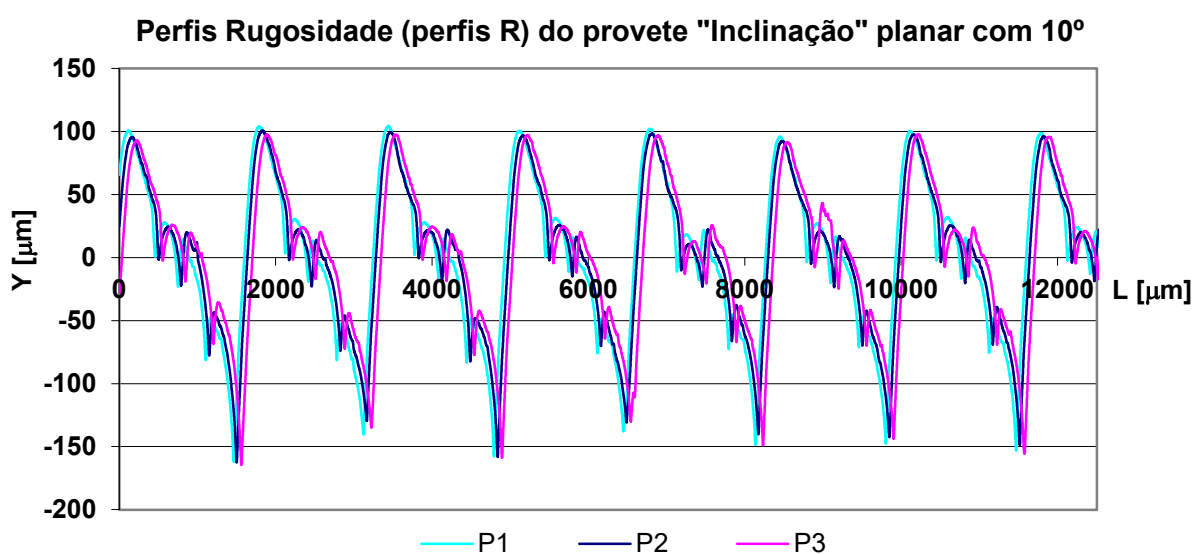


Figura 190 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete “Inclinação” planar com 10°.

Tabela 29 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” planar com 10°.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_Planar_10°	49,68	2,63	294,43	0,90
P2_Planar_10°	46,95		290,08	
P3_Planar_10°	46,75		286,98	
Planar_10°	47,79	2,63	290,50	0,90

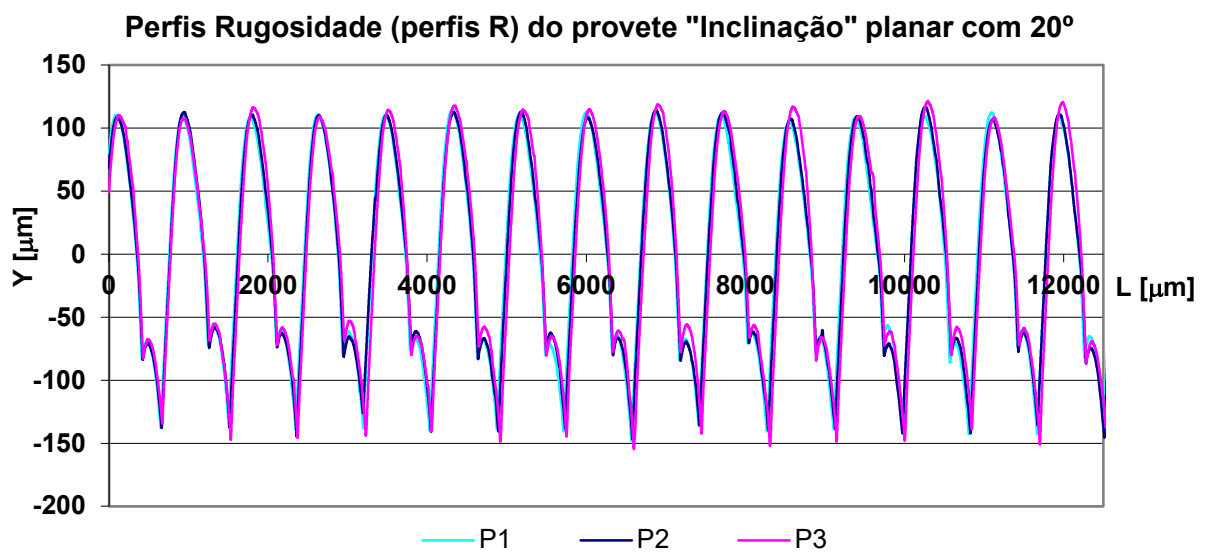


Figura 191 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 20°.

Tabela 30 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" planar com 20°.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_Planar_20°	71,97	1,62	272,67	1,10
P2_Planar_20°	72,35		277,51	
P3_Planar_20°	74,82		281,53	
Planar_20°	73,05	1,62	277,24	1,10

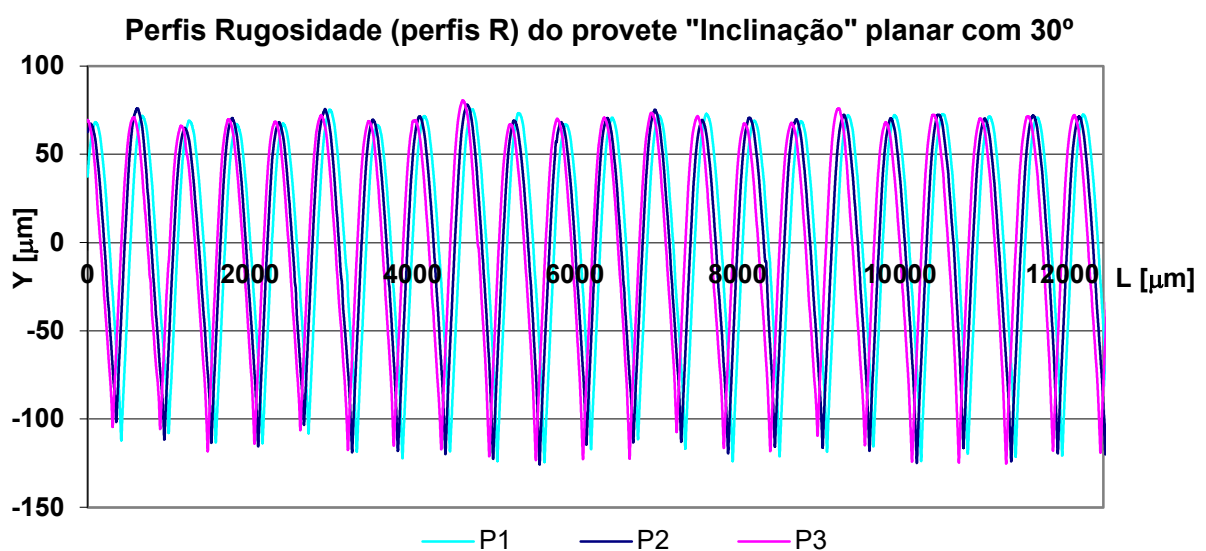


Figura 192 - Gráfico dos perfis rugosidade do provete "Inclinação" planar com 30°.

Tabela 31 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” planar com 30°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_Planar_30°	50,70		207,06	
P2_Planar_30°	50,70		208,60	
P3_Planar_30°	50,24		215,16	
Planar_30°	50,55	0,40	210,27	1,55

8.5.2. Medição da rugosidade da camada superior do Gabari 20°

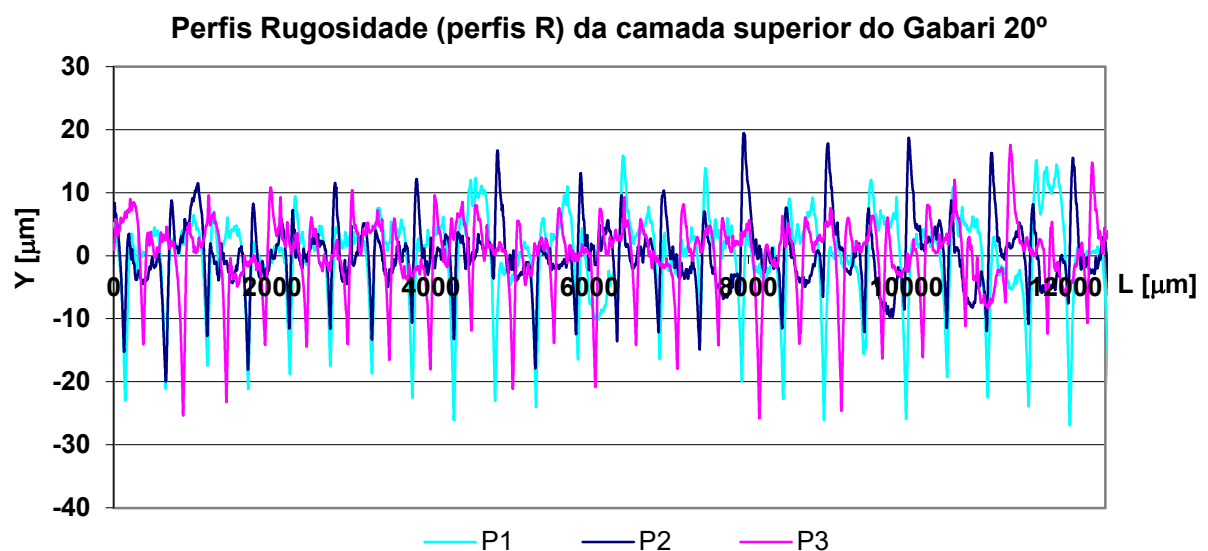


Figura 193 - Gráfico dos perfis rugosidade (perfis R) da camada superior do Gabari 20°.

Tabela 32 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade da camada superior do Gabari 20°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_Gabari 20°	5,16		46,63	
P2_Gabari 20°	3,86		40,20	
P3_Gabari 20°	4,04		44,68	
Gabari 20°	4,35	12,35	43,84	5,53

8.5.3. Medição da rugosidade de uma parede lateral do provete “Inclinação” planar com 30°

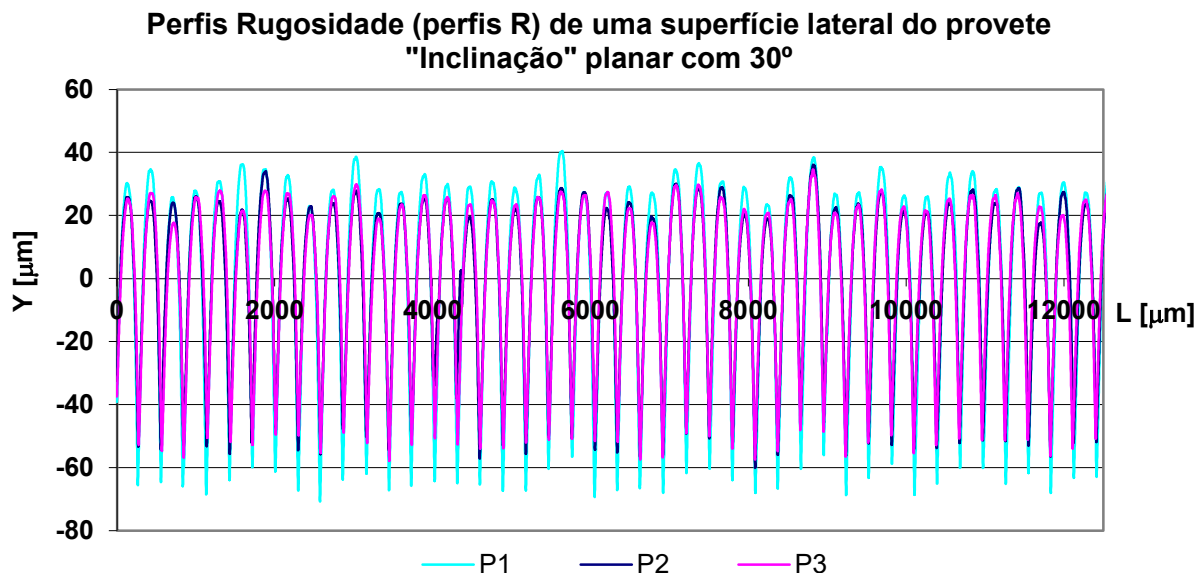


Figura 194 - Gráfico dos perfis rugosidade (perfis R) de uma superfície lateral do provete "Inclinação" planar com 30°.

Tabela 33 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade de uma superfície lateral do provete "Inclinação" planar com 30°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_LAT Planar 30°	25,02		115,50	
P2_LAT Planar 30°	20,34		98,01	
P3_LAT Planar 30°	20,37		96,29	
LAT Planar 30°	21,91	9,45	103,27	7,9

8.5.4. Provete “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,3 mm

Dado que os provetes “Inclinação” com largura de extrusão de 0,3mm apresentaram uma superfície muito rugosa a olho nu, estabeleceu-se que estes provetes não deveriam ser submetidos aos ensaios de rugosidade. Desta forma, a medição de rugosidades dos provetes não planares foi iniciada pelo provete com largura de extrusão de 0,4 mm.

8.5.5. Provetes “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,4 mm

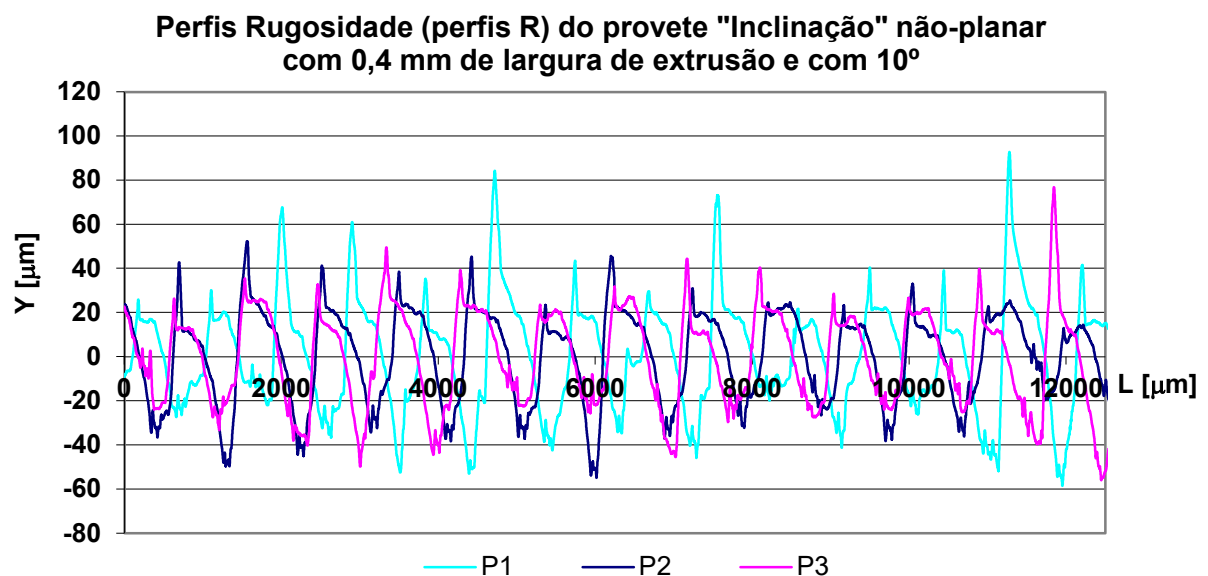


Figura 195 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão com 10°.

Tabela 34 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,4 mm de largura de extrusão e com 10°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,4mm_10°	20,18		156,82	
P2_0,4mm_10°	17,68		139,22	
P3_0,4mm_10°	18,56		132,37	
0,4mm_10°	18,81	4,89	142,80	6,54

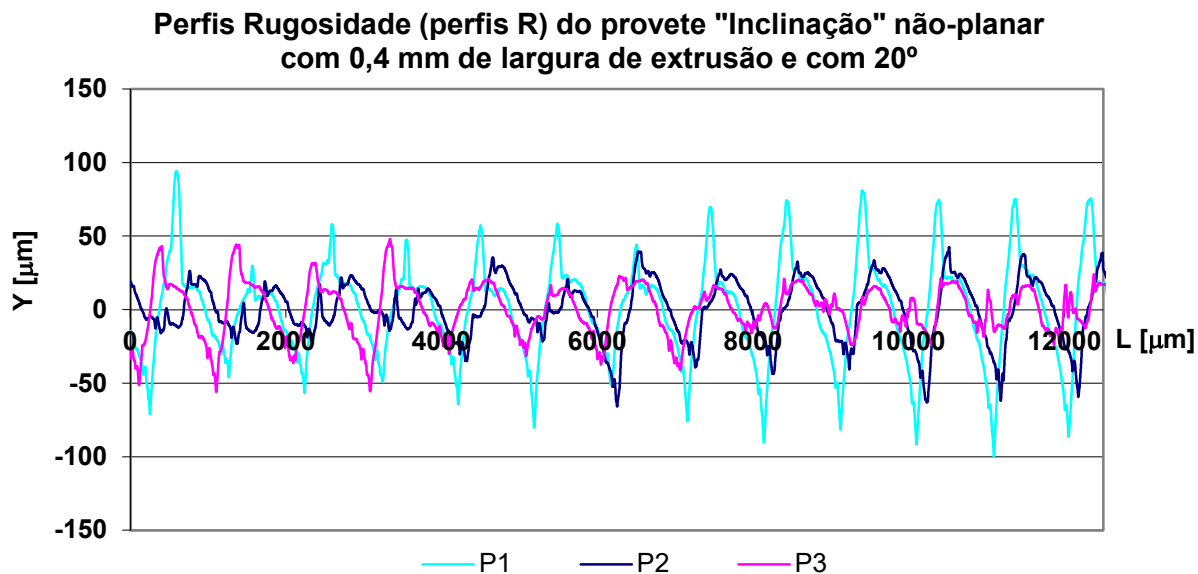


Figura 196 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão com 20°.

Tabela 35 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,4 mm de largura de extrusão e com 20°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,4mm_20°	26,34		214,73	
P2_0,4mm_20°	16,26		154,90	
P3_0,4mm_20°	14,41		114,93	
0,4mm_20°	19,00	25,74	161,52	21,96

Não foi possível efetuar as medições de rugosidade do provete com 30° de inclinação pois, após várias tentativas, a elevada rugosidade da superfície do provete fez com que o aparelho de medição saísse fora do intervalo de medição, e assim, parasse sucessivamente os diversos ensaios realizados.

8.5.6. Provetes “Inclinação” não planares com largura de extrusão de 0,5 mm

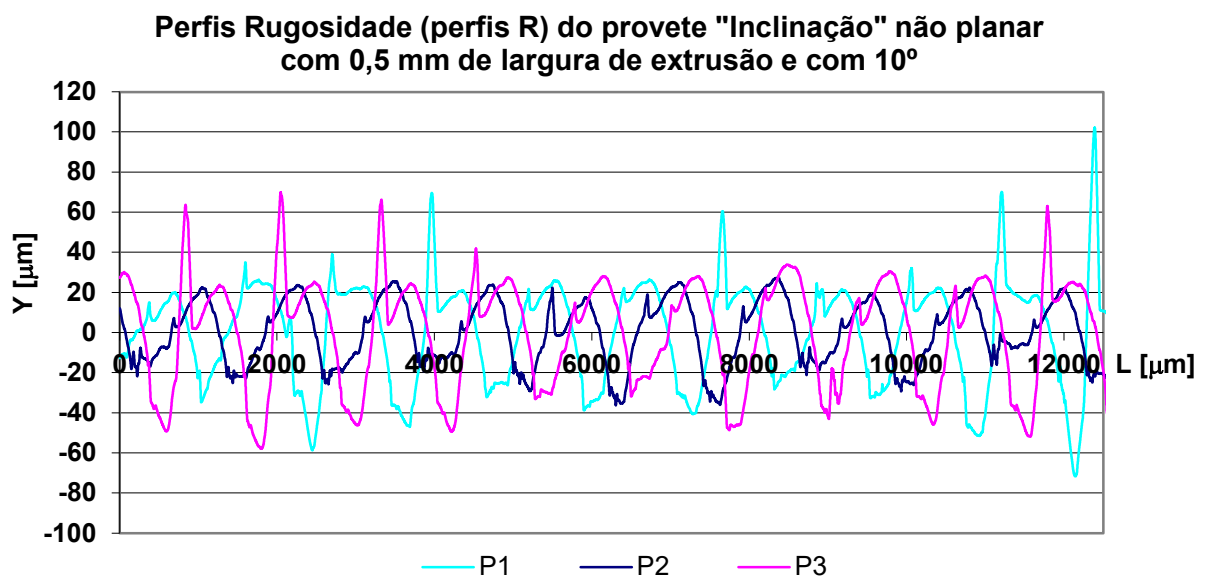


Figura 197 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 10°.

Tabela 36 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete “Inclinação” não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 10°.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_0,5mm_10°	21,03		177,17	
P2_0,5mm_10°	13,93		99,38	
P3_0,5mm_10°	22,71		144,90	
0,5mm_10°	19,22	18,37	140,48	19,51

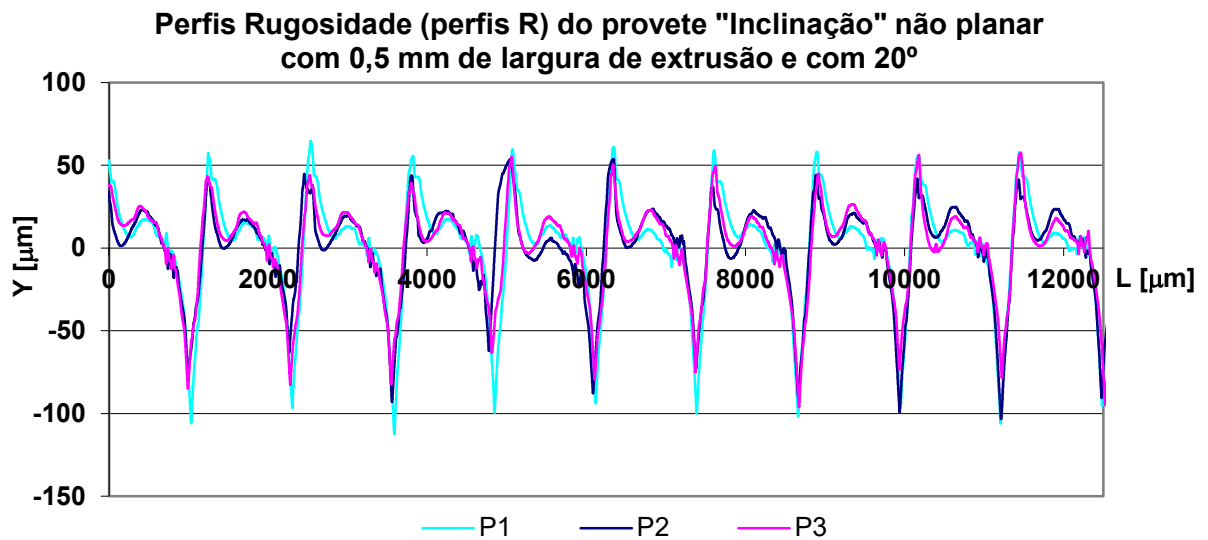


Figura 198 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 20°.

Tabela 37 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 20°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,5mm_20°	22,59		187,70	
P2_0,5mm_20°	20,03		195,55	
P3_0,5mm_20°	20,10		198,42	
0,5mm_20°	20,91	5,37	193,89	2,13

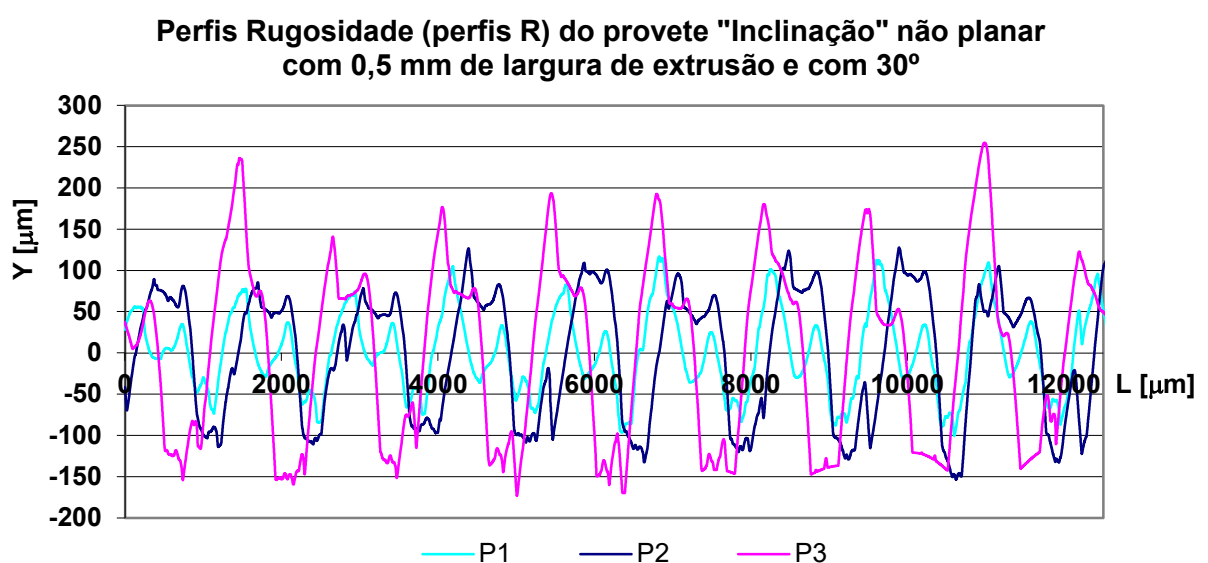


Figura 199 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão com 30°.

Tabela 38 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,5 mm de largura de extrusão e com 30°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,5mm_30°	40,53		256,95	
P2_0,5mm_30°	69,23		286,40	
P3_0,5mm_30°	96,69		480,68	
0,5mm_30°	68,82	27,4	341,34	27,21

8.5.7. Provete "Inclinação" não planar com largura de extrusão de 0,6 mm

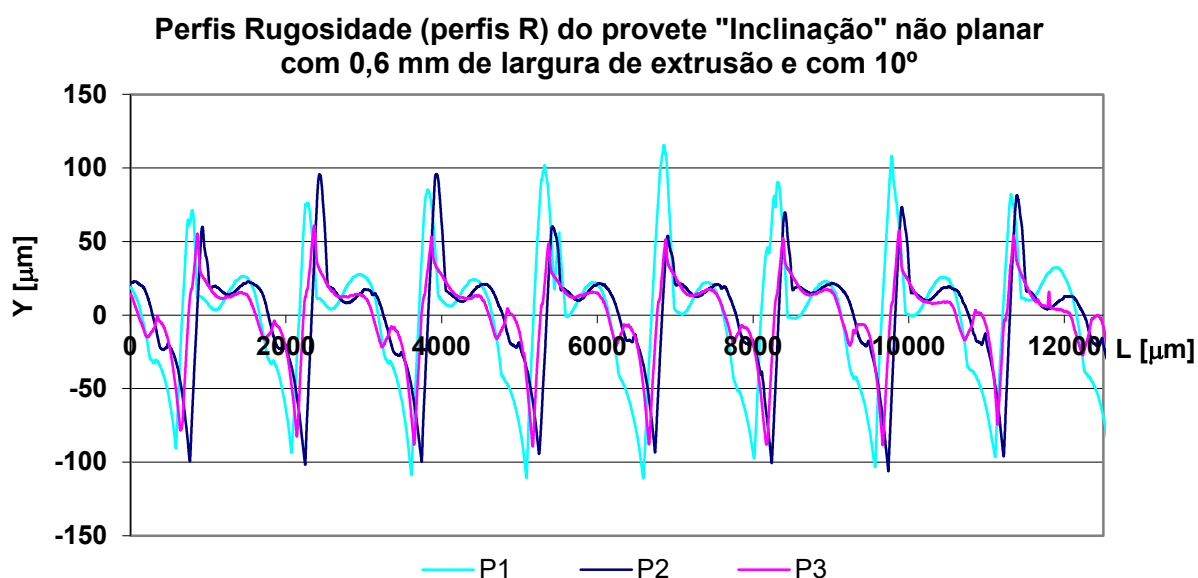


Figura 200 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 10°.

Tabela 39 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 10°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,6mm_10°	33,87		231,69	
P2_0,6mm_10°	26,70		214,27	
P3_0,6mm_10°	19,81		179,39	
0,6mm_10°	26,79	17,62	208,45	9,29

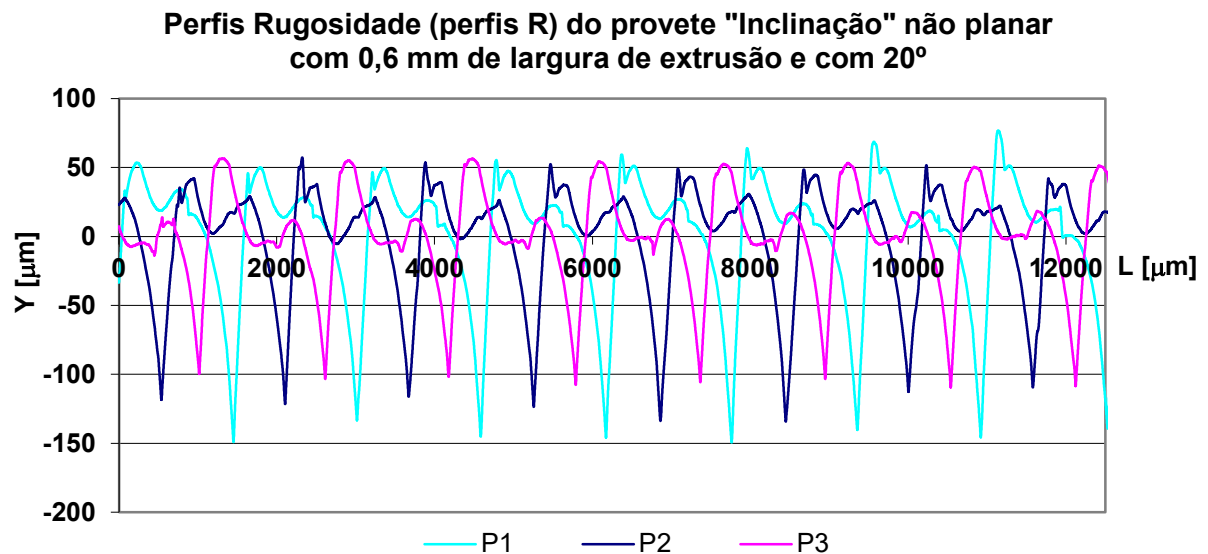


Figura 201 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 20°.

Tabela 40 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 20°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,6mm_20°	33,99		249,70	
P2_0,6mm_20°	28,64		216,22	
P3_0,6mm_20°	23,90		190,15	
0,6mm_20°	28,84	11,89	218,69	9,45

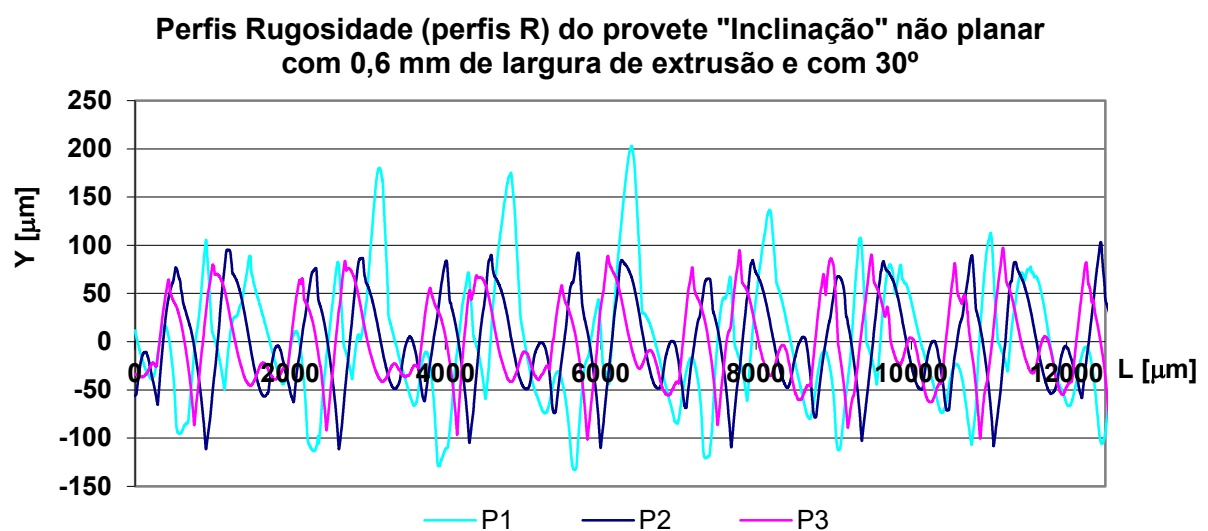


Figura 202 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão com 30°.

Tabela 41 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,6 mm de largura de extrusão e com 30°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,6mm_30°	51,69		389,93	
P2_0,6mm_30°	40,46		226,79	
P3_0,6mm_30°	36,88		204,59	
0,6mm_30°	43,01	13,45	273,77	28,29

8.5.8. Provetes com largura de extrusão de 0,7 mm

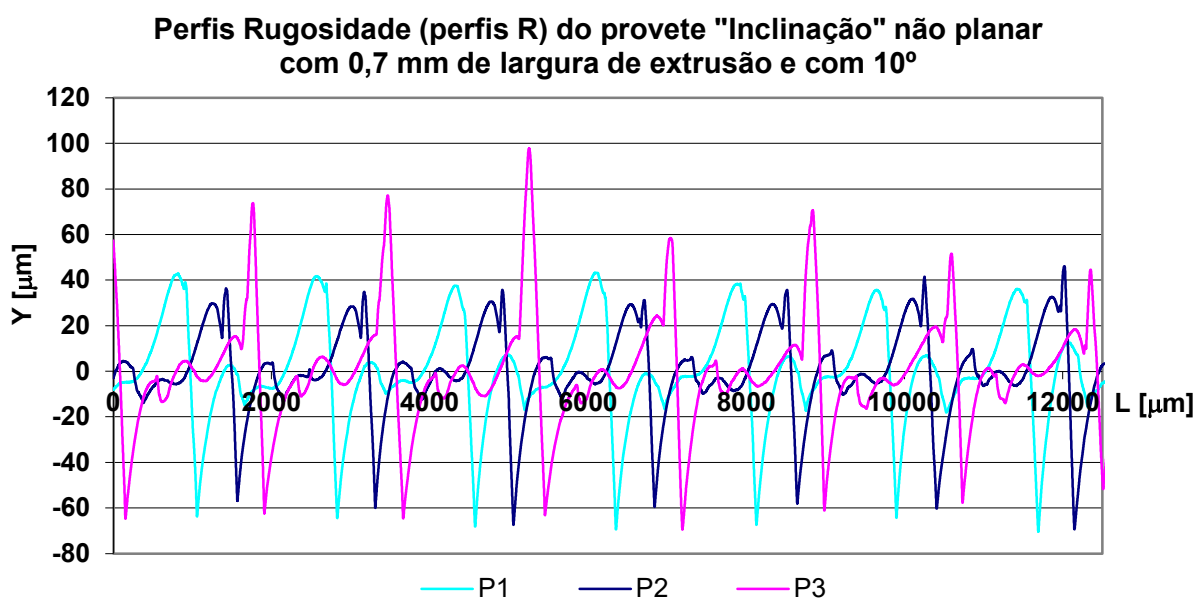


Figura 203 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 10°.

Tabela 42 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 10°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,7mm_10°	15,71		133,41	
P2_0,7mm_10°	13,36		132,67	
P3_0,7mm_10°	15,60		174,16	
0,7mm_10°	14,89	6,85	146,75	12,45

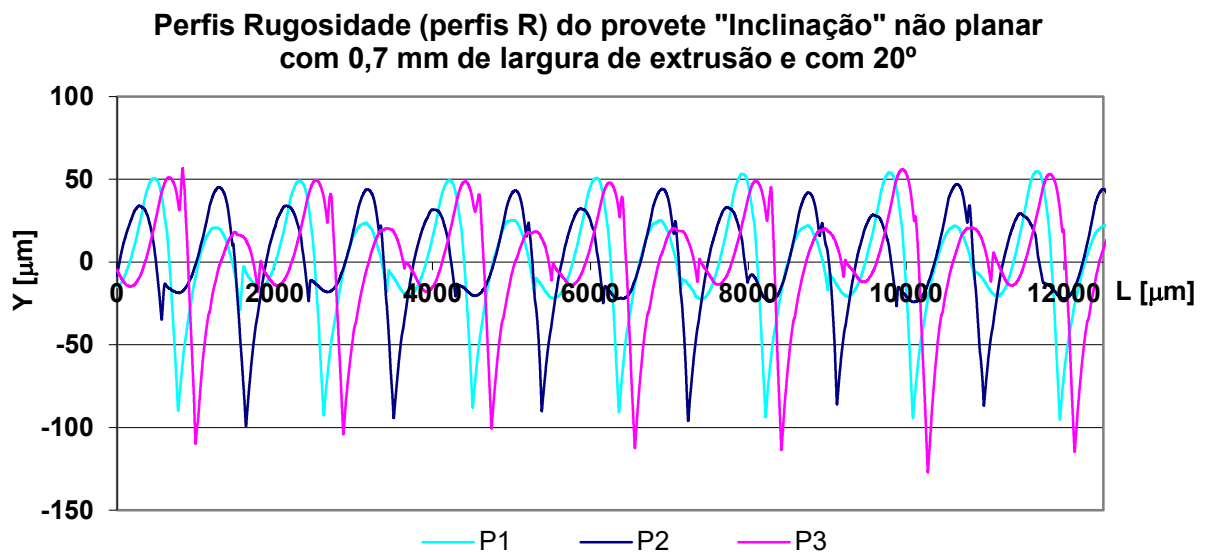


Figura 204 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 20°.

Tabela 43 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 20°.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_0,7mm_20°	24,45	1,17	160,09	11,67
P2_0,7mm_20°	24,57		152,85	
P3_0,7mm_20°	25,17		201,50	
0,7mm_20°	24,73	1,17	171,48	11,67

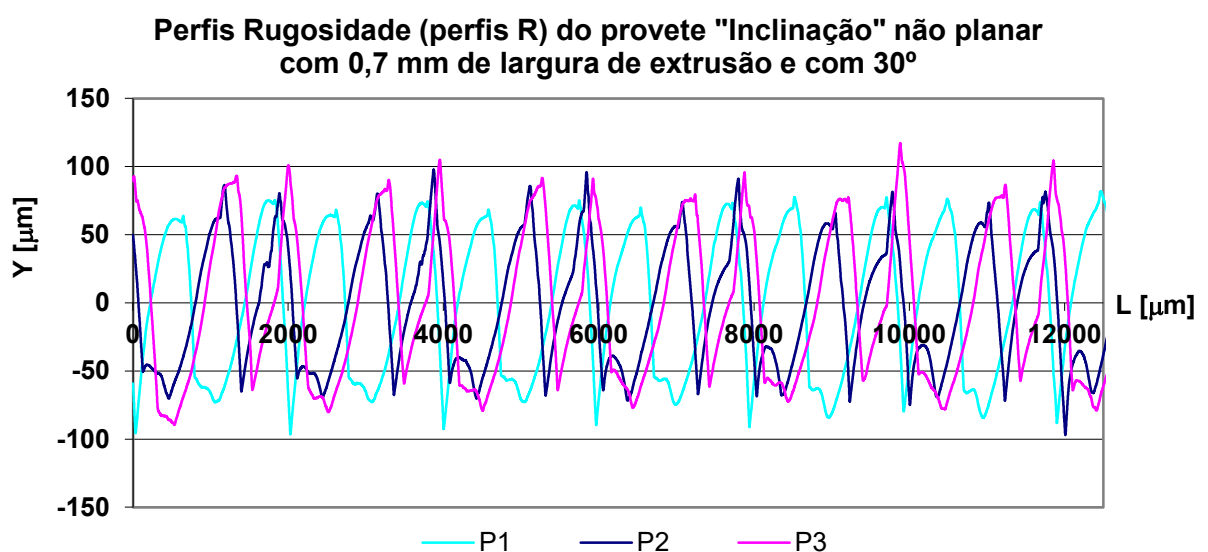


Figura 205 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão com 30°.

Tabela 44 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 0,7 mm de largura de extrusão e com 30°.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_0,7mm_30°	47,76		210,16	
P2_0,7mm_30°	40,40		211,35	
P3_0,7mm_30°	48,87		233,08	
0,7mm_30°	45,68	7,71	218,20	4,55

8.5.9. Provetes do teste 1

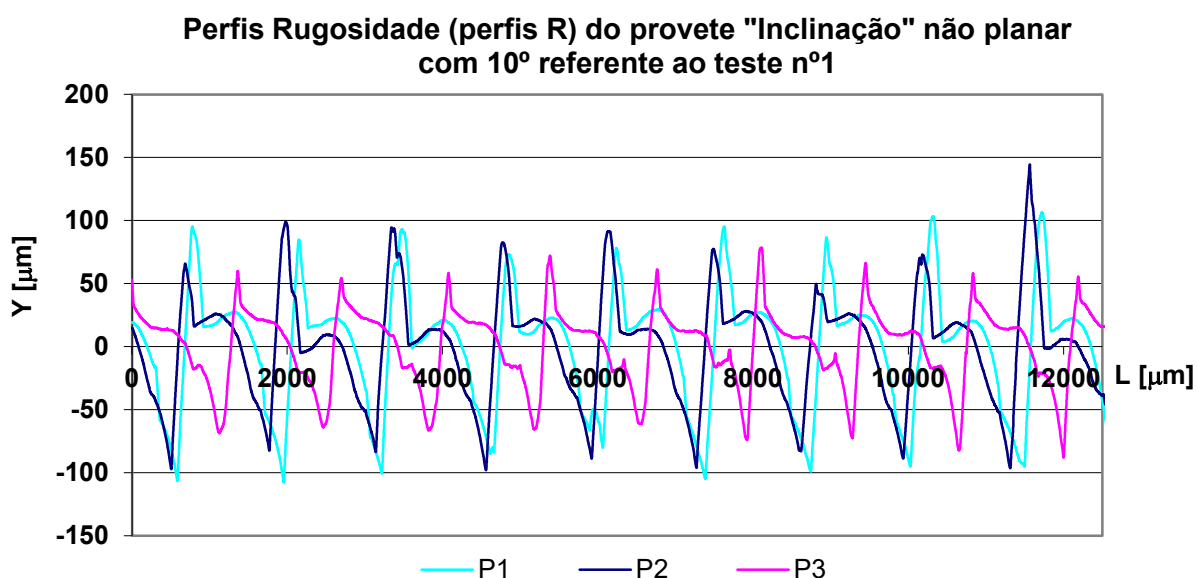


Figura 206 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 1.

Tabela 45 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 1.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste1_10°	36,48		258,69	
P2_teste1_10°	32,85		281,60	
P3_teste1_10°	24,19		184,13	
Teste1_10°	31,17	14,95	241,47	15,83

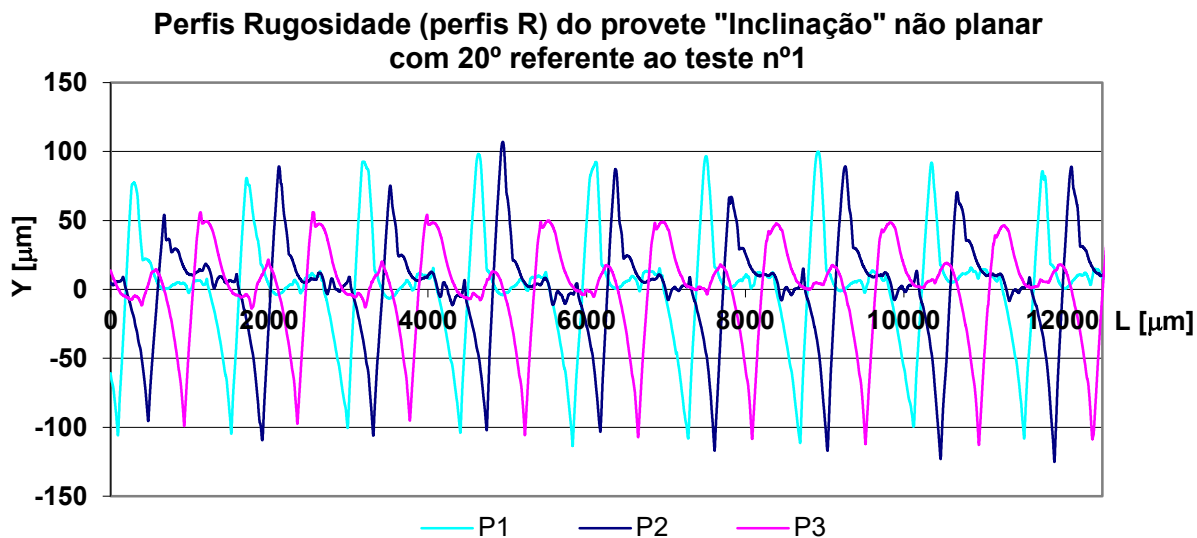


Figura 207 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 1.

Tabela 46 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 1.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste1_20°	26,65		219,64	
P2_teste1_20°	25,94		251,30	
P3_teste1_20°	24,21		181,91	
Teste1_20°	25,60	3,36	217,62	10,94

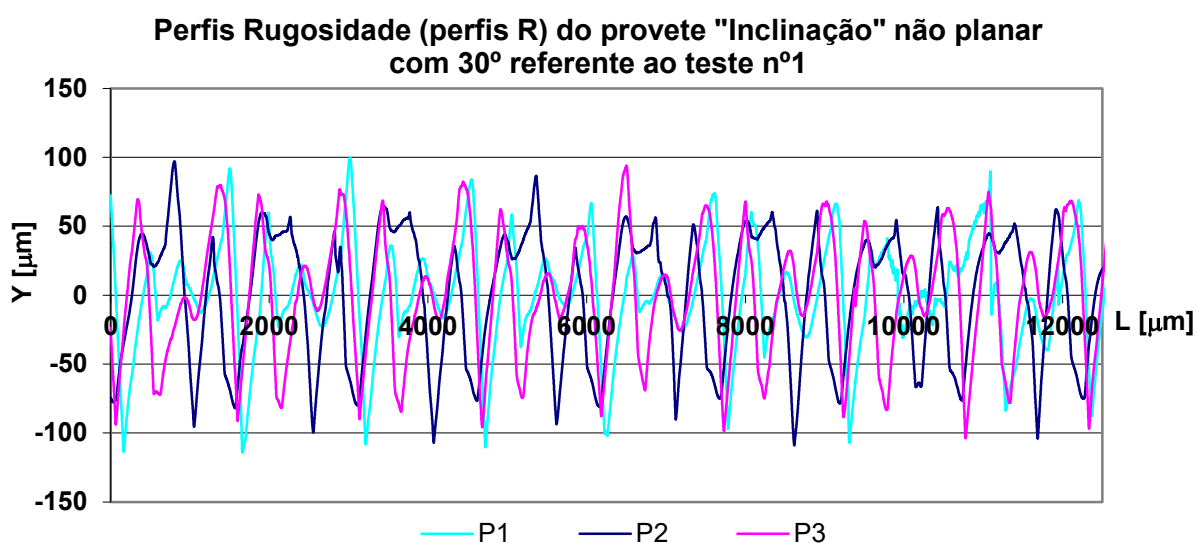


Figura 208 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 1.

Tabela 47 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 1.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste1_30°	28,61		238,49	
P2_teste1_30°	39,84		213,73	
P3_teste1_30°	35,71		218,23	
Teste1_30°	34,72	88,28	223,48	4,48

8.5.10. Provetes do teste 2

Na realização dos ensaios de rugosidade aos provetes do teste 2 foi verificado que a superfície em análise possui uma rugosidade que sai fora da escala de medição do aparelho o que impossibilita a realização de ensaios a estes provetes.

8.5.11. Provetes do teste 3

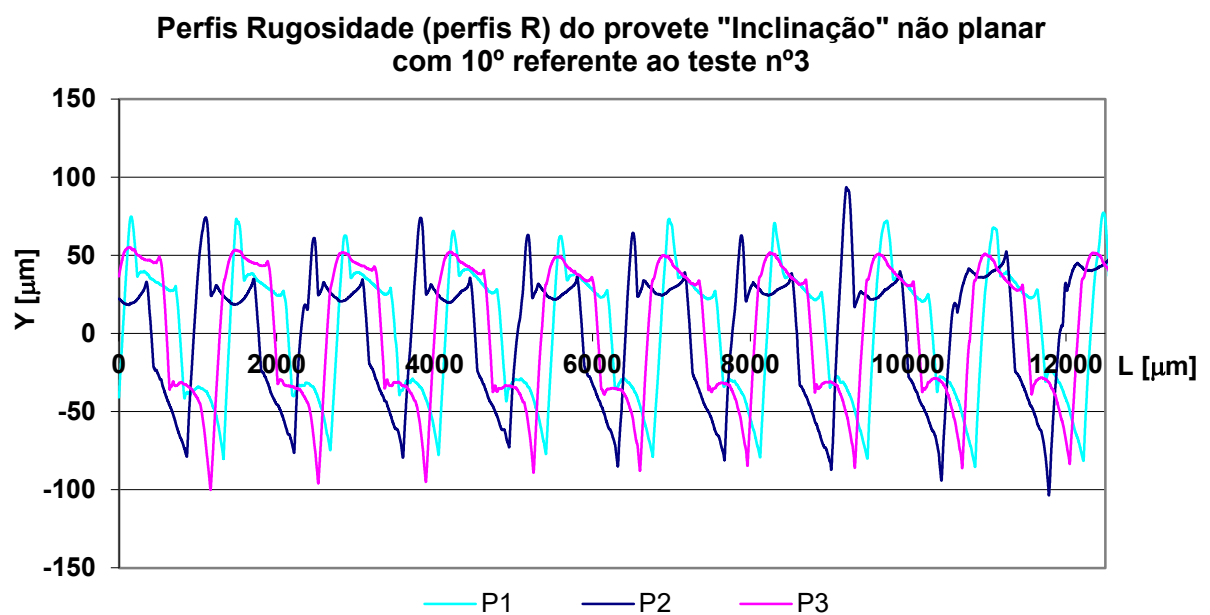


Figura 209 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 3.

Tabela 48 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 3.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste3_10°	37,51		173,63	
P2_teste3_10°	36,56		217,13	
P3_teste3_10°	40,05		171,33	
Teste3_10°	38,04	3,52	187,36	10,59

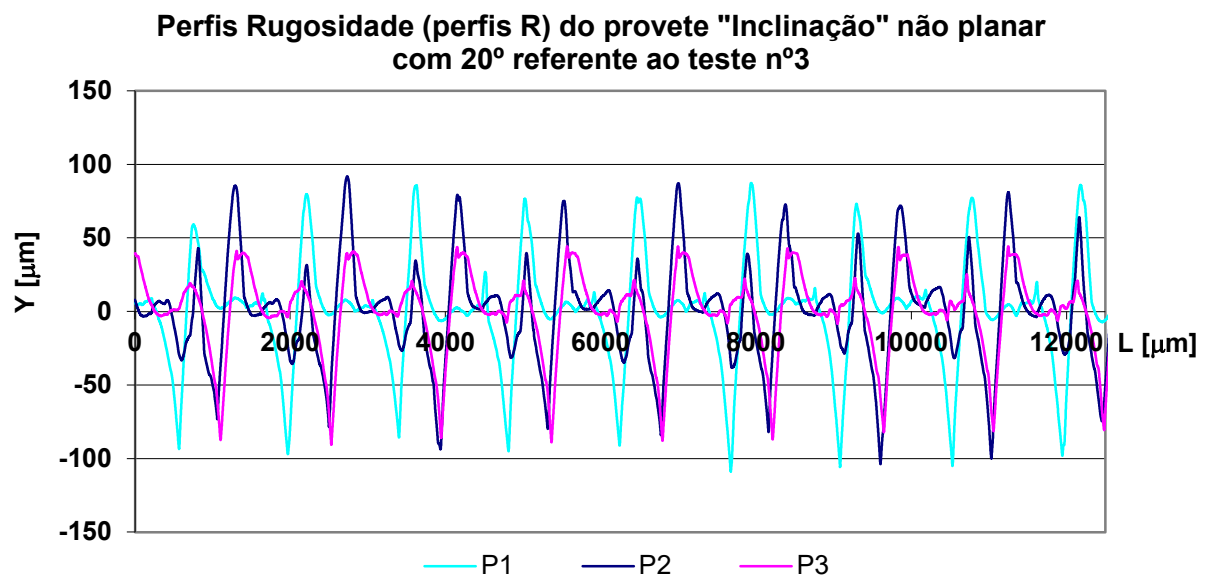


Figura 210 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 3.

Tabela 49 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 3.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste3_20°	22,92		204,84	
P2_teste3_20°	24,98		209,73	
P3_teste3_20°	18,67		137,91	
Teste3_20°	22,19	10,58	184,16	16,74

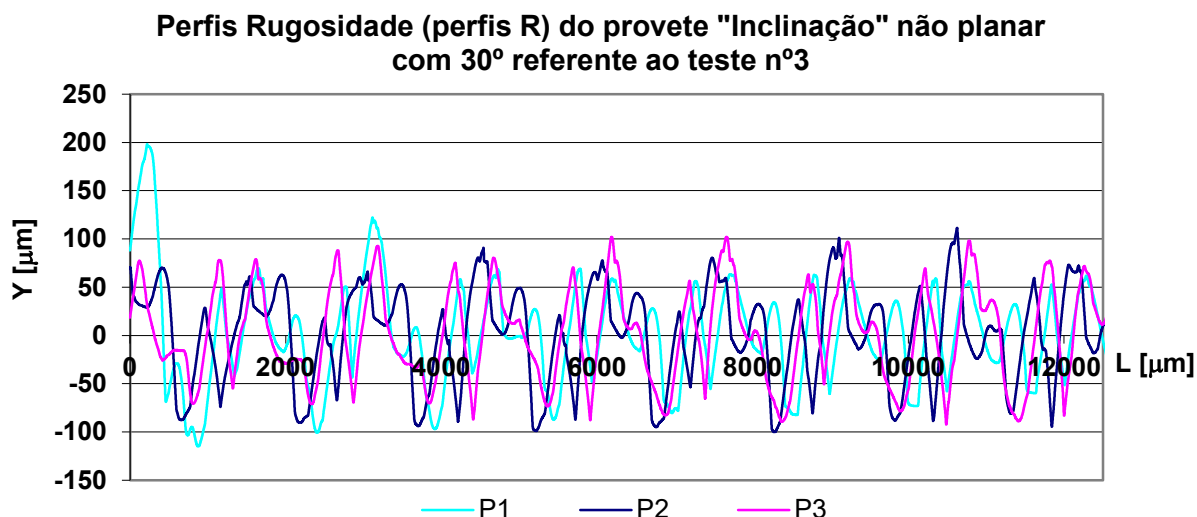


Figura 211 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 3.

Tabela 50 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 3.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste3_30°	39,67		379,05	
P2_teste3_30°	39,92		242,46	
P3_teste3_30°	40,41		213,61	
Teste3_30°	40,00	0,67	278,37	24,11

8.5.12. Provetes do teste 4

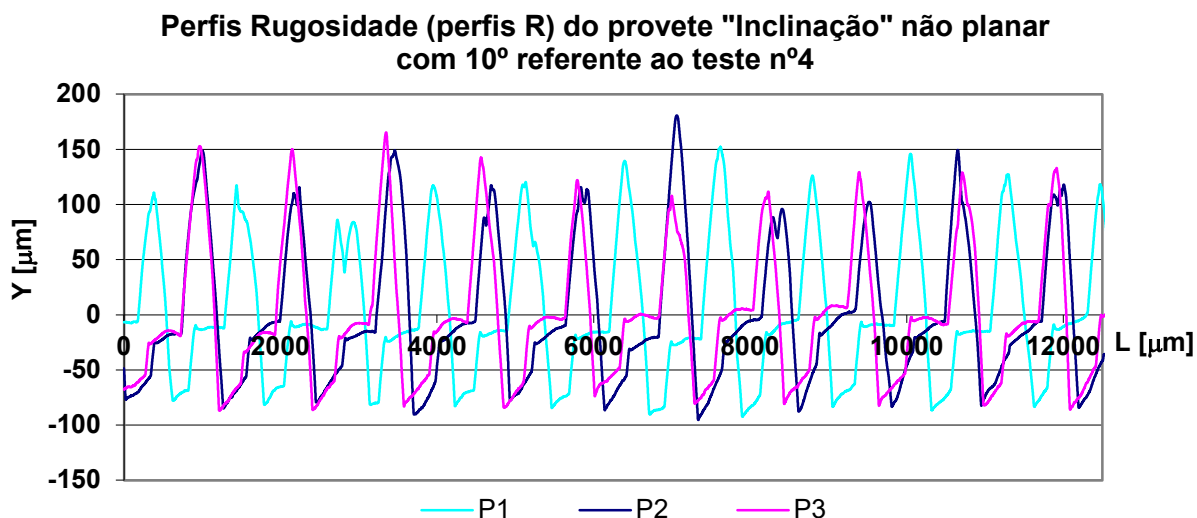


Figura 212 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 4.

Tabela 51 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 4.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste4_10°	48,07		256,92	
P2_teste4_10°	50,77		287,32	
P3_teste4_10°	46,35		267,15	
Teste4_10°	48,40	3,26	270,46	4,16

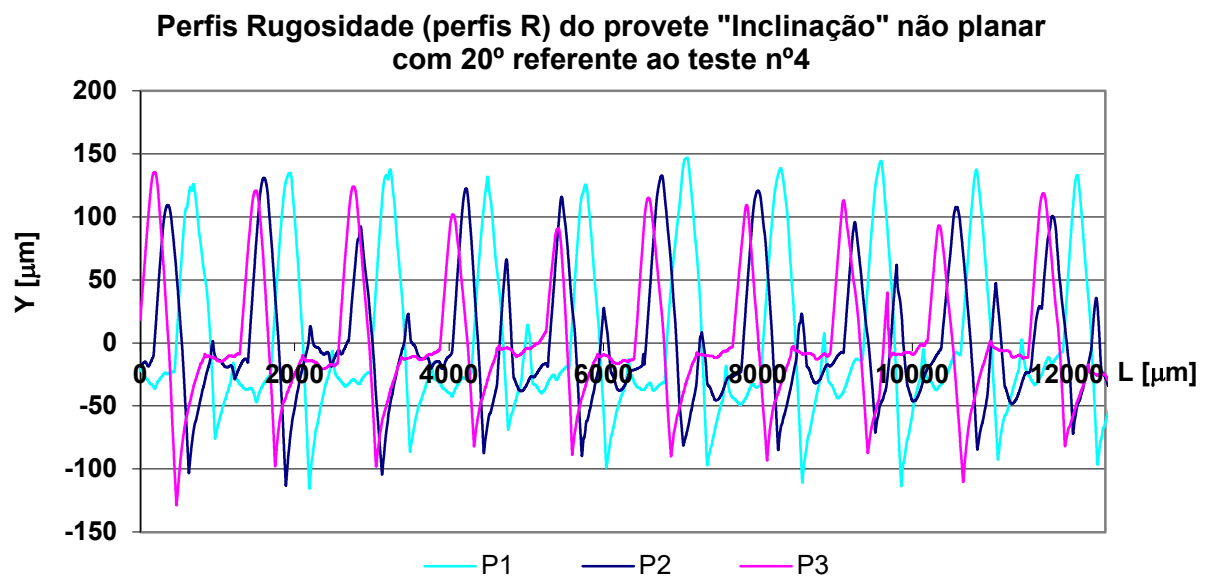


Figura 213 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 4.

Tabela 52 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 4.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste4_20°	51,42		290,95	
P2_teste4_20°	40,08		272,40	
P3_teste4_20°	37,17		294,03	
Teste4_20°	42,89	13,27	285,79	3,12

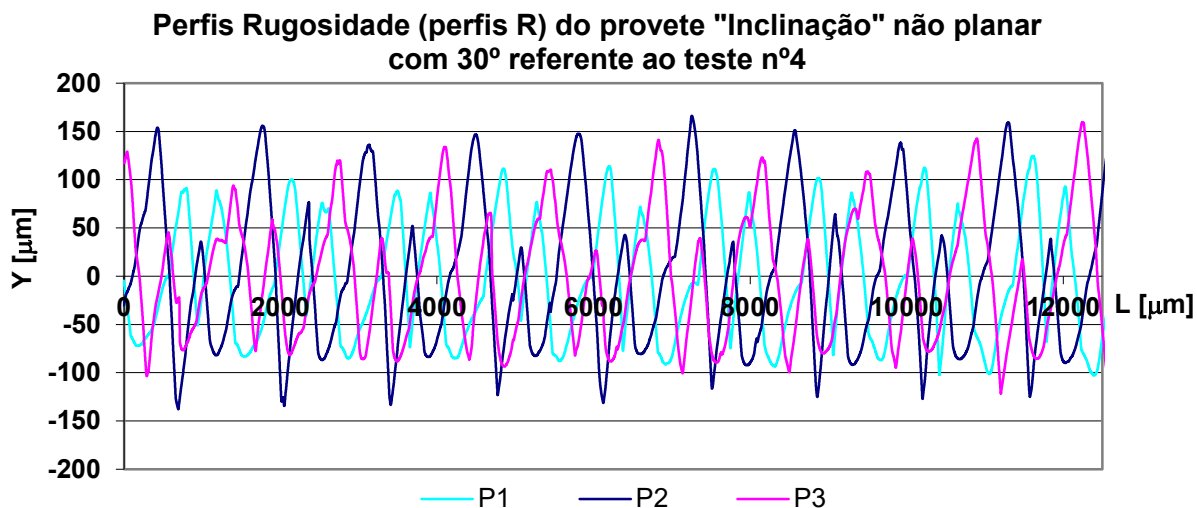


Figura 214 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 4.

Tabela 53 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 4.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste4_30°	51,40		241,57	
P2_teste4_30°	62,22		335,47	
P3_teste4_30°	53,69		295,66	
Teste4_30°	55,77	7,71	290,90	11,31

8.5.13. Provetes do teste 5

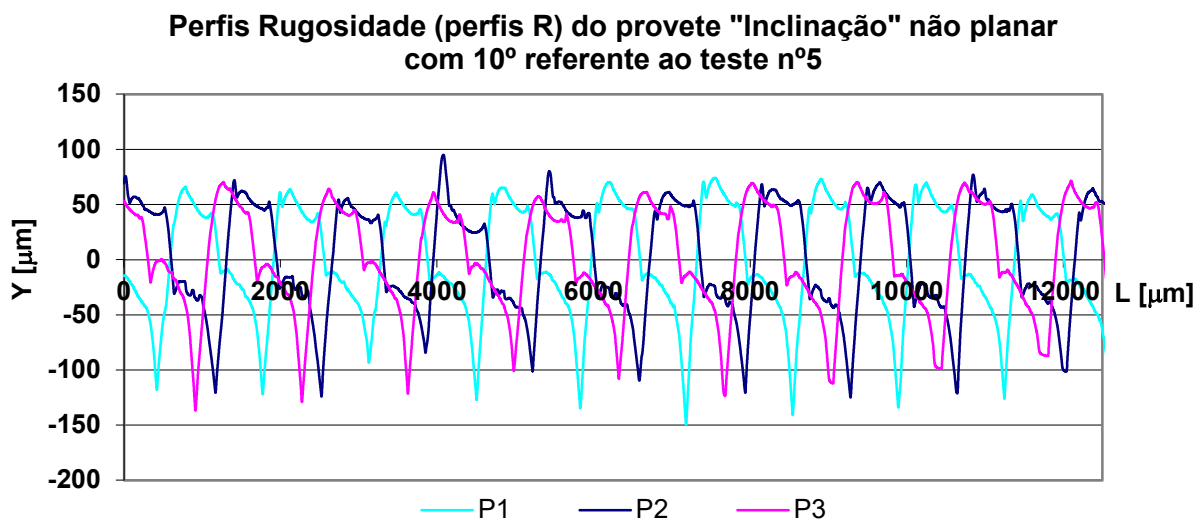


Figura 215 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 5.

Tabela 54 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 5.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste5_10°	43,33		271,84	
P2_teste5_10°	45,01		224,08	
P3_teste5_10°	40,88		216,99	
Teste5_10°	43,07	3,39	244,30	7,51

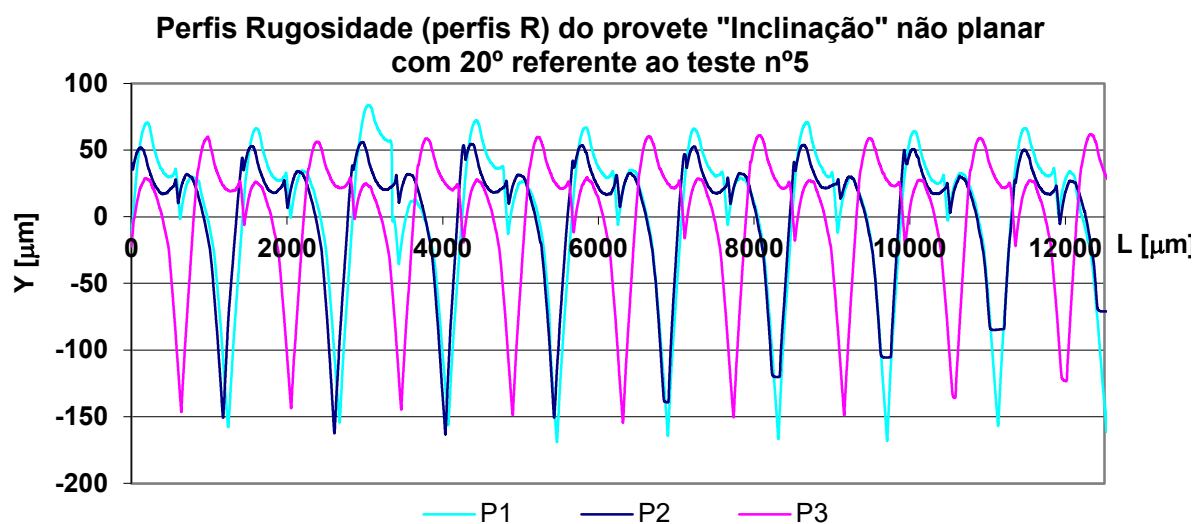


Figura 216 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 5.

Tabela 55 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 5.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste5_20°	44,84		327,03	
P2_teste5_20°	38,08		223,61	
P3_teste5_20°	38,29		230,92	
Teste5_20°	40,44	7,26	260,52	17,02

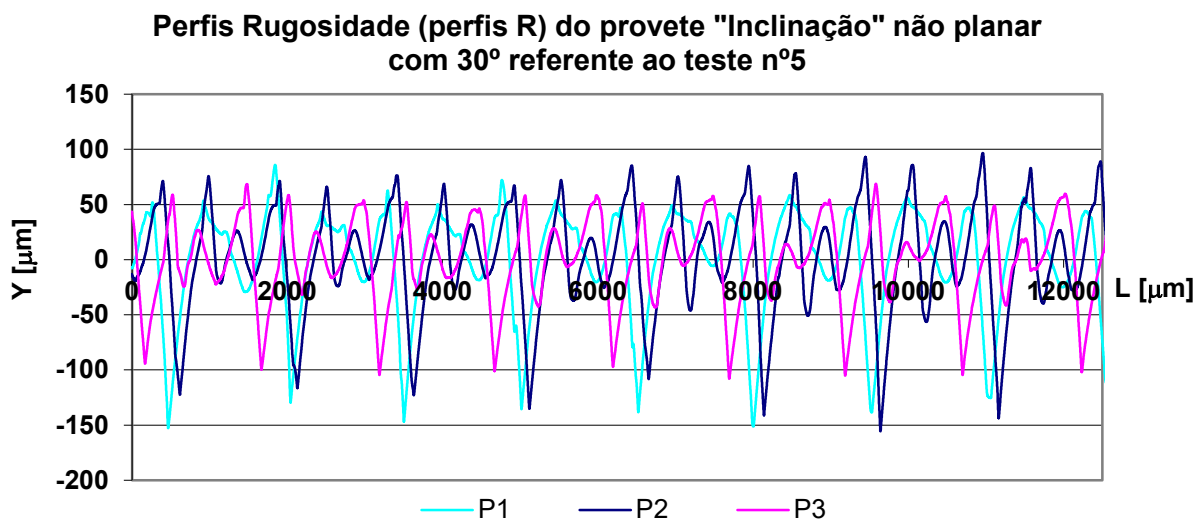


Figura 217 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 5.

Tabela 56 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 5.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste5_30°	36,39		262,46	
P2_teste5_30°	36,67		273,28	
P3_teste5_30°	28,90		180,86	
Teste5_30°	33,99	9,98	238,87	16,19

8.5.14. Provete do teste 6

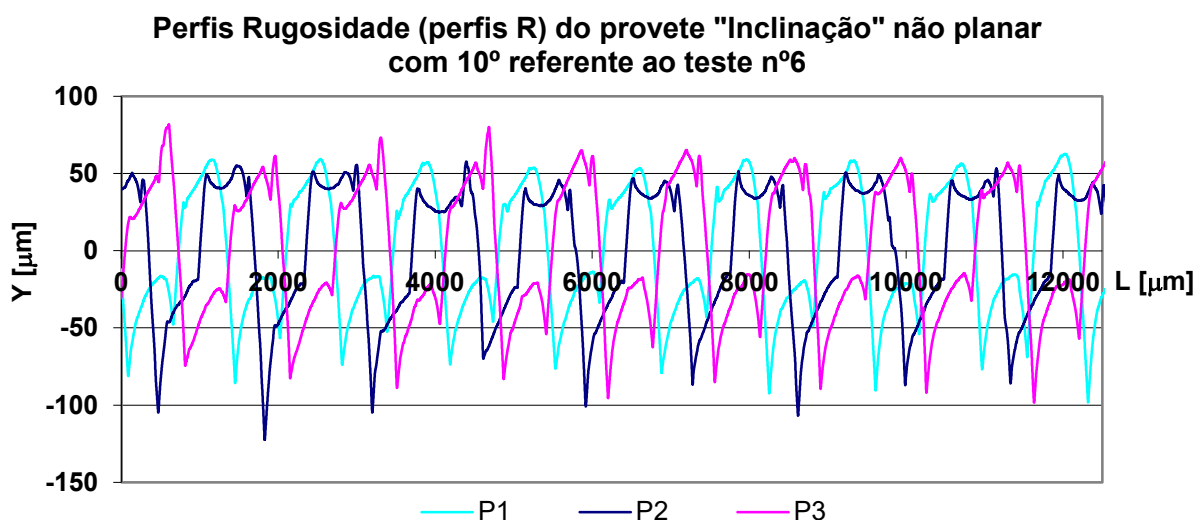


Figura 218 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 6.

Tabela 57 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 6.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste6_10°	36,71		178,59	
P2_teste6_10°	38,76		202,18	
P3_teste6_10°	39,44		199,72	
Teste6_10°	38,30	2,77	193,50	5,14

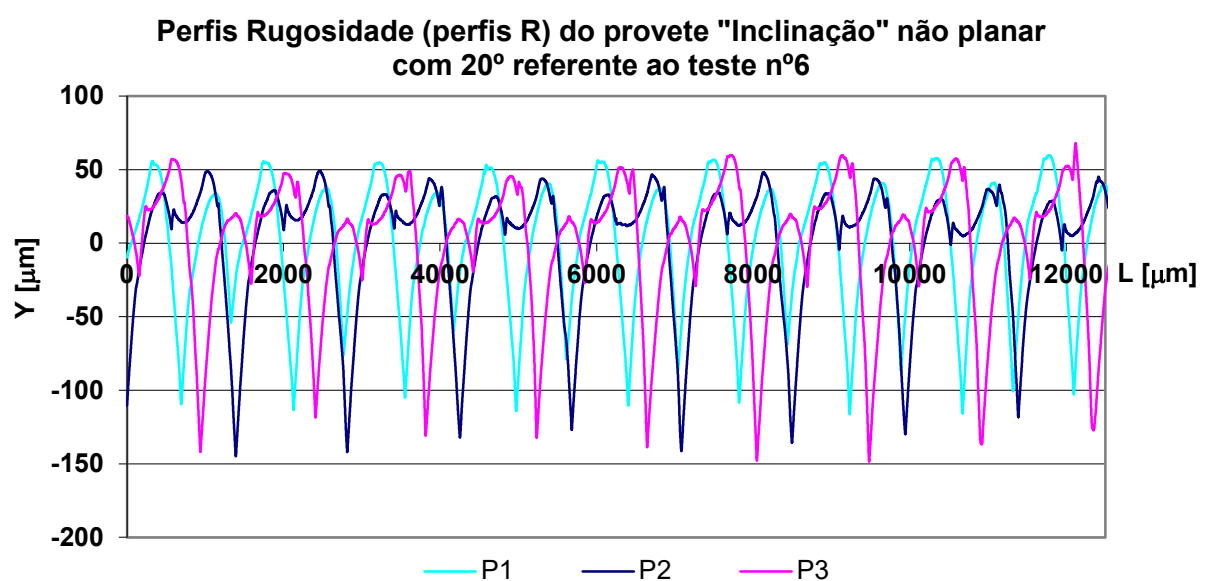


Figura 219 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 6.

Tabela 58 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 6.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste6_20°	34,95		186,84	
P2_teste6_20°	32,07		203,05	
P3_teste6_20°	33,32		234,96	
Teste6_20°	33,45	3,00	208,28	8,54

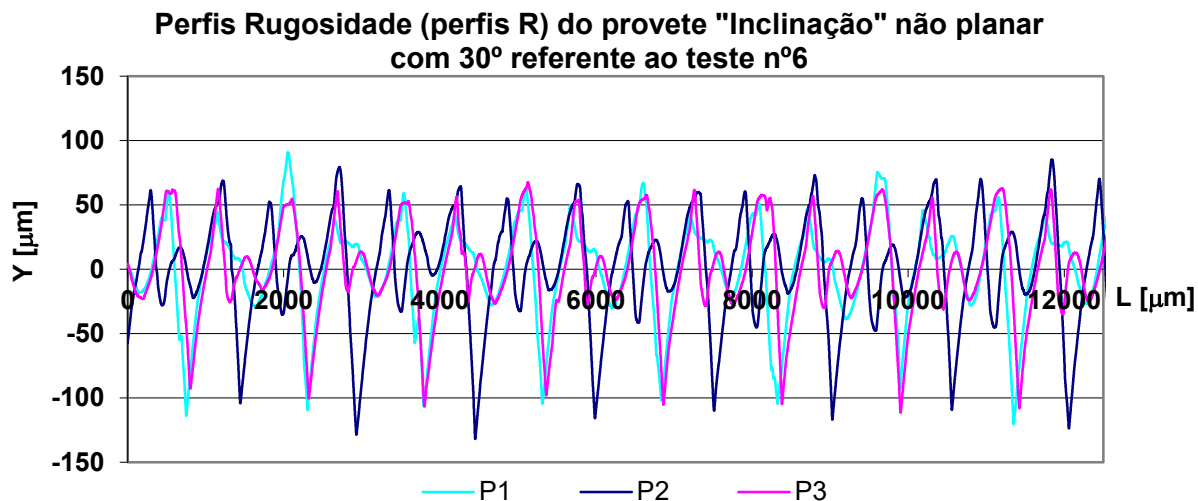


Figura 220 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 6.

Tabela 59 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 6.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste6_30°	28,93		235,65	
P2_teste6_30°	32,10		230,13	
P3_teste6_30°	28,34		198,39	
Teste6_30°	29,79	5,17	221,39	6,93

8.5.15. Provetes do teste 7

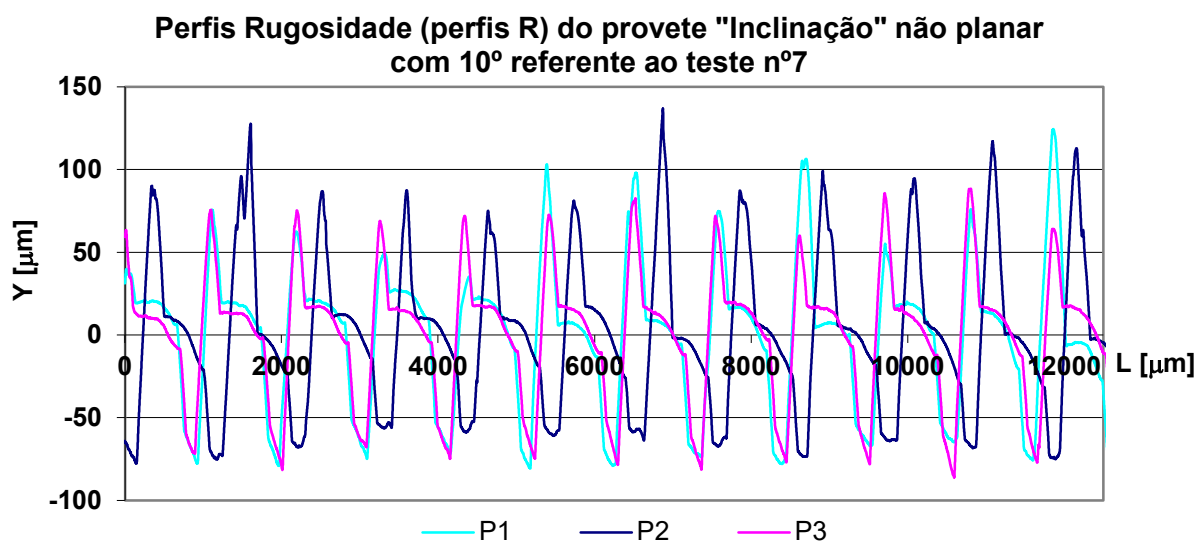


Figura 221 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 7.

Tabela 60 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 7.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste7_10°	32,92		218,84	
P2_teste7_10°	34,60		220,17	
P3_teste7_10°	28,48		181,38	
Teste7_10°	32,00	7,33	206,80	8,19

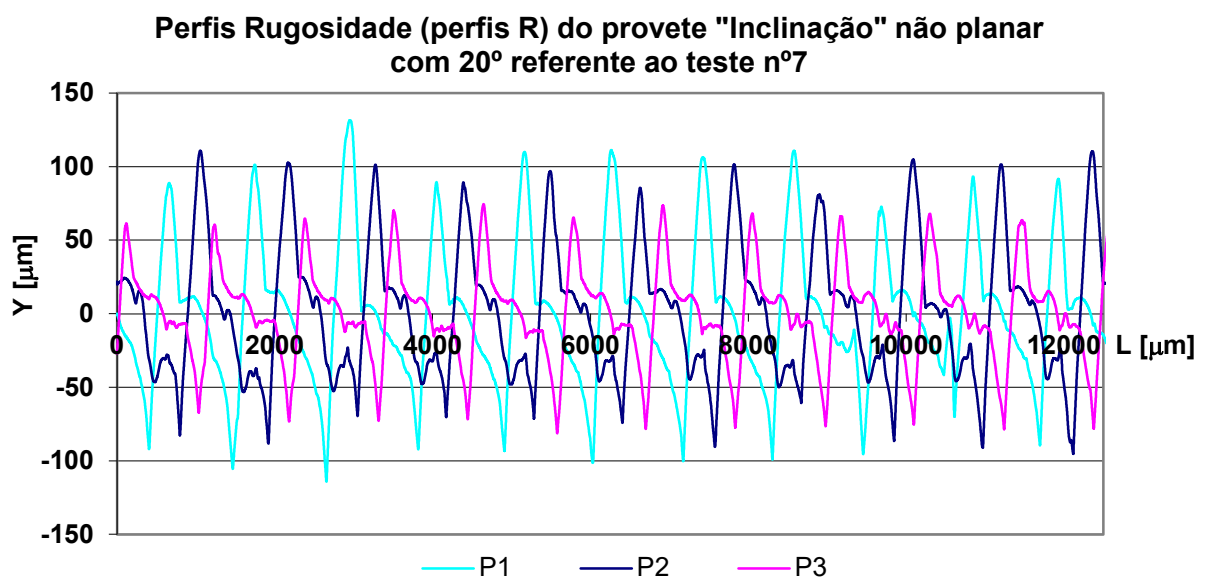


Figura 222 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 7.

Tabela 61 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 7.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste7_20°	35,69		258,54	
P2_teste7_20°	36,15		218,50	
P3_teste7_20°	22,89		162,58	
Teste7_20°	31,58	18,34	213,21	15,83

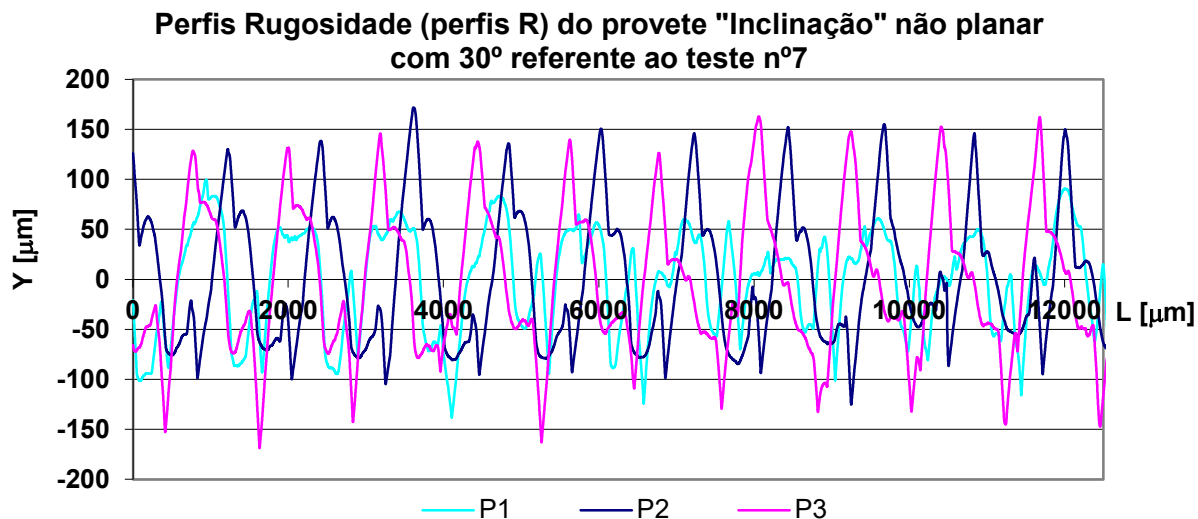


Figura 223 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 7.

Tabela 62 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 7.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste7_30°	43,14	13,46	262,67	10,57
P2_teste7_30°	57,56		300,53	
P3_teste7_30°	61,45		354,36	
Teste7_30°	54,05	13,46	305,85	10,57

8.5.16. Provetes do teste 8

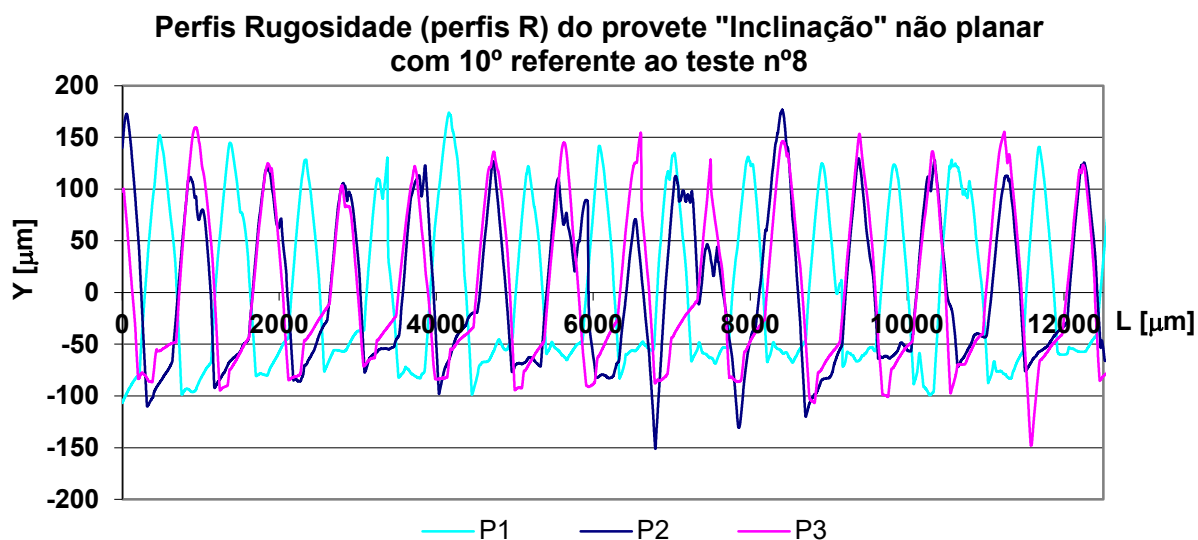


Figura 224 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 8.

Tabela 63 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 10° referente ao teste nº 8.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste8_10°	67,54		284,14	
P2_teste8_10°	64,05		345,10	
P3_teste8_10°	65,43		312,83	
Teste8_10°	65,67	1,89	314,02	6,60

Perfis Rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº8

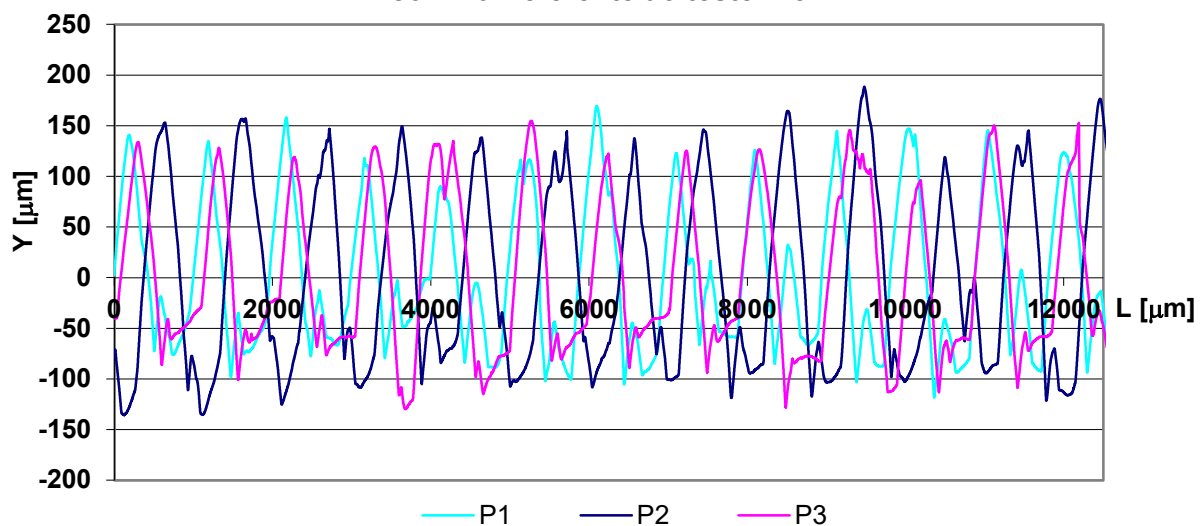


Figura 225 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 8.

Tabela 64 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 20° referente ao teste nº 8.

Designação	R _a (μm)	DPR R _a (%)	R _t (μm)	DPR R _t (%)
P1_teste8_20°	61,79		310,37	
P2_teste8_20°	80,10		341,74	
P3_teste8_20°	67,54		338,61	
Teste8_20°	69,81	9,83	330,24	4,01

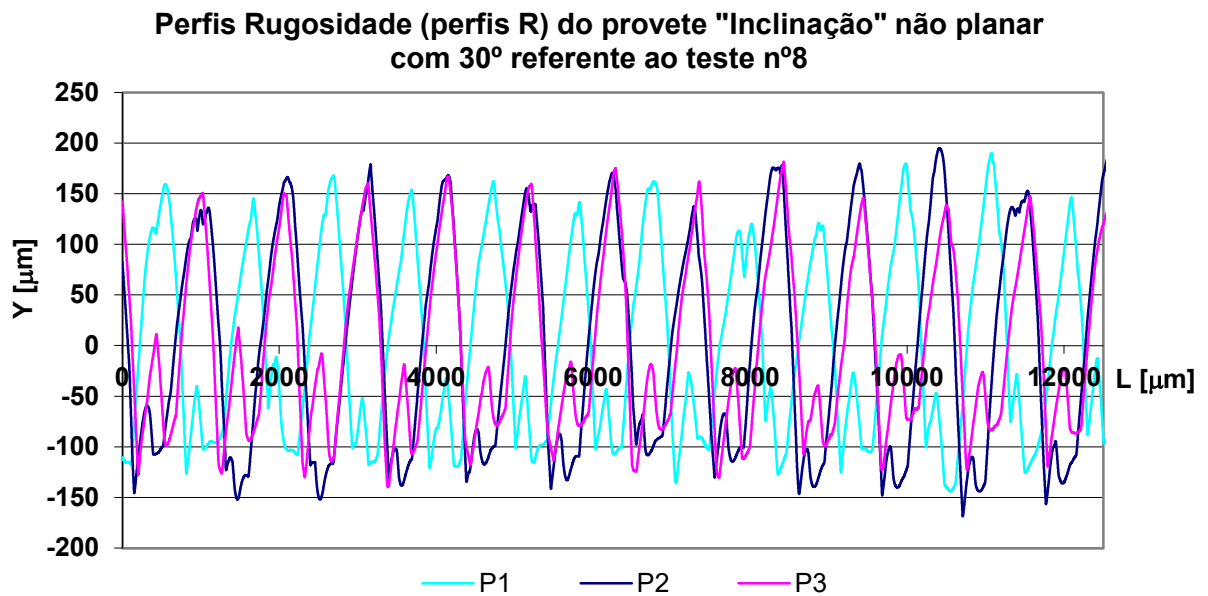


Figura 226 - Gráficos dos perfis rugosidade (perfis R) do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 8.

Tabela 65 - Valores obtidos nos ensaios de rugosidade do provete "Inclinação" não planar com 30° referente ao teste nº 8.

Designação	R_a (μm)	DPR R_a (%)	R_t (μm)	DPR R_t (%)
P1_teste8_30°	80,96		345,28	
P2_teste8_30°	97,39		367,62	
P3_teste8_30°	74,89		334,23	
Teste8_30°	84,40	10,26	349,04	3,55

8.6. Anexo F – Ensaios de tração

Neste documento, podemos encontrar todos os dados retirados dos ensaios de tração efetuado aos diversos provetes analisados. Uma vez finalizados os ensaios, foram extraídos os valores de força e deslocamento de cada provete e guardados numa folha Excel para posterior análise.

Estes valores foram processados posteriormente, dando origem a gráficos Tensão/Deformação e gráficos de linhas de tendência, dos respetivos gráficos Tensão/Deformação, para apuramento dos valores do Módulo de elasticidade para cada provete. Este módulo foi calculado com recurso à norma ISO 527, que caracteriza o intervalo segundo qual deve ser calculado o módulo de elasticidade ($0,05 \% \leq \epsilon \leq 0,25 \%$).

A determinação do módulo de elasticidade foi feita através do declive da equação da reta da regressão linear, dos valores obtidos, para o intervalo especificado na norma, do gráfico Tensão/Deformação. Para analisar a aproximação desta curva aos valores dos ensaios, foi calculado o coeficiente de determinação (fiabilidade), que nos informa da compatibilidade da regressão feita aos resultados obtidos.

Após a obtenção de todos os gráficos necessários foram tabelados os valores mais importante, para que depois estes valores pudessem ser utilizados para tirar conclusões e para comparar resultados. Uma vez feitas todas as tabelas com todos os dados dos ensaios de tração, foi feita uma média dos valores de todos os provetes, de cada tipologia de provetes, para apuramento dos valores globais.

Com o intuito de verificar a veracidade dos valores obtidos, foi calculado o desvio padrão relativo para verificar a precisão e a exatidão e a existência de alguma irregularidade.

8.6.1. Provetes planares - PLXY

Na curva PLXY1, do gráfico da (Fig. 226), podemos observar uma descontinuidade no ensaio, originada por causa de uma pausa durante o mesmo, efetuada para remover um extensómetro do provete, pois verificou-se que a sua utilização não seria necessária para o ensaio.

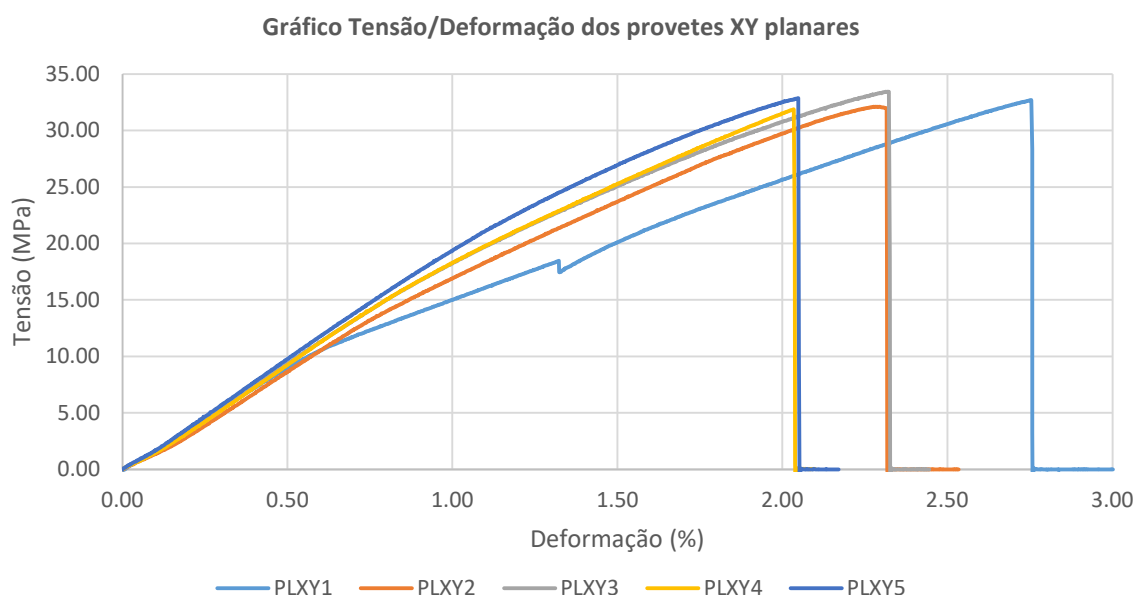


Figura 227 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY planares.

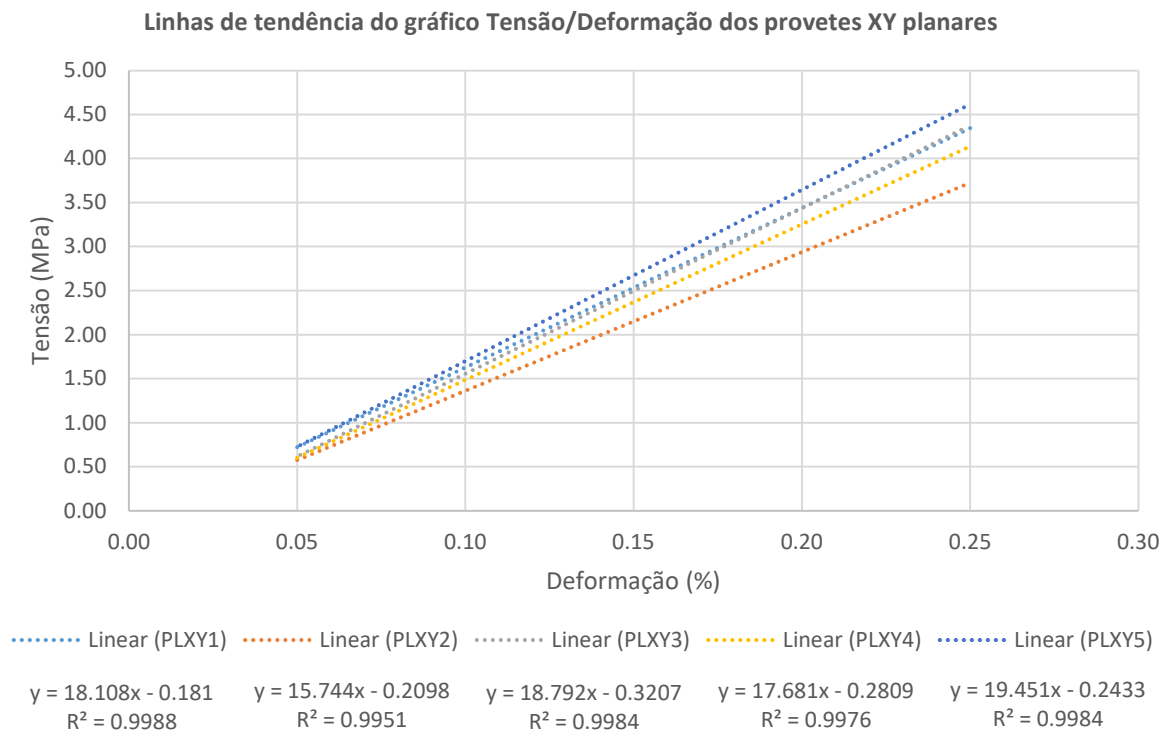


Figura 228 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY planares.

Tabela 66 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Zona de rotura
PLXY1	32,70	2,76	1,81	99,88	Planar
PLXY2	32,11	2,32	1,57	99,51	Planar
PLXY3	33,44	2,33	1,88	99,84	Planar
PLXY4	31,90	2,04	1,77	99,76	Planar
PLXY5	32,87	2,05	1,95	99,84	Planar
PLXY	32,60	2,30	1,80	---	---

Tabela 67 - Desvio padrão relativo dos provetes PLXY.

	Tensão Máxima	Deformação
PLXY	1,69 %	11,38 %

8.6.2. Provete XY 10° Não Planares - NPXY1

Neste ensaio, não só foi possível verificar um aumento nos valores das tensões máximas e da deformação, mas também uma mudança no comportamento do provete. Enquanto os provetes planares apresentaram um comportamento frágil, estes provetes apresentaram um comportamento um pouco mais parecido com um material dúctil sem patamar de escoamento definido.

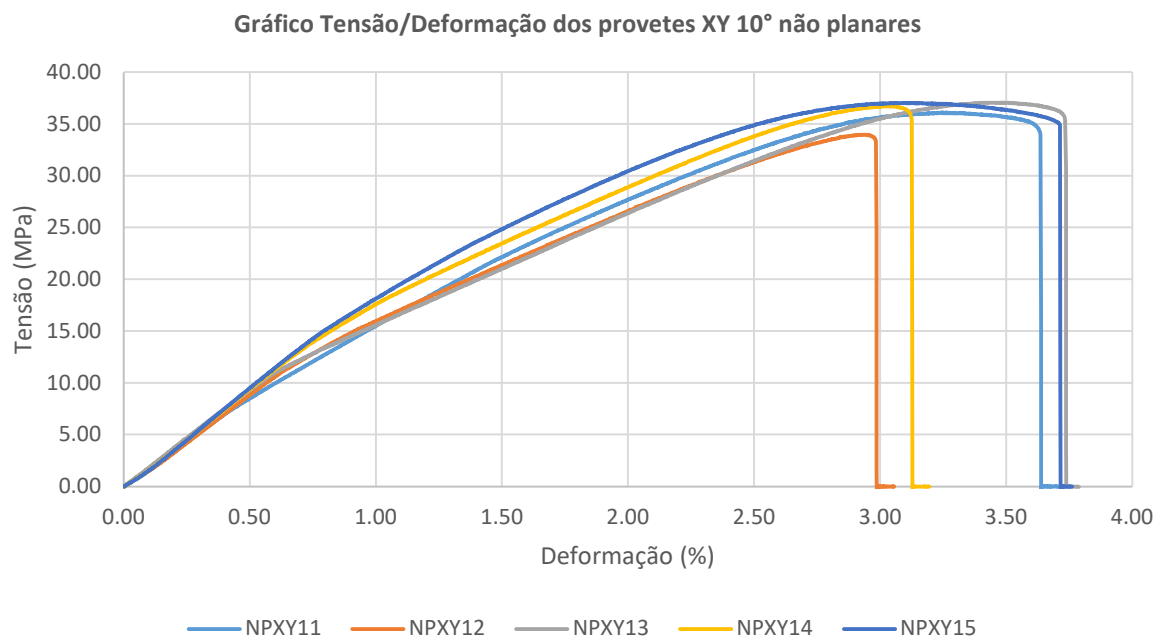


Figura 229 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 10° não planares.

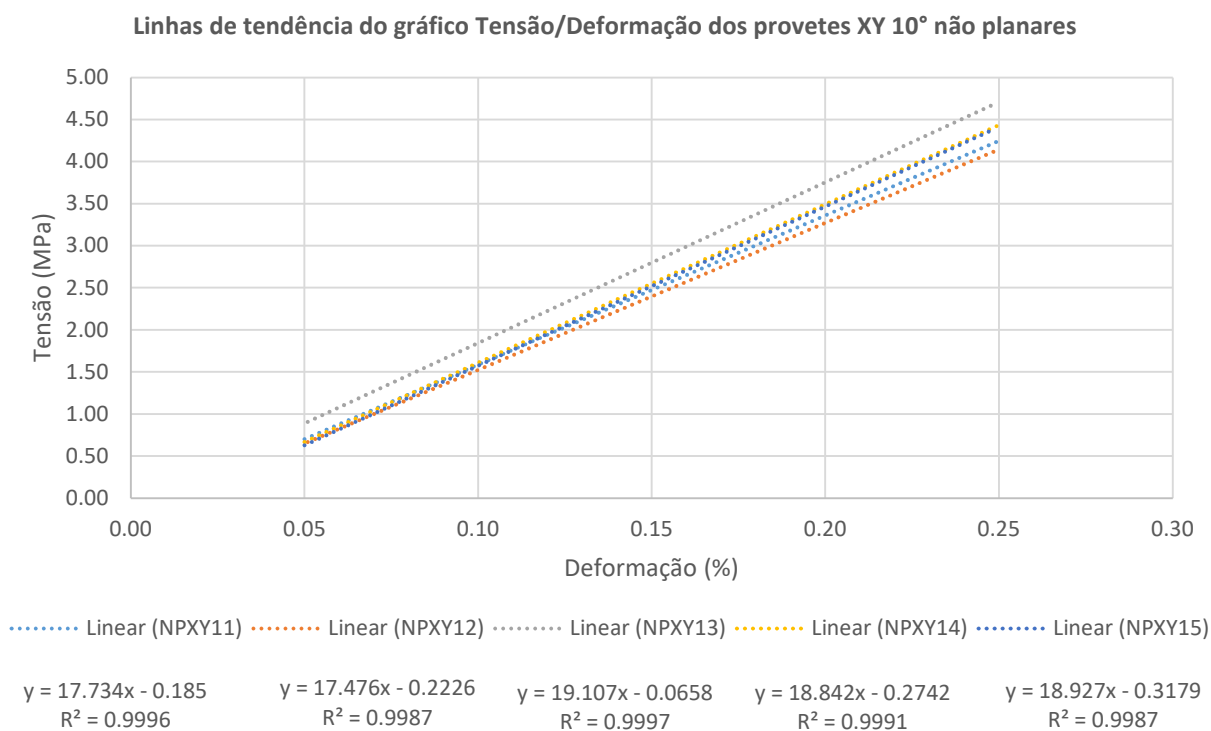


Figura 230 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 10° não planares.

Tabela 68 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 10° não planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Tipo de rotura
NPXY11	36,12	3,64	1,77	99,96	Planar
NPXY12	33,97	2,99	1,75	99,87	Transição entre planar e não planar
NPXY13	37,07	3,74	1,91	99,97	Planar
NPXY14	36,74	3,13	1,88	99,91	Transição entre planar e não planar
NPXY15	37,06	3,71	1,89	99,87	Planar
NPXY1	36,19	3,44	1,84	---	---

Tabela 69 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY1.

	Tensão Máxima	Deformação
NPXY1	3,21 %	9,26 %

8.6.3. Provetes XY 20° Não Planares - NPXY2

Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 20° não planares

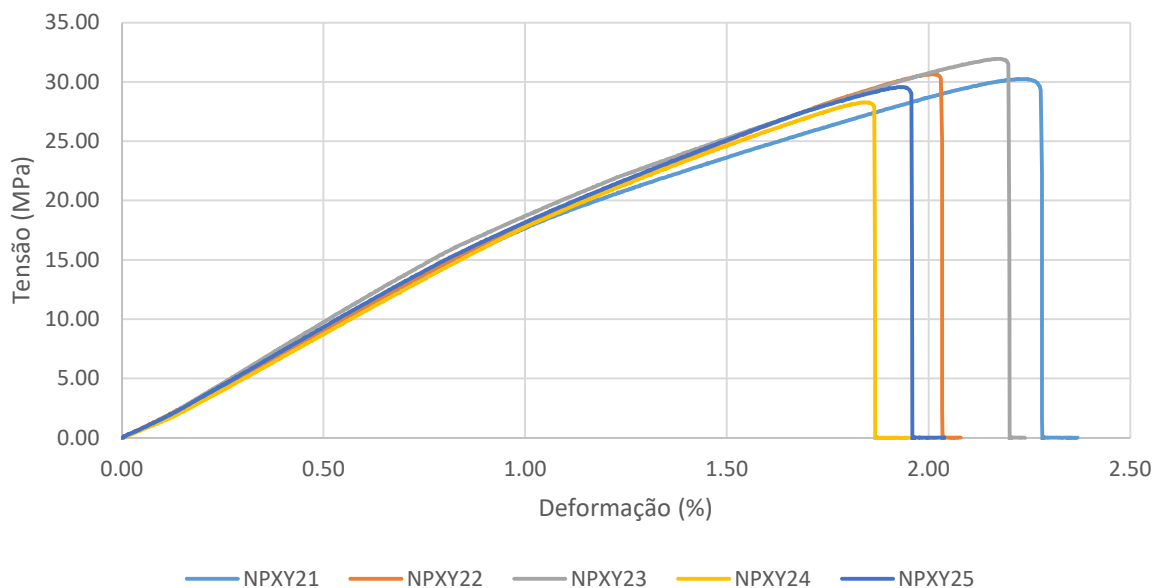


Figura 231 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 20° não planares.

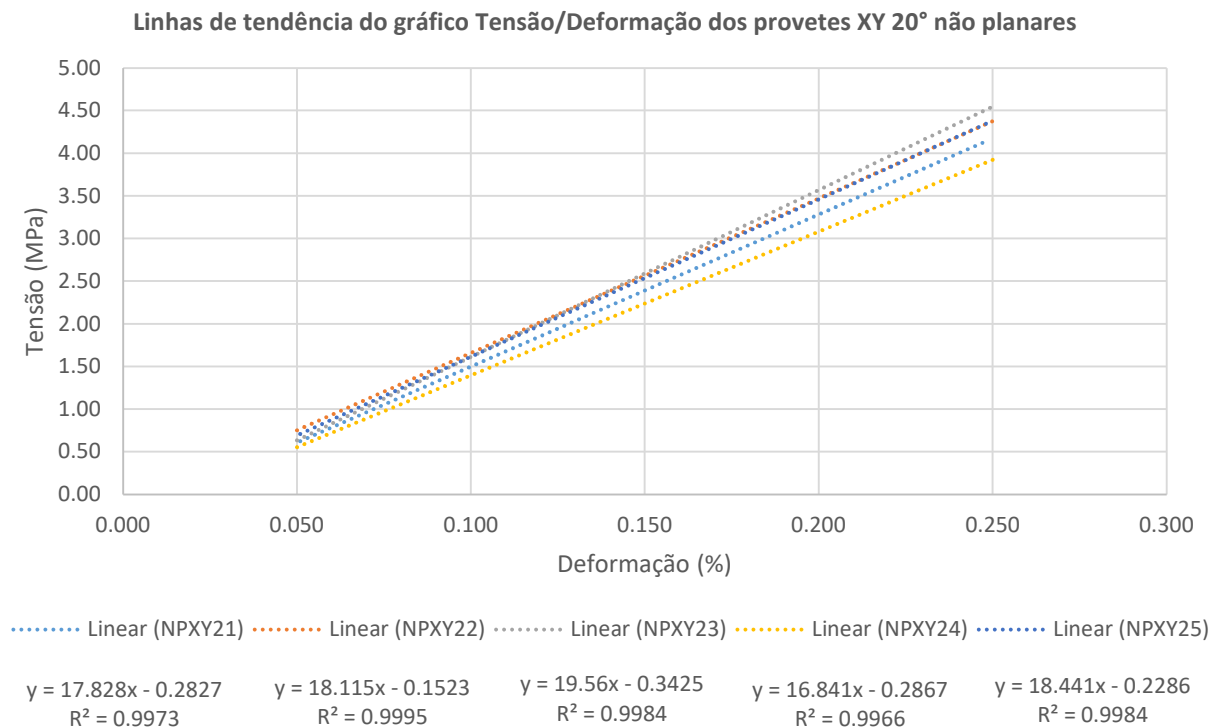


Figura 232 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 20° não planares.

Tabela 70 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 20° não planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Zona de rotura
NPXY21	30,25	2,28	1,78	99,73	Transição entre planar e não planar
NPXY22	30,66	2,03	1,81	99,95	Não planar
NPXY23	31,95	2,20	1,96	99,84	Não planar
NPXY24	28,29	1,87	1,68	99,66	Não planar
NPXY25	29,57	1,96	1,84	99,84	Planar
NPXY2	30,14	2,07	1,82	---	---

Tabela 71 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY2.

	Tensão Máxima	Deformação
NPXY2	4,01 %	7,37 %

8.6.4. Provete XY 30° Não planares - NPXY3

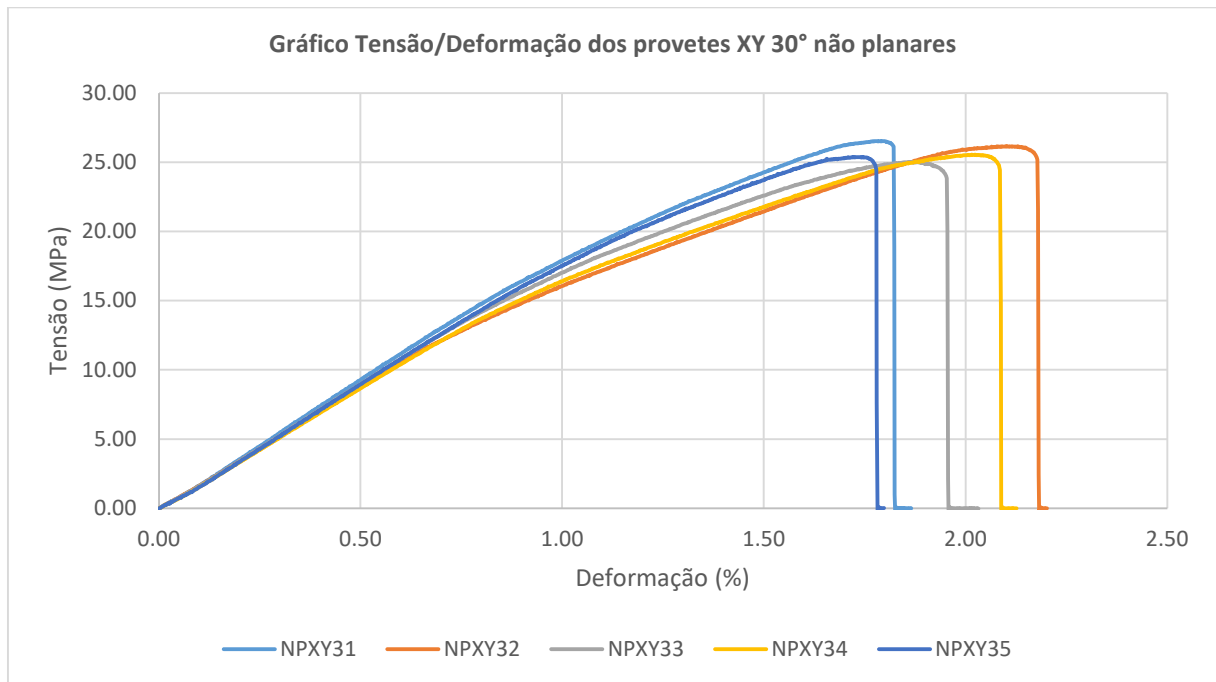


Figura 233 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 30° não planares.

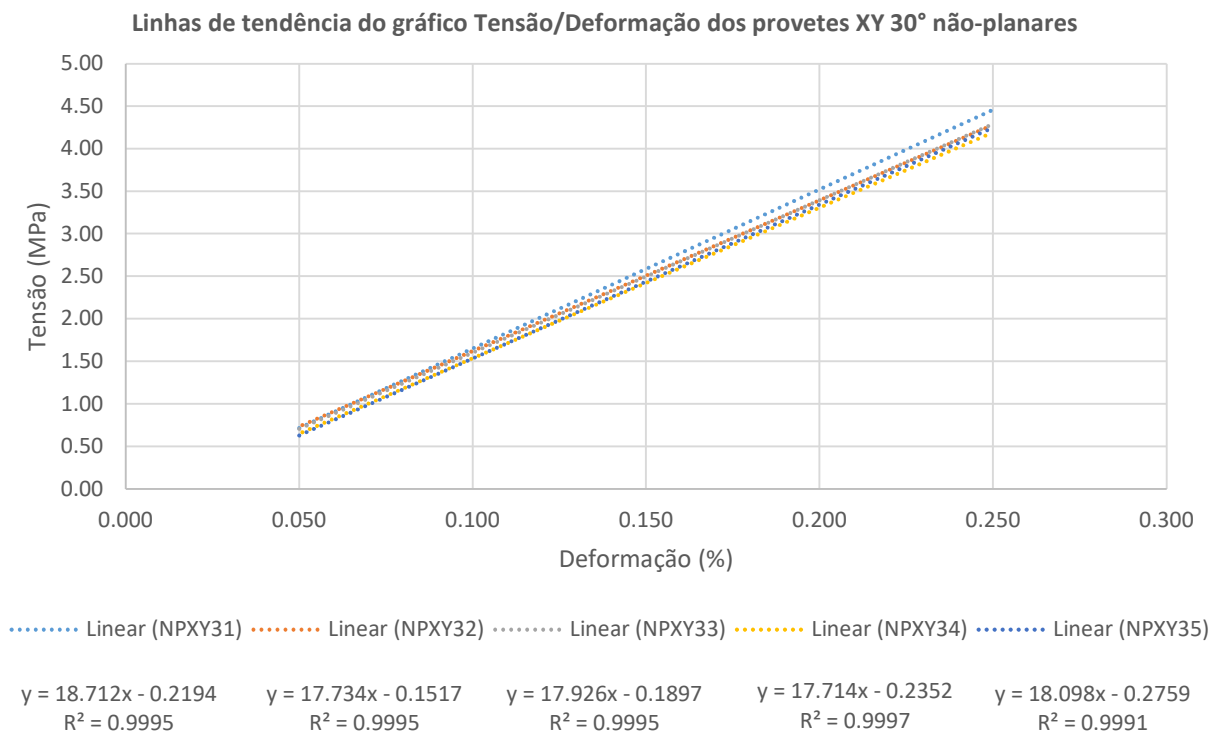


Figura 234 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes XY 30° não planares.

Tabela 72 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração XY 30° não planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Zona de rotura
NPX31	26,53	1,82	1,87	99,95	Não planar
NPXY32	26,19	2,18	1,77	99,95	Não planar
NPXY33	25,02	1,96	1,79	99,95	Não planar
NPXY34	25,56	2,09	1,09	99,97	Não planar
NPXY35	25,38	1,78	1,81	99,91	Não planar
NPXY3	25,74	1,97	1,80	---	---

Tabela 73 - Desvio padrão relativo dos provetes NPXY3.

	Tensão Máxima	Deformação
NPXY3	2,13 %	7,44 %

8.6.5. Provetes planares – NPZ

Nos ensaios de tração realizados aos provetes PL4 e PL5 ocorreu uma rotura antecipada dos mesmos, devido ao aperto excessivo das maxilas. Uma vez que, após rotura do provete, o seu comprimento ainda era suficiente para garantir o correto aperto das maxilas, o ensaio de tração foi realizado normalmente.

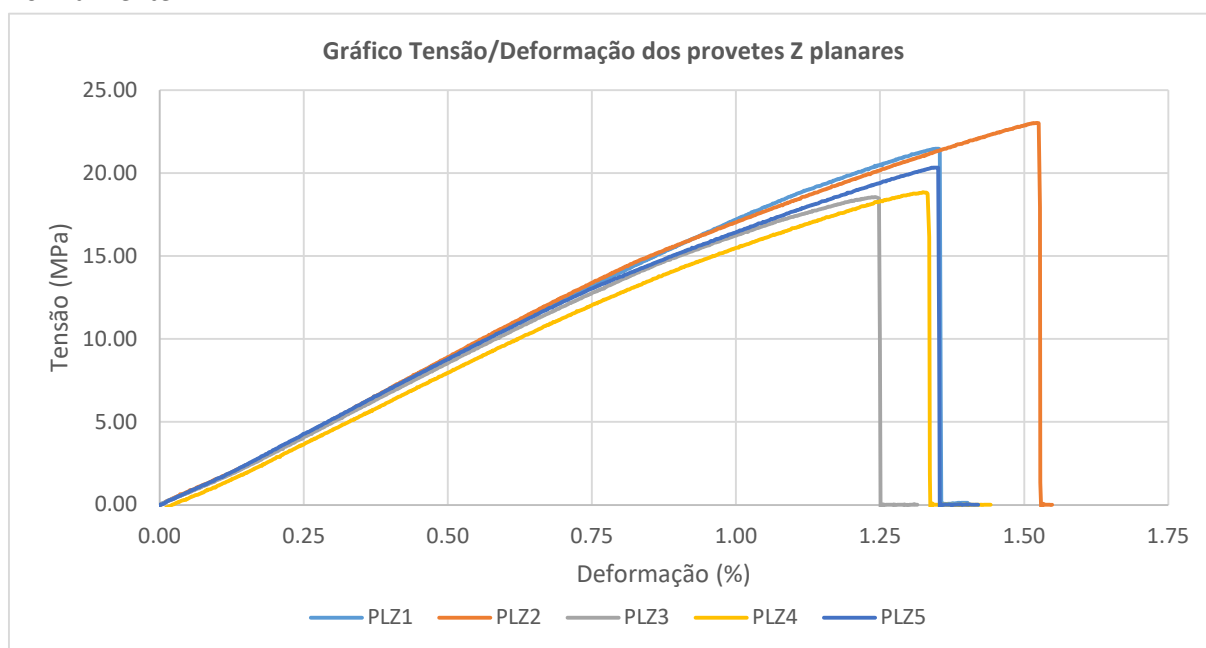


Figura 235 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z planares.

Verificou-se que a linha de tendência do provete PLZ4 ficou ligeiramente desfasada das restantes. Este desvio deve-se ao facto de, no momento de iniciar o ensaio, o provete não estar isento de solicitações. No início deste ensaio, o provete encontrava-se ligeiramente à compressão (com cerca de -0,37MPa de tensão), sendo que para a tensão de referência de 0 MPa o provete já possuía algum deslocamento.

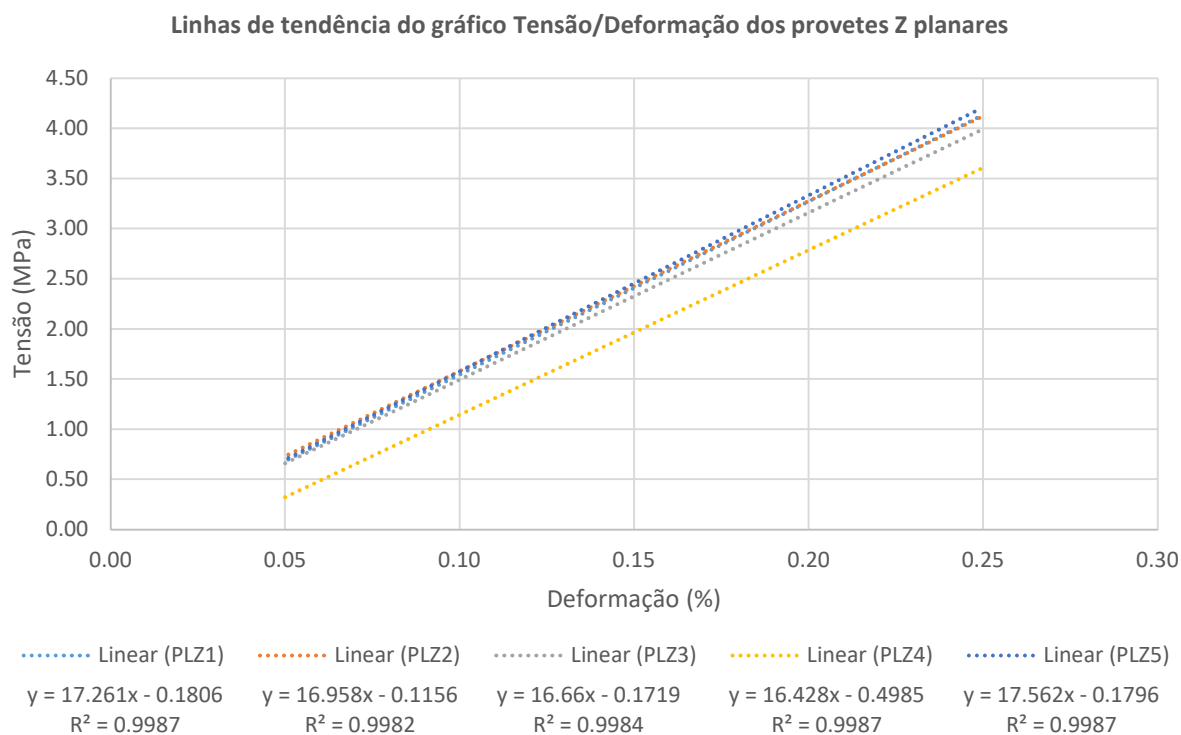


Figura 236 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z planares.

Tabela 74 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração Z planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Tipo de rotura
PLZ1	21,48	1,35	1,73	99,87	Separação e quebra de camadas
PLZ2	23,02	1,53	1,70	99,82	Separação de camadas
PLZ3	18,55	1,25	1,67	99,84	Separação de camadas
PLZ4	18,85	1,34	1,64	99,87	Separação e quebra de camadas
PLZ5	20,34	1,35	1,76	99,87	Separação de camadas
PLZ	20,45	1,36	1,70	---	---

Tabela 75 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ.

	Tensão Máxima	Deformação
PLZ	8,14 %	6,62 %

8.6.6. Provetes Z 10° Não planares – NPZ1

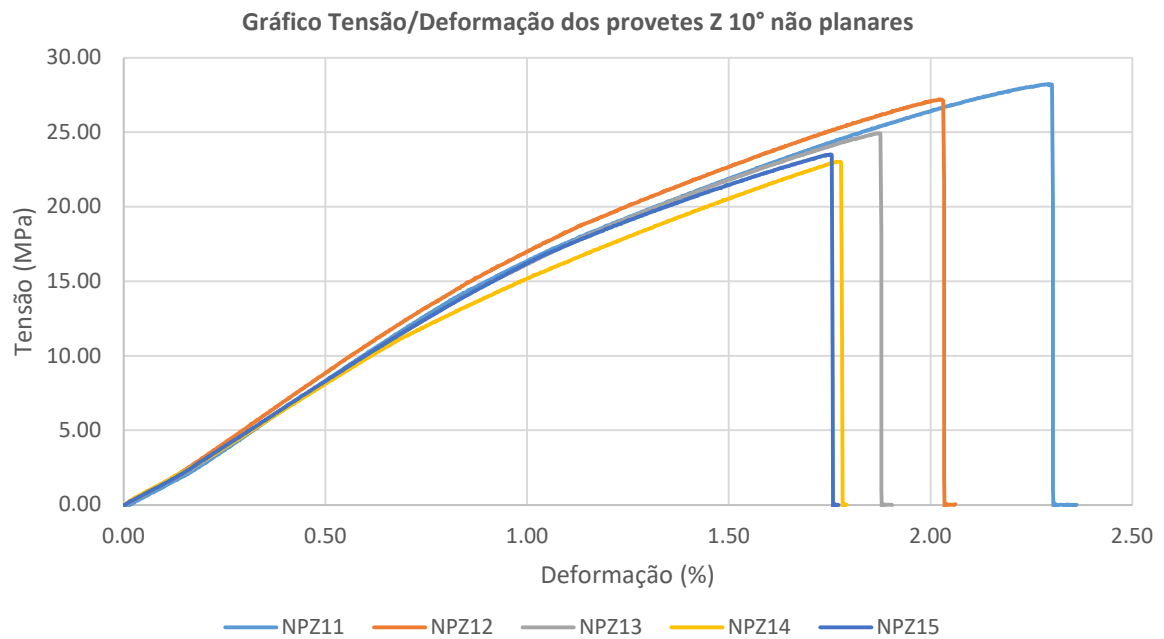


Figura 237 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 10° não planares.

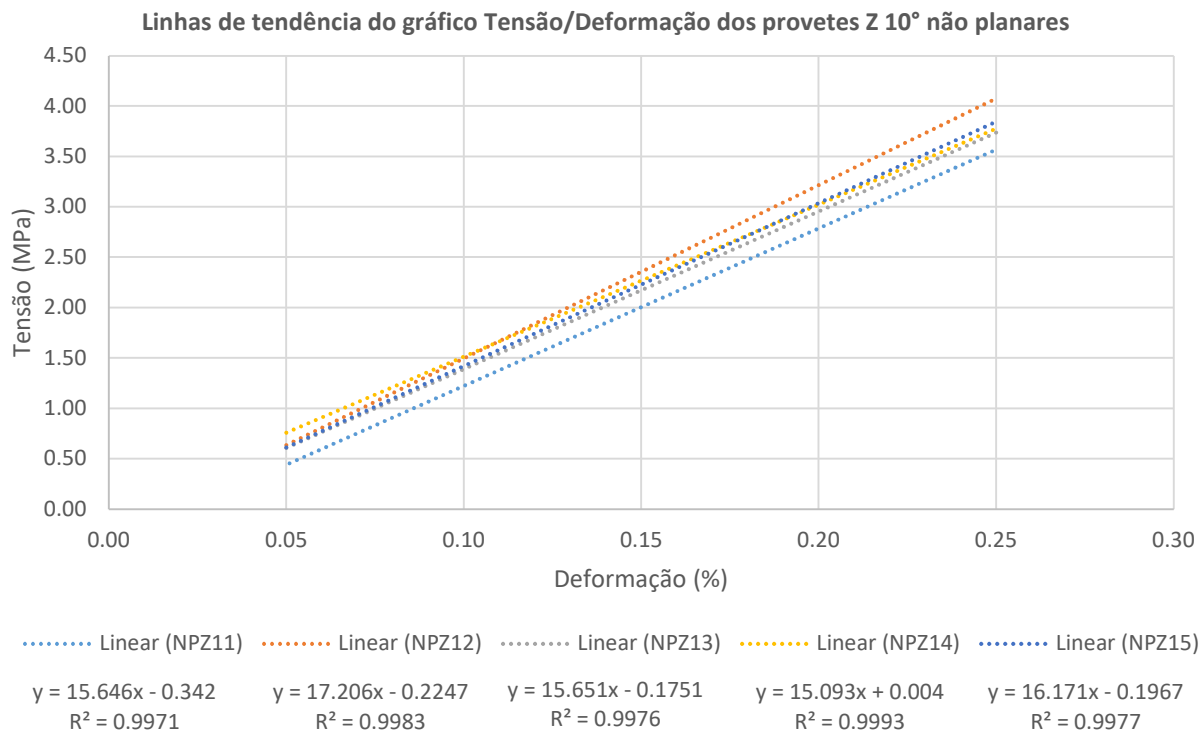


Figura 238 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 10° não planares.

Tabela 76 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração Z 10° não planares.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Tipo de rotura
NPZ11	28,23	2,30	1,56	99,71	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ12	27,22	2,03	1,72	99,83	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ13	24,92	1,88	1,57	99,76	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ14	23,02	1,78	1,51	99,93	Separação e quebra de camadas
NPZ15	23,50	1,76	1,62	99,77	Separação de camadas
NPZ1	25,38	1,95	1,60	---	---

Tabela 77 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ1.

	Tensão Máxima	Deformação
NPZ1	8,04 %	10,33 %

8.6.7. Provetes Z 20° Não planares – NPZ2

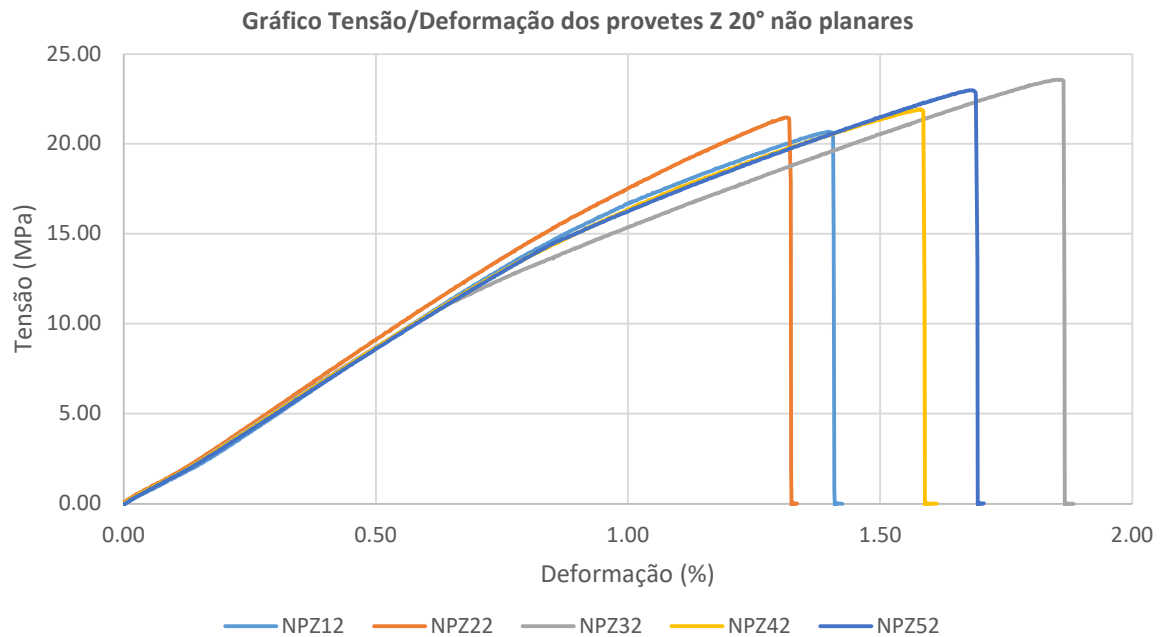


Figura 239 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 20° não planares.

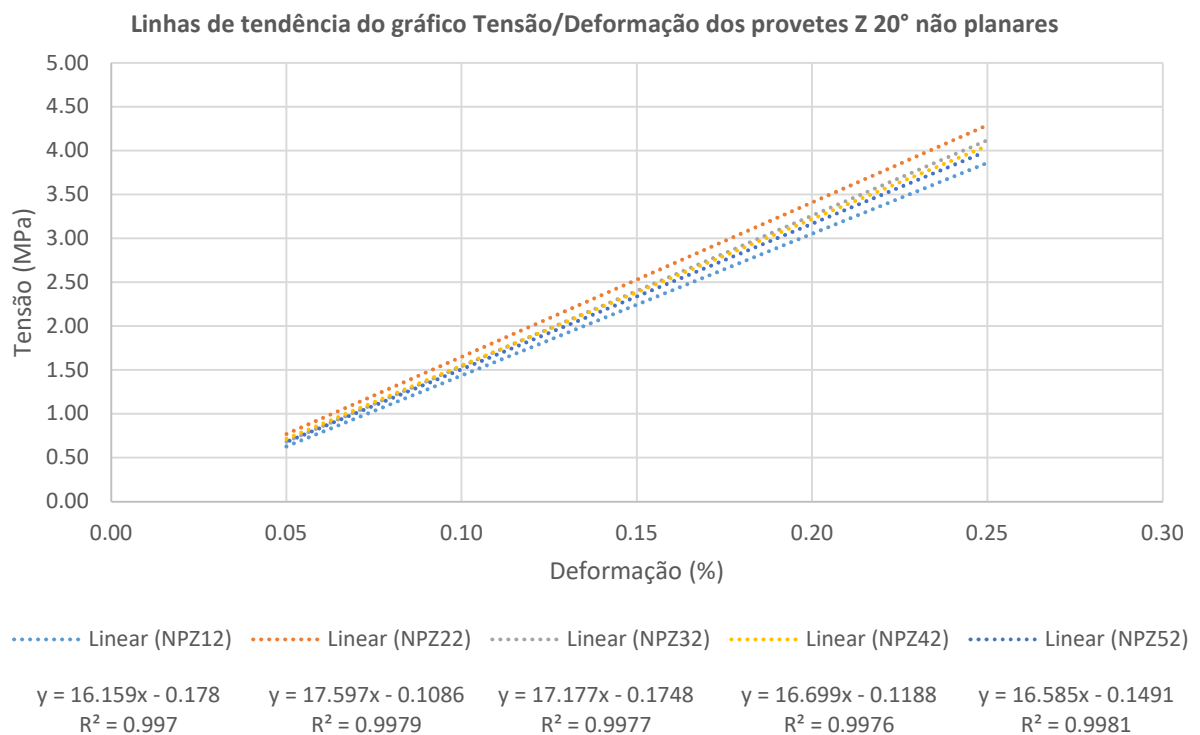


Figura 240 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 20° não planares.

Tabela 78 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração não planares Z 20°.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Tipo de rotura
NPZ21	20,68	1,41	1,62	99,70	Separação e quebra de camadas
NPZ22	21,46	1,32	1,76	99,79	Separação e quebra de camadas
NPZ23	23,57	1,87	1,72	99,77	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ24	21,93	1,59	1,67	99,76	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ25	21,93	1,69	1,66	99,81	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ2	22,13	1,58	1,68	---	---

Tabela 79 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ2.

	Tensão Máxima	Deformação
NPZ2	4,69 %	12,37 %

8.6.8. Provetes Z 30° Não planares – NPZ3

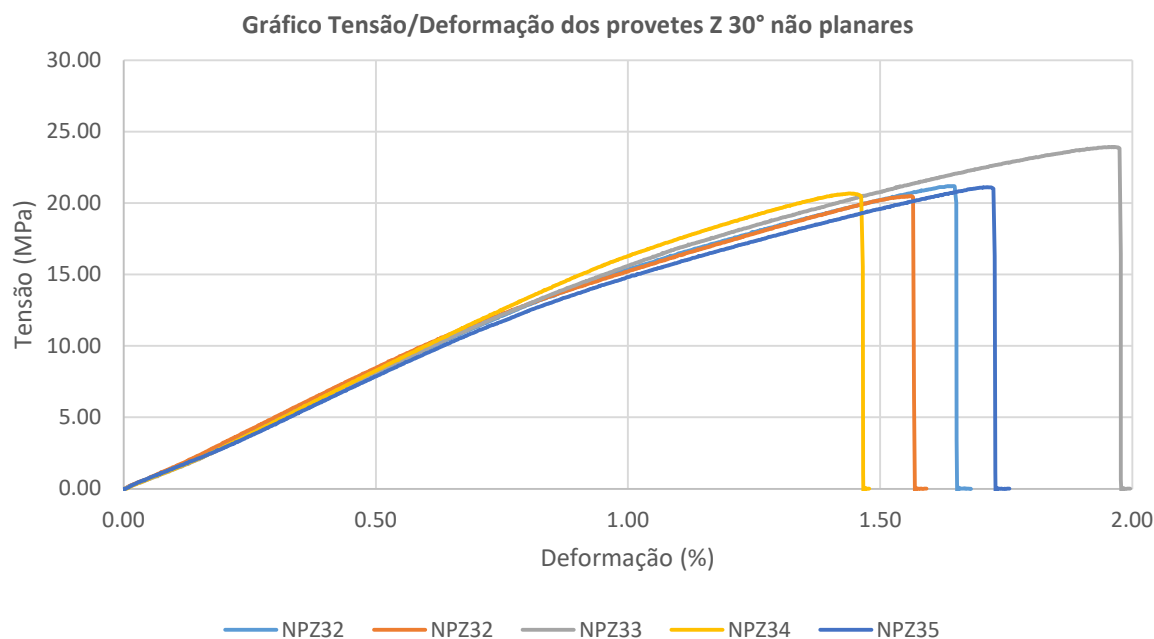


Figura 241 - Gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 30° não planares.

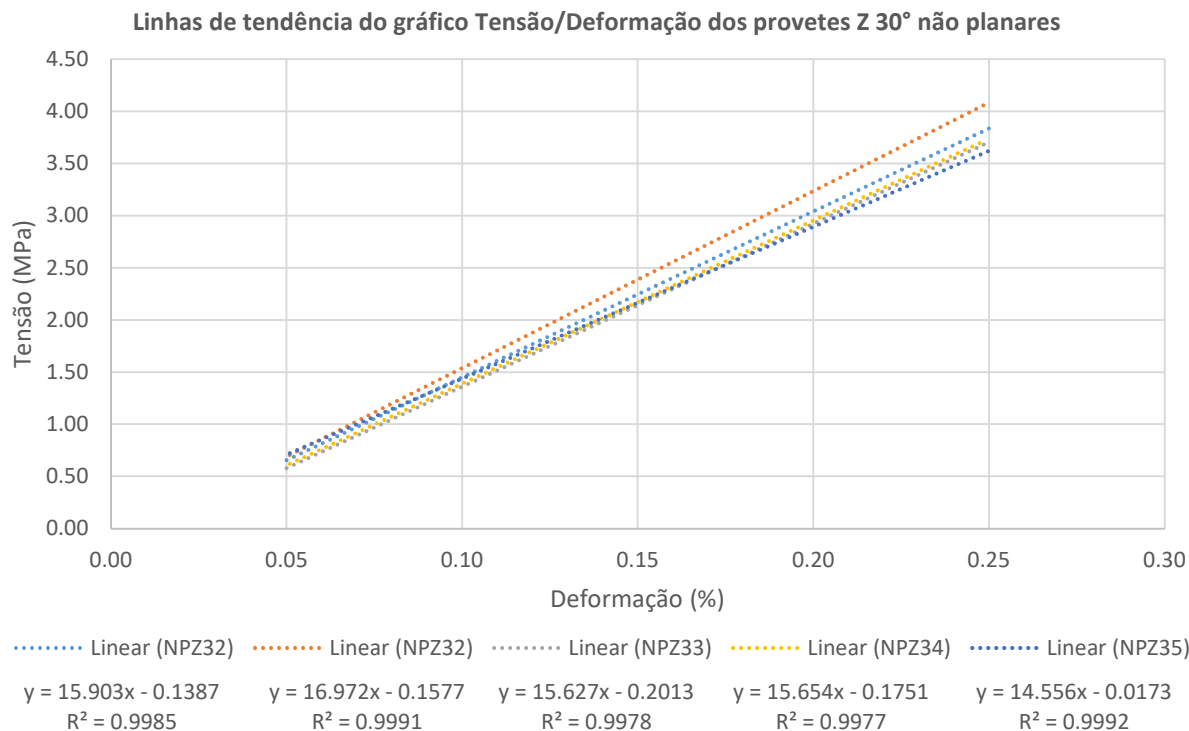


Figura 242 - Linhas de tendência do gráfico Tensão/Deformação dos provetes Z 30° não planares.

Tabela 80 - Propriedades mecânicas dos provetes de tração não planares Z 30°.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fiabilidade (%)	Tipo de rotura
NPZ31	21,20	1,65	1,59	99,85	Separação e quebra de camadas
NPZ32	20,49	1,57	1,70	99,91	Separação de camadas com ligeira quebra das mesmas
NPZ33	23,92	1,98	1,56	99,78	Separação e quebra de camadas
NPZ34	20,67	1,47	1,57	99,77	Separação e quebra de camadas
NPZ35	21,11	1,73	1,46	99,92	Separação e quebra de camadas
NPZ3	21,48	1,68	1,57	---	---

Tabela 81 - Desvio padrão relativo dos provetes NPZ3.

	Tensão Máxima	Deformação
NPZ3	5,82 %	10,33 %

