



## Otimização de parâmetros e estudo de técnicas de pós-processamento de peças fabricadas por FDM

NUNO FILIPE MATOS PEIXOTO DE SOUSA

setembro de 2021

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E ESTUDO DE TÉCNICAS  
DE PÓS-PROCESSAMENTO DE PEÇAS FABRICADAS POR  
*FUSED DEPOSITION MODELING***

Nuno Filipe Matos Peixoto de Sousa

1141139

**2020/2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E ESTUDO DE TÉCNICAS DE PÓS-PROCESSAMENTO DE PEÇAS FABRICADAS POR *FUSED DEPOSITION MODELING*

Nuno Filipe Matos Peixoto de Sousa  
1141139

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva.

**2020/2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP

## **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP

## **Arguente**

Doutor Fernando Jorge Lino Alves

Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer à empresa *Lani Robotics* a oportunidade do estágio e principalmente, à Liliane, ao Filipe e ao Luís, o auxílio e o ânimo que me deram ao longo deste projeto.

Um agradecimento especial ao Óscar por me ter acompanhado ao longo do mestrado, e neste trabalho, como amigo e orientador, apoiando-me em todos os momentos.

Quero agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco Silva, o apoio, a disponibilidade e a orientação ao longo de todo o estágio. À Engenheira Fátima Andrade pela disponibilidade e pela ajuda nos laboratórios do ISEP.

À Adriana, a minha namorada, agradeço a motivação, o apoio incansável e por nunca ter deixado de acreditar em mim, que tornou possível, não só este trabalho, como toda a minha caminhada na engenharia.

Aos meus pais e irmãos, agradeço o suporte incondicional que sempre demonstraram ao longo da minha vida, nos bons e maus momentos, nos meus sonhos e ambições.

Por último, a todos os colegas e amigos com os quais partilhei muitos momentos, quero agradecer a amizade, o companheirismo e a alegria que me trouxeram no meu percurso académico.



## PALAVRAS CHAVE

Manufatura Aditiva, *Fused Deposition Modeling*, Pós-processamento, Materiais Compósitos, *Vapour Smoothing*, *Dipping*, *Rugosidade*, *Propriedades mecânicas*, ASA, PC

## RESUMO

A manufatura aditiva é considerada uma das tecnologias que influenciou e desencadeou uma nova revolução industrial, modificando os conceitos e imaginação da produção industrial através da manufatura digital e da Indústria 4.0. Neste trabalho, com recurso a máquinas de tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), estabeleceu-se como primeiro objetivo o estudo da influência que alguns parâmetros têm no tempo de produção e na qualidade final da peça, mais concretamente a nível de acabamento superficial, rigor dimensional e resistência mecânica. Para isso, foram produzidas, analisadas e ensaiadas peças teste como capas de telemóvel em TPU, *fork grippers* e provetes de tração em ASA e PC. Devido ao efeito escada e elevada rugosidade das peças produzidas por esta tecnologia, considerou-se importante estudar diferentes técnicas de pós-processamento tanto físicas como químicas, entre as quais o *dipping* e o *vapour smoothing*, para vários tipos de materiais, como o PLA, o PETG e o ASA, utilizando como reagentes, metil-etil-cetona (MEK), acetona e diclorometano, estabelecendo-se, assim, o segundo objetivo. Após a análise das peças sujeitas aos pós-processamentos foram indicados os melhores técnicas para cada material. O terceiro objetivo definido foi o estudo dos parâmetros de provetes de tração produzidos com materiais compósitos de matriz polimérica (Nylon ou PETG) reforçados com fibras curtas de carbono, e/ou contínuas de carbono através da realização de testes à tração. A partir do primeiro objetivo foi possível observar que, nos materiais ASA e PC, a percentagem de *infill* não tem muito impacto na rugosidade e que a espessura de camada foi o parâmetro com maior influência nas propriedades mecânicas, por exemplo. Através das técnicas *dipping* e *vapour smoothing* verificou-se uma redução máxima da rugosidade de, aproximadamente, 97% e 99%, respetivamente. Com o terceiro objetivo, analisando os provetes reforçados com fibras curtas de carbono, verificou-se que a orientação de construção tem um grande impacto nas propriedades mecânicas, garantindo um aumento da tensão máxima de 20% para a mesma espessura de camada, comparando com orientação de construção

vertical com a horizontal. Por último, com os ensaios de tração, obteve-se um valor máximo de tensão de 379,36 MPa para os provetes compósitos reforçados com fibras contínuas de carbono.

**KEYWORDS**

Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Post-processing Techniques, Composites, Vapour Smoothing, Dipping, Roughness, Mechanical Properties, ASA, PC

**ABSTRACT**

Additive manufacturing is considered one of the technologies that influenced and triggered a new industrial revolution, changing the concepts and imagination of industrial production through digital manufacturing and Industry 4.0. In this work, using Fused Deposition Modeling (FDM) technology machines, the first aim was to study the influence that some parameters have on production time and on the final quality of the pieces, specifically in terms of surface finish, dimensional accuracy, and mechanical strength. For this, test pieces were produced, analyzed and tested, such as mobile phone cases in TPU, fork grippers and tensile specimens in ASA and PC. Due to the staircase effect and the high roughness of the parts produced by this technology, it was considered important to study different post-processing techniques, both physical and chemical, including dipping and vapour smoothing, for a variety of materials, such as PLA, PETG and ASA, using reagents such as methyl-ethyl-ketone (MEK), acetone and dichloromethane, establishing the second objective. After analyzing the parts subjected to post-processing, the best techniques for each material were obtained. The third aim defined was the study of the parameters of tensile specimens produced with polymer matrix composites (Nylon or PETG) reinforced with short carbon fibers, and/or continuous carbon fibers through the performance of tensile tests. As result for the first aim, it was possible to observe that, in ASA and PC materials, the infill percentage does not have much impact on roughness and the layer thickness was the parameter with the major influence on mechanical properties. Through the dipping and vapour smoothing techniques there was a maximum reduction of approximately 97% in roughness and 99%, respectively. Furthermore, analyzing the specimens reinforced with short carbon fibers, it was found that the construction orientation has a great impact on the mechanical properties, ensuring a maximum stress increase of 20% for the same layer thickness, comparing the vertical construction orientation with horizontal orientation. Finally, with the tensile tests, a maximum stress value of 379.36 MPa was obtained for the composite specimens reinforced with continuous carbon fibers.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

|      |  |
|------|--|
| 3D   | Tridimensional                                   |
| AM   | Manufatura aditiva                               |
| ABS  | Acrilonitrilo-butadieno-estireno                 |
| ASA  | Acrilonitrilo-estireno-acrilato                  |
| ASTM | <i>American Society of Testing and Materials</i> |
| CAD  | <i>Computer-Aided Design</i>                     |
| CLIP | <i>Continuous Liquid Interface Production</i>    |
| CMM  | <i>Coordinate Measuring Machine</i>              |
| DCM  | Diclorometano                                    |
| DLP  | <i>Digital Light Processing</i>                  |
| DMD  | <i>Digital micromirrors devices</i>              |
| DMLS | <i>Direct Metal Laser Sintering</i>              |
| EBM  | <i>Electron Beam Melting</i>                     |
| FDM  | <i>Fused Deposition Modeling</i>                 |
| FFF  | <i>Fused Filament Fabrication</i>                |
| HSHT | <i>High Strenght High Temperature</i>            |
| IPA  | Álcool isopropílico                              |
| LOM  | <i>Laminated Object Manufacturing</i>            |
| LPBF | <i>Laser Powder Bed Fusion</i>                   |
| MEK  | Metil-etil-cetona                                |
| PC   | Policarbonato                                    |
| PEEK | Polieter-eter-cetona                             |
| PETG | Polietileno tereftalato glicol                   |
| PLA  | Ácido polilático                                 |
| PVA  | Álcool polivinílico                              |
| SEM  | Microscopia eletrónica de varrimento             |
| SLA  | <i>Stereolithography Apparatus</i>               |
| SLM  | <i>Selective Laser Melting</i>                   |
| SLS  | <i>Selective Laser Sintering</i>                 |
| STL  | <i>STereoLithography</i>                         |
| TPU  | Poliuretano termoplástico                        |
| UAM  | <i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>         |
| UV   | Ultravioleta                                     |

### Lista de Unidades

|    |               |
|----|---------------|
| °C | Graus Celcius |
| μm | Micron        |

---

|                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| cm <sup>3</sup> /h | Centímetros cúbicos por hora |
| GPa                | Gigapascal                   |
| mm                 | Milímetro                    |
| mm/s               | Milímetros por segundo       |
| mm <sup>3</sup>    | Milímetros cúbicos           |
| MPa                | Megapascal                   |
| s                  | segundo                      |

---

#### Lista de Símbolos

---

|  |                              |
|--|------------------------------|
| %  | Porcentagem                  |
| C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O              | Acetato de Etilo             |
| C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> | Tetrahidrofurano             |
| CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub>              | Diclorometano                |
| CHCl <sub>3</sub>                            | Clorofórmio                  |
| wt%  | Porcentagem de teor de fibra |
| Wt   | Ondulação média              |

---

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

|               |  |
|---------------|--|
| <i>Nozzle</i> | Componente de uma máquina FDM que deposita o material em estado derretido na plataforma de construção.   |
| <i>Brim</i>   | Camada de material que rodeia a peça a produzir de modo a garantir maior aderência da mesma na plataforma de construção, não afetando a qualidade da primeira camada de impressão. |
| <i>Skirt</i>  | Perímetro exterior que rodeia a peça a produzir, mas sem tocar nesta, com o objetivo de estabelecer uma extrusão suave antes da impressão.   |
| <i>Raft</i>   | Conjunto de camadas impressas diretamente por baixo da peça de modo a melhorar a adesão e evitar empenos.  |

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - SETORES DA MANUFATURA ADITIVA [11] .....  | 10 |
| FIGURA 2 - PROPÓSITO DE PEÇAS MANUFATURADAS [11].....  | 11 |
| FIGURA 3 - MATERIAIS FORNECIDOS PARA A MANUFATURA ADITIVA [11].....  | 11 |
| FIGURA 4 - TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA OFERECIDAS [13].....  | 12 |
| FIGURA 5 - TECNOLOGIAS COM MAIORES RECEITAS [13].....  | 12 |
| FIGURA 6 – A) ESQUEMA DO PROCESSO FDM [31]. B) EXEMPLO DE UMA IMPRESSORA 3D FDM [32] ....  | 15 |
| FIGURA 7 - TIPOS DE IMPRESSORAS FDM SEGUNDO A MOVIMENTAÇÃO DE IMPRESSÃO [29].....  | 16 |
| FIGURA 8 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE ALGUNS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO [49] .....  | 19 |
| FIGURA 9 - EXEMPLO DE UMA IMPRESSÃO COM FRACA ADERÊNCIA ENTRE O MATERIAL DEPOSITADO E<br>A PLATAFORMA DE CONSTRUÇÃO [59] .....   | 23 |
| FIGURA 10 - EXEMPLO DE UMA PEÇA COM <i>UNDER-EXTRUSION</i> [61] .....  | 24 |
| FIGURA 11 - EXEMPLO DE UMA PEÇA COM <i>OVER-EXTRUSION</i> [59] .....   | 24 |
| FIGURA 12 - EXEMPLO DE UMA PEÇA COM <i>OVERHEATING</i> [59] .....  | 25 |
| FIGURA 13 - EXEMPLO DE UMA PEÇA COM <i>STRINGING</i> [59].....   | 25 |
| FIGURA 14 – A) EXEMPLO DE UMA PEÇA COM PROBLEMAS DE <i>BRIDGES</i> [59]. B) EXEMPLO DE UMA PEÇA<br>COM PROBLEMAS DE <i>OVERHANG</i> .....  | 26 |
| FIGURA 15 - EXEMPLO DE PEÇA COM <i>BLOBS</i> OU <i>ZITS</i> [59] .....   | 27 |
| FIGURA 16 - EXEMPLO DE PEÇA COM EMPENAMENTO [59] .....   | 28 |
| FIGURA 17 - EXEMPLO DE PEÇA COM DELAMINAÇÃO [59] .....   | 28 |
| FIGURA 18 - EXEMPLO DE PEÇA COM <i>PILLOWING</i> [61] .....  | 29 |
| FIGURA 19 - EXEMPLO DE PEÇA COM <i>ELEPHANT FOOT</i> [61] .....  | 29 |
| FIGURA 20 - ORGANOGRAMA DA EMPRESA .....   | 43 |
| FIGURA 21 - MÁQUINA <i>PRUSA MK3S</i> .....  | 50 |
| FIGURA 22 - MÁQUINA <i>MARKFORGED MARK TWO</i> .....   | 50 |
| FIGURA 23 - A) MÁ CALIBRAÇÃO COM O <i>NOZZLE</i> DEMASIADO ELEVADO B) BOA CALIBRAÇÃO COM<br>DISTÂNCIA IDEAL ENTRE <i>NOZZLE</i> E PLATAFORMA C) MÁ CALIBRAÇÃO COM O <i>NOZZLE</i> DEMASIADO<br>BAIXO [96]..... | 53 |
| FIGURA 24 - CALIBRAÇÃO " <i>FIRST LAYER CALIBRATION</i> " COM O FILAMENTO <i>PRUSAMENT PETG</i> .....  | 53 |
| FIGURA 25 - A) CAMADA DA PRIMEIRA TENTATIVA DE CALIBRAÇÃO. B) DETALHE DAS SALIÊNCIAS NA<br>CAMADA. ....  | 54 |
| FIGURA 26 - A) DETALHE DO CENTRO DA CAMADA. B) DETALHE DA CAMADA COM <i>UNDER-EXTRUSION</i><br>ACENTUADO NO LADO ESQUERDO DA PLATAFORMA. ....  | 54 |
| FIGURA 27 - A) CAMADA COM BOA CALIBRAÇÃO. B) CAMADA COM BOA CALIBRAÇÃO NO LADO EM<br>CONTACTO COM A PLATAFORMA DE CONSTRUÇÃO .....   | 55 |
| FIGURA 28 - EXEMPLO DE <i>BRIDGE</i> DE 1MM A 10 MM.....   | 56 |
| FIGURA 29 - EXEMPLO DE <i>OVERHANG</i> .....   | 56 |
| FIGURA 30 - EXEMPLO DE PEÇA DE CONCAVIDADES .....  | 57 |
| FIGURA 31 - EXEMPLO DE CUBO RECORTADO .....  | 57 |
| FIGURA 32 - ORGANOGRAMA DOS TESTES REALIZADOS .....  | 58 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 33 - MODELO 3D DA CAPA DE TELEMÓVEL.....   | 59 |
| FIGURA 34 - CAD DO <i>FORK GRIPPER</i> .....  | 61 |
| FIGURA 35 - DIMENSÕES DOS PROVETES SEGUNDO A NORMA ASTM D638 .....  | 62 |
| FIGURA 36 – 1. AQUECER O PARAFUSO COM UMA PISTOLA DE AR QUENTE; 2. INSERIR O PARAFUSO NA PARTE INFERIOR DO CUBO; 3. REGULAR A TEMPERATURA DO REAGENTE; 4. MERGULHAR O CUBO NO REAGENTE; 5. DEIXAR O CUBO SECAR; 6. COLOCAR O CUBO NA MÁQUINA DE CURA COM A TEMPERATURA E O TEMPO ESTIPULADOS. ....  | 64 |
| FIGURA 37 - CAD DO CUBO VAPOUR SMOOTHING.....   | 64 |
| FIGURA 38 – 1. COLOCAR A QUANTIDADE ESTIPULADA DE REAGENTE NA MÁQUINA; 2. AJUSTAR A TEMPERATURA DO ENSAIO; 3. COLOCAR UM TERMÓMETRO PARA GARANTIR A TEMPERATURA DEFINIDA; 4. FECHAR A TAMPA DE MODO AO REAGENTE AQUECER E CRIAR VAPOR; 5. ABRIR A TAMPA E COLOCAR A PEÇA; 6. FECHAR A TAMPA E ESPERAR O TEMPO ESTIPULADO DO ENSAIO; 7. RETIRAR A CONJUNTO, CESTO, BASE, TERMÓMETRO E CUBO DE MODO A NÃO TOCAR NESTE ÚLTIMO; 8. DEIXAR SECAR E COLOCAR, POSTERIORMENTE, O CUBO NA MÁQUINA DE CURA COM A TEMPERATURA E O TEMPO DEFINIDOS..... | 65 |
| FIGURA 39 – ORIENTAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL DOS PROVETES <i>ONYX</i> E <i>PETG CARBON</i> .....  | 66 |
| FIGURA 40 - DIMENSÕES DOS PROVETES DE TRAÇÃO REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CARBONO, SEGUNDO A NORMA ASTM D3039.....  | 67 |
| FIGURA 41 - A) FRENTE DA CAPA DE TELEMÓVEL (TESTE 1). B) DETALHE DE STRINGING NO LADO ESQUERDO C) DETALHE DE STRINGING NO LADO DIREITO. B) DETALHE DE STRINGING NA PARTE DE BAIXO. C) DETALHE DO RISCO. D) DETALHE DE DESFASAMENTO DE CAMADAS NA LATERAL. E) TRASEIRA DA CAPA COM PÓS-PROCESSAMENTO. F) FRENTE DA CAPA COM PÓS-PROCESSAMENTO. ....  | 72 |
| FIGURA 42 – ZONAS A MEDIR E RESPECTIVAS DIMENSÕES DOS <i>FORK GRIPPERS</i> .....  | 73 |
| FIGURA 43 - SUPERFÍCIES DEFINIDAS PARA MEDIÇÃO DAS RUGOSIDADES DOS <i>FORK GRIPPERS</i> .....   | 74 |
| FIGURA 44 - EXEMPLO DE GRÁFICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO DE ASA .....   | 77 |
| FIGURA 45 - EXEMPLO DE GRÁFICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO DE PC .....  | 78 |
| FIGURA 46 - A) CUBO DE RUGOSIDADES COM ESPESSURA DE CAMADA 0,30 MM. B) CUBO DE RUGOSIDADES COM ESPESSURA DE CAMADA 0,20 MM. C) CUBO DE RUGOSIDADES COM ESPESSURA DE CAMADA 0,10 MM. ....  | 79 |
| FIGURA 47 - EXEMPLO DE UM CUBO EM PLA COM A OPÇÃO " <i>IRONING</i> " .....  | 80 |
| FIGURA 48 - EXEMPLO DE UM CUBO EM ASA APÓS LIXAGEM, COM <i>GRITS</i> DE 220 ATÉ 2000.....   | 81 |
| FIGURA 49 - CUBO DE PETG APÓS <i>SANDBLASTING</i> .....   | 82 |
| FIGURA 50 – RUGOSIDADES RA DOS CUBOS EM PLA ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 83 |
| FIGURA 51 - RUGOSIDADES RZ DOS CUBOS EM PLA ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 83 |
| FIGURA 52 - RUGOSIDADES RA DOS CUBOS EM ASA ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 84 |
| FIGURA 53 - RUGOSIDADES RZ DOS CUBOS EM ASA ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 84 |
| FIGURA 54 - RUGOSIDADES RA DOS CUBOS EM PETG ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....  | 85 |
| FIGURA 55 - RUGOSIDADES RZ DOS CUBOS EM PETG ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....  | 85 |
| FIGURA 56 - RUGOSIDADES RA DOS CUBOS EM <i>ONYX</i> ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 86 |
| FIGURA 57 - RUGOSIDADES RZ DOS CUBOS EM <i>ONYX</i> ANTES E APÓS <i>DIPPING</i> .....   | 86 |
| FIGURA 58 - RUGOSIDADES RA NO PLA APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....  | 87 |
| FIGURA 59 - RUGOSIDADES RZ NO PLA APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....  | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 60 - RUGOSIDADE RA DO ASA APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....   | 88  |
| FIGURA 61 - RUGOSIDADES RZ NO ASA APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....  | 88  |
| FIGURA 62 - RUGOSIDADES RA NO PETG APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....   | 89  |
| FIGURA 63 - RUGOSIDADES RZ NO PETG APÓS <i>VAPOUR SMOOTHING</i> .....   | 89  |
| FIGURA 64 - EXEMPLO DE UM GRÁFICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO DE <i>ONYX</i> .....  | 90  |
| FIGURA 65 – EXEMPLO DE UM GRÁFICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO DE <i>PETG CARBON</i> .....   | 91  |
| FIGURA 66 - EXEMPLO DE GRÁFICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO DE <i>ONYX</i> COM FIBRA CONTÍNUA DE CARBONO .....   | 92  |
| FIGURA 67 - PERFIS DE RUGOSIDADES DOS CUBOS EM PLA COM DIFERENTES ESPESSURAS DE CAMADA:<br>A) SUPERFÍCIE LATERAL DO CUBO DE 0,30 MM. B) SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CUBO DE 0,30 MM C)<br>SUPERFÍCIE LATERAL DO CUBO DE 0,20 MM. D) SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CUBO DE 0,20 MM. E)<br>SUPERFÍCIE LATERAL DO CUBO DE 0,10 MM. F) SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CUBO DE 0,10 MM ... | 101 |
| FIGURA 68 – PERFIL DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DE UMA PEÇA FABRICADA COM A<br>OPÇÃO “IRONING” .....  | 102 |
| FIGURA 69 - PERFIS DE RUGOSIDADES DOS CUBOS DE PLA: A) SUPERFÍCIE LIXADA COM <i>GRITS</i> 220 E 400.<br>B) SUPERFÍCIE LIXADA COM <i>GRITS</i> 220, 400 E 800. C) SUPERFÍCIE LIXADA COM <i>GRITS</i> DE 220, 400,<br>800 E 1200. D) SUPERFÍCIE LIXADA COM <i>GRITS</i> 220, 400, 800, 1200 E 2000. ....  | 103 |
| FIGURA 70 – PERFIS DE RUGOSIDADE DOS CUBOS DE PLA ANTES E APÓS <i>SANDBLASTING</i> : A) SUPERFÍCIE<br>LATERAL ANTES DE <i>SANDBLASTING</i> . B) SUPERFÍCIE SUPERIOR ANTES DO PÓS-PROCESSAMENTO. C)<br>SUPERFÍCIE LATERAL APÓS <i>SANDBLASTING</i> . D) SUPERFÍCIE SUPERIOR APÓS <i>SANDBLASTING</i> .....   | 104 |
| FIGURA 71 - A) TOPOGRAFIA 3D DA SUPERFÍCIE LATERAL (À ESQUERDA) E SUPERIOR (À DIREITA) DE UM<br>CUBO EM PLA SEM PÓS-PROCESSAMENTO .....   | 107 |
| FIGURA 72 - TOPOGRAFIA 3D DA SUPERFÍCIE LATERAL (À ESQUERDA) E SUPERIOR (À DIREITA) DO TESTE<br>4 .....   | 107 |
| FIGURA 73 - GRÁFICOS DOS PERFIS E TOPOGRAFIA 2D DA ONDULAÇÃO DA SUPERFÍCIE LATERAL (À<br>ESQUERDA) E SUPERIOR (À DIREITA) DO TESTE 4.....   | 108 |
| FIGURA 74 - TOPOGRAFIA 3D DA SUPERFÍCIE LATERAL DE UM CUBO DE <i>VAPOUR SMOOTHING</i> EM PLA<br>SEM PÓS-PROCESSAMENTO .....   | 115 |
| FIGURA 75 - TOPOGRAFIA 3D (ACIMA) E GRÁFICOS DE PERFIL E TOPOGRAFIA 2D DA ONDULAÇÃO<br>(ABAIXO) DO TESTE 4 .....  | 115 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 - SUMÁRIO DE ARTIGOS SOBRE OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS.....  | 20 |
| TABELA 2 - SUMÁRIO DE ARTIGOS SOBRE PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS EM FDM.....   | 34 |
| TABELA 3 - SUMÁRIO DE ARTIGOS SOBRE TÉCNICAS DE PÓS-PROCESSAMENTO.....   | 38 |
| TABELA 4 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO PRUSAMENT PLA.....  | 47 |
| TABELA 5 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO PRUSAMENT PETG.....   | 47 |
| TABELA 6 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO PRUSAMENT ASA.....  | 48 |
| TABELA 7 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO FILLAMENTUM ASA EXTRAFILL.....  | 48 |
| TABELA 8 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO PRUSAMENT PC BLEND.....   | 48 |
| TABELA 9 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO FILLAMENTUM FLEXFILL 98A.....   | 48 |
| TABELA 10 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO MARKFORGED ONYX.....   | 49 |
| TABELA 11 - PROPRIEDADES DO FILAMENTO KIMYA PETG CARBON.....   | 49 |
| TABELA 12 - PROPRIEDADES DA FIBRA CONTÍNUA MARKFORGED CARBON.....  | 49 |
| TABELA 13 - VELOCIDADES DE IMPRESSÃO DA CAPA DE TELEMÓVEL TESTE 1.....   | 59 |
| TABELA 14 - VELOCIDADES DE IMPRESSÃO DA CAPA DE TELEMÓVEL TESTE 2.....   | 60 |
| TABELA 15 - VELOCIDADES DE IMPRESSÃO DA CAPA DE TELEMÓVEL TESTE 3.....   | 60 |
| TABELA 16 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO DE CUBOS DE RUGOSIDADE E TÉCNICAS PÓS-<br>PROCESSAMENTO A APLICAR NOS MATERIAIS PLA, ASA E PETG..... | 62 |
| TABELA 17 - PARÂMETROS DO PÓS-PROCESSAMENTO SANDBLASTING PARA O PLA, ASA E PETG.....   | 63 |
| TABELA 18 - DESVIOS DIMENSIONAIS ABSOLUTOS DOS FORK GRIPPERS EM ASA E PC.....  | 74 |
| TABELA 19 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS RUGOSIDADES DOS FORK GRIPPERS EM ASA.....  | 75 |
| TABELA 20 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS RUGOSIDADES DOS FORK GRIPPERS EM PC.....   | 75 |
| TABELA 21 - PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS PROVETES EM ASA.....   | 76 |
| TABELA 22 - PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS PROVETES EM PC.....  | 77 |
| TABELA 23 - RUGOSIDADES E DIMENSÕES DOS CUBOS DE RUGOSIDADES COM DIFERENTES ESPESSURAS<br>DE CAMADA EM PLA.....                          | 78 |
| TABELA 24 - RUGOSIDADES E DIMENSÕES DOS CUBOS DE RUGOSIDADES COM DIFERENTES ESPESSURAS<br>DE CAMADA EM ASA.....                          | 79 |
| TABELA 25 - RUGOSIDADES E DIMENSÕES DOS CUBOS DE RUGOSIDADES COM DIFERENTES ESPESSURAS<br>DE CAMADA EM PETG.....                         | 79 |
| TABELA 26 - RUGOSIDADES E DIMENSÕES DOS CUBOS DE RUGOSIDADES PRODUZIDOS COM A OPÇÃO<br>“IRONING” EM PLA.....                             | 80 |
| TABELA 27 - RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DOS CUBOS EM<br>PLA APÓS LIXAGEM.....                        | 81 |
| TABELA 28 - RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DOS CUBOS EM<br>ASA APÓS LIXAGEM.....                        | 81 |
| TABELA 29 - RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DOS CUBOS EM<br>PETG APÓS LIXAGEM.....                       | 81 |
| TABELA 30 - RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E LATERAIS DOS CUBOS EM PLA, ASA E PETG<br>APÓS SANDBLASTING.....                     | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 31 - VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DOS CUBOS EM PLA, ASA E PETG APÓS SANDBLASTING .....  | 82  |
| TABELA 32 - VARIAÇÃO DAS RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E LATERAIS DOS CUBOS EM PLA APÓS <i>DIPPING</i> .....                  | 83  |
| TABELA 33 - VARIAÇÃO DAS RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E LATERAIS DOS CUBOS EM ASA APÓS <i>DIPPING</i> .....                  | 84  |
| TABELA 34 - VARIAÇÃO DAS RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E LATERAIS DOS CUBOS EM PETG APÓS <i>DIPPING</i> .....                 | 85  |
| TABELA 35 - VARIAÇÃO DAS RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES SUPERIORES E LATERAIS DOS CUBOS EM ONYX APÓS <i>DIPPING</i> .....                 | 86  |
| TABELA 36 - PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS PROVETES EM ONYX.....  | 90  |
| TABELA 37 - PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS PROVETES EM PETG <i>CARBON</i> .....                                     | 91  |
| TABELA 38 - PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS PROVETES EM ONYX COM FIBRA CONTÍNUA DE CARBONO.....                      | 92  |
| TABELA 39 - MELHORES PARÂMETRO DE IMPRESSÃO DOS <i>FORK GRIPPERS</i> EM ASA, PELO MÉTODO TAGUCHI .....                                 | 96  |
| TABELA 40 - PARÂMETROS COM MAIOR INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE E NO DESVIO DIMENSIONAL NOS <i>FORK GRIPPERS</i> EM ASA, PELA ANOVA.....     | 96  |
| TABELA 41 - MELHORES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO DOS <i>FORK GRIPPERS</i> EM PC, PELO MÉTODO TAGUCHI .....                                 | 97  |
| TABELA 42 - PARÂMETROS COM MAIOR INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE E NO DESVIO DIMENSIONAL NOS <i>FORK GRIPPERS</i> EM PC, PELA ANOVA .....     | 97  |
| TABELA 43 - MELHORES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO DOS PROVETES DE TRAÇÃO EM ASA, PELO MÉTODO TAGUCHI.....                                   | 98  |
| TABELA 44 - PARÂMETROS COM MAIOR INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DOS PROVETES DE TRAÇÃO EM ASA, PELA ANOVA .....                           | 99  |
| TABELA 45 - MELHORES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA OS PROVETES DE TRAÇÃO EM PC, PELO MÉTODO TAGUCHI.....                                | 99  |
| TABELA 46 - PARÂMETRO COM MAIOR INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DOS PROVETES DE TRAÇÃO EM PC, PELA ANOVA .....                             | 99  |
| TABELA 47 - MELHORES PARÂMETROS DE PRODUÇÃO PARA OS PROVETES DE TRAÇÃO EM ONYX, PELO MÉTODO TAGUCHI.....                               | 123 |
| TABELA 48 - PARÂMETROS COM MAIOR INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES DE TRAÇÃO EM ONYX, PELA ANOVA.....                 | 123 |
| TABELA 49 - MELHORES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA OS PROVETES DE TRAÇÃO EM <i>PETG CARBON</i> , PELO MÉTODO TAGUCHI.....               | 124 |
| TABELA 50 - PARÂMETROS COM MAIOR INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES DE TRAÇÃO EM PETG <i>CARBON</i> , PELA ANOVA ..... | 124 |
| TABELA 51 - VOLUMES DE MATRIZ E DE FIBRAS CONTINUAS DE CARBONO NOS PROVETES COMPÓSITOS .....   | 125 |
| TABELA 52 - PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS PARA CADA OBJETIVO .....   | 129 |

# ÍNDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                   | <b>3</b>  |
| 1.1      | Contextualização .....                                    | 3         |
| 1.2      | Objetivos .....   | 3         |
| 1.3      | Metodologia .....   | 4         |
| 1.4      | Estrutura da dissertação .....                            | 4         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                        | <b>9</b>  |
| 2.1      | Manufatura aditiva .....                                  | 9         |
| 2.2      | Estudo de mercado e impacto económico .....               | 10        |
| 2.3      | Principais processos de manufatura aditiva .....          | 13        |
| 2.4      | FDM .....   | 15        |
| 2.4.1    | Como funciona .....                                       | 15        |
| 2.4.2    | Vantagens e Limitações do processo FDM .....              | 16        |
| 2.4.3    | Principais parâmetros de impressão .....                  | 17        |
| 2.4.4    | Defeitos mais frequentes .....                            | 22        |
| 2.4.4.1  | Problemas associados à impressora 3D .....                | 22        |
| 2.4.4.2  | Problemas associados à deposição de material .....        | 23        |
| 2.4.4.3  | Problemas de qualidade de impressão .....                 | 27        |
| 2.5      | Tipos de materiais utilizados na manufatura aditiva ..... | 30        |
| 2.5.1    | Polímeros .....   | 30        |
| 2.5.2    | Compósitos .....  | 32        |
| 2.6      | Pós-processamento .....                                   | 36        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO E AMBIENTAÇÃO À EMPRESA</b> .....       | <b>43</b> |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                          | <b>47</b> |
| 4.1      | Materiais .....   | 47        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.2      | Métodos.....  | 49        |
| 4.2.1    | Máquinas FDM.....   | 49        |
| 4.2.2    | Máquinas e ferramentas para pós-processamento.....  | 51        |
| 4.2.3    | Equipamento de ensaios mecânicos e de análise superficial e dimensional .....             | 51        |
| 4.3      | Calibração das máquinas (diferentes materiais, live z teórico vs real).....               | 52        |
| 4.3.1    | Calibração “First Layer Calibration” (Calibração teórica) .....                           | 52        |
| 4.3.2    | Calibração “Bed Level Correction” (Calibração experimental).....                          | 53        |
| 4.4      | Limite conjunto máquina-material .....  | 55        |
| 4.4.1    | Bridges.....  | 55        |
| 4.4.2    | Overhangs .....   | 56        |
| 4.4.3    | Concavidades .....  | 56        |
| 4.4.4    | Convexidades .....  | 57        |
| 4.5      | Procedimento Experimental .....   | 58        |
| 4.5.1    | Capa de telemóvel .....   | 59        |
| 4.5.2    | Fork Gripper .....  | 61        |
| 4.5.3    | Provetes de Tração ASA e PC .....   | 61        |
| 4.5.4    | Cubos de Rugosidades.....   | 62        |
| 4.5.4.1  | Sandblasting .....  | 63        |
| 4.5.4.2  | Dipping .....   | 63        |
| 4.5.5    | Vapour Smoothing.....   | 64        |
| 4.5.6    | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono .....    | 66        |
| 4.5.7    | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono ..... | 66        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>71</b> |
| 5.1      | Capa de Telemóvel .....   | 71        |
| 5.2      | Fork Grippers .....   | 73        |
| 5.3      | Provetes de tração ASA e PC.....  | 76        |
| 5.4      | Cubos de Rugosidades .....  | 78        |
| 5.4.1    | Cubos de Rugosidades com diferentes espessuras de camada .....                            | 78        |
| 5.4.2    | Cubos de Rugosidades “Ironing” .....  | 80        |
| 5.4.3    | Cubos de Rugosidades com lixagem.....   | 80        |
| 5.4.4    | Cubos de Rugosidades com sandblasting.....  | 81        |
| 5.4.5    | Cubos de Rugosidades Dipping.....   | 82        |
| 5.5      | Vapour Smoothing.....   | 87        |
| 5.6      | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono .....    | 90        |
| 5.7      | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono ..... | 91        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>ANÁLISE CRÍTICA .....</b>                                   | <b>95</b> |
| 6.1      | Capa de telemóvel .....  | 95        |
| 6.2      | Fork Gripper .....   | 95        |
| 6.2.1    | ASA .....  | 96        |
| 6.2.1.1  | Método Taguchi .....   | 96        |
| 6.2.1.2  | Análise da Variância (ANOVA) .....                             | 96        |
| 6.2.2    | PC .....   | 97        |
| 6.2.2.1  | Método Taguchi .....   | 97        |
| 6.2.2.2  | Análise da Variância (ANOVA) .....                             | 97        |
| 6.3      | Provetes de Tração ASA e PC .....                              | 98        |
| 6.3.1    | ASA .....  | 98        |
| 6.3.1.1  | Método Taguchi .....   | 98        |
| 6.3.1.2  | Análise da Variância (ANOVA) .....                             | 98        |
| 6.3.2    | PC .....   | 99        |
| 6.3.2.1  | Método Taguchi .....   | 99        |
| 6.3.2.2  | Análise da Variância (ANOVA) .....                             | 99        |
| 6.4      | Cubos de Rugosidades com diferentes espessuras de camada ..... | 100       |
| 6.4.1    | Cubos em PLA .....   | 100       |
| 6.4.2    | Cubos em ASA .....   | 101       |
| 6.4.3    | Cubos em PETG .....  | 102       |
| 6.5      | Cubos de Rugosidades com “Ironing” .....                       | 102       |
| 6.6      | Lixagem .....  | 103       |
| 6.6.1    | Cubos em PLA .....   | 103       |
| 6.6.2    | Cubos em ASA .....   | 103       |
| 6.6.3    | Cubos em PETG .....  | 104       |
| 6.7      | Sandblasting .....   | 104       |
| 6.7.1    | Cubos em PLA .....   | 104       |
| 6.7.2    | Cubos em ASA .....   | 105       |
| 6.7.3    | Cubos em PETG .....  | 105       |
| 6.8      | Dipping .....  | 105       |
| 6.8.1    | Cubos em PLA .....   | 106       |
| 6.8.1.1  | Análise da topografia (microscopia 3D) .....                   | 107       |
| 6.8.2    | Cubos em ASA .....   | 109       |
| 6.8.2.1  | Análise da topografia (microscopia 3D) .....                   | 110       |
| 6.8.3    | Cubos em PETG .....  | 110       |
| 6.8.3.1  | Análise da topografia (microscopia 3D) .....                   | 111       |
| 6.9      | Vapour Smoothing .....   | 112       |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 6.9.1     | Vapour Smoothing PLA.....   | 113        |
| 6.9.1.1.1 | Análise da topografia (microscopia 3D).....   | 114        |
| 6.9.1.2   | Vapour smoothing ASA.....   | 117        |
| 6.9.1.2.1 | Análise da topografia (microscopia 3D).....   | 118        |
| 6.9.1.3   | Vapour Smoothing PETG .....   | 120        |
| 6.9.1.3.1 | Análise da topografia (microscopia 3D).....   | 121        |
| 6.10      | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono .....    | 122        |
| 6.10.1    | Onyx.....   | 122        |
| 6.10.1.1  | Método Taguchi.....   | 122        |
| 6.10.1.2  | Análise de Variância (ANOVA).....   | 123        |
| 6.10.2    | PETG Carbon .....   | 123        |
| 6.10.2.1  | Método Taguchi.....   | 123        |
| 6.10.2.2  | Análise da Variância (ANOVA).....   | 124        |
| 6.11      | Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono ..... | 124        |
| <b>7</b>  | <b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                  | <b>129</b> |
| 7.1       | Conclusões .....  | 129        |
| 7.2       | Proposta de trabalhos futuros.....  | 132        |
| <b>8</b>  | <b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....</b>                                   | <b>135</b> |
| <b>9</b>  | <b>ANEXOS .....</b>   | <b>143</b> |
| 9.1       | ANEXO A – Fichas Técnicas Máquinas FDM.....   | 143        |
| 9.2       | ANEXO B – Fichas técnicas dos Filamentos.....   | 147        |
| 9.3       | ANEXO C – Reagentes utilizados.....   | 162        |
| 9.4       | ANEXO D - Tabelas Limites Material-Máquina.....   | 163        |
| 9.4.1     | Bridges.....  | 163        |
| 9.4.2     | Overhang.....   | 165        |
| 9.4.3     | Concavidades .....  | 167        |
| 9.4.4     | Convexidades .....  | 169        |
| 9.5       | ANEXO E – Tabela dos parâmetros de impressão dos fork grippers.....                       | 172        |
| 9.6       | ANEXO F – Tabela dos parâmetros de impressão dos Provetes de Tração em ASA e PC.....      | 173        |
| 9.7       | ANEXO G – Tabelas de parâmetros do pós-processamento dipping .....                        | 174        |
| 9.8       | ANEXO H - Dipping cubos de rugosidades do Onyx.....                                       | 176        |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 9.8.1    | Parâmetros do dipping em Onyx .....  | 176 |
| 9.8.2    | Análise Crítica do pós-processamento dipping do Onyx .....   | 176 |
| 9.9      | ANEXO I – Tabelas de parâmetros do pós-processamento vapour smoothing.....   | 177 |
| 9.10     | ANEXO J - Tabela de parâmetros de impressão dos provetes de tração em Onyx e PETG Carbon.....                      | 179 |
| 9.11     | ANEXO K – Tabela de parâmetros de impressão dos provetes de tração reforçados com fibras contínuas de carbono..... | 180 |
| 9.12     | ANEXO L – Imagens das capas de telemóveis dos Teste 2 e 3, após produção e pós-processamento .....                 | 181 |
| 9.13     | ANEXO M – Método Taguchi e ANOVA dos fork grippers em ASA .....  | 183 |
| 9.13.1   | Método Taguchi.....  | 183 |
| 9.13.1.1 | Análise da Variância (ANOVA).....  | 186 |
| 9.14     | ANEXO N – Método Taguchi e ANOVA dos fork grippers em PC .....   | 189 |
| 9.14.1   | Método Taguchi.....  | 189 |
| 9.14.2   | Análise da Variância (ANOVA).....  | 192 |
| 9.15     | ANEXO O – Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em ASA .....   | 195 |
| 9.15.1   | Método Taguchi.....  | 195 |
| 9.15.2   | Análise da Variância (ANOVA).....  | 197 |
| 9.16     | ANEXO P - Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em PC.....   | 200 |
| 9.16.1   | Método Taguchi.....  | 200 |
| 9.16.2   | Análise da Variância (ANOVA).....  | 202 |
| 9.17     | ANEXO Q – Perfis de Rugosidade dos cubos de diferentes espessuras de camada .....                                  | 205 |
| 9.18     | ANEXO R – Cubos após lixagem .....   | 206 |
| 9.18.1   | Fotos dos cubos de rugosidades após lixagem .....  | 206 |
| 9.18.2   | Perfis de Rugosidade dos cubos de lixagem.....   | 207 |
| 9.19     | ANEXO S – Cubos de sandblasting.....   | 208 |
| 9.19.1   | Fotos dos cubos após sandblasting .....  | 208 |
| 9.19.1   | Perfis de Rugosidade dos cubos de sandblasting .....   | 209 |
| 9.20     | ANEXO T – Cubos de rugosidades após dipping .....  | 210 |
| 9.20.1   | Fotos dos cubos de rugosidades após dipping.....   | 210 |
| 9.20.2   | Microscopia 3D cubos dipping.....  | 213 |
| 9.21     | ANEXO U -Cubos após vapour smoothing.....  | 220 |
| 9.21.1   | Variação da rugosidade nos cubos de vapour smoothing.....  | 220 |
| 9.21.2   | Fotos dos cubos após vapour smoothing.....   | 223 |

---

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 9.21.3   | Microscopia 3D cubos vapour smoothing.....                               | 226 |
| 9.22     | ANEXO V – Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em Onyx.....     | 231 |
| 9.22.1   | Método Taguchi.....  | 231 |
| 9.22.2   | Análise da Variância (ANOVA).....  | 233 |
| 9.23     | ANEXO X - Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração PETG Carbon..... | 236 |
| 9.23.1.1 | Método Taguchi.....  | 236 |
| 9.23.1.2 | Análise da Variância (ANOVA).....  | 238 |

# INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A manufatura aditiva (AM) é uma tecnologia que tem vindo a crescer exponencialmente ao longo dos últimos anos, competindo com os processos de manufatura tradicionais. Esta tecnologia apresenta várias vantagens, como a produção de peças de geometria complexa, que nos processos tradicionais não seriam possíveis, e não necessita de ferramentas ou moldes. Por estas e outras razões, tem-se vindo a afirmar de forma significativa nos mais variados setores como, por exemplo, no sector automóvel, aeroespacial e industrial.

A AM é um tema que despoletou grande interesse para a realização deste trabalho devido ao facto de estar em constante desenvolvimento, tanto a nível de novos processos, novos materiais, otimização de processos de fabrico, redução de desperdício de materiais e novas formas de ver a indústria, aliando-se à indústria 4.0.

Entretanto, surgiu a oportunidade de realizar um estágio curricular, na empresa *Lani Robotics*, com o intuito de desenvolver a dissertação sobre a AM. Estipulou-se que se iria estudar e otimizar parâmetros do processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), utilizando materiais poliméricos e compósitos de base polimérica com adição de fibras e, por último, estudar técnicas de pós-processamento a implementar na empresa.

## 1.2 Objetivos

Para a realização deste estudo foram estabelecidos três objetivos.

O primeiro objetivo foi estudar a influência que alguns parâmetros têm no tempo de produção e na qualidade final da peça, mais concretamente a nível de acabamento superficial e resistência mecânica. Posto isto, numa primeira fase, foram efetuados testes de estudo aos limites do conjunto máquina-material, de forma a conhecer os materiais e capacidades das máquinas. Após conhecer as capacidades máquina-material, foram produzidas peças teste como capas de telemóvel, *fork grippers* e provetes de tração, de modo a estudar a influência de parâmetros, analisando as superfícies e ensaiando os provetes de tração. Por último, foram apresentados os melhores resultados que garantem as melhores propriedades mecânicas.

Um dos aspetos negativos da manufatura aditiva é o efeito de escada e, por consequência, a elevada rugosidade superficial da peça. Assim, considerou-se importante estudar diferentes técnicas de pós-processamento para vários tipos de

materiais, de modo a melhorar e combater esse e outros defeitos, estabelecendo-se o segundo objetivo.

O terceiro objetivo foi o estudo dos parâmetros de peças produzidas com materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono, e/ou contínuas de carbono através da realização de testes à tração. Após a realização dos testes referidos, estes foram analisados e, por fim, apresentados os melhores resultados que garantam as melhores propriedades mecânicas.

### 1.3 Metodologia

A metodologia abordada para a realização deste trabalho foi conduzida do seguinte modo:

- Integração na empresa;
- Tomada de conhecimento sobre as máquinas a manipular;
- Calibração das máquinas Prusa MK3S;
- Investigação sobre o tema da manufatura aditiva e técnicas de pós-processamento com recurso a livros, artigos científicos, dissertações de mestrado ou doutoramento e *websites*;
- Análise e seleção de parâmetros a estudar que influenciam a qualidade de peças a produzir;
- Produção de peças teste e análise de resultados da influência de parâmetros;
- Identificação e seleção de técnicas de pós-processamento a testar e a implementar na empresa;
- Produção de peças teste e aplicação de técnicas de pós-processamento;
- Análise e seleção de parâmetros a estudar que influenciam as propriedades mecânicas de peças de materiais compósitos de fibra contínua de base polimérica;
- Produção dos provetes e realização dos testes mecânicos selecionados;
- Análise crítica dos resultados em comparação com os artigos selecionados no estado de arte e conclusões.

### 1.4 Estrutura da dissertação

De modo a facilitar a leitura e a interpretação desta dissertação, esta apresenta uma estrutura dividida em nove capítulos e vários subcapítulos, sendo estes:

- **Capítulo 1** – Introdução

Breve contextualização do tema da AM e apresentação das motivações à realização desta dissertação, bem como da empresa na qual se realizou grande parte do trabalho experimental. Além disso, estão estipulados os objetivos deste trabalho, seguindo-se as metodologias utilizadas.

- **Capítulo 2** – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feito um trabalho bibliográfico em que é apresentado um estudo mais aprofundado sobre a AM, dando um maior enfoque no processo FDM e materiais mais utilizados. Além deste estudo, será elaborado um estado da arte sobre a influência de parâmetros no processamento de uma peça a produzir, por FDM, tanto a nível de qualidade superficial como de resistência mecânica e técnicas de pós-processamento.

- **Capítulo 3** – Caracterização da empresa

Apresentação da empresa onde se realizou o estágio curricular.

- **Capítulo 4** – Apresentação dos materiais e máquinas utilizadas

Apresentação das máquinas e dos materiais que foram utilizados para a elaboração desta dissertação. Neste capítulo também serão detalhados os testes realizados e as normas seguidas.

- **Capítulo 5** – Resultados

Neste capítulo serão expostos os resultados de todos os testes experimentais efetuados.

- **Capítulo 6** – Análise Crítica

Reflexão crítica dos resultados obtidos e utilização de análises estatísticas.

- **Capítulo 7** - Conclusões

Realização de um sumário sobre o trabalho desenvolvido e apresentação das considerações finais e propostas de trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

2.2 ESTUDO DE MERCADO E IMPACTO ECONÓMICO

2.3 PRINCIPAIS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

2.4 FDM

2.5 TIPOS DE MATERIAIS UTILIZADOS NA MANUFATURA ADITIVA

2.6 PÓS-PROCESSAMENTO



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Manufatura aditiva*

A AM, também conhecida por impressão tridimensional (3D), é considerada uma das tecnologias que influenciou e desencadeou uma nova revolução industrial, modificando os conceitos e imaginação de produção industrial através da manufatura digital e da Indústria 4.0 [1, 2]. Esta tecnologia é definida pela *American Society of Testing and Materials* (ASTM) como “o processo de unir materiais de forma a produzir objetos a partir de dados de um modelo 3D, geralmente camada a camada, em oposição a metodologias de manufatura subtrativa” [3]. O processamento de um objeto através desta tecnologia divide-se nos seguintes passos [4]:

- Produção de um modelo digital em CAD, ou através de engenharia inversa, utilizando um *scanner* 3D;
- Conversão do modelo digital para um tipo de ficheiro que a impressora consiga interpretar. O tipo de ficheiro mais utilizado é o *STereoLithography* (STL), que consiste numa malha de triângulos utilizada de forma a descrever a superfície do objeto, simplificando os modelos 3D. Outros formatos utilizados são o OBJ e o 3DP;
- Importação do ficheiro STL para um *slicer software* que tem como função dividir o objeto pretendido em várias camadas (2D) e converter o ficheiro inicial para um *G-code*. É neste *software* que são definidos os parâmetros de impressão;
- Produção da peça, camada após camada, até à formação do objeto tridimensional pretendido. Dependendo das propriedades requeridas, o objeto poderá necessitar de pós-processamento [5].

Quanto à evolução histórica, considera-se que o início do desenvolvimento da manufatura aditiva deu-se entre 1981 e 1999. Durante este período, foram inventados e patenteados vários processos de fabrico, realçando a comercialização da primeira máquina *Stereolithography Apparatus* (SLA) em 1987 pela *3D Systems*, inventada pelo seu cofundador, Charles Hull. Além deste processo, em 1988 surgiu a primeira *Selective Laser Sintering* (SLS) pertencendo à *DTM Inc.* e em 1992 a *Stratasys* patenteou o processo FDM. No início dos anos 2000, observou-se um incremento da utilização e desenvolvimento destes e outros processos, começando-se a aplicar em vários mercados desde a indústria aeroespacial à medicina. Devido a estes desenvolvimentos e ao facto das patentes iniciais de várias tecnologias expirarem, surgiram impressoras a preços mais acessíveis, o que despoletou o aparecimento de novos negócios e novas ideias de mercado [6, 7].

## 2.2 Estudo de mercado e impacto económico

Vários fatores contribuem para que esta tecnologia seja implementada nos mais variados mercados, em vez da manufatura tradicional. Alguns desses fatores são a capacidade de produção de peças complexas, redução do desperdício de material, flexibilidade no design e customização [8]. Além disso, apresenta grande vantagem na produção de pequenos lotes, eliminando o investimento em ferramentas e moldes, na redução de inventário, *lead time* de produção e *time-to-market*, o que beneficia a competitividade entre empresas [9, 10]. Um exemplo de uma empresa que beneficiou com a implementação da tecnologia de manufatura aditiva foi a produtora de carros Ford. Antes desta implementação utilizavam tecnologias tradicionais para o desenvolvimento e teste de motores, resultando em custos de centenas de milhares de dólares e que demoravam mais de seis meses. Atualmente, utilizam a manufatura aditiva possibilitando os testes de vários motores protótipos simultaneamente, apresentando um custo de cerca de quatro a cinco milhares de dólares [10]. Devido a esta evolução, à redução de *time-to-market* e dos custos em protótipos, outras empresas do setor do automóvel têm vindo a apostar nesta tecnologia. Segundo o *Wholer's Report 2017*, em 2016, os setores que mais utilizam esta tecnologia são a indústria, representando 19%, aeroespacial com 18% e automóvel com 15%, como que se pode observar na Figura 1 [11].

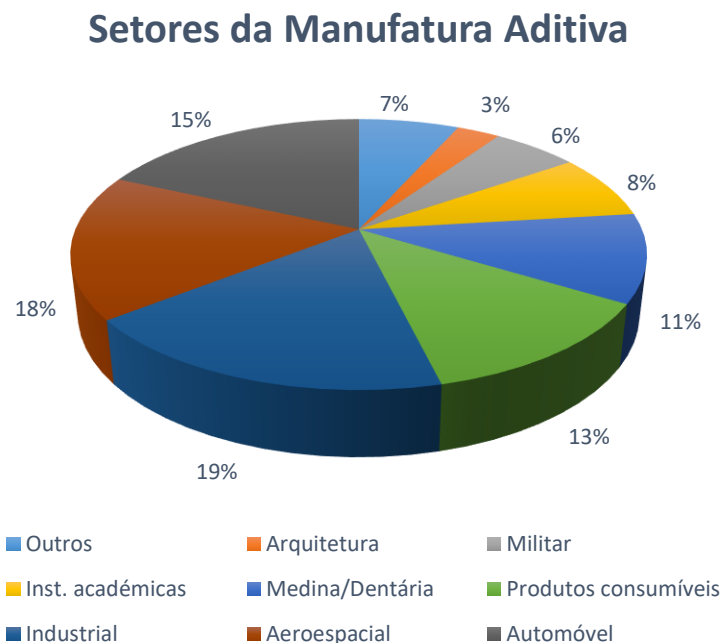


Figura 1 - Setores da manufatura aditiva [11]

Devido aos recentes avanços tecnológicos, a possibilidade de produzir peças funcionais em AM, e não só protótipos, tem vindo a aumentar. Na Figura 2 pode-se observar que peças funcionais representam a maior percentagem do propósito da produção, com 34%.

### Propósito de Peças Manufaturadas

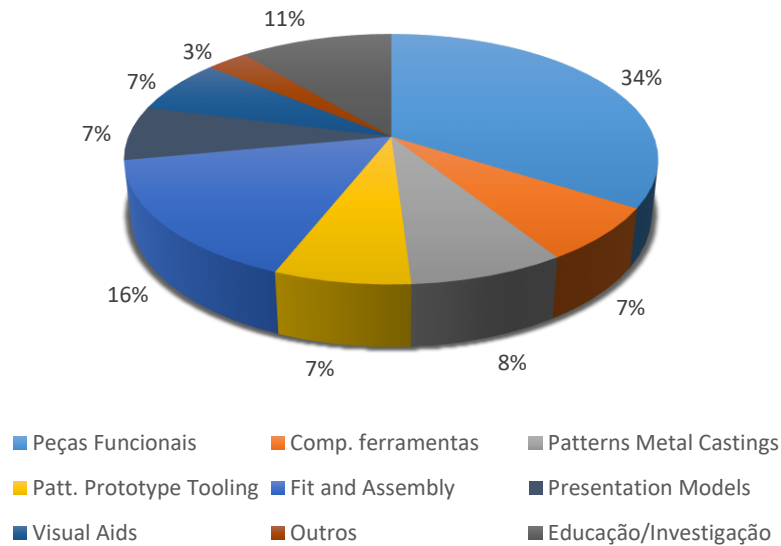


Figura 2 - Propósito de peças manufaturadas [11]

Em 2016 gerou-se uma receita de 903 milhões de dólares no conjunto de materiais comprados para a AM. Na Figura 3 pode-se observar que os polímeros e os filamentos representam a grande parte desses materiais, sendo que os metais já aparecem com uma percentagem de 14% bastante promissora. A receita de metais aumentou em 5 anos consecutivos em mais de 40%, tendo um crescimento de 40,1% em 2018, segundo o *Wholer's Report* de 2019 [12].

### Materiais Fornecidos para a Manufatura Aditiva

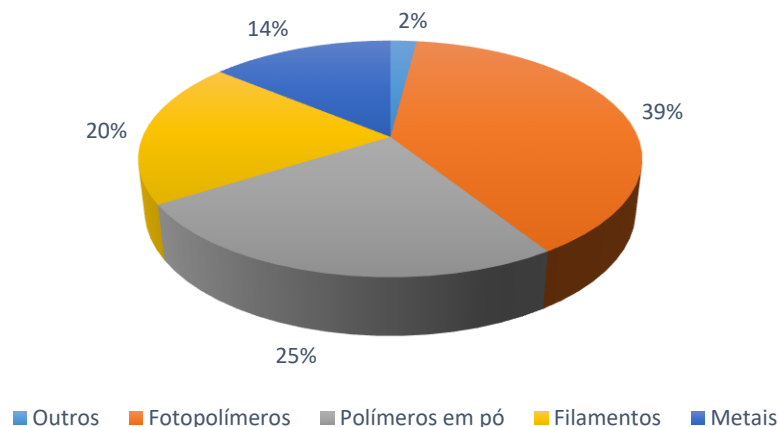


Figura 3 - Materiais fornecidos para a manufatura aditiva [11]

A empresa AMFG, entre abril e junho de 2019, conduziu um estudo sobre os serviços de manufatura aditiva, questionando algumas empresas que oferecem este tipo de serviço. Um dos objetivos foi identificar quais os processos de fabrico que ofereciam e qual deles proporciona receitas mais elevadas. Na Figura 4 pode-se observar que o processo de fabrico mais oferecido é o FDM, representando 70%, seguido do SLA e SLS, com 63% e 62%, respetivamente. Em quarto lugar vai-se afirmando a manufatura aditiva de metal, representando 39% [13].

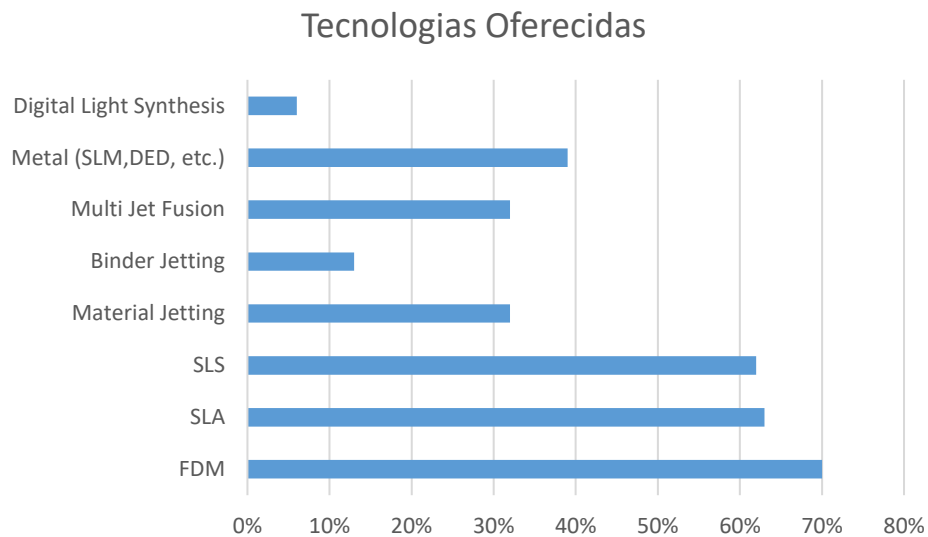


Figura 4 - Tecnologias de manufatura aditiva oferecidas [13]

Quanto à tecnologia que contribui com uma maior receita para as empresas questionadas, através da Figura 5, observa-se que 40% dos entrevistados selecionaram FDM, seguindo-se do SLS e manufatura aditiva de metal com 23%.

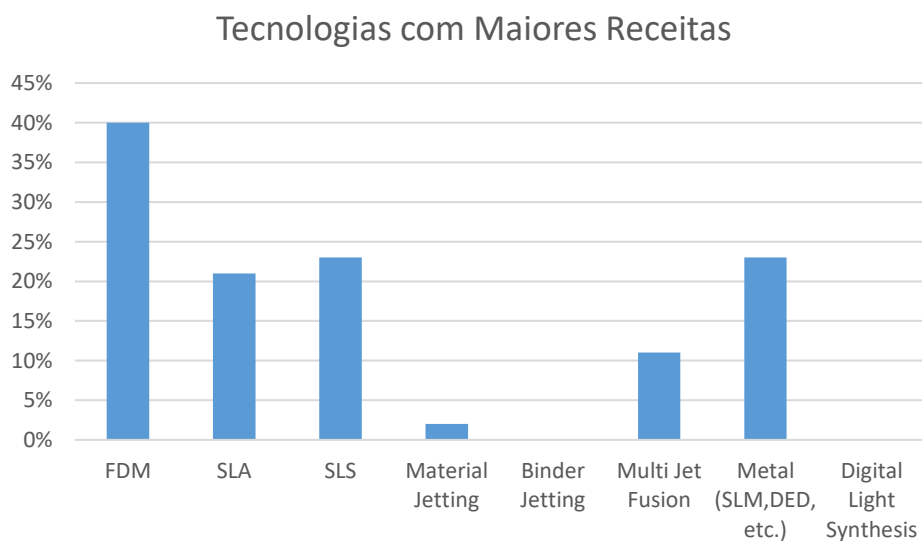


Figura 5 - Tecnologias com maiores receitas [13]

### 2.3 Principais processos de manufatura aditiva

Devido ao aparecimento de novas empresas e de novas máquinas, por questões legais, surgiram acrónimos diferentes para o mesmo processo de fabrico, como é o caso do FDM criado pela *Stratasys* e o *Fused Filament Fabrication* (FFF) denominado pela *RepRap* [6]. Assim, a ASTM teve a necessidade de agrupar processos semelhantes e dividir em sete categorias as diferentes tecnologias de manufatura aditiva segundo a norma ASTM F2792 – 12a, que inclui o *binder jetting*, *direct energy deposition*, *material jetting*, *powder bed fusion*, *sheet lamination*, *vat photo-polymerization* e *material extrusion* [3, 6, 14, 15].

De seguida, serão apresentadas, de forma breve, as categorias definidas pela ASTM, sendo que ao longo do trabalho apenas será aprofundada a categoria de *material extrusion*, mais concretamente o processo FDM.

- ***Binder jetting***

O *binder jetting* é um processo de manufatura aditiva que consiste na deposição seletiva de um líquido ligante, normalmente polimérico, numa camada de material em pó. Ao longo do processo, as camadas vão-se juntando até formar a peça 3D desejada [16].

- ***Direct energy deposition***

O *direct energy deposition* é uma tecnologia de manufatura aditiva que utiliza uma fonte de calor como feixe de eletrões, laser ou plasma de modo a fundir materiais que, entretanto, serão depositados seguindo um caminho definido. Os materiais utilizados podem ser cerâmicos, polímeros e, geralmente, metais e híbridos de base metálica, em forma de pó ou fio. É importante referir que é um processo idêntico ao *material extrusion*, mas, neste caso, o nozzle tem maior “liberdade”, não estando fixo a um eixo e podendo-se mover em vários eixos [17, 18].

- ***Material jetting***

O *material jetting* é uma tecnologia semelhante à de uma impressora 2D convencional. O processo consiste na deposição de “gotas”, neste caso de material fotossensível de forma seletiva, numa plataforma. O material vai sendo depositado camada a camada e curado através de radiação ultravioleta (UV). Após cada camada, um *roller* move-se por cima da camada efetuada de modo a retirar excessos e garantir uma boa adesão entre as mesmas [19, 20].

- ***Powder bed fusion***

O *powder bed fusion* é a tecnologia mais popular de produção de peças metálicas por manufatura aditiva, sendo possível utilizar outros tipos de materiais como cerâmicos,

polímeros e compósitos. Esta tecnologia consiste na utilização de fontes de calor como laser, feixe de elétrons e infravermelhos, que irão focar sobre uma camada de material em pó, fundindo o material seletivamente com a forma da camada que se quer produzir [17, 21, 22]. Esta categoria pode-se dividir em diversos processos como *polymer laser sintering* (pLS), *metal laser sintering* (mLS) e *electron beam melting* (EBM) [23].

- **Sheet lamination**

A tecnologia *sheet lamination* é uma das categorias que tem recebido menor atenção por parte das indústrias [24]. É uma tecnologia simples que consiste na “colagem” de folhas de metal ou outros materiais, com a forma da camada pretendida, através de ligações adesivas ou soldadura ultrassónica. Esta categoria divide-se em dois processos, *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM), sendo que o primeiro utiliza adesivos para a junção das camadas e o segundo utiliza soldadura eletrónica [25].

- **Vat photo-polymerization**

O *vat photo-polymerization* é uma tecnologia que consiste na utilização de uma luz UV que ativa a polimerização de uma resina foto polimérica que reside num tanque. Esta luz UV irá seletivamente curar a resina com a forma pretendida, camada após camada [26]. Os processos mais comuns nesta categoria são o SLA, *Digital Light Processing* (DLP) e *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP). O SLA utiliza um laser de alta potência de forma a curar o foto polímero, seletivamente, enquanto que no DLP a resina não é curada ponto-a-ponto, mas antes a partir de uma imagem refletida por *digital micromirrors devices* (DMD). Quanto ao CLIP, este utiliza um filme permeável de oxigénio que inibe a polimerização na superfície perto da fonte laser, fazendo camada a camada de modo contínuo [27, 28].

- **Material extrusion**

O material extrusion é uma tecnologia que consiste na extrusão de um material através de um *nozzle* ou orifício, que é depositado de forma seletiva percorrendo um determinado percurso, camada após camada, numa plataforma de construção [3]. Esta categoria pode ser dividida em vários processos como por exemplo FDM/FFF, *3D dispensing*, *3D microextrusion*, *fluid dosing*, *3D plotting* e *robocasting*. Algumas das principais características desta tecnologia são a capacidade de produzir peças com mais do que um material, de produzir peças multicolores, de utilizar borrachas, poliuretanos, silicones, termoplásticos, entre outros polímeros, materiais compósitos, biomateriais, cerâmicos, hidrogéis, comida ou até células vivas como material de produção [18, 29, 30].

## 2.4 FDM

### 2.4.1 Como funciona

O processo FDM funciona segundo o princípio *material extrusion*, que consiste na deposição de material ao longo de uma plataforma de construção através de um *nozzle* percorrendo um caminho anteriormente definido. Este processo segue os seguintes passos [4]:

- Inserção de um filamento, em bobine, na cabeça de extrusão da impressora;
- Quando o *nozzle* alcança a temperatura definida do material a utilizar, através de um conjunto de engrenagens, o material é “puxado” e posteriormente aquecido e amolecido no *heat block*, que se situa na cabeça extrusora;
- De seguida, a cabeça de extrusão percorre o caminho predefinido e vai depositando material ao longo da plataforma de construção formando a camada pretendida;
- Após essa camada estar terminada, a plataforma ou o *nozzle*, dependendo do tipo de impressora, move-se segundo o eixo Z à altura da próxima camada;
- O processo repete-se, camada a camada, até à produção total da peça.

Na Figura 6 pode-se observar um esquema simplificado do processo FDM e um exemplo de uma impressora 3D que segue o mesmo processo.

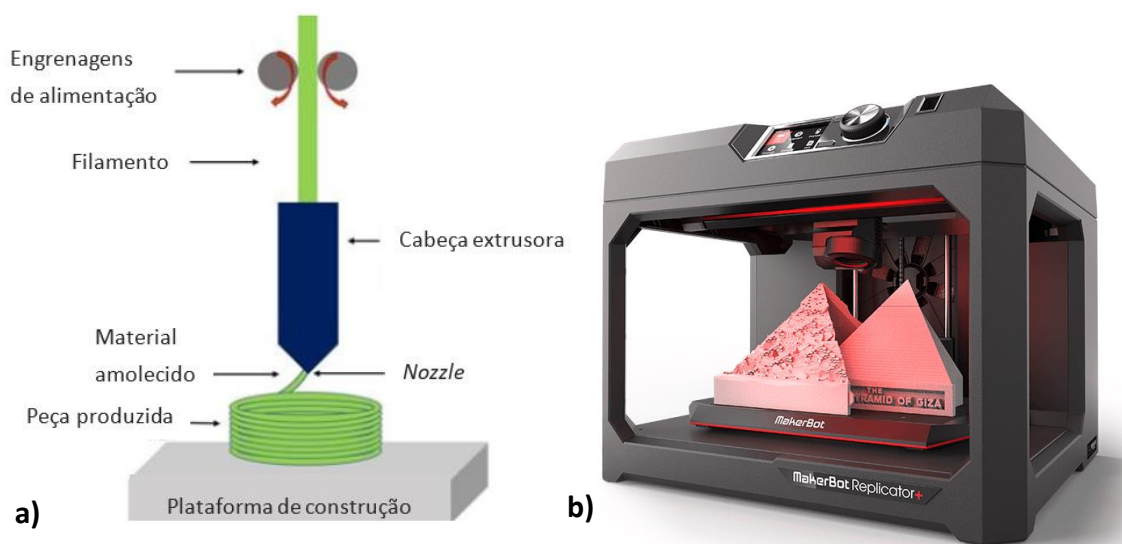


Figura 6 – a) Esquema do processo FDM [31]. b) Exemplo de uma impressora 3D FDM [32]

Atualmente, existem vários tipos de impressoras que se podem classificar em impressoras cartesianas, polares, delta e braço de robot [33, 34]. Na Figura 7 podem-se observar os esquemas dos tipos de impressoras referidas anteriormente.

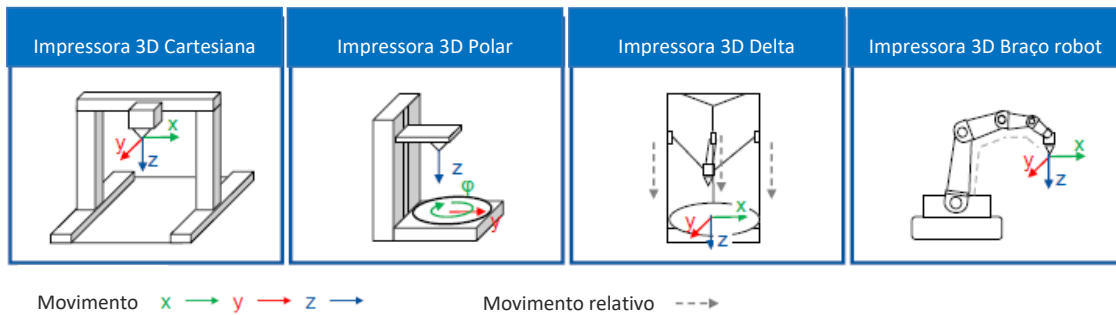


Figura 7 - Tipos de impressoras FDM segundo a movimentação de impressão [29]

#### 2.4.2 Vantagens e Limitações do processo FDM

O processo FDM, tal como a maior parte dos outros processos de AM, tem tido um crescimento exponencial nos últimos anos, principalmente devido às vantagens que oferece quando comparado com processos de manufatura convencional. Algumas dessas vantagens são:

- **Geometria complexa** – o processo FDM proporciona a produção de peças com geometrias complexas, as quais não seriam possíveis através de processos de manufatura convencionais, ou então necessitariam de vários passos para a produção da peça desejada [35-37];
- **Peças integradas e funcionais** – por vezes, nos processos convencionais, devido à complexidade da peça a produzir, é necessário dividir a peça em diversas partes e efetuar a montagem posteriormente. Com o processo FDM essa necessidade torna-se bastante menor e, além disso, através deste, é possível produzir diferentes peças de uma única vez, de forma montada e funcional, reduzindo a posterior montagem [35, 38];
- **Produção de pequenos lotes** – os processos convencionais, geralmente, são mais direcionados à produção em massa, enquanto que a AM concentra-se na produção de pequenos lotes, diminuindo os custos de produção para peças dessa escala de produção [35, 39];
- **Customização** – através do processo FDM é possível a produção de peças customizadas, tanto a nível de quantidade, qualidade, aparência, materiais e funcionalidade a custos acessíveis [35];
- **Custos reduzidos** – em comparação à manufatura convencional, a manufatura aditiva apresenta custos bastante reduzidos pois, não necessita de moldes ou ferramentas, reduz a montagem de peças, reduz a quantidade de material desperdiçado, eliminação de stocks, entre outros custos associados [27, 39];
- **Produção reativa e versátil** – a facilidade e a rapidez de produzir uma peça, testar, modificar e reproduzi-la novamente torna possível a redução do *time-to-market* e *lead time* de produção [39].

Tal como em qualquer tipo de processo, o processo FDM apresenta algumas limitações como:

- **Efeito escada** – este efeito é provavelmente um dos maiores problemas do processo FDM, apresentando avanços e recuos entre as camadas, o que torna a sua utilização impossível para peças em que a baixa rugosidade superficial seja exigida, ou então são utilizadas técnicas de pós-processamento [40-42];
- **Formação de vazios** – a formação de vazios é inerente à natureza do processo FDM. A magnitude deste problema está dependente dos parâmetros de impressão e dos filamentos utilizados, especialmente em filamentos reforçados com fibras. O efeito nas peças produzidas resulta em propriedades anisotrópicas o que pode levar à delaminação e à perda de propriedades mecânicas [40];
- **Complexidade do processo** – o processo FDM é um processo bastante complexo devido ao número elevado de parâmetros que influenciam tanto as características visuais como as características mecânicas das peças a produzir [43];
- **Volume de construção** – as dimensões da peça a produzir está dependente do volume de construção da impressora e, posto isto, por vezes as peças têm de ser divididas em segmentos de modo a tornar possível a sua produção [9];
- **Suportes** – para efetuar *bridges* e *overhangs*, pode ser necessária a utilização de suportes, suportes estes que são efetuados com o mesmo material ou então com materiais que se dissolvem em água como o álcool polivinílico (PVA). Isto representa uma limitação pois, a utilização de suportes obriga a um maior gasto de materiais, maior tempo de produção e pós-processamento [38].

#### 2.4.3 Principais parâmetros de impressão

São vários os parâmetros que influenciam as características e a eficiência da produção de objetos pelo processo FDM. Algumas impressoras de manufatura aditiva permitem a manipulação de parâmetros que controlam, por exemplo, o formato da peça, a estrutura interna (podendo optar por um objeto sólido ou não), a qualidade superficial e alterar as propriedades mecânicas consoante a aplicação pretendida [44]. É importante referir que dependendo do fabricante da impressora 3D a liberdade de escolha de parâmetros pode ser limitada.

Alguns dos principais parâmetros utilizados no processo FDM são a espessura da camada, o *raster angle*, o *raster width*, o *contour width*, o *infill pattern*, a densidade de *infill*, o *air gap*, a velocidade de impressão, a orientação de construção, a temperatura de extrusão, o diâmetro do *nozzle*, entre outros. Alguns destes parâmetros serão descritos a seguir [40, 43].

- **Air gap**

Entende-se por *air gap* a distância entre dois cordões adjacentes numa camada depositada. O *air gap* pode ser positivo, negativo ou zero. Quando este parâmetro é positivo, os cordões encontram-se separados, sendo utilizado quando a resistência da estrutura da peça não é imperativa e se quer diminuir o tempo de produção. Caso o *air gap* seja zero, significa que os cordões estão simplesmente em contacto um com o

outro. Um *air gap* negativo traduz-se numa junção dos cordões, o que resulta numa estrutura mais densa e num maior tempo de produção [40, 45]. Na Figura 8 está esquematicamente representado este parâmetro.

- **Diâmetro do *nozzle***

Diâmetro do *nozzle* é o diâmetro do orifício por onde o material é extrudido. A qualidade superficial é influenciada por este parâmetro, tal como o rigor dimensional, o *raster width* e o tempo de produção. Aumentando o diâmetro do *nozzle* diminui-se o tempo de produção e aumenta-se o *raster width* [40, 46].

- **Espessura de camada**

A espessura de camada é a altura da camada ao longo do eixo vertical, ou seja, é a quantidade de material depositado numa única passagem ao longo deste eixo. É considerado um parâmetro muito influente, pois condiciona diretamente a qualidade superficial e o tempo de produção da peça. Aumentando a espessura de camada o tempo de produção irá diminuir, tal como a qualidade da impressão. A espessura da camada, geralmente, é menor do que o diâmetro do *nozzle* [40, 44].

- ***Infill density***

A densidade de *infill* é a percentagem de volume de material no interior de uma peça. Uma peça com 0% de *infill* só tem carapaça e com 100% é sólida. Este parâmetro influencia diretamente o peso e as propriedades mecânicas da peça a produzir. Geralmente, aumentando a densidade obtém-se melhores propriedades mecânicas, mas também o aumento de massa [40, 43, 47].

- ***Infill pattern***

O *infill pattern* é o tipo de padrão efetuado em que é depositado material na estrutura interna da peça. Este parâmetro influencia a resistência mecânica da peça a produzir. Existem vários tipos de padrões como, por exemplo, hexagonal, triangular, diamante, linear, entre outros [43, 48].

- **Orientação de construção**

Orientação de construção traduz-se na direção em que a peça é produzida ao longo dos eixos X, Y e Z, na plataforma de construção. Este parâmetro influencia as propriedades mecânicas e a utilização, ou não, de suportes que irão influenciar a qualidade superficial da peça a produzir [40, 43].

### **Raster angle**

Entende-se por *raster angle* ou ângulo do cordão, como a direção de deposição de material ao longo de plataforma de construção em relação ao eixo X que, geralmente, varia entre 0° e 90°. Este parâmetro influencia as propriedades mecânicas da peça a produzir [40, 43]. Na Figura 8 pode-se observar um exemplo esquemático de *raster angle*.

- **Raster width**

*Raster width* define-se como a largura do cordão que é depositado ao longo do caminho percorrido, que é bastante influenciada pelo diâmetro do *nozzle*. Este parâmetro influencia o tempo de produção de uma peça sendo que, aumentando a largura do cordão menor é o tempo de produção da peça desejada [40, 48]. Na Figura 8 está representado esquematicamente este parâmetro.

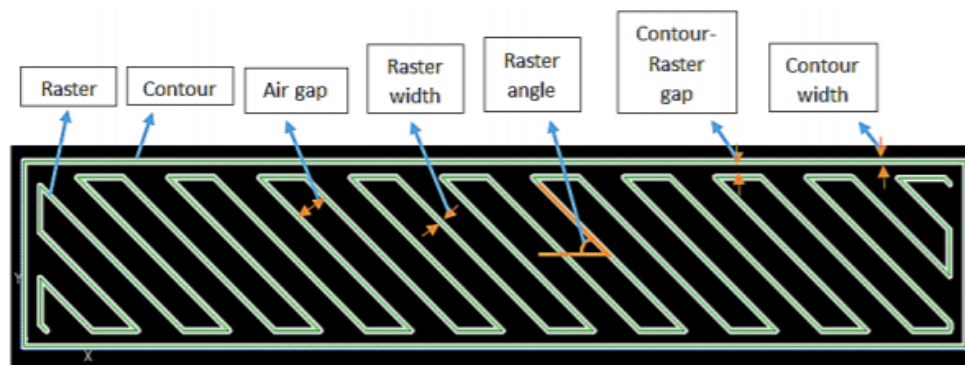


Figura 8 - Esquema ilustrativo de alguns parâmetros de impressão [49]

- **Temperatura de extrusão**

A temperatura de extrusão é a temperatura à qual o filamento é aquecido durante a processo que varia consoante o material utilizado e a velocidade de impressão, entre outros fatores. Este parâmetro altera a viscosidade do material e tem influência nas propriedades mecânicas e na qualidade superficial da peça a produzir [40, 43].

- **Velocidade de impressão**

Entende-se por velocidade de impressão a distância percorrida pela cabeça de extrusão no plano XY, por unidade de tempo, enquanto deposita material. Este parâmetro tem influencia no tempo de impressão e nas tensões residuais do objeto [40, 50].

No processo FDM existe uma necessidade de estudar qual a influência dos parâmetros de impressão, visto que é um processo complexo, com muitos parâmetros a influenciar a qualidade final da peça, que muitas vezes entram em conflito uns com os outros [51]. Na Tabela 1 são apresentados e sumarizados alguns artigos em que se estudou a influência de alguns parâmetros de modo a otimizá-los.

Tabela 1 - Sumário de artigos sobre otimização de parâmetros

| Referências Bibliográficas        | Sumário  |
|-----------------------------------|--|
| Nancharaiah, T. <i>et al</i> [52] | <p>Neste trabalho, os autores estudaram o efeito dos parâmetros espessura de camada, <i>raster width</i>, <i>raster angle</i> e <i>air gap</i> na qualidade superficial e precisão dimensional em peças em ABS. Foi utilizado o método Taguchi de modo a avaliar a influência de cada parâmetro e foram produzidas dezoito amostras seguindo a norma ASTM D 695. Por fim, foi efetuada uma análise ANOVA que registou que a espessura da camada e o <i>raster width</i> têm grande influência na qualidade superficial e na precisão dimensional. Quanto ao <i>air gap</i>, este tem pouco efeito na qualidade superficial e algum efeito na precisão dimensional. O <i>raster angle</i> apresenta pouca influência na qualidade superficial e na precisão dimensional.</p>  |
| Nuñez, P. <i>et al</i> [53]       | <p>Neste artigo, os autores analisaram a influência da espessura de camada e percentagem de <i>infill</i> na rugosidade superficial, precisão dimensional e planeza numa peça em ABS-plus produzida pelo processo FDM. Foram realizados quatro testes experimentais em que variavam os parâmetros da espessura da camada em 0,178 mm e 0,278 e densidade de <i>infill</i> em 10% e 100% (sólido). O melhor registo a nível dimensional foi obtido com a espessura de camada e <i>infill</i> mais elevados (0,278, 100%) obtendo-se um desvio máximo no tamanho da peça de cerca de 36 <math>\mu\text{m}</math> nos eixos X, Y e Z e um desvio volumétrico de cerca de 4,2 <math>\text{mm}^3</math>. Os piores resultados foram obtidos com a menor espessura e menor percentagem de <i>infill</i> (0,174, 10%) apresentando um desvio dimensional de cerca de 262 <math>\mu\text{m}</math> e volumétrico de cerca de 108,1 <math>\text{mm}^3</math>. Quanto à qualidade superficial ambos os parâmetros influenciam e o melhor resultado foi obtido com a menor espessura de camada e densidade de <i>infill</i> mais elevada (0,174, 100%). Em relação à planeza, registou-se um melhor valor para a menor espessura de camada e densidade de <i>infill</i> mais elevada (0,174, 100%) e pior registo para a maior espessura de camada e menor densidade de <i>infill</i> (0,278, 10%).</p> |
| Srinivasan, R. <i>et al</i> [54]  | <p>Srinivasan, R. <i>et al</i> estudaram a influência da densidade de <i>infill</i> na resistência à tração e rugosidade superficial de uma peça em PETG produzida pelo processo FDM. Foram realizados e ensaiados nove provetes com densidades de <i>infill</i> desde 20% aos 100%, segundo a norma ASTM D 638, e medida a rugosidade destes com um rugosímetro. Foi registado que com o aumento da percentagem de <i>infill</i> a resistência à tração aumenta e que a rugosidade aumenta no sentido oposto. Posto isto, os melhores valores de resistência à</p>  |

| Referências Bibliográficas                | Sumário   |
|---|---|
|   | <p>tração e rugosidade, 32,12 MPa e 2,87 <math>\mu\text{m}</math> respetivamente, obtiveram-se com uma densidade de <i>infill</i> de 100%.</p>  |
| <p>Wang, P. <i>et al</i><br/>[55]</p>     | <p>Neste trabalho, os investigadores estudaram a influência dos parâmetros diâmetro do <i>nozzle</i>, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e espessura da camada na densidade, na resistência à tração e na rugosidade superficial em peças em PEEK. Foram produzidos e ensaiados vários provetes observando-se que todos estes parâmetros influenciam a densidade, a resistência à tração e a rugosidade superficial. O aumento da temperatura e a diminuição da espessura de camada podem melhorar a rugosidade superficial, a densidade e a resistência à tração. Os melhores parâmetros foram uma temperatura de extrusão de 440°C, velocidade de impressão de 20 mm/s e espessura de camada de 0,1 mm.</p> |
| <p>Wankhede, V.<br/><i>et al</i> [56]</p> | <p>Neste trabalho, os autores estudaram o efeito dos parâmetros densidade de <i>infill</i>, espessura de camada e <i>infill pattern</i> na rugosidade superficial e no tempo de impressão em peças em ABS. Foram produzidos provetes e, de seguida, foi efetuada uma análise ANOVA que demonstrou que a espessura tem a maior influência no tempo de construção e na rugosidade superficial. Os melhores parâmetros para menores tempos de impressão foram a maior espessura de camada (0,3302 mm), a baixa densidade de <i>infill</i> e o padrão <i>smart</i>. Para uma menor rugosidade, os parâmetros foram a espessura de camada menor (0,254 mm), a baixa densidade de <i>infill</i> e padrão <i>smart</i>.</p>        |
| <p>Mora, S. M. <i>et al</i> [57]</p>      | <p>Neste artigo, os investigadores estudaram a influência dos parâmetros como a espessura de camada, velocidade de impressão e orientação de construção em peças em ABS produzidas pelo processo FDM na precisão dimensional e qualidade superficial. Com recurso a um <i>scanner</i> 3D comparou-se a peça produzida com o CAD e observou-se que a melhor qualidade superficial se conseguiu com a menor espessura de camada (0,2 mm) e menor velocidade de impressão (10 <math>\text{cm}^3/\text{h}</math>). Quanto à pior qualidade superficial, esta segue o sentido oposto. Além disso, estes parâmetros não têm um efeito significativo na precisão dimensional.</p>  |

Os artigos referidos na Tabela 1, entre outros, foram úteis para a escolha de parâmetros a estudar, como também, para a comparação de resultados.

#### 2.4.4 Defeitos mais frequentes

Os problemas de produção de peças por FDM podem ter várias causas e podem ser divididos em três categorias: problemas associados à impressora 3D, problemas associados à deposição de material e problemas de qualidade de impressão. De seguida, serão apresentados alguns dos problemas mais recorrentes para cada tipo de categoria.

##### 2.4.4.1 Problemas associados à impressora 3D

Os problemas associados à impressora podem ser vários como, por exemplo, a falha ao extrudir no início da impressão, a fraca aderência da primeira camada e a extrusão afastada das camadas anteriores.

- **Falha ao extrudir no início da impressão**

A razão pela qual o *nozzle* não deposita material na plataforma nos primeiros momentos de impressão pode estar relacionado com vários fatores. Este problema poderá ocorrer devido ao *nozzle* se encontrar demasiado próximo da plataforma, ao filamento estar em más condições ou ao *nozzle* estar obstruído. De modo a solucionar este problema deve-se efetuar uma *skirt* para preparar a impressora para extrudir antes da camada, recalibrar a plataforma de construção, verificar o estado do filamento nas engrenagens e garantir que o *nozzle* se encontra limpo [58].

- **Fraca aderência da primeira camada**

A qualidade da primeira camada a imprimir é muito importante, pois não só interfere nessa mesma camada como na restante impressão. Este problema pode ocorrer na sequência de uma má calibração da plataforma de construção, provocando uma distância do *nozzle* demasiado alta, pode ocorrer devido à velocidade de impressão ser demasiado elevada ou simplesmente por existirem resíduos ou gorduras na plataforma que impossibilitam uma boa adesão [58, 59]. Algumas soluções possíveis para estes problemas são a recalibração da plataforma, de modo a garantir a distância correta entre o *nozzle* e a mesma, diminuição da velocidade de impressão, aumento da temperatura de extrusão ou da plataforma de construção, limpeza da plataforma com álcool isopropílico (IPA) ou acetona, utilização de *brim* ou adesivos solúveis em água [60]. Na Figura 9 está representado um exemplo de fraca aderência entre o material depositado e a plataforma de construção.

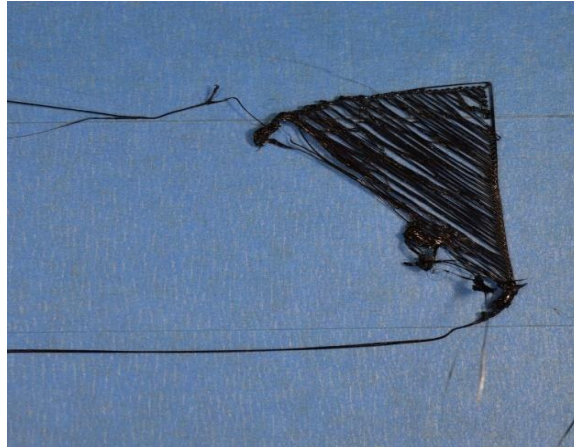


Figura 9 - Exemplo de uma impressão com fraca aderência entre o material depositado e a plataforma de construção [59]

- **Extrusão afastada das camadas anteriores**

Este problema pode manifestar-se por duas razões. Primeiro, quando ocorre perda de aderência da peça extrudida e esta se desloca durante a impressão, o material continua a ser extrudido, mas sem adesão com as camadas anteriores. Segundo, o *G-code* ou o ficheiro CAD, pode ter algum erro como, por exemplo, uma quebra da geometria em algum ponto [58].

#### 2.4.4.2 Problemas associados à deposição de material

Quanto aos problemas associados à deposição estes podem ser, por exemplo, *under-extrusion*, *over-extrusion*, *overheating*, *stringing*, *dimensional accuracy*, *poor bridging*, entre outros.

- ***Under-Extrusion***

*Under-extrusion* consiste no fornecimento de material insuficiente para a impressão da peça pretendida. Neste tipo de defeito ocorre falta de material entre camadas que pode levar ao aparecimento de vazios visíveis ou até mesmo falta de camadas, tornando a peça mais frágil. Este problema pode derivar de vários fatores como a fraca qualidade do filamento com flutuações acentuadas de diâmetro, *settings* de impressão incorretos, sujidade do *nozzle* impedindo a passagem fluida do material, folga ou sujidade nas engrenagens, entre outros. Algumas soluções para este problema são garantir que as engrenagens estão bem apertadas, verificar o diâmetro do filamento com um paquímetro, verificar se as engrenagens, a *hot end* e o *nozzle* se encontram devidamente limpos, garantir que os *settings* do *licer* estão corretos e se necessário aumentar gradualmente o *extrusion multiplier (flow rate)* até o problema desaparecer [58, 61]. Na Figura 10 pode-se observar um exemplo de uma peça com *under-extrusion*.



Figura 10 - Exemplo de uma peça com *under-extrusion* [61]

- **Over-Extrusion**

*Over-extrusion* traduz-se no excesso de fornecimento de material na impressão, afetando a qualidade superficial e o rigor dimensional da peça desejada. Este problema pode ocorrer devido a um *extrusion multiplier* ou *flow rate* elevado, ou devido à velocidade de impressão elevada. A solução deste problema passa pela redução do *flow rate* ou do *extrusion multiplier*. É importante referir que o aumento destes parâmetros tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas da peça [58, 61, 62]. Na Figura 11 está representado um exemplo de uma peça em que ocorreu *over-extrusion*.

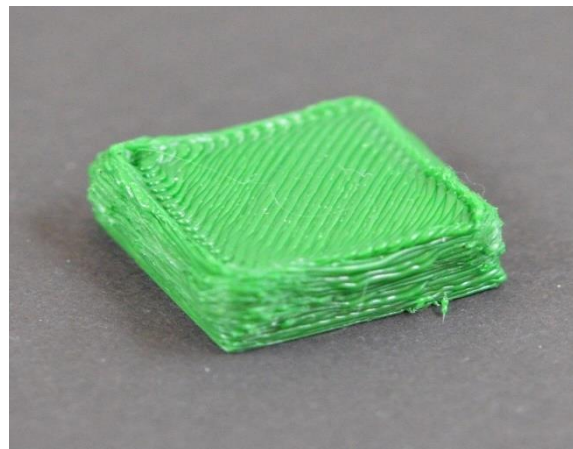


Figura 11 - Exemplo de uma peça com *over-extrusion* [59]

- **Overheating**

*Overheating*, ou excesso de temperatura, observa-se quando a peça apresenta um aspeto deformado ou “derretido”. Este excesso de temperatura possivelmente resulta da escolha de uma temperatura demasiado elevada para o filamento utilizado, de insuficiência de dissipação de calor da *hot end* ou de uma velocidade de impressão elevada. De modo a solucionar este problema deve-se verificar a temperatura de extrusão recomendada para o filamento utilizado, diminuir gradualmente a temperatura de extrusão, verificar o funcionamento e a posição do sistema de ventilação e, se possível, aumentar o *airflow* ou diminuir a velocidade de impressão de

modo a que as camadas tenham mais tempo para arrefecer [58, 61, 63]. Na Figura 12 pode-se observar um exemplo de uma peça em que ocorreu *overheating*.

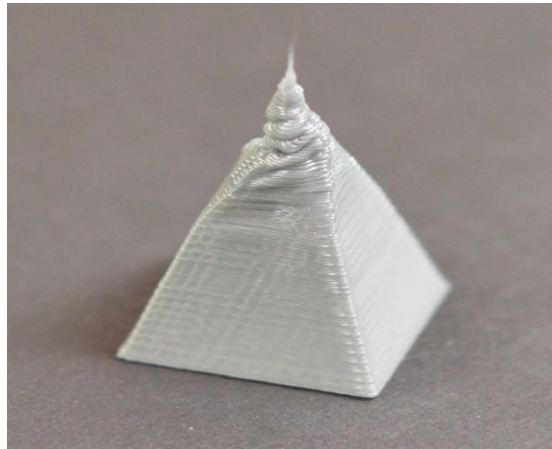


Figura 12 - Exemplo de uma peça com *overheating* [59]

- ***Stringing* ou *Oozing***

O *stringing* ou *oozing* ocorre quando é depositado material em zonas “vazias” entre partes da peça a produzir, enquanto a cabeça de extrusão efetua *travel moves*, movimentos estes em que não é suposto depositar material. Alguns dos fatores para este problema ocorrer são a temperatura demasiado elevada para o material a utilizar, a qualidade do filamento e os *settings* de retração incorretos. Algumas das soluções para este problema passam por ajustar os parâmetros da retração do filamento, diminuir a temperatura de extrusão, evitar *travel moves* em zonas vazias e aumentar a velocidade destes movimentos [58, 59]. Na Figura 13 está representado um exemplo de uma peça em que ocorreu *stringing*.

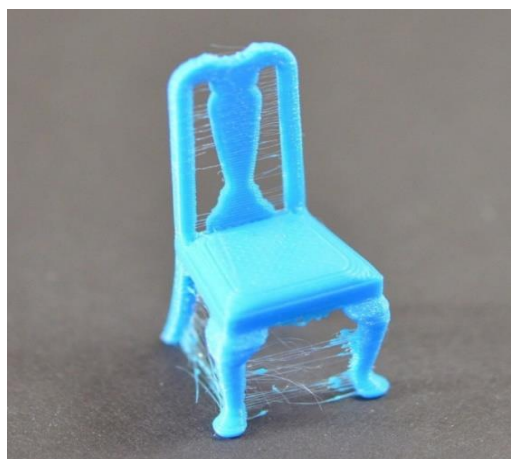


Figura 13 - Exemplo de uma peça com *stringing* [59]

- ***Dimensional Accuracy***

Quando se criam *assemblies* de peças que irão interagir umas com as outras, é necessário que haja rigor dimensional, de modo que as peças se encaixem com a precisão requerida. Por vezes, esta precisão não se observa, apresentando, por exemplo, furos com diâmetro errado, peças que não encaixam umas nas outras e folgas demasiado elevadas. Razões para este problema podem ser: medidas incorretas no ficheiro CAD, não seguindo as regras de dimensionamento para este processo, problemas de altura da camada, contração do material e problemas associados aos eixos da máquina, por falta ou por excesso de tensão nestes sistemas. De modo a solucionar este problema deve-se recalibrar os eixos X e Y de forma a garantir as tensões corretas, recalibrar a plataforma de construção para assegurar a espessura correta da primeira camada e efetuar testes para se perceber a percentagem de contração da peça e, assim, calcular o erro e compensar essa contração nas próximas impressões [59, 61].

- ***Poor Bridging and Overhangs***

Entende-se por *bridge* ou ponte como o material que é extrudido entre dois pontos elevados da peça. Quanto ao *overhang*, este trata-se do ângulo entre a peça e o eixo vertical. A capacidade de efetuar uma *bridge* ou *overhang* com sucesso depende das propriedades do material e da impressora. Existem várias soluções de modo a melhorar estas propriedades, como por exemplo, aplicar estruturas de suportes, aumentar o *airflow* de forma a arrefecer o filamento mais rapidamente e diminuir a velocidade de impressão. Alguns *slicer softwares* têm funcionalidades que automaticamente detetam as *bridges* existentes na peça e alteram os *settings* de modo a conseguir melhores resultados [58, 59, 61, 64]. Na Figura 14 pode-se observar um exemplo de uma peça em que as *bridges* não foram efetuadas com sucesso e um exemplo de uma peça em que os *overhangs* não foram corretamente realizados.

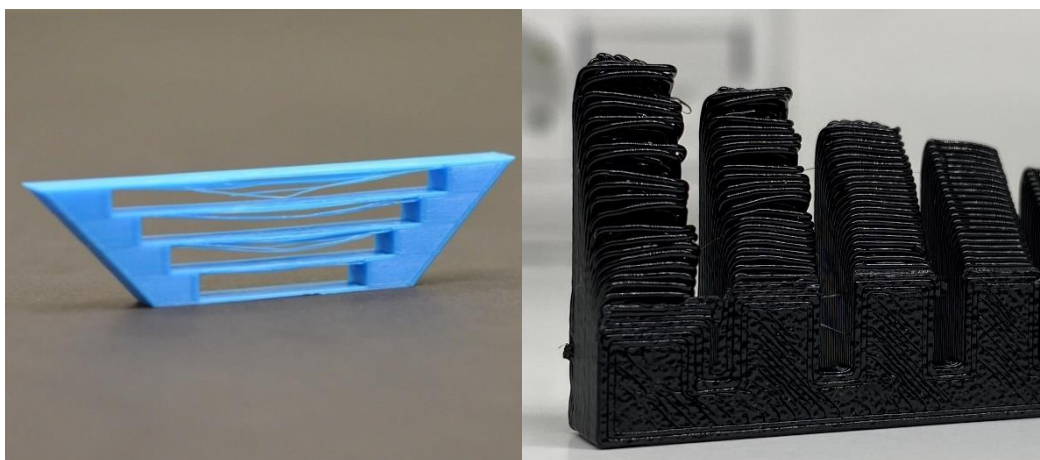


Figura 14 – a) Exemplo de uma peça com problemas de *bridges* [59]. b) Exemplo de uma peça com problemas de *overhang*

### 2.4.4.3 Problemas de qualidade de impressão

Em relação a problemas associados à qualidade de impressão estes podem ser, *blobs* ou *zits*, empenamento, delaminação, *pillowing*, *elephant foot*, entre outros.

- **Blobs ou Zits**

*Blobs* ou *zits* são marcas que aparecem na parte exterior da peça produzida devido aos constantes inícios e fins de extrusão durante os movimentos ao longo do percurso de impressão. Por vezes, consegue-se perceber através destes defeitos onde foi o início ou fim da deposição. De modo a reduzir ou evitar este problema a retração deve estar ativa de maneira a evitar um excesso de deposição de material nesses inícios e fins visíveis e selecionar a forma de como se pretende iniciar cada camada, aleatoriamente, alinhado ou *nearest*, para que se possa “esconder” este defeito da melhor forma possível para a peça em questão [58, 59, 63]. Na Figura 15 está representado um exemplo de uma peça com *blobs* ou *zits*.

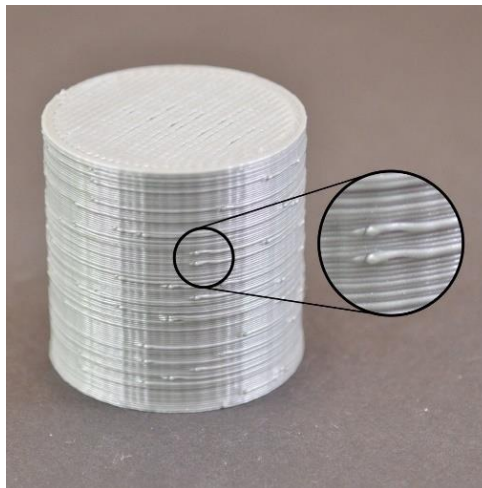


Figura 15 - Exemplo de peça com *blobs* ou *zits* [59]

- **Warping**

*Warping* ou empenamento, ocorre principalmente em peças em que o material utilizado tem uma temperatura de extrusão elevada, ocorrendo uma diferença significativa entre a temperatura ambiente e a temperatura de extrusão. Esta amplitude térmica causa tensões residuais elevadas que levam à retração do material, de tal forma, que pode levar ao empeno da peça. Para solucionar este problema deve-se garantir que a plataforma de construção se encontra limpa utilizando-se IPA ou acetona, utilizar adesivos à base de água como cola para uma melhor adesão à plataforma, desativar o *airflow*, utilizar *brims* ou *rafts* ou efetuar a impressão dentro de uma *enclosure* onde o ambiente é mais controlado, garantindo uma amplitude térmica menor [58, 59]. Na Figura 16 pode-se observar um exemplo de uma peça que sofreu empenamento.

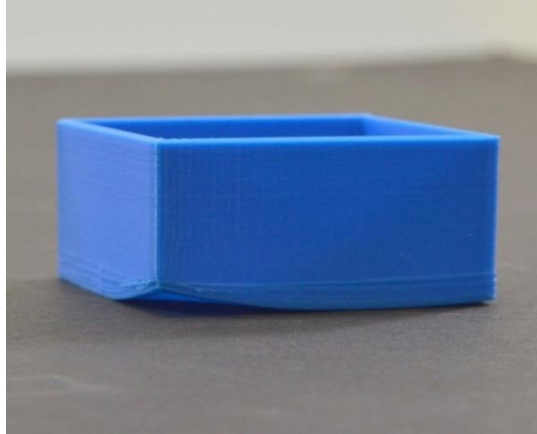


Figura 16 - Exemplo de peça com empenamento [59]

- **Delaminação**

A delaminação ocorre quando duas camadas se separam devido à fraca união entre as mesmas. Este efeito ocorre principalmente em peças altas devido à amplitude térmica entre a base e o topo da peça, pois o calor fornecido pela plataforma aquecida não alcança toda a peça. Posto isto, nas camadas onde a temperatura é mais baixa, o material depositado tende a arrefecer de forma mais acelerada provocando a má união entre camadas. De modo a solucionar este problema deve-se garantir que a camada a depositar seja “esmagada” de forma a se unir com a anterior. Outra possível resolução passa por diminuir a espessura da camada, sendo importante referir que espessura desta deve ser pelo menos 20% inferior ao diâmetro do *nozzle*. Além disso, deve-se aumentar a temperatura de extrusão, diminuir o *airflow* ou efetuar a impressão numa *enclosure* com o propósito de manter a temperatura ambiente mais elevada [58, 59]. Na Figura 17 está representado um exemplo de uma peça em que ocorreu delaminação.



Figura 17 - Exemplo de peça com delaminação [59]

- ***Pillowing***

*Pillowing* consiste na ocorrência de cavidades ou até mesmo furos na superfície da peça produzida. Alguns fatores que podem resultar neste problema são a espessura insuficiente das camadas superiores, a temperatura de extrusão e a velocidade de impressão demasiado elevadas ou os *settings* de refrigeração incorretos. Para a resolução deste defeito deve-se aumentar o número das camadas superiores, aumentar o *airflow* e diminuir a temperatura de extrusão ou a velocidade de impressão [58, 61]. Na Figura 18 pode-se observar um exemplo de uma peça com *pillowing*.



Figura 18 - Exemplo de peça com *pillowing* [61]

- ***Elephant Foot***

*Elephant foot* é um defeito que ocorre quando algumas camadas não arrefecem suficientemente e, com o peso das camadas seguintes, estas “achatam”, projetando-se lateralmente, como se pode observar na Figura 19. Este problema ocorre principalmente em impressoras que possuem plataformas aquecidas. Algumas soluções para este problema são a criação de pequenos chanfros na base da peça, aumentar o *airflow*, diminuir a temperatura da plataforma e recalibrar a plataforma de construção [58, 61].



Figura 19 - Exemplo de peça com *elephant foot* [61]

## 2.5 Tipos de materiais utilizados na manufatura aditiva

Os materiais utilizados na manufatura aditiva diferem conforme o tipo de tecnologia. O material não só difere na sua constituição como também no seu estado que pode variar entre pó, líquido, filamento, entre outros [65]. Os principais materiais utilizados na manufatura aditiva são os polímeros, metais, cerâmicos e compósitos de base polimérica, metálica ou cerâmica. Mais recentemente, têm-se desenvolvido *smart materials* que têm a particularidade de alterar a geometria e a forma da peça produzida através de estímulos externos, como temperatura ou humidade. Estes tipos de materiais estão diretamente ligados à emergente impressão 4D, que se refere à quarta dimensão, o tempo [18, 66, 67].

No âmbito deste trabalho apenas se irá focar sobre os materiais poliméricos e compósitos mais utilizados no processo FDM.

### 2.5.1 Polímeros

Os polímeros são os materiais mais utilizado no processo FDM, mais concretamente os polímeros amorfos e termoplásticos. A razão para esta escolha é o largo intervalo de temperaturas em que a viscosidade e o amolecimento do material são favoráveis à deposição do mesmo [65]. Exemplo de alguns polímeros utilizados são o ácido polilático (PLA), acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), politereftalato de etileno glicol (PETG), acrilonitrilo-estireno-acrilato (ASA), policarbonato (PC), nylon, polieter-etercetona (PEEK) e álcool polivinílico (PVA). Para a produção de peças mais flexíveis utiliza-se, por exemplo, poliuretano termoplástico (TPU) [31, 65]. De seguida, serão apresentados, de forma breve, os materiais que irão ser utilizados na parte de desenvolvimento deste trabalho.

- **PLA**

PLA é o material mais utilizado no processo FDM. Este material destaca-se por ser biodegradável, o que tem aumentado a sua procura e utilização. Apresenta facilidade de impressão, necessita de menor energia e temperatura de extrusão em relação à maioria dos outros materiais, é rígido e pouco dúctil. Para além disso, apresenta baixa expansão térmica, menor probabilidade de empenamento e não precisa de plataforma aquecida, sendo capaz de produzir peças de grandes dimensões [43, 68]. Por sua vez, também se registam algumas limitações como a fragilidade, a falta de resistência térmica, a falta de resistência a radiações UV e um pós-processamento difícil [68].

- **ABS / ASA**

O ABS e o ASA são materiais com características muito idênticas, apesar do ASA apresentar algumas vantagens em relação ao ABS como maior resistência a radiações UV e menor contração térmica. Estes materiais oferecem boa resistência a altas temperaturas (não apresentando deformações até aos 100°C), ao impacto e à humidade. Devido a estas características são muito utilizados para o desenvolvimento

de peças teste [31, 43, 68]. Além destas propriedades, apresentam vantagens no pós-processamento em relação ao PLA, sendo possível reduzir com alguma facilidade a rugosidade das superfícies e o efeito escada, por exemplo, através de vapores de acetona. Quanto às limitações, estes materiais têm tendência a empenar devido à expansão térmica elevada, apresentam difícil impressão e libertação de odor durante o processo [68].

- **PC**

Policarbonatos são termoplásticos que apresentam boas propriedades mecânicas, como boa tenacidade, resistência térmica e resistência à tração. Além destas vantagens, estes materiais providenciam uma boa qualidade superficial, boa adesão entre camadas e durabilidade. A energia que necessitam e a temperatura de extrusão são bastante elevadas em comparação a outros materiais. Este material é de difícil impressão e tem grande tendência a empenar, principalmente em objetos de grandes dimensões [43, 68].

- **PETG**

PETG é um termoplástico derivado do PET, mas modificado com glicol de modo a tornar a impressão mais fácil e garantir maior flexibilidade [69]. É um material muito utilizado pois apresenta boa resistência térmica, maior ductilidade e menor fragilidade do que o PLA. Tal como o PLA, não tem tendência a empenar e apresenta facilidade de impressão. Algumas desvantagens deste material são a possibilidade de ocorrência de *stringing*, a difícil remoção dos suportes, a dificuldade em efetuar *bridges*, não sendo o material mais adequado para pequenas peças [68].

- **Materiais Flexíveis**

Os materiais flexíveis, tipo TPU, são materiais elásticos e resistentes. Estes elastómeros não têm tendência a empenar, apresentam boa ligação entre camadas e resistência à abrasão. Algumas limitações são a baixa velocidade de impressão, a tendência para absorver humidade e a necessidade de maior preparação para imprimir este material [68].

- **Nylon**

O nylon é utilizado quando são requeridas peças com boas propriedades mecânicas como resistência ao impacto, ductilidade e resistência química. Para além disso, demonstra boa resistência mecânica, apresentando boa adesão entre camadas. Algumas limitações deste material são a tendência para empenar, tanto quanto o ABS e o ASA, e para absorver humidade, que deteriora o filamento sendo necessário armazená-lo em ambientes secos [43, 68].

### 2.5.2 Compósitos

A falta de propriedades mecânicas como resistência térmica, resistência à tração, rigidez, entre outras, impossibilitam a utilização do processo FDM com materiais virgens para a produção de objetos funcionais de engenharia. Posto isto, têm-se desenvolvido materiais compósitos, que resultam da combinação de dois ou mais materiais de modo a melhorar a funcionalidade final das peças. Por norma, um compósito serve-se de um ou mais materiais de reforço e uma matriz de um material base que tem a função de ligar os restantes materiais de forma a transmitir as cargas aplicadas na peça aos materiais de reforço e protegê-los contra a corrosão [31, 65, 70].

Dependendo da funcionalidade e propriedades requeridas de uma peça a produzir em FDM, podem-se utilizar diferentes formas de materiais de reforço. Os materiais de reforço podem ser partículas, fibras ou nanomateriais embebidos numa matriz polimérica, sendo que os mais utilizados são fibras curtas ou contínuas, nanopartículas, micropartículas e partículas metálicas [31]. Neste trabalho apenas serão abordados compósitos de fibras curtas e contínuas, nomeadamente *Onyx*, e fibras de carbono no desenvolvimento deste projeto.

No processo FDM existem três formas de produzir uma peça com adição de fibras como material de reforço, as quais são [71]:

- As fibras e a matriz polimérica são misturadas antes da extrusão;
- As fibras e a matriz polimérica são misturadas como um filamento pré-impregnado;
- Estes materiais são injetados separadamente com recurso a duas cabeças de extrusão, uma que extrude a matriz polimérica e outra a fibra.

As fibras curtas ou descontínuas, geralmente, são misturadas numa matriz polimérica amolecida e têm a função de incrementar a resistência mecânica da peça a produzir. Aquando da produção do filamento compósito o arranjo das fibras é aleatório, mas estas devem seguir uma orientação específica. Além desta necessidade, a percentagem e o tamanho das fibras devem ser rigorosamente controlados com o objetivo de evitar a obstrução do nozzle e de garantir a melhores propriedades mecânicas da peça final. Parâmetros como *infill pattern*, *raster angle*, temperatura de extrusão, espessura da camada, número de camadas reforçadas, orientação de construção, entre outros, influenciam as propriedades mecânicas da peça a produzir.

Neste trabalho, na parte do desenvolvimento, foram utilizados materiais reforçados com fibras descontínuas de carbono, nomeadamente *Onyx* da *Markforged*.

- **Onyx**

O *Onyx* é um material compósito de base polimérica, neste caso nylon, com adição de microfibras de carbono. Este tipo de material apresenta propriedades como alta resistência mecânica, dureza e resistência química. Além disso, o *Onyx* pode ser reforçado com fibras contínuas, garantindo propriedades mecânicas mais elevadas [72].

Este tipo de compósitos reforçados com fibras curtas de base polimérica, apesar de garantirem propriedades mecânicas significativamente melhores do que as peças produzidas apenas com um polímero, apresentam fracas propriedades quando comparado a peças produzidas através de processos convencionais com materiais compósitos. De modo a competir com esses processos convencionais, foram introduzidas fibras contínuas em matrizes poliméricas.

A produção de compósitos reforçados com fibras contínuas necessita de duas extrusoras, uma para o termoplástico e outra para a fibra contínua ou então, necessita de uma co-extrusora, que extrude o termoplástico juntamente com a fibra contínua que irá ficar impregnada no filamento [73, 74].

Ao contrário da produção de peças com reforço de fibras curtas, na utilização de fibras contínuas é possível controlar a direção da fibra. Devido a este parâmetro, ou seja, uma orientação melhorada, e à maior área de contacto, estas últimas apresentam propriedades mecânicas significativamente melhores do que as fibras curtas. Com a otimização de parâmetros de impressão, reduzindo a formação de vazios (porosidade) e melhorando a ligação da matriz polimérica e da fibra contínua, o processo FDM é capaz de competir com os convencionais. É importante referir que, ao contrário dos processos convencionais, neste processo não é efetuada pressão no objeto, influenciando a porosidade, levando à perda de propriedades mecânicas [70]. Apesar disso, este processo tem a vantagem de conseguir produzir peças com geometria mais complexa e, por vezes, com melhores propriedades [75].

As fibras de carbono, vidro e Kevlar são as fibras mais utilizadas nestes processos.

- **Fibra de carbono**

A fibra de carbono devido às suas propriedades mecânicas, como um ótimo rácio entre resistência mecânica e peso, é muitas das vezes utilizada de modo a incrementar a resistência de outros materiais. Além destas características também apresenta alta resistência à tração e à flexão, alta resistência química e térmica (aguentando altas e baixas temperaturas) e baixa expansão térmica, mas apresenta fraca resistência à compressão e a fortes impactos [76, 77].

- **Kevlar**

A fibra Kevlar pertence à família das aramidas. Caracteriza-se por apresentar boas propriedades mecânicas, térmicas, baixa contração térmica e resistência à chama. Este material mantém as suas propriedades mecânicas desde temperaturas baixas até aos 400°C [78].

- **Fibra de vidro / vidro HSHT**

A fibra de vidro é um material que tem como base de constituição sílica e óxido metálico. Este tipo de fibra é muito utilizado como material de reforço de compósitos de base polimérica e apresenta boas propriedades mecânicas como excelente estabilidade química, alta resistência à tração e resistência térmica. As fibras de vidro *High Strength High Temperature* (HSHT) apresentam duas principais características que são a alta resistência mecânica, podendo-se comparar com o alumínio 6061-T6, e a resistência a altas temperaturas, podendo ser aplicadas como reforço em peças utilizadas em ambientes de altas temperaturas como autoclaves e moldes [77, 79].

De modo a garantir as melhores propriedades mecânicas de uma peça produzida pelo processo FDM, têm-se realizado bastantes estudos científicos e experimentais sobre a influência de vários parâmetros de impressão na produção de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas ou contínuas. Alguns dos parâmetros estudados são a orientação de construção, a percentagem de fibra, a orientação das fibras, entre outros. Na Tabela 2 estão apresentados sumários de artigos científicos em que foram estudados alguns desses parâmetros.

Tabela 2 - Sumário de artigos sobre produção de compósitos em FDM

| Referências Bibliográficas           | Sumário  |
|--------------------------------------|--|
| Mohammadizadeh, M. <i>et al</i> [70] | Neste artigo foi estudada a influência dos parâmetros orientação das fibras, fração volúmica das fibras e temperatura na resistência à tração, fadiga e fluência de compósitos de matriz polimérica, neste caso nylon, reforçados com fibra de vidro, carbono ou Kevlar. Com os resultados obtidos observou-se que as falhas dos provetes produzidos ocorrem principalmente devido a delaminação, quebra da fibra ou arrancamento desta, sendo que a última é a falha mais frequente. Posto isto, a orientação das fibras apresenta influência significativa. A temperatura apresenta uma influência direta na deformação dos provetes quando sujeitos a ensaios de fluência, sendo que o aumento da temperatura se traduz numa maior deformação. Quanto às propriedades mecânicas, uma maior percentagem de densidade de fibra e orientação uniforme no sentido da carga aplicada resultam na melhoria destas propriedades. Por último, os provetes reforçados com fibra de carbono obtiveram maior resistência mecânica do que os restantes. |
| Ning, F. <i>et al</i> [80]           | Ning, F. <i>et al</i> estudaram a influência da adição de fibras curtas de carbono nas propriedades mecânicas em provetes  |

---

produzidos pelo processo FDM. Inicialmente foram preparados filamentos com fibra de carbono, com diferentes tamanhos e fração volúmica, e ABS como base polimérica. De modo a estudar as propriedades mecânicas foram produzidos provetes para o ensaio de tração e flexão. Através destes ensaios observou-se que os provetes com adição de fibra de carbono em relação aos provetes virgens apresentam maior resistência à tração e rigidez, mas menor tensão de cedência, ductilidade e dureza. Os provetes com 10 wt% apresentaram maior porosidade, podendo ser a razão pela qual estes obtiveram menor resistência à tração, dureza, tensão de cedência e ductilidade. Os provetes com 5 wt% obtiveram melhorias significativas quanto à flexão em relação aos provetes virgens e, além disso, estes apresentaram maior resistência à tração quando comparados com os provetes com 7,5 wt%. Por último, observou-se que para tamanhos de fibra maiores a resistência à tração e rigidez aumentam, mas apresentam menor tenacidade e ductilidade.

---

Ning, F. *et al*

[81]

Neste estudo, os investigadores estudaram a influência dos parâmetros *raster angle*, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e espessura da camada nas propriedades mecânicas de provetes compósitos de matriz polimérica, neste caso ABS, reforçados com fibras curtas de carbono. Através dos ensaios mecânicos e FE-SEM observou-se que um *raster angle* de [0°, 90°] apresenta significativamente maior resistência à tração e maior rigidez do que um *raster angle* de [-45°, 45°]. Quanto à velocidade de impressão, observou-se que com o seu incremento as propriedades mecânicas diminuíram por ocorrer menor interação e ligação entre os cordões. Além disso, observou-se que as propriedades mecânicas aumentaram com o aumento da temperatura de extrusão até aos 220°C e que diminuíram após este valor, originando um maior número de poros a temperaturas mais elevadas. Por último, a menor espessura de camada, 0,15 mm, obteve a maior resistência à tração, rigidez e tensão de cedência, apesar de que a espessura de camada de 0,25 mm apresentou maior tenacidade e ductilidade.

---

Blok, L. G. *et al*

[82]

Neste artigo, os investigadores estudaram e compararam a influência da adição de fibras contínuas e descontínuas de carbono em matriz de base polimérica, neste caso nylon, nas propriedades mecânicas de provetes produzidos pelo processo FDM. Com os resultados obtidos observou-se que a resistência

---

---

à tração e a rigidez dos compósitos reforçados com fibra contínua é muito superior aos reforçados com fibras curtas, 986 MPa/33 MPa e 64 GPa/1,9 GPa, respetivamente. Outro aspeto que se observou foi a limitação e falta de controlo na deposição das fibras contínuas e na formação de vazios em peças com geometrias mais complexas.

---

Justo, J. *et al* estudaram e compararam as propriedades mecânicas obtidas por provetes compósitos de matriz polimérica, neste caso nylon, reforçados com fibras contínuas de carbono ou de vidro produzidos pelo processo FDM com *pre-pregs* com fibras de carbono ou vidro. Os resultados obtidos revelaram que a produção de compósitos por FDM ainda não consegue competir com o autoclave em relação às propriedades mecânicas principalmente devido à menor fração volúmica de fibras e à maior porosidade.

---

Sardinha, M. *et al* Neste estudo, os investigadores estudaram a influência da orientação e fração volúmica de fibras contínuas nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica de nylon com reforço de fibras contínuas de vidro. Através de ensaios de tração verificaram que as propriedades mecânicas melhoram com o incremento da fração volúmica de fibras e que, após dezasseis camadas de fibra seguidas, as propriedades mecânicas não sofreram melhorias significativas. Além disso, de modo a garantir a reprodutibilidade observaram que o número máximo de camadas consecutivas não deve ser superior a doze. Quanto à influência da orientação das fibras, observou-se que orientação a 0° com a carga a aplicar garante melhores propriedades mecânicas do que a 45° e a 90°.

---

## 2.6 Pós-processamento

A maioria das peças produzidas pelo processo FDM necessita de pós-processamento, visto que as peças a produzir podem precisar de suportes ou conter alguns defeitos, como excesso de material, que pode ser facilmente removido. A remoção de suportes é, por norma, o primeiro pós-processamento a aplicar quando estes existem, sendo obrigatório retirá-los. Estes suportes podem ser efetuados com o mesmo material da peça produzida ou com um material solúvel, como é o caso do PVA que possibilita uma melhor qualidade superficial nas zonas de suporte. É importante referir que este pós-processamento não melhora a qualidade da superfície [84, 85].

O efeito escada é, claramente, uma das grandes limitações do processo FDM. Com o propósito de reduzir esse efeito, vários investigadores estudam e otimizam os diversos

e complexos parâmetros que influenciam a qualidade superficial das peças a produzir. Por vezes, são requeridas peças em que a otimização dos parâmetros não é suficiente, necessitando qualidade superficial elevada, toleranciamento geométrico mais apertado ou alguma propriedade mecânica ou térmica em específico. De modo a cumprir os requisitos, poderá ser necessário aplicar pós-processamentos nas peças produzidas, que irão alterar as características das mesmas [86].

Os pós-processamentos podem-se dividir em dois tipos, mecânicos ou químicos. Alguns tratamentos mecânicos são:

- **Lixagem**

Este é um pós-processamento abrasivo que possibilita a redução da rugosidade superficial da peça, como também remove resíduos de suportes, *blobs*, entre outros pequenos defeitos que a peça poderá conter. Geralmente, utilizam-se diferentes *grits* ao longo do processamento, começando com *grits* de 100, 150, conforme a espessura da camada e a existência ou não de defeitos, até *grits* de 2000 ou acima, de forma a obter um melhor acabamento. É um pós-processamento económico, mas está limitado à capacidade do operador por ser um tratamento manual, por isso, não controlado e inconsistente [84, 86].

- **Sandblasting ou Granalhagem**

*Sandblasting* ou granalhagem consiste na projeção de pequenas partículas como, areia, microesferas de vidro, entre outros materiais abrasivos, numa peça de modo a diminuir a rugosidade superficial e diminuir o efeito escada. Com este acabamento superficial obtém-se uma superfície com aspeto mate e suave. Um dos problemas que se observa neste pós-processamento é a mudança de cor da peça [41, 87].

Quanto aos tratamentos químicos estes podem ser, por exemplo:

- **Pintura (primário+tinta)**

Este pós-processamento divide-se em pelo menos duas etapas: aplicação de primário e aplicação de tinta. Antes da aplicação do primário a peça deve ser lixada. Esta aplicação deve ser feita de modo a garantir uma camada fina preservando os detalhes da peça, que irá servir como uma preparação para a pintura. Após o primário, a peça deve ser novamente lixada com o propósito de retirar algumas imperfeições. Por fim, a peça pode ser pintada de modo a obter um acabamento suave e dar a aparência pretendida [41, 84, 85].

- **Dipping em solventes**

*Dipping* consiste na imersão das peças num líquido solvente que irá reagir com a camada exterior da peça produzida, reduzindo a rugosidade superficial. Neste pós-

processamento a peça é submetida a este solvente apenas durante alguns segundos e, de seguida, é deixada a secar até o solvente evaporar totalmente [84, 85].

- **Vapour Smoothing**

*Vapour smoothing* é um pós-processamento utilizado para diminuir a rugosidade superficial e obter um acabamento mais estético, garantindo um aspeto brilhante. Consiste na utilização de vapores que reagem com a camada superficial da peça produzida. Os materiais e solventes mais utilizados são o ABS, com a utilização de acetona como solvente, e PLA com a utilização de clorofórmio ou tetrahydrofurano, entre outros solventes. Uma das dificuldades deste pós-processamento é determinar o tempo de exposição da peça ao solvente pois, importa reduzir a rugosidade sem que provoque danos nesta. Este tratamento além de afetar a rugosidade também poderá afetar as propriedades mecânicas e térmicas das peças produzidas [41, 84-86].

- **Infiltração de epóxido**

A infiltração de epóxido pode alterar as características das peças produzidas, aumentando a sua resistência, diminuindo a porosidade e diminuindo a rugosidade superficial. De modo a efetuar este pós-processamento são necessários dois materiais, o epóxido e um catalisador que irá promover a reação de endurecimento. Este tratamento superficial não é recomendado quando é requerida uma peça com rigor dimensional e arestas “afiadas” [84, 87].

Segundo o *Wholer’s Report* de 2018, os custos de pós-processamento de peças produzidas por manufatura aditiva representam 27% do custo de produção de uma peça. Atualmente, de modo a reduzir esses custos, os investigadores estudam e otimizam os parâmetros que influenciam as técnicas de pós-processamento reduzindo o trabalho manual e tornando-o mais consistente e automatizado [88, 89]. Na Tabela 3 estão sumarizados alguns desses estudos de técnicas de pós-processamento.

Tabela 3 - Sumário de artigos sobre técnicas de pós-processamento

| Referências Bibliográficas            | Sumário  |
|---------------------------------------|--|
| Mazlan, S. N.<br><i>et al</i><br>[90] | Neste artigo foi estudado o tratamento superficial de peças em ABS produzidas pelo processo FDM. Foram efetuados dois pós-processamentos, um com acetona e outro com metil-etil-cetona (MEK), através de <i>cold vapor smoothing</i> . A partir dos resultados obtidos observou-se que a rugosidade das peças diminui até 99%, reduzindo o efeito escada, mas que a resistência mecânica também diminui. Além disso, registou-se que o tempo de exposição não pode ser demasiado elevado visto que pode afetar a precisão dimensional. |

| Referências Bibliográficas       | Sumário   |
|----------------------------------|---|
| Valerga, A. P. <i>et al</i> [91] | <p>Valerga, A. P. <i>et al</i> estudaram o tratamento superficial de peças em PLA produzidas pelo processo FDM. Foram efetuados quatro pós-processamentos, um com clorofórmio (<math>\text{CHCl}_3</math>), outro com diclorometano (<math>\text{CH}_2\text{Cl}_2</math>), um terceiro com tetrahydrofurano (<math>\text{C}_4\text{H}_8\text{O}</math>) e, por último, um com acetato de etilo (<math>\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2</math>), através de um processo de imersão. Os resultados obtidos deste pós-processamento mostraram que a rugosidade diminuiu em todos os processos, sendo que as peças imersas em clorofórmio obtiveram os melhores resultados, 97%, seguindo-se do diclorometano com 94%, o tetrahydrofurano com 80% e 35% no caso do acetato de etilo. Por fim, o clorofórmio também registou as melhores características térmicas e de cristalização.</p>  |
| Kalyan, K. <i>et al</i> [92]     | <p>Neste estudo, os investigadores analisaram a influência de alguns parâmetros de impressão como a orientação de construção e a densidade de <i>infill</i> e de um tratamento superficial químico, <i>hot vapour smoothing</i> com acetona, na qualidade superficial, na dureza e na precisão dimensional de uma peça produzida pelo processo FDM em ABS. Com os resultados obtidos observou-se que o tempo de exposição da peça a este tratamento melhora drasticamente a qualidade superficial da mesma e que, as várias repetições do processo vão “derretendo” as camadas superficiais diminuindo os picos e preenchendo os <i>air gaps</i>, aumentando ligeiramente a dureza. Deste tratamento resulta uma ligeira diminuição dimensional da peça. Por último, os melhores parâmetros encontrados foram uma orientação de construção de <math>0^\circ</math>, densidade de <i>infill</i> alta e frequência de imersão de quatro ciclos de 10 s cada.</p>                        |
| Gajdoš, I. <i>et al</i> [93]     | <p>Gajdoš, I. <i>et al</i> estudaram a influência de dois pós-processamentos em vários provetes, produzidos pelo processo FDM em ABS. Os provetes foram divididos em quatro grupos. O primeiro apenas sofreu um pós-processamento, <i>blasting</i> com esferas de vidro e bicarbonato de sódio, o segundo grupo sofreu primeiramente um pós-processamento químico com aplicação de MEK e, de seguida, <i>blasting</i> com os dois tipos de esferas. Quanto ao terceiro grupo, este foi pintado com uma solução <i>nano-filler</i> NanoSeal 180W e posteriormente foi realizado outro pós-processamento de <i>blasting</i> e, por último, no quarto grupo foi aplicada massa em <i>spray</i> e, de seguida, <i>blasting</i>. Os resultados obtidos revelaram que o <i>blasting</i> é uma solução viável para a redução da rugosidade superficial, apesar de que no terceiro e quarto grupo este tratamento aumentou a rugosidade em comparação com o tratamento anterior, NanoSeal</p> |

| Referências Bibliográficas    | Sumário   |
|-------------------------------|---|
|                               | 180W e massa em <i>spray</i> . Também concluíram que o MEK melhorou a rugosidade superficial dos provetes e que, com a aplicação <i>blasting</i> , se pode diminuir ainda mais essa rugosidade.   |
| Khan, M. <i>et al</i><br>[94] | Neste artigo, foi estudada a influência de parâmetros de impressão como <i>air gap</i> , <i>raster angle</i> e <i>raster width</i> e de parâmetros de pós-processamento químico, <i>vapour smoothing</i> com acetona, como a temperatura, o tempo de secagem e o número de ciclos do tratamento em peças produzidas pelo processo FDM em ABS. Os resultados obtidos mostraram uma redução significativa da rugosidade através do pós-processamento, em que a temperatura, o tempo e o número de ciclos do processo de tratamento superficial têm grande importância na rugosidade final da peça. Quanto à influência dos parâmetros de impressão observou-se que o parâmetro de impressão mais influente foi o <i>air gap</i> . |
| Singh, R., et al<br>[95]      | Este estudo analisou a utilização de um pós-processamento em peças produzidas pelo processo FDM em ABS. Para a realização deste estudo foi utilizada uma estação de <i>vapour smoothing</i> em que se efetuou o tratamento superficial com acetona. Os resultados obtidos mostraram que a qualidade superficial pode ser melhorada com este pós-processamento, reduzindo a rugosidade, sem que afete significativamente a precisão dimensional. Além disso, através de microscopia eletrónica de varrimento (SEM), observou-se um <i>re-flow</i> do material, resultando numa fina camada na superfície que dá o aspeto estético à peça final.  |

**CARACTERIZAÇÃO E  
AMBIENTAÇÃO À EMPRESA**



### 3 Caracterização e ambientação à empresa

A *Lani Robotics* foi constituída em 2019 com o objetivo de se dedicar à concepção, desenvolvimento e produção de equipamentos industriais inovadores. Assim, procurando uma solução para o problema de baixa competitividade da tecnologia, foi elaborada uma pesquisa à oferta existente e um estudo sustentado junto de especialistas. Dessa forma, desenvolveu-se um conceito produtivo capaz de escalar a produção de componentes com recurso à manufatura aditiva, de forma a ser possível a produção de pequenos a médios lotes a preços competitivos.

A equipa da *Lani Robotics*, é constituída por três pessoas e está organizada segundo o organograma da Figura 20.



Figura 20 - Organograma da empresa

A empresa dispõe que vários tipos de tecnologias de manufatura aditiva, como SLA e FDM para polímeros virgens e para compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas. Sendo uma empresa relativamente recente, foi necessário conhecer as capacidades das máquinas e proceder à sua calibração, bem como, foi essencial conhecer os materiais a utilizar e as capacidades máquina-material, através da produção de várias peças, de modo a ter noção da qualidade que se pode oferecer aos clientes, e assim, dar início à produção das peças pedidas. Além disso, foi importante desenvolver técnicas de pós-processamento nos diferentes materiais de maneira a garantir aos clientes um melhor acabamento superficial e menores rugosidades das peças produzidas.

Por último, de forma a assegurar as melhores propriedades mecânicas dos componentes a produzir, foram otimizados parâmetros de impressão para diversos materiais virgens e materiais compósitos.



# MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.2 MÉTODOS

4.3 CALIBRAÇÃO DAS MÁQUINAS (DIFERENTES MATERIAIS, LIVE  
Z TEÓRICO VS REAL)

4.4 LIMITE MÁQUINA-MATERIAL

4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL



## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

Os materiais utilizados para o procedimento experimental deste trabalho foram os filamentos *Prusament PLA*, *Prusament*, *Prusament PETG*, *Prusament ASA*, *Fillamentum ASA Extrafill*, *Prusament PC Blend*, *Fillamentum Flexfill 98A* (TPU), *Kimya PETG Carbon*, *Markforged Onyx* e fibra de carbono contínua *Markforged Carbon*. Nas Tabelas 4-12 estão referidas as principais características destes materiais.

Tabela 4 - Propriedades do filamento Prusament PLA

| <i>Prusament PLA</i>                                |                        |
|---|------------------------|
| Nome químico  | Ácido Polilático       |
| Diâmetro [mm]                                       | 1,75 ± 0,02            |
| Temperatura de extrusão [°C]                        | 210 ± 10               |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]                | 1,24                   |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]             | 50,8 ± 2,4 (ISO 527-1) |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]         | 2,2 ± 0,1 (ISO 527-1)  |
| Alongamento no ponto de cedência <sup>[1]</sup> [%] | 2,9 ± 0,3 (ISO 527-1)  |

Tabela 5 - Propriedades do filamento Prusament PETG

| <i>Prusament PETG</i>                               |                       |
|---|-----------------------|
| Nome químico  | Copoliéster           |
| Diâmetro [mm]                                       | 1,75 ± 0,02           |
| Temperatura de extrusão [°C]                        | 250 ± 10              |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]                | 1,27                  |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]             | 47 ± 1 (ISO 527-1)    |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]         | 1,5 ± 0,1 (ISO 527-1) |
| Alongamento no ponto de cedência <sup>[1]</sup> [%] | 5,1 ± 0,1 (ISO 527-1) |

Tabela 6 - Propriedades do filamento *Prusament ASA*

| <i>Prusament ASA</i>                                |                                 |
|---|---------------------------------|
| Nome químico  | Acrilonitrilo-estireno-acrilato |
| Diâmetro [mm]                                       | 1,75 ± 0,02                     |
| Temperatura de extrusão [°C]                        | 260 ± 5                         |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]                | 1,07                            |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]             | 42 ± 1 (ISO 527-1)              |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]         | 1,6 ± 0,1 (ISO 527-1)           |
| Alongamento no ponto de cedência <sup>[1]</sup> [%] | 3,3 ± 0,1 (ISO 527-1)           |

Tabela 7 - Propriedades do filamento *Fillamentum ASA Extrafill*

| <i>Fillamentum ASA Extrafill</i>                  |                                 |
|---|---------------------------------|
| Nome químico                                      | Acrilonitrilo-estireno-acrilato |
| Diâmetro [mm]                                     | 1,75 ± 0,05                     |
| Temperatura de extrusão [°C]                      | 240 - 255                       |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]              | 1,07                            |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]           | 40 (ASTM D638)                  |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]       | 1,7 (ASTM D638)                 |
| Alongamento no ponto de rotura <sup>[1]</sup> [%] | 35% (ASTM D638)                 |

Tabela 8 - Propriedades do filamento *Prusament PC Blend*

| <i>Prusament PC Blend</i>                           |                         |
|---|-------------------------|
| Nome químico  | Polycarbonato aditivado |
| Diâmetro [mm]                                       | 1,75 ± 0,03             |
| Temperatura de extrusão [°C]                        | 275 ± 10                |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]                | 1,22                    |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]             | 65 ± 2 (ISO 527-1)      |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]         | 1,9 ± 0,1 (ISO 527-1)   |
| Alongamento no ponto de cedência <sup>[1]</sup> [%] | 5,7 ± 0,1 (ISO 527-1)   |

Tabela 9 - Propriedades do filamento *Fillamentum Flexfill 98A*

| <i>Fillamentum Flexfill 98A</i>      |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Nome químico                         | Poliuretano Termoplástico |
| Diâmetro [mm]                        | 1,75 ± 0,10               |
| Temperatura de extrusão [°C]         | 220 - 240                 |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,23                      |
| Tensão de cedência [MPa]             | 53,7 (DIN 53504)          |
| Alongamento no ponto de rotura [%]   | 318 (DIN 53504)           |
| Dureza Shore                         | 98A (ISO 7619-1)          |

Tabela 10 - Propriedades do filamento *Markforged Onyx*

| <i>Markforged Onyx</i>               |  |
|--------------------------------------|--|
| Nome químico                         | Poliamida reforçada com fibras curtas de carbono |
| Temperatura de extrusão [°C]         | 275  |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,2  |
| Tensão de cedência [MPa]             | 36 (ASTM D638)                                   |
| Modulo de elasticidade [GPa]         | 1,4 (ASTM D638)                                  |
| Alongamento no ponto de cedência [%] | 25 (ASTM D638)                                   |

Tabela 11 - Propriedades do filamento *Kimya PETG Carbon*

| <i>Kimya PETG Carbon</i>                            |  |
|---|--|
| Nome químico  | Politereftalato de etileno glicol com adição de fibras curtas de carbono |
| Diâmetro [mm]                                       | 1,75 ± 0,10  |
| Temperatura de extrusão [°C]                        | 225  |
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ]                | 1,317  |
| Tensão de cedência <sup>[1]</sup> [MPa]             | 52,9 (ISO 527-2/5A/50)   |
| Modulo de elasticidade <sup>[1]</sup> [GPa]         | 4,015 (ISO 527-2/5A/50)  |
| Alongamento no ponto de cedência <sup>[1]</sup> [%] | 2,4 (ISO 527-2/5A/50)  |

Tabela 12 - Propriedades da fibra contínua *Markforged Carbon*

| <i>Markforged Carbon</i>             |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| Peso específico [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,4              |
| Tensão de cedência [MPa]             | 800 (ASTM D3039) |
| Modulo de elasticidade [GPa]         | 60 (ASTM D3039)  |
| Alongamento no ponto de rotura [%]   | 1,5 (ASTM D3039) |

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Máquinas FDM

As máquinas FDM utilizadas para a produção de peças teste e provetes foram a *Prusa MK3S* e a *Markforged Mark Two*.

- *Prusa MK3S*

A *Prusa MK3S* (Figura 21) é uma máquina de manufatura aditiva de preço acessível. Esta máquina utiliza o processo FDM e apresenta um volume de construção de 250 x 210 x 200 [mm], um peso de 6,35 kg e uma plataforma aquecida e removível. Quanto

aos filamentos disponíveis para esta máquina, estes não estão limitados pelo fabricante desta, sendo possível a utilização de vários tipos de materiais provenientes de diversos fabricantes. A temperatura máxima de extrusão é de 300°C e a da plataforma aquecida poderá ir até aos 120°C. Quanto ao *slicer software* utilizado, esta máquina não está limitada a nenhum em específico, podendo-se utilizar, por exemplo, o *Prusa Slicer*, o *Ultimaker Cura* ou o *Simplify3D*, que fornecem um elevado grau de liberdade de alterações dos parâmetros de impressão.

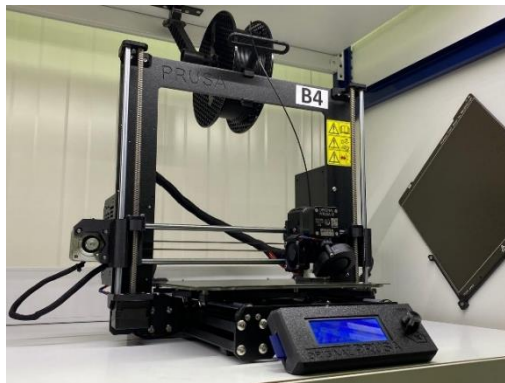


Figura 21 - Máquina Prusa MK3S

- *Markforged Mark Two*

A *Markforged Mark Two* (Figura 22) é uma máquina de impressão 3D que utiliza o processo FDM, com a particularidade de possuir uma cabeça co-extrusora, capaz de imprimir peças de materiais compósitos de base polimérica reforçados com fibras contínuas. Esta máquina apresenta um volume de construção de 320 x 132 x 154 [mm], um peso de 16 kg e uma plataforma de acoplamento cinemático. Os materiais disponíveis são o Nylon, o *Onyx* e as fibras contínuas de carbono, vidro, vidro HSHT e *Kevlar* da *Markforged*. Ao contrário da *Prusa MK3S*, esta utiliza um *slicer software* disponibilizado pelo fabricante, o *Eiger Cloud*, que não fornece o mesmo grau de liberdade de alteração dos parâmetros de impressão, não permitindo, por exemplo, escolher a temperatura de extrusão e a velocidade de impressão, entre outros parâmetros.

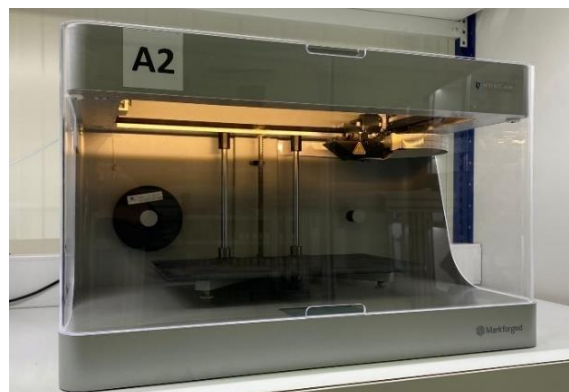


Figura 22 - Máquina Markforged Mark Two

#### 4.2.2 Máquinas e ferramentas para pós-processamento

Para a utilização das técnicas de pós-processamento *sandblasting* e *vapour smoothing* foram utilizadas as seguintes máquinas:

- Máquina *Vapour Smoothing*

Para o pós-processamento *vapour smoothing*, adaptou-se o aparelho de limpeza de ultrassons, *GT SONIC-P2*, que garante uma potência de 100 W, uma gama de temperaturas desde 20°C aos 80°C e um volume de dois litros.

- Máquina *Sandblasting*

A máquina *Zion Air SB22A* foi utilizada para o pós-processamento de *sandblasting*. Este equipamento permite trabalhar com pressões de 4 a 8 bar, com consumos de ar comprimido de 420 a 710 l/min.

Para o pós-processamento foram utilizados vários materiais e ferramentas, consoante a técnica praticada, sendo que, nos manuais os materiais/ferramentas foram os seguintes:

- Ferramentas de corte com lâmina e pistola de ar quente de modo a retirar pequenos defeitos como *blobs* e *stringing*;
- Lixas de diferentes *grits*, de 220, 440, 800, 1200 e 2000, para o pós-processamento de lixagem;

Na técnica de pós-processamento *dipping* e *vapour smoothing* foram utilizados os seguintes materiais:

- Reagentes líquidos como acetona, metil-etil-cetona (MEK) e diclorometano (Anexo C);
- Placas de aquecimento, gobelets em vidro e alumínio e um termómetro.

Por último, para o *sandblasting* foram utilizadas microesferas de vidro como material abrasivo.

#### 4.2.3 Equipamento de ensaios mecânicos e de análise superficial e dimensional

De modo a estudar as propriedades mecânicas, a rugosidade, a precisão geométrica e analisar as superfícies de peças produzidas, foram utilizados os seguintes aparelhos:

- Máquina de ensaios mecânicos

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada a máquina *Shimadzu AG-100 kN*. Esta máquina permite efetuar ensaios à flexão, tração e compressão de materiais compósitos, metálicos e plásticos, permitindo uma carga de até 100 kN. Para estes ensaios foi utilizado um extensómetro mecânico.

- Paquímetro Digital

Foi utilizado o paquímetro digital *Mitutoyo Digital ABS AOS* para analisar o rigor dimensional das peças e provetes produzidos, com uma resolução de 0,02 mm.

- Rugosímetro

Com o objetivo de estudar a rugosidade das diversas superfícies das peças e provetes produzidos foi utilizado o rugosímetro *Mahr Perthometer M1*. Este rugosímetro tem o propósito de determinar e documentar os parâmetros mais comuns de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  e  $R_{Pc}$ ). Para a obtenção da topografia de algumas peças foi utilizado o rugosímetro *Hommelwerke LV-50*.

- Microscopia 3D

Para a análise topográfica das superfícies dos cubos que sofreram pós-processamento *dipping* ou *vapour smoothing*, foi utilizado o microscópio 3D *NPFLEX* da *Bruker*. Este equipamento permite analisar a topografia de amostras sem as danificar, fornecendo medições 3D através da tecnologia WLI.

### 4.3 Calibração das máquinas (diferentes materiais, live z teórico vs real)

Uma boa calibração da plataforma de construção é muito importante para o sucesso da produção da peça desejada, pois a aderência do material depositado na plataforma depende desse nivelamento.

A calibração das plataformas das Prusa MK3S, foi efetuada em dois modos, primeiramente utilizando a funcionalidade “*First Layer Calibration*” e, em segundo lugar, utilizando a funcionalidade “*Bed Level Correction*”.

#### 4.3.1 Calibração “*First Layer Calibration*” (Calibração teórica)

Esta funcionalidade fornece algumas opções que influenciam a qualidade e aderência da primeira camada como a temperatura de extrusão, a temperatura da plataforma de construção, a velocidade de impressão, o *flow* e o “*Live adjust Z*”. Esta última opção permite ajustar a distância entre a plataforma e o *nozzle* em tempo real. O tempo de impressão da camada desta funcionalidade é de apenas 1 minuto e 45 segundos, aproximadamente.

Inicialmente, para uma calibração mais grosseira foi efetuada a calibração através da funcionalidade “*First Layer Calibration*”, considerando-se como uma calibração teórica. Para esta calibração mantiveram-se os parâmetros pré-definidos pela máquina dependendo do material utilizado e, apenas se ajustou a distância entre o *nozzle* e a plataforma de construção. Considera-se que esta calibração foi bem efetuada quando o material depositado apresenta boa aderência e o aspeto da Figura 23 b).

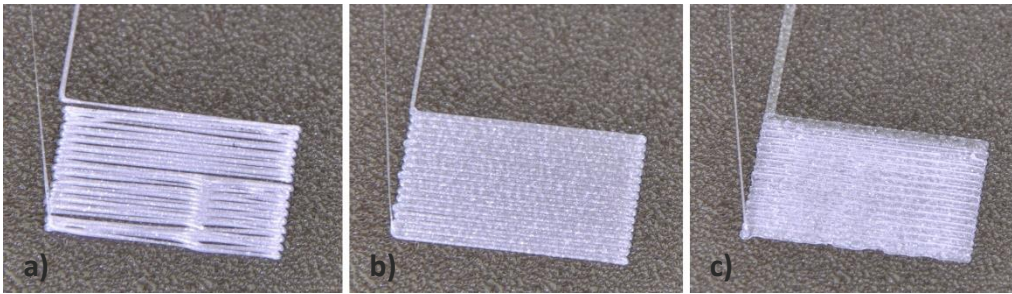


Figura 23 - a) Má calibração com o *nozzle* demasiado elevado b) Boa calibração com distância ideal entre *nozzle* e plataforma c) Má calibração com o *nozzle* demasiado baixo [96]

Durante a calibração das máquinas constatou-se que para cada tipo de plataforma utilizada, no caso deste projeto uma lisa e uma rugosa, a distância entre o *nozzle* e a plataforma altera de modo significativo. Além disso, a altura ideal do *nozzle* também varia consoante o material utilizado. Esta calibração foi efetuada em todas as Prusa MK3S para os filamentos *Prusament PLA*, *Prusament PETG*, *Prusament PC Blend*, *Fillamentum ASA* e *Fillamentum TPU* e para o tipo de plataforma de construção recomendada para cada material. Na Figura 24 pode-se observar uma das calibrações de uma máquina para PETG.



Figura 24 - Calibração "*First Layer Calibration*" com o filamento *Prusament PETG*

#### 4.3.2 Calibração "*Bed Level Correction*" (Calibração experimental)

Após a calibração através da funcionalidade "*First Layer Calibration*", que serviu para obter um valor de referência da distância entre o *nozzle* e a plataforma de construção, foi efetuada uma nova calibração com auxílio da funcionalidade "*Bed Level Correction*". Esta funcionalidade tem como função compensar as "ligeiras imperfeições" da primeira camada dando a possibilidade de elevar ou baixar a plataforma à esquerda, à direita, à frente e atrás.

Primeiramente, foi necessário efetuar o *download* de um ficheiro STL, disponibilizado pela *Prusa*, com a altura de uma camada com o formato que se pode observar na Figura 25. De seguida, foi efetuado o *slice* no *licer software PrusaSlicer*, utilizando os valores pré-definidos para o material a utilizar com uma altura de camada de 0,20 mm e foi gerado o *G-Code* para a impressão do ficheiro.

O material utilizado para a calibração da primeira máquina foi o *Prusament PETG* na plataforma de construção rugosa. Na Figura 24 está representada a impressão finalizada da camada, onde se pode observar a qualidade desta, notando-se a inexistência de vazios, porém algumas zonas mais salientes que podem indicar *over-extrusion* ou o *nozzle* demasiado baixo.

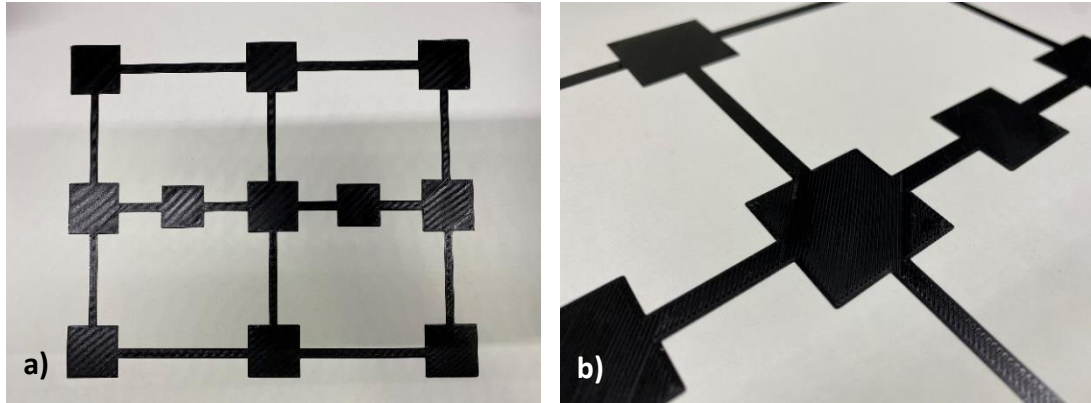


Figura 25 - a) Camada da primeira tentativa de calibração. b) Detalhe das saliências na camada.

De forma a melhorar a qualidade da camada optou-se por diminuir o *extrusion multiplier* de 1 para 0,98. Na Figura 26, pode-se verificar que não ocorreu *over-extrusion*, mas antes, *under-extrusion* em quase toda a camada, evidenciando-se de forma mais acentuada no lado esquerdo, significando que a plataforma de construção não estava bem nivelada.

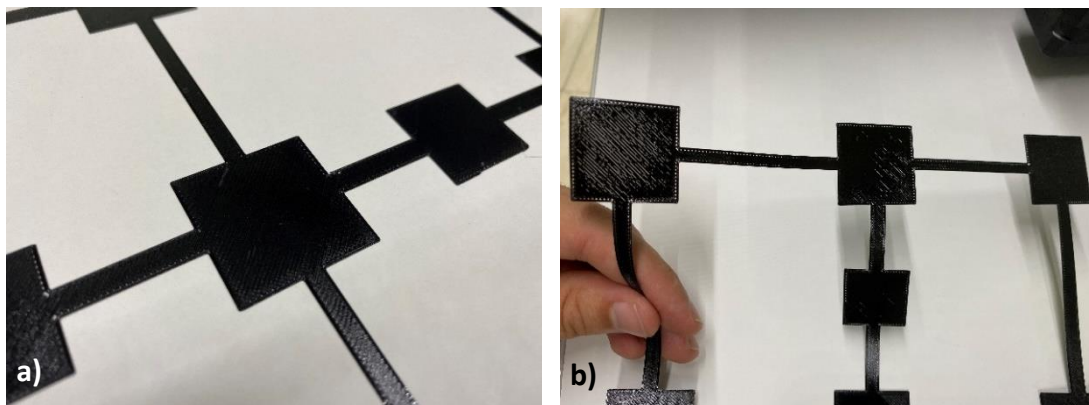


Figura 26 - a) Detalhe do centro da camada. b) Detalhe da camada com *under-extrusion* acentuado no lado esquerdo da plataforma.

Foram realizadas mais tentativas até que a qualidade da camada fosse a ideal, garantindo uma boa calibração da máquina, alterando-se os valores do “*Live Adjust Z*” e “*Bed Level Calibration*”. Na Figura 27 pode-se visualizar a qualidade final da camada, apresentando uma camada uniforme, sem vazios e sem saliências, com um aspeto brilhante e rugoso na face em contacto com a plataforma (rugosidade associada a este tipo de material).

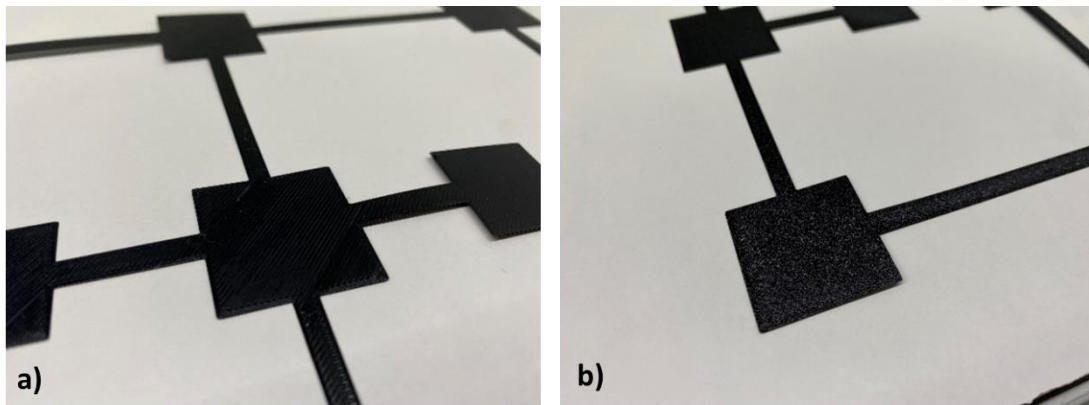


Figura 27 - a) Camada com boa calibração. b) Camada com boa calibração no lado em contacto com a plataforma de construção

#### 4.4 Limite conjunto máquina-material

Com o propósito de analisar os limites de impressão da máquina e dos materiais a utilizar, foram produzidas várias peças teste, utilizando os parâmetros pré-definidos pelo *PrusaSlicer*. Produziram-se *bridges* com diversos tamanhos, desde 1 mm até aos 70 mm, *overhangs* dos 35° até aos 70°, concavidades com diâmetros desde 1 mm até aos 17 mm e convexidades através de cubos recortados.

Os materiais testados foram o *Prusament PLA*, *Prusament PETG*, *Prusament ASA*, *Fillamentum ASA*, *Prusament PC Blend* e *Fillamentum Flexfill 98A* (TPU) com espessuras de camada de 0,30 mm, 0,20 mm, 0,15 mm e 0,10 mm.

O estudo destas peças teste tem um grau de importância elevado, não só para garantir qualidade máxima ao cliente, mas também para perceber a partir de que ponto é necessário a utilização de suportes, conseguindo uma melhor gestão de materiais e de tempo de produção.

##### 4.4.1 Bridges

Tal como referido anteriormente, foram produzidas *bridges* com tamanhos desde 1mm até 70 mm. Após a produção destas peças, estas foram analisadas e categorizadas a nível de qualidade: excelente quando não apresenta qualquer falha na *bridge*; boa quando apresenta curvatura ligeira ou outro defeito não considerável; razoável quando ocorre uma curvatura mais acentuada, mas sem comprometer claramente a qualidade da *bridge*, ou outro defeito menor; e má (quando a curvatura é demasiado acentuada ou não consegue realizar a *bridge*). Nas Tabelas A 1-6, presentes no Anexo D, pode-se observar essa análise.

É importante referir que a ocorrência de *stringing* de forma mais acentuada deu-se, principalmente, nas peças com espessura de camada de 0,15 mm e 0,10 mm, possivelmente tendo como influência a humidade absorvida pelo filamento, visto que foram as últimas peças a serem produzidas.

Nas *bridges* com espessura de camada de 0,10 mm ocorreu um defeito inesperado, a largura de alguns cordões foi inconstante, podendo estar relacionado com a diminuição do *flow rate* no sentido direto da diminuição da espessura de camada. Por último, foi observado que o filamento *Fillamentum Flexfill TPU 98A*, não é capaz de realizar *bridges* com boa qualidade. Na Figura 28 está representado um exemplo de uma peça com *bridges* desde 1mm até 10 mm.

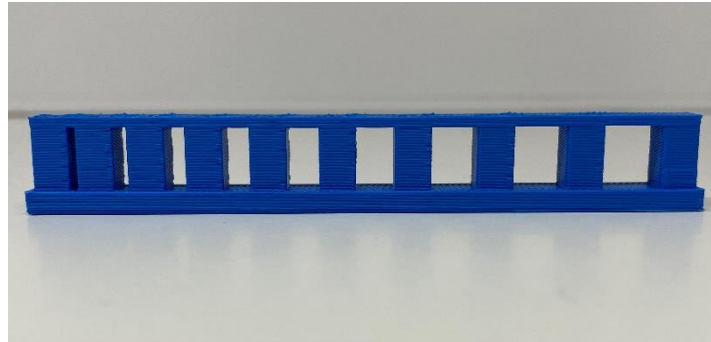


Figura 28 - Exemplo de *bridge* de 1mm a 10 mm

#### 4.4.2 *Overhangs*

Para além das *bridges*, foram produzidos *overhangs* com o mesmo objetivo, ou seja, garantir a melhor qualidade ao cliente e conseguir uma melhor gestão de recursos. Nas Tabelas A 7 a 12 do Anexo D estão referidos os intervalos de valores em que é possível, ou não, realizar com qualidade o *overhang* para cada espessura de camada definida. Na Figura 29 pode-se observar um exemplo de uma peça teste de *overhang*.

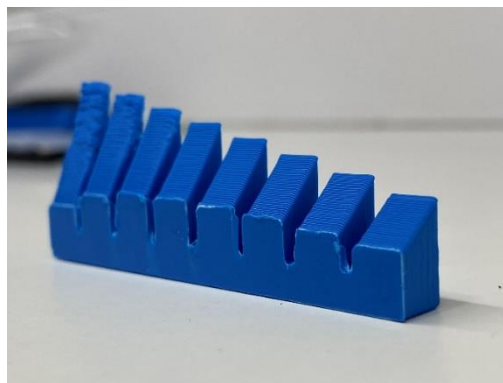


Figura 29 - Exemplo de *overhang*

#### 4.4.3 *Concavidades*

Com o estudo das *concavidades*, verificou-se que espessura de camada tem uma grande influência na ovalização, sendo que para uma maior espessura de camada menor é o detalhe e maior é a ovalização que se observa, principalmente, em diâmetros menores. Na Figura 30 está representado um exemplo de uma peça teste de *concavidades*.

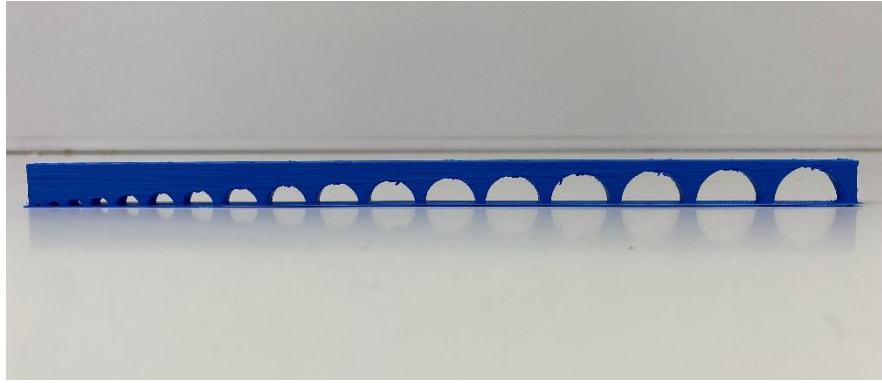


Figura 30 - Exemplo de peça de concavidades

Nas Tabelas A 13-17 do Anexo D estão referidos os valores das concavidades em que ocorreu ovalização em demasia e em que intervalos foi, ou não, capaz de efetuar a concavidade com qualidade para cada espessura de camada definida. Para além disso, é possível perceber que o filamento *Fillamentum Flexfill TPU 98A* não é capaz de realizar este tipo de concavidades em nenhum comprimento de arco das peças produzidas, apresentando demasiada curvatura das pontes e cordões soltos. Além disso, nas peças produzidas com espessuras de camada de 0,2 mm, 0,15 mm e 0,10 mm ocorre *stringing* acentuado.

#### 4.4.4 Convexidades

Quanto aos cubos recortados, constatou-se que quanto menor a espessura de camada, melhores resultados se obtêm em relação às convexidades. Além disso, observa-se um maior detalhe nas concavidades, notando-se um menor efeito de escada. Nas Tabelas A 18-22 do Anexo D pode-se observar para quais as espessuras de camada que foram, ou não, capazes de efetuar as concavidades da circunferência, as concavidades interiores e as convexidades das circunferências com qualidade. Na Figura 31 está representado um exemplo de um cubo recortado.

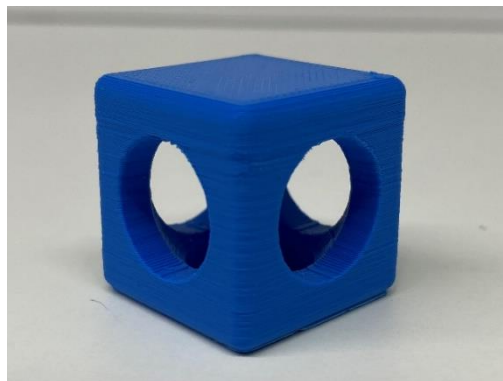


Figura 31 - Exemplo de cubo recortado

#### 4.5 Procedimento Experimental

Com o propósito de cumprir os objetivos estipulados inicialmente, foram efetuados os testes representados no organograma da Figura 32. De modo a cumprir o primeiro objetivo, foram produzidas e analisadas capas de telemóvel, *fork grippers* e provetes de tração em ASA e PC. Para o segundo objetivo, procedeu-se à produção de cubos de rugosidades que permitiram o estudo de várias técnicas de pós-processamento, como lixagem, *sandblasting*, *dipping* e *vapour smoothing*. Por último, seguiu-se a produção de provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas e contínuas de carbono e a análise dos ensaios de tração realizados.

A produção das peças de cada teste deu-se em ambiente controlado, garantindo-se uma temperatura ambiente de, aproximadamente, 20°C e utilizando, diariamente, um desumidificador, de modo a minimizar fatores que pudessem ter influência nas propriedades das peças estudadas.

É importante realçar que a ordem pela qual foram efetuados estes testes não teve um carácter científico, seguindo apenas as necessidades da empresa.

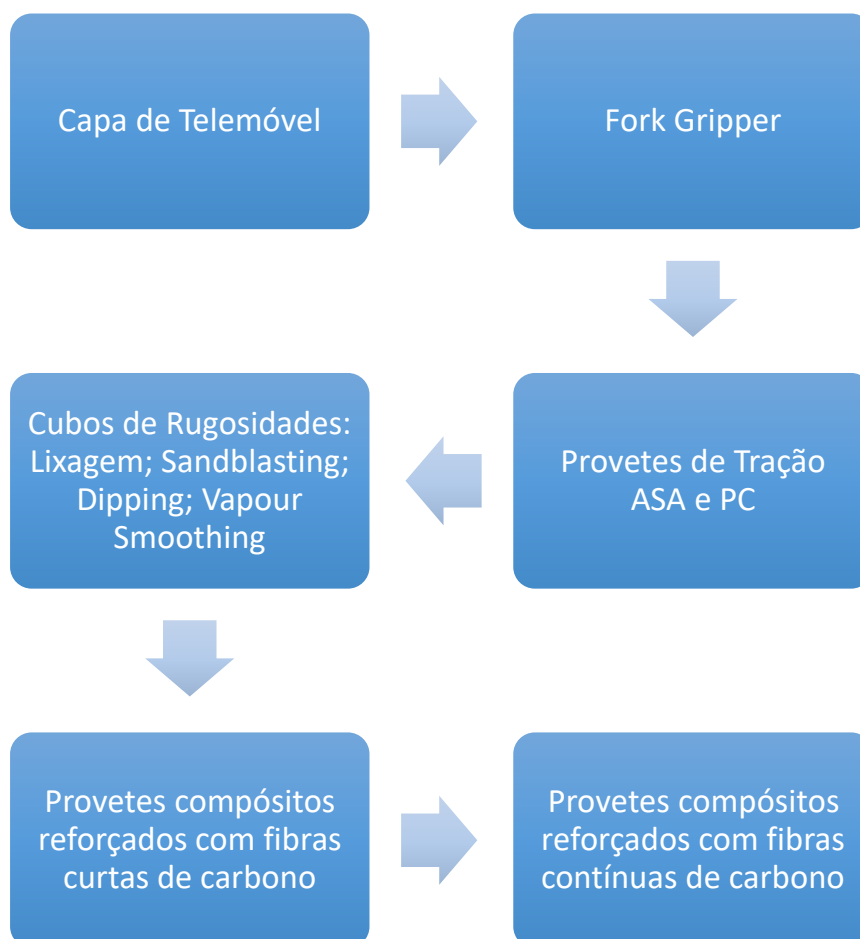


Figura 32 - Organograma dos testes realizados

#### 4.5.1 Capa de telemóvel

Como já foi referido anteriormente, o seguimento dos testes efetuados ao longo deste trabalho, esteve diretamente ligado à necessidade resultados úteis para a empresa. Sendo as capas de telemóvel um objeto requerido por alguns clientes, a produção destas foi estudada. O objetivo deste estudo passa pela otimização do tempo de produção *versus* o aspeto visual de três capas de telemóvel (Figura 33) em TPU, utilizando o filamento *Fillamentum Flexfill TPU 98A*. Cada capa de telemóvel apresenta parâmetros de impressão diferentes, que variam consoante o tempo de impressão desejado.

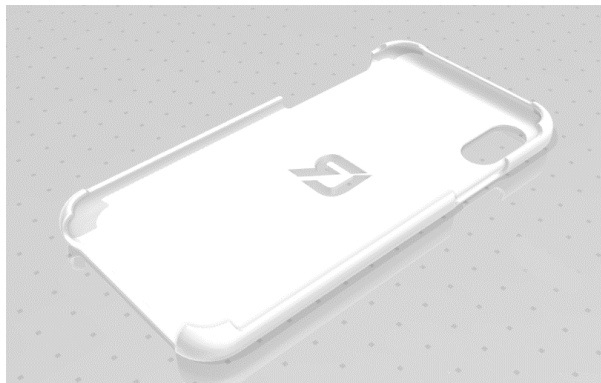


Figura 33 - Modelo 3D da capa de telemóvel

- Teste 1

Para a capa de telemóvel Teste 1, foram selecionados os parâmetros *standard* de impressão para o filamento em causa, bem como uma espessura de camada de 0,15 mm (valor com melhores resultados, para este material, em overhangs e com bom detalhe). Os valores dos parâmetros de velocidade de impressão para esta peça estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Velocidades de impressão da capa de telemóvel Teste 1

| Velocidades de impressão |         |
|--------------------------|---------|
| Perímetros               | 30 mm/s |
| Pequenos perímetros      | 20 mm/s |
| Perímetros externos      | 20 mm/s |
| <i>Infill</i>            | 30 mm/s |
| <i>Solid infill</i>      | 25 mm/s |
| <i>Top solid infill</i>  | 20 mm/s |
| <i>Gap fill</i>          | 25 mm/s |
| Primeira camada          | 20 mm/s |

- Teste 2

Quanto à capa de telemóvel Teste 2 foram selecionados parâmetros que diminuem o tempo de impressão, neste caso diminuindo a densidade de *infill*, utilizando o *infill pattern Grid* e aumentando a velocidade de impressão. De modo a aumentar a velocidade de impressão para os valores desejados, foi necessário aumentar o valor “*Max volumetric speed*” de 1,35 mm<sup>3</sup>/s para 2 mm<sup>3</sup>/s, aumentando a quantidade de material depositado por unidade de tempo.

Os valores dos parâmetros de velocidade de impressão para esta peça estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Velocidades de impressão da capa de telemóvel Teste 2

| Velocidades de impressão |         |
|--------------------------|---------|
| Perímetros               | 40 mm/s |
| Pequenos perímetros      | 25 mm/s |
| Perímetros externos      | 30 mm/s |
| <i>Infill</i>            | 40 mm/s |
| <i>Solid infill</i>      | 40 mm/s |
| <i>Top solid infill</i>  | 35 mm/s |
| <i>Gap fill</i>          | 30 mm/s |
| Primeira camada          | 30 mm/s |

- Teste 3

Por fim, a peça Teste 3 foi produzida com parâmetros que aumentam o tempo de produção e que tendem a melhorar a qualidade da peça, aumentando a densidade de *infill*, utilizando o *infill pattern* triangular e diminuindo a velocidade de impressão. Os valores dos parâmetros de velocidade de impressão para esta peça estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Velocidades de impressão da capa de telemóvel Teste 3

| Velocidades de impressão |         |
|--------------------------|---------|
| Perímetros               | 20 mm/s |
| Pequenos perímetros      | 10 mm/s |
| Perímetros externos      | 10 mm/s |
| <i>Infill</i>            | 25 mm/s |
| <i>Solid infill</i>      | 20 mm/s |
| <i>Top solid infill</i>  | 15 mm/s |
| <i>Gap fill</i>          | 15 mm/s |
| Primeira camada          | 15 mm/s |

#### 4.5.2 Fork Gripper

Wankhede, V. et al [56] estudou o efeito dos parâmetros densidade de *infill*, espessura de camada e *infill pattern* na rugosidade superficial em peças em ABS. Esse estudo demonstrou que a espessura de camada tem maior influência no tempo de construção e na rugosidade superficial. Tendo por base este artigo e o propósito de estudar a influência dos parâmetros espessura de camada e densidade de *infill* na rugosidade e no toleranciamento geométrico, foram produzidas várias peças teste, representadas na Figura 34, com o filamento *Prusament ASA* e *Prusament PC Blend* numa *Prusa MK3S*. Na Tabela A 24 do Anexo E, pode-se observar que foram realizados nove testes, três peças por teste, variando estes dois parâmetros. As três peças de cada teste foram produzidas em simultâneo, na mesma máquina, de modo a garantir as mesmas condições para cada teste realizado.

De modo analisar a influência destes parâmetros, foi usado o método Taguchi e realizado uma análise da variância (ANOVA).

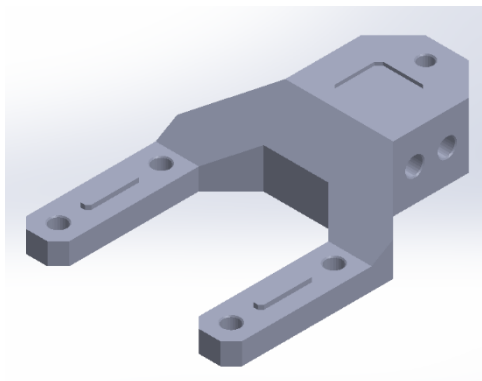


Figura 34 - CAD do Fork Gripper

#### 4.5.3 Provetes de Tração ASA e PC

De modo a estudar a influência dos parâmetros espessura da camada, *raster angle* e temperatura de extrusão na resistência mecânica, foram produzidos provetes de tração, com a superfície de maior área em XY, numa *Prusa MK3S*, seguindo a norma ASTM D638 (Figura 35). Na Tabela A 25 do Anexo F, estão representados os parâmetros de impressão para um total de dezoito testes, em que se variaram as espessuras de camada, as temperaturas de extrusão e os *raster angle*, para os dois materiais.

Os filamentos utilizados foram o *Prusament ASA* e o *Prusament PC Blend*, visto serem dos materiais com mais procura para peças que necessitem de resistência mecânica. Após a produção dos provetes, estes foram ensaiados segundo a norma ASTM D638, em que a velocidade do ensaio estipulada foi de 5 mm/s e a distância entre amarras de 115 mm. Na Figura 33 pode-se observar as dimensões dos provetes produzidos.

Tal como nos *fork grippers*, para entender a influência dos parâmetros, foi usado o método Taguchi e realizada uma análise da variância (ANOVA).

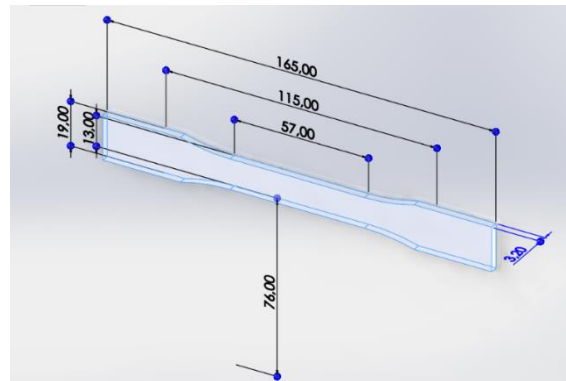


Figura 35 - Dimensões dos provetes segundo a norma ASTM D638

#### 4.5.4 Cubos de Rugosidades

Para o estudo da rugosidade em diferentes planos foram produzidos vários cubos com dimensões de 30 x 30 x 30 [mm], em PLA, ASA, PETG numa *Prusa MK3S*, e em *Onyx* numa *Markforged Mark Two*. Na Tabela 16 estão apresentados os testes efetuados utilizando estes cubos, variando o tipo de pós-processamento e a espessura de camada. Por último, foram produzidos três cubos com a opção “*Ironing*”. As técnicas de pós-processamento realizadas foram: lixagem com *grits* de 220, 440, 800, 1200 e 2000; *sandblasting* em que se utilizou microesferas de vidro como agente abrasivo; *dipping* em metil-etil-cetona (MEK), acetona e diclorometano (DCM) para os cubos em PLA, ASA e PETG. Para estes testes foi escolhida uma espessura de camada de 0,20 mm, visto ser considerada uma espessura de camada de qualidade standard.

Tabela 16 - Parâmetros de impressão de cubos de rugosidade e técnicas pós-processamento a aplicar nos materiais PLA, ASA e PETG

| Espessura de Camada | Lixa Manual                        | <i>Sandblasting</i> | <i>Dipping</i> |
|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------------|
| 0,30 mm             | -                                  | -                   | -              |
| 0,20 mm             | -                                  | -                   | -              |
| 0,10 mm             | -                                  | -                   | -              |
| 0,20 mm             | Grit 220 + 440                     | -                   | -              |
| 0,20 mm             | Grit 220 + 440 + 800               | -                   | -              |
| 0,20 mm             | Grit 220 + 440 + 800 + 1200        | -                   | -              |
| 0,20 mm             | Grit 220 + 440 + 800 + 1200 + 2000 | -                   | -              |
| 0,20 mm             | -                                  | Sim                 | -              |
| 0,20 mm             | -                                  | -                   | MEK            |
| 0,20 mm             | -                                  | -                   | Acetona        |
| 0,20 mm             | -                                  | -                   | DCM            |

#### 4.5.4.1 Sandblasting

Uma das técnicas de pós-processamento utilizadas foi o *sandblasting*, em que se utilizaram microesferas de vidro como agente abrasivo. Gajdoš, I. *et al* [93], obteve uma redução da rugosidade  $R_a$ , em peças em ABS, de 7,89%, recorrendo a esta técnica. Visto que o aparelho de *sandblasting* disponível não tinha a capacidade para atingir a pressão utilizada nesse estudo, não foi possível a utilização dos mesmos parâmetros. Assim sendo, aplicou-se uma pressão de 5 bar e efetuou-se um número de passagens que garantisse algum efeito em relação ao aspeto visual e que não provocasse danos nas superfícies. Na Tabela 17 estão representados os parâmetros utilizados para cada material.

Tabela 17 - Parâmetros do pós-processamento sandblasting para o PLA, ASA e PETG

| Nome do Teste | Agente Abrasivo       | Pressão | Nº Passagens | Distância da peça |
|---------------|-----------------------|---------|--------------|-------------------|
| PLA_SB        | Microesferas de vidro | 5 bar   | 30           | 10 cm             |
| ASA_SB        | Microesferas de vidro | 5 bar   | 15           | 10 cm             |
| PETG_SB       | Microesferas de vidro | 5 bar   | 30           | 10 cm             |

#### 4.5.4.2 Dipping

Valerga *et al* [91], estudou a reação de vários reagentes como diclorometano em peças em PLA, durante períodos de 30 e 60 segundos, conseguindo uma redução da rugosidade ( $R_a$ ) de 97%. Galantucci, L.M. *et al* [97] analisou a rugosidade em peças em ABS após *dipping* em acetona com uma concentração de 90% durante 300 segundos, conseguindo uma notória diminuição da rugosidade. Mazlan, S. N. *et al* [90] averiguou a reação entre o material ABS e o reagente MEK, através da técnica *cold vapour smoothing*, obtendo uma redução da rugosidade de, aproximadamente, 99%. Posto isto, tendo como base estes estudos, estipularam-se os parâmetros e os reagentes apresentados nas Tabelas A 26-28 do Anexo G. Quanto ao pós-processamento dos cubos de *Onyx*, os seus parâmetros e resultados encontram-se na Tabela A 29 no Anexo H.

Para esta técnica de pós-processamento foram realizados nove testes, com três amostras cada. Estabeleceu-se que para os ensaios em que foram efetuados vários ciclos as peças seriam curadas numa máquina de cura com temperatura regulável e radiação UV e, que para os ensaio de só um ciclo estes curaram à temperatura ambiente. Na Figura 36 pode-se observar o procedimento experimental desta técnica.



Figura 36 – 1. Aquecer o parafuso com uma pistola de ar quente; 2. Inserir o parafuso na parte inferior do cubo; 3. Regular a temperatura do reagente; 4. Mergulhar o cubo no reagente; 5. Deixar o cubo secar; 6. Colocar o cubo na máquina de cura com a temperatura e o tempo estipulados.

#### 4.5.5 Vapour

#### Smoothing

Para este estudo foi concebida uma peça com diferentes ângulos nas laterais e rasgos de várias dimensões na superfície superior, como se pode observar na Figura 37, com o propósito de estudar a influência dos parâmetros do pós-processamento na rugosidade em vários ângulos e no rigor dimensional.

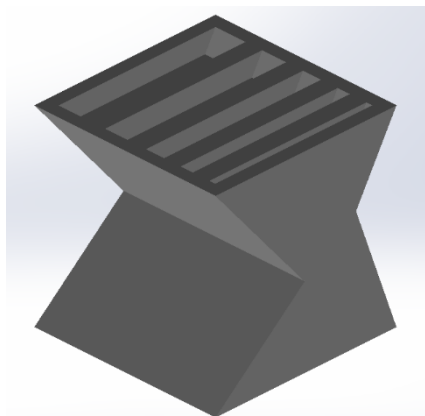


Figura 37 - CAD do cubo vapour smoothing

Sendo que a empresa não possuía uma máquina de *vapour smoothing*, utilizou-se uma máquina de limpeza de ultrassons, que desempenhou um papel semelhante, devido à sua resistência aos reagentes químicos utilizados e o facto de ser possível regular a temperatura. Os materiais utilizados foram os filamentos PLA, ASA e PETG e os reagentes MEK, acetona e diclorometano. Na Figura 38 está descrito o procedimento deste pós-processamento.



Figura 38 – 1. Colocar a quantidade estipulada de reagente na máquina; 2. Ajustar a temperatura do ensaio; 3. Colocar um termómetro para garantir a temperatura definida; 4. Fechar a tampa de modo ao reagente aquecer e criar vapor; 5. Abrir a tampa e colocar a peça; 6. Fechar a tampa e esperar o tempo estipulado do ensaio; 7. Retirar a conjunto, cesto, base, termómetro e cubo de modo a não tocar neste último; 8. Deixar secar e colocar, posteriormente, o cubo na máquina de cura com a temperatura e o tempo definidos.

Singh, R., et al [95] estudou a técnica *vapour smoothing* através de ensaios de peças em ABS, utilizando acetona como reagente, variando o tempo do ensaio entre 10, 15 e 20 segundos, obtendo uma redução da rugosidade superficial de até, aproximadamente, 99%. Quanto a Jin, Y., et al [98] este investigou a influência desta técnica, utilizando diclorometano como reagente em peças de PLA. Segundo este estudo, o melhor acabamento superficial foi obtido com um tempo de ensaio de 30 segundos. Tendo por base estes artigos, começou-se por aplicar os parâmetros definidos nesses estudos. Os resultados obtidos não foram os esperados, visto que os cubos não apresentaram um *reflow* do material suficiente para garantir um melhor acabamento superficial. Assim sendo, foram estipulados intervalos de tempo de ensaios maiores, de modo a obter um melhor acabamento superficial. Os parâmetros utilizados encontram-se nas Tabelas A 30-32 do Anexo I.

#### 4.5.6 *Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono*

Com o propósito de estudar a influência dos parâmetros orientação de construção e espessura de camada nas propriedades mecânicas, foram produzidos provetes em *Onyx* e *PETG Carbon*, de forma a realizar ensaios de tração seguindo a norma ASTM D638. Para estes ensaios, estipulou-se uma velocidade de ensaio de 5 mm/s e distância entre amarras de 115 mm. Na Figura 39, pode-se observar as duas orientações de construção dos provetes. Os parâmetros de impressão estão descritos na Tabela A 33 do Anexo J.

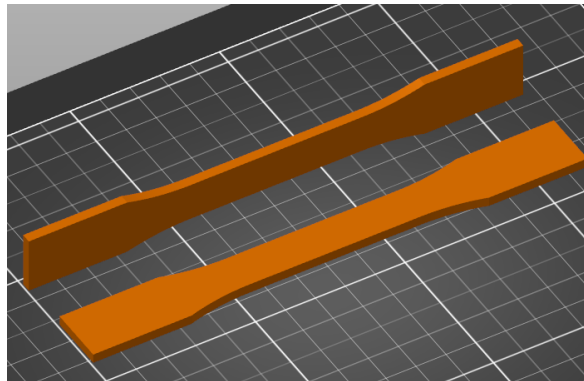


Figura 39 – Orientação vertical e horizontal dos provetes *Onyx* e *PETG Carbon*

#### 4.5.7 *Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono*

Dickson, A.N., et al [99] estudou o efeito da adição de fibras contínuas de carbono em provetes de matriz polimérica, neste caso nylon. Nesse estudo, foram produzidos provetes com 8 camadas de fibra, com um tipo de reforço concêntrico com 6 perímetros, resultando numa tensão máxima de 216 MPa. De modo a estudar a

influência do número de camadas de fibras contínuas, o número de perímetros nos diferentes tipos de reforço (concêntrico e isotrópico) e o *raster angle*, foram produzidos provetes em *Onyx* com a adição de fibras contínuas de carbono. Para este estudo, a norma ASTM D3039 foi utilizada para a produção dos mesmos e posteriores ensaios de tração. As dimensões definidas estão representadas na Figura 40 e a velocidade do ensaio foi de 2 mm/s. Na Tabela 39 do Anexo K, estão definidos os parâmetros utilizados.

Visto que a quebra dos provetes de ensaio estava a ocorrer na zona das amarras, ou logo a seguir a estas, foram colocados *tabs* de modo a reduzir a tensões localizadas e evitar que a quebra ocorresse nestas regiões.

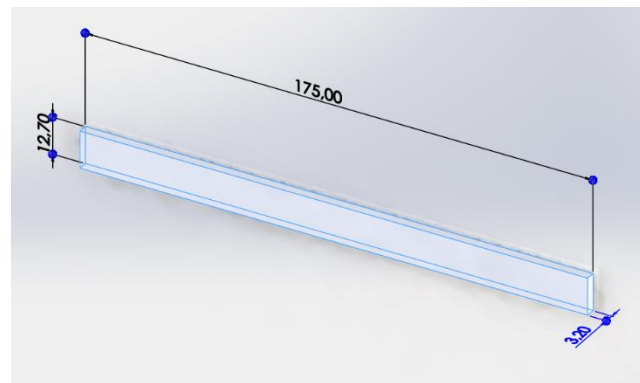


Figura 40 - Dimensões dos provetes de tração reforçados com fibras contínuas de carbono, segundo a norma ASTM D3039



# RESULTADOS

5.1 CAPA DE TELEMÓVEL

5.2 FORK GRIPPERS

5.3 PROVETES DE TRAÇÃO ASA E PC

5.4 CUBOS DE RUGOSIDADES

5.5 VAPOUR SMOOTHING

5.6 PROVETES COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
REFORÇADOS COM FIBRAS CURTAS DE CARBONO

5.7 PROVETES COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CARBONO



## 5 Resultados

### 5.1 Capa de Telemóvel

Através dos três testes realizados foi possível observar a influência da velocidade de impressão no aspeto visual e no tempo de impressão. É importante referir que, devido à baixa espessura da capa de telemóvel, a densidade de *infill* foi de 100%, assim sendo, a densidade de *infill* estipulada e o tipo de padrão de *infill* não tiveram relevância.

- Teste 1

Este teste foi realizado com parâmetros de impressão *standard*, que resultou na capa de telemóvel presente na Figura 40. É de notar que ocorreram vários defeitos como *stringing* acentuado nas extremidades laterais, no símbolo e no rasgo para a câmara fotográfica (Figura 41 a) e b), c) e d)); riscos na camada superior do interior da capa, devido ao *nozzle* raspar durante os *travel moves* (Figura 41 e)); e desfasamento entre camadas nas laterais (Figura 41 f)). Quanto ao tempo de produção da peça e de pós-processamento estes foram de 4 horas e 9 minutos e de 20 minutos, respetivamente.

Após o pós-processamento com recurso a uma ferramenta de corte manual com lâmina, retirou-se o *stringing* ocorrido, resultando numa aparência bastante melhor, como se pode verificar na Figura 41 g) e h). No entanto, os outros defeitos presentes não foram possíveis de eliminar.

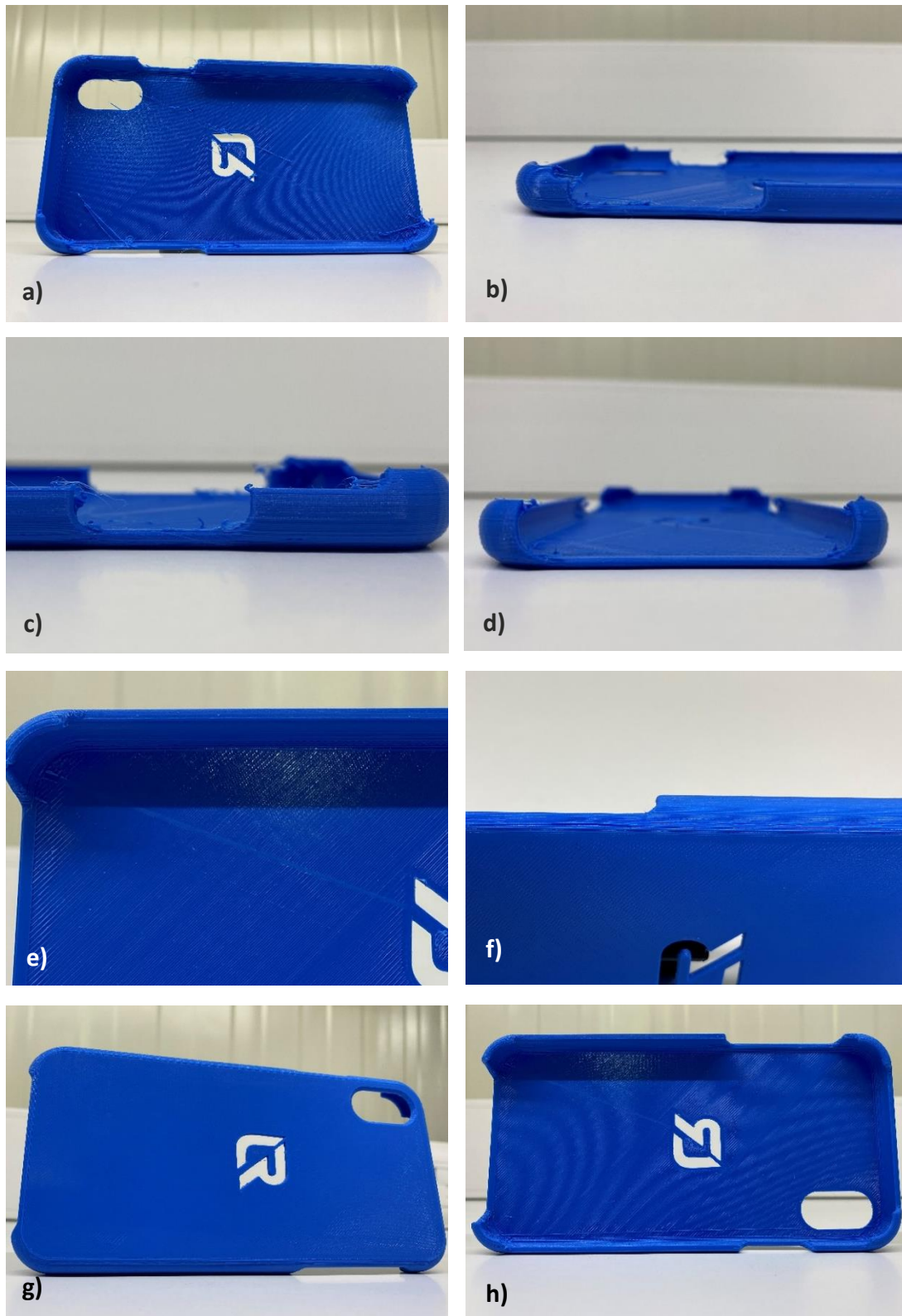


Figura 41 - a) Frente da capa de telemóvel (Teste 1). b) Detalhe de stringing no lado esquerdo c) Detalhe de stringing no lado direito. b) Detalhe de stringing na parte de baixo. c) Detalhe do risco. d) Detalhe de desfazamento de camadas na lateral. e) Traseira da capa com pós-processamento. f) Frente da capa com pós-processamento.

- Teste 2

No segundo teste, realizado com parâmetros de impressão com velocidades de impressão superiores e *Lift*, em relação ao Teste 1, obteve-se a capa de telemóvel presente na Figura A 2 do Anexo L. Através desta, pode-se observar a ocorrência ainda mais acentuada de *stringing* nas extremidades, símbolo e rasgo da câmara fotográfica (Figura A 2 a), b) e c)); marcas na camada superior do interior da capa, devido ao *stringing* que ficou por baixo desta última camada (Figura A 2 d)); e desfasamento entre camadas acentuado nas laterais (Figura A 2 e) e f)). Relativamente ao tempo de produção da peça e do pós-processamento, estes foram de 2 horas e 52 minutos e de 20 minutos, respetivamente.

Com recurso a uma ferramenta de corte manual com lâmina, retirou-se o *stringing* ocorrido, resultando num melhor acabamento, como se verifica na Figura A 2 g) e h)). Os restantes defeitos presentes não foram possíveis de eliminar.

- Teste 3

Quanto ao Teste 3, em que se utilizaram parâmetros de velocidade menores, obteve-se a capa de telemóvel presente na Figura A 3 do Anexo L. Nesta figura pode-se observar a ocorrência acentuada de *stringing*, tal como no segundo teste; menor desfasamento entre camadas nas laterais da capa do que no Teste 2 e maior do que no Teste 1. Quanto ao tempo de impressão da peça e de pós-processamento, estes foram de 5 horas e 5 minutos e de 20 minutos, respetivamente.

Após pós-processamento, com recurso a uma ferramenta de corte manual com lâmina, retirou-se o *stringing* ocorrido, garantindo uma aparência melhorada. Mais uma vez, não se conseguiram eliminar os restantes defeitos.

## 5.2 Fork Grippers

Após a produção dos *fork grippers*, estes foram medidos com recurso a um paquímetro, nas sete zonas representadas na Figura 42.

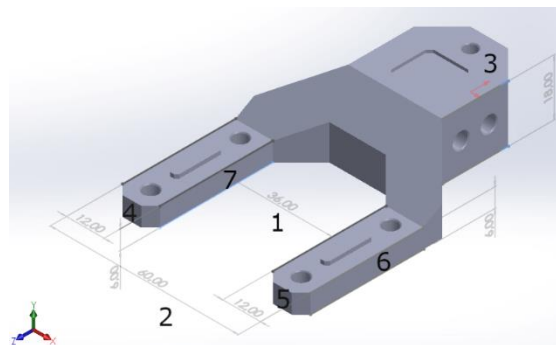


Figura 42 – Zonas a medir e respetivas dimensões dos *fork grippers*

De modo a entender os desvios dimensionais, foram calculados os desvios absolutos para cada teste. Na Tabela 18, são apresentados esses valores. É importante referir que, como estes desvios foram medidos com recurso a um paquímetro e os valores obtidos foram na ordem das centésimas de milímetros, a fiabilidade destes resultados não é garantida.

Tabela 18 - Desvios dimensionais absolutos dos *fork grippers* em ASA e PC

| Teste | Desvios Dimensionais [mm] |      |
|-------|---------------------------|------|
|       | ASA                       | PC   |
| 1     | 0,45                      | 0,74 |
| 2     | 0,62                      | 0,60 |
| 3     | 0,56                      | 0,79 |
| 4     | 0,55                      | 0,72 |
| 5     | 0,53                      | 0,71 |
| 6     | 0,64                      | 0,94 |
| 7     | 0,45                      | 0,67 |
| 8     | 0,53                      | 0,52 |
| 9     | 0,54                      | 0,63 |

Na Figura 43 estão definidas as zonas em que se efetuaram as medições das rugosidades. Estes valores estão representados nas Tabelas 19 e 20, sendo que estes são a média dos valores das três amostras por cada teste.

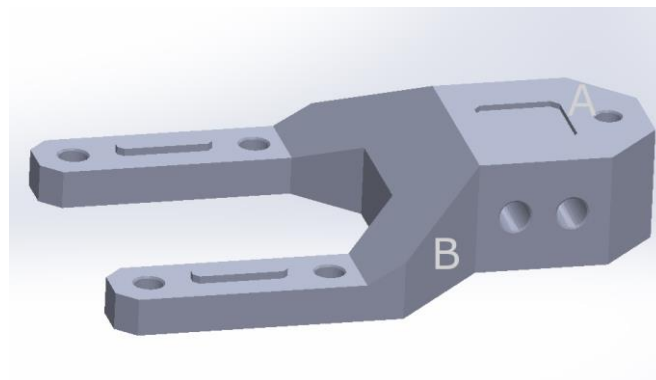


Figura 43 - Superfícies definidas para medição das rugosidades dos *fork grippers*

Tabela 19 - Resultados das medições das rugosidades dos *fork grippers* em ASA

| Teste número | A                    |                      | B                    |                      |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
| 1            | 5,443                | 23,465               | 13,721               | 59,092               |
| 2            | 5,532                | 28,750               | 12,730               | 56,470               |
| 3            | 6,797                | 30,120               | 13,182               | 56,668               |
| 4            | 4,833                | 24,049               | 9,850                | 45,129               |
| 5            | 5,471                | 26,404               | 9,981                | 45,409               |
| 6            | 5,118                | 25,030               | 9,719                | 43,783               |
| 7            | 4,148                | 21,785               | 7,600                | 38,675               |
| 8            | 3,100                | 22,212               | 7,750                | 37,658               |
| 9            | 3,222                | 21,057               | 7,535                | 38,335               |

Tabela 20 - Resultados das medições das rugosidades dos *fork grippers* em PC

| Teste número | A                    |                      | B                    |                      |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
| 1            | 4,447                | 22,249               | 13,934               | 61,959               |
| 2            | 3,397                | 18,823               | 14,327               | 67,780               |
| 3            | 4,725                | 23,483               | 14,406               | 65,439               |
| 4            | 4,863                | 23,553               | 10,852               | 51,206               |
| 5            | 5,862                | 28,880               | 10,479               | 47,699               |
| 6            | 4,855                | 25,565               | 10,384               | 47,316               |
| 7            | 3,121                | 16,907               | 8,515                | 42,617               |
| 8            | 3,280                | 15,797               | 7,683                | 36,327               |
| 9            | 2,748                | 13,202               | 9,092                | 46,924               |

### 5.3 Provetes de tração ASA e PC

Com a produção e posteriores ensaios dos provetes em ASA e PC, através do tratamento dos dados fornecidos pelos ensaios, foi possível obter algumas propriedades mecânicas como o alongamento, módulo de elasticidade e tensão máxima. Nas Tabelas 21 e 22 estão apresentados os resultados obtidos. Os valores apresentados são a média dos valores das três amostras por cada teste. Nas Figuras 44 e 45 pode-se observar um gráfico de tensão/deformação de um dos ensaios realizados em ASA e PC, respetivamente.

Tabela 21 - Parâmetros e resultados dos ensaios de tração dos provetes em ASA

| Teste número | Espessura da camada | Raster Angle | Temperatura de extrusão | Módulo de Elasticidade [GPa] | Tensão máxima [MPa] | Along. [%] |
|--------------|---------------------|--------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|------------|
| 1            | 0,20 mm             | ± 45°        | 255°C                   | 2,15                         | 40,36               | 6,84       |
| 2            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 255°C                   | 2,19                         | 39,43               | 4,50       |
| 3            | 0,20 mm             | 0°           | 255°C                   | 2,12                         | 45,00               | 5,31       |
| 4            | 0,20 mm             | ± 45°        | 265°C                   | 2,14                         | 41,33               | 6,83       |
| 5            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 265°C                   | 2,15                         | 40,57               | 4,70       |
| 6            | 0,20 mm             | 0°           | 265°C                   | 2,12                         | 44,20               | 4,70       |
| 7            | 0,20 mm             | ± 45°        | 275°C                   | 2,13                         | 39,69               | 4,80       |
| 8            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 275°C                   | 2,16                         | 40,17               | 5,15       |
| 9            | 0,20 mm             | 0°           | 275°C                   | 2,13                         | 43,27               | 4,29       |
| 10           | 0,10 mm             | ± 45°        | 255°C                   | 2,13                         | 38,71               | 4,39       |
| 11           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 255°C                   | 2,16                         | 34,00               | 2,84       |
| 12           | 0,10 mm             | 0°           | 255°C                   | 2,28                         | 47,68               | 4,32       |
| 13           | 0,10 mm             | ± 45°        | 265°C                   | 2,14                         | 40,34               | 3,78       |
| 14           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 265°C                   | 2,18                         | 37,94               | 3,66       |
| 15           | 0,10 mm             | 0°           | 265°C                   | 2,23                         | 46,65               | 4,02       |
| 16           | 0,10 mm             | ± 45°        | 275°C                   | 2,13                         | 40,04               | 4,29       |
| 17           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 275°C                   | 2,16                         | 36,44               | 3,01       |
| 18           | 0,10 mm             | 0°           | 275°C                   | 2,22                         | 44,91               | 3,95       |



Figura 44 - Exemplo de gráfico Tensão/Deformação de ASA

Tabela 22 - Parâmetros e resultados dos ensaios de tração dos provetes em PC

| Teste número | Espessura da camada | Raster Angle | Temperatura de extrusão | Módulo de Elasticidade [GPa] | Tensão máxima [MPa] | Along. [%] |
|--------------|---------------------|--------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|------------|
| 1            | 0,20 mm             | ± 45°        | 265°C                   | 2,15                         | 54,90               | 6,24       |
| 2            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 265°C                   | 2,10                         | 55,63               | 4,85       |
| 3            | 0,20 mm             | 0°           | 265°C                   | 2,11                         | 60,47               | 5,98       |
| 4            | 0,20 mm             | ± 45°        | 275°C                   | 2,20                         | 57,09               | 7,44       |
| 5            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 275°C                   | 2,15                         | 59,10               | 6,21       |
| 6            | 0,20 mm             | 0°           | 275°C                   | 2,16                         | 59,17               | 6,18       |
| 7            | 0,20 mm             | ± 45°        | 285°C                   | 2,18                         | 58,27               | 7,55       |
| 8            | 0,20 mm             | 0°/90°       | 285°C                   | 2,16                         | 59,86               | 7,30       |
| 9            | 0,20 mm             | 0°           | 285°C                   | 2,12                         | 59,50               | 7,05       |
| 10           | 0,10 mm             | ± 45°        | 265°C                   | 2,07                         | 52,06               | 6,28       |
| 11           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 265°C                   | 2,14                         | 50,25               | 5,00       |
| 12           | 0,10 mm             | 0°           | 265°C                   | 3,16                         | 64,08               | 6,49       |
| 13           | 0,10 mm             | ± 45°        | 275°C                   | 2,95                         | 52,49               | 5,09       |
| 14           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 275°C                   | 2,99                         | 52,70               | 4,26       |
| 15           | 0,10 mm             | 0°           | 275°C                   | 3,12                         | 63,54               | 6,88       |
| 16           | 0,10 mm             | ± 45°        | 285°C                   | 3,11                         | 56,32               | 6,49       |
| 17           | 0,10 mm             | 0°/90°       | 285°C                   | 3,14                         | 58,32               | 5,32       |
| 18           | 0,10 mm             | 0°           | 285°C                   | 3,17                         | 62,84               | 6,65       |



Figura 45 - Exemplo de gráfico Tensão/Deformação de PC

## 5.4 Cubos de Rugosidades

### 5.4.1 Cubos de Rugosidades com diferentes espessuras de camada

Após a produção dos cubos com diferentes espessuras de camada, foram medidas as rugosidades das superfícies laterais e superiores e medidas as dimensões dos mesmos, com recurso ao rugosímetro e ao paquímetro, respetivamente, efetuando cinco medições tanto para as rugosidades como para as dimensões. Nas Tabelas 23, 24 e 25 estão apresentados os resultados destas medições para cada tipo de material. Um exemplo destes cubos com diferentes espessuras de camada está representado na Figura 46.

Tabela 23 - Rugosidades e dimensões dos cubos de rugosidades com diferentes espessuras de camada em PLA

| Teste número | Material | Esp. de Camada [mm] | Rugosidade Superfície Superior [μm] |        | Rugosidade Superfície Lateral [μm] |        | Dimensões [mm]              |
|--------------|----------|---------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------|
|              |          |                     | Ra                                  | Rz     | Ra                                 | Rz     |                             |
| 1            | PLA      | 0,30                | 5,377                               | 28,325 | 21,216                             | 88,305 | 30,00 x<br>30,13 x<br>29,91 |
| 2            | PLA      | 0,20                | 5,864                               | 32,866 | 14,075                             | 60,971 | 30,00 x<br>30,11 x<br>29,97 |
| 3            | PLA      | 0,10                | 3,815                               | 27,649 | 7,297                              | 38,198 | 29,98 x<br>29,98 x<br>30,03 |

Tabela 24 - Rugosidades e dimensões dos cubos de rugosidades com diferentes espessuras de camada em ASA

| Teste número | Material | Esp. de Camada [mm] | Rugosidade Superfície Superior [μm] |        | Rugosidade Superfície Lateral [μm] |        | Dimensões [mm]              |
|--------------|----------|---------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------|
|              |          |                     | Ra                                  | Rz     | Ra                                 | Rz     |                             |
|              |          |                     | 1                                   | ASA    | 0,30                               | 4,844  |                             |
| 2            | ASA      | 0,20                | 6,319                               | 30,995 | 13,960                             | 63,060 | 28,85 x<br>29,96 x<br>29,96 |
| 3            | ASA      | 0,10                | 3,423                               | 24,189 | 7,968                              | 39,538 | 29,84 x<br>29,85 x<br>29,95 |

Tabela 25 - Rugosidades e dimensões dos cubos de rugosidades com diferentes espessuras de camada em PETG

| Teste número | Material | Esp. de Camada [mm] | Rugosidade Superfície Superior [μm] |        | Rugosidade Superfície Lateral [μm] |        | Dimensões [mm]              |
|--------------|----------|---------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------|
|              |          |                     | Ra                                  | Rz     | Ra                                 | Rz     |                             |
|              |          |                     | 1                                   | PETG   | 0,30                               | 5,958  |                             |
| 2            | PETG     | 0,20                | 6,572                               | 32,133 | 14,598                             | 63,910 | 29,93 x<br>30,04 x<br>30,02 |
| 3            | PETG     | 0,10                | 3,570                               | 17,685 | 8,619                              | 44,759 | 29,97 x<br>29,96 x<br>29,95 |



Figura 46 - a) Cubo de Rugosidades com espessura de camada 0,30 mm. b) Cubo de Rugosidades com espessura de camada 0,20 mm. c) Cubo de Rugosidades com espessura de camada 0,10 mm.

### 5.4.2 Cubos de Rugosidades "Ironing"

Quando concluída a produção dos cubos de PLA com a opção de impressão "Ironing", foram efetuadas medições à rugosidade das superfícies superiores e às alturas dos mesmos. Exemplo de um cubo produzido com esta opção está representado na Figura 47. Na Tabela 26 pode-se observar as médias, de cinco resultados obtidos e a variação da rugosidade, em percentagem, em relação aos cubos referentes ao Teste 2 da Tabela 23.

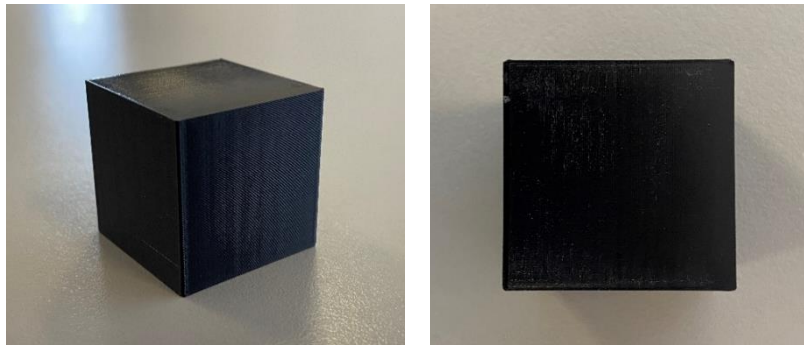


Figura 47 - Exemplo de um cubo em PLA com a opção "Ironing"

Tabela 26 - Rugosidades e dimensões dos cubos de rugosidades produzidos com a opção "Ironing" em PLA

| Teste número | Material | Rugosidade Superfície Superior [μm] |     | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> [%] |        | Dimensões [mm] |
|--------------|----------|-------------------------------------|-----|---|--------|----------------|
|              |          | Ra                                  | Rz  | Ra  | Rz     |                |
|              |          | 1                                   | PLA | 3,142                                     | 17,691 |                |

<sup>[1]</sup> em relação ao teste 2 da Tabela 23

### 5.4.3 Cubos de Rugosidades com lixagem

Na Figura 48 pode-se observar um exemplo de um cubo sujeito a este pós-processamento. Nas Tabelas 27, 28 e 29 estão apresentadas as médias dos resultados das rugosidades medidas das superfícies superiores das amostras de cada teste e a sua variação, em percentagem. Para cada teste realizado foi acrescentada uma lixa mais refinada ao teste seguinte como, por exemplo, para o teste número 1 foram utilizadas as *grits* 220 e 440 e para o teste 2 as *grits* 220, 440, 800.

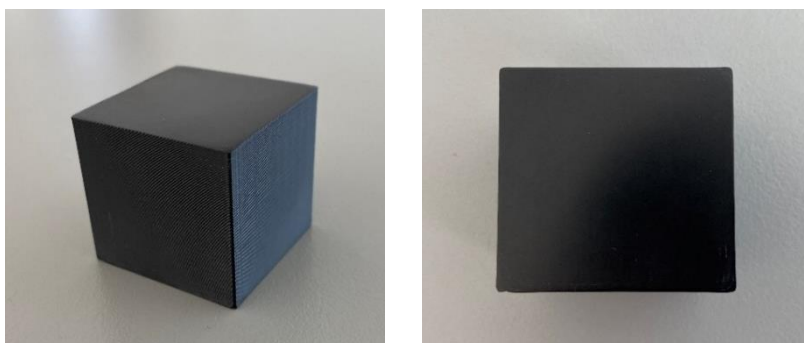


Tabela 27 - Figura 48 - Exemplo de um cubo em ASA após lixagem, com *grits* de 220 até 2000  
Rugosidades das superfícies superiores e variação da rugosidade dos cubos em PLA após lixagem

| Teste número | Material | Rugosidade Superfície Superior [ $\mu\text{m}$ ] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> [%] |       |
|--------------|----------|--|-------|---|-------|
|              |          | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | PLA      | 0,911  | 6,593 | 84,46                                     | 79,84 |
| 2            | PLA      | 0,370  | 2,763 | 93,68                                     | 91,59 |
| 3            | PLA      | 0,276  | 2,357 | 95,29                                     | 92,83 |
| 4            | PLA      | 0,101  | 0,986 | 98,28                                     | 97,00 |

<sup>[1]</sup> em relação ao teste 2 da Tabela 23

Tabela 28 - Rugosidades das superfícies superiores e variação da rugosidade dos cubos em ASA após lixagem

| Teste número | Material | Rugosidade Superfície Superior [ $\mu\text{m}$ ] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> [%] |       |
|--------------|----------|--|-------|---|-------|
|              |          | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | ASA      | 1,007  | 6,827 | 84,07                                     | 77,98 |
| 2            | ASA      | 0,332  | 2,510 | 94,75                                     | 91,90 |
| 3            | ASA      | 0,241  | 2,032 | 96,19                                     | 93,44 |
| 4            | ASA      | 0,087  | 0,771 | 98,62                                     | 97,51 |

<sup>[1]</sup> em relação ao teste 2 da Tabela 24

Tabela 29 - Rugosidades das superfícies superiores e variação da rugosidade dos cubos em PETG após lixagem

| Teste número | Material | Rugosidade Superfície Superior [ $\mu\text{m}$ ] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> [%] |       |
|--------------|----------|--|-------|---|-------|
|              |          | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | PETG     | 0,750  | 5,720 | 85,58                                     | 82,20 |
| 2            | PETG     | 0,287  | 2,421 | 95,63                                     | 92,47 |
| 3            | PETG     | 0,168  | 1,539 | 97,44                                     | 95,21 |
| 4            | PETG     | 0,068  | 0,630 | 98,97                                     | 98,04 |

<sup>[1]</sup> em relação ao teste 2 da Tabela 25

#### 5.4.4 Cubos de Rugosidades com *sandblasting*

Após a produção dos cubos e posterior pós-processamento com *sandblasting*, foram medidas as rugosidades das superfícies superiores e laterais de cada amostra. Na Figura 49 pode-se observar um cubo de PETG após *sandblasting*. As médias dos valores obtidos do conjunto de amostras para cada material estão apresentados nas Tabelas 30 e 31, tal como a variação das rugosidades, em percentagem.

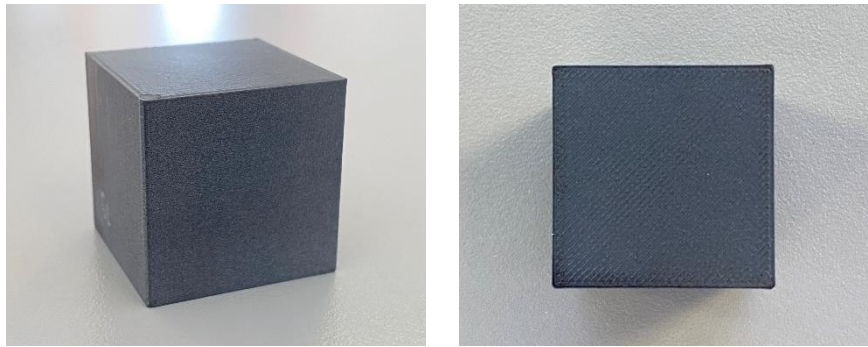


Figura 49 - Cubo de PETG após sandblasting

Tabela 30 - Rugosidades das superfícies superiores e laterais dos cubos em PLA, ASA e PETG após sandblasting

| Nome do Teste | Material | Rugosidade Superfície Superior [ $\mu\text{m}$ ] |        | Rugosidade Superfície Lateral [ $\mu\text{m}$ ] |        |
|---------------|----------|--|--------|---|--------|
|               |          | Ra   | Rz     | Ra  | Rz     |
| PLA_SB        | PLA      | 2,716  | 14,367 | 2,416   | 13,547 |
| ASA_SB        | ASA      | 2,739  | 14,658 | 2,772   | 14,875 |
| PETG_SB       | PETG     | 3,586  | 17,448 | 3,844   | 19,485 |

Tabela 31 - variação da rugosidade dos cubos em PLA, ASA e PETG após sandblasting

| Nome do Teste | Material | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Lateral [%] |       |
|---------------|----------|--|-------|---|-------|
|               |          | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| PLA_SB        | PLA      | 50,73  | 45,99 | 82,10   | 76,32 |
| ASA_SB        | ASA      | 60,34  | 54,73 | 80,59   | 76,26 |
| PETG_SB       | PETG     | 47,22  | 51,78 | 72,53   | 68,33 |

#### 5.4.5 Cubos de Rugosidades Dipping

Nas Figuras 50-57, estão representados os valores das médias das rugosidades, Ra e Rz, das superfícies superiores e laterais, para os diferentes materiais sujeitos a este pós-processamento. Nestas imagens também se podem observar a média das rugosidades iniciais, das mesmas superfícies, definidas pelo número zero. Nas Tabelas 32-35, estão apresentadas as variações das rugosidades das superfícies medidas, em percentagem, para cada material.

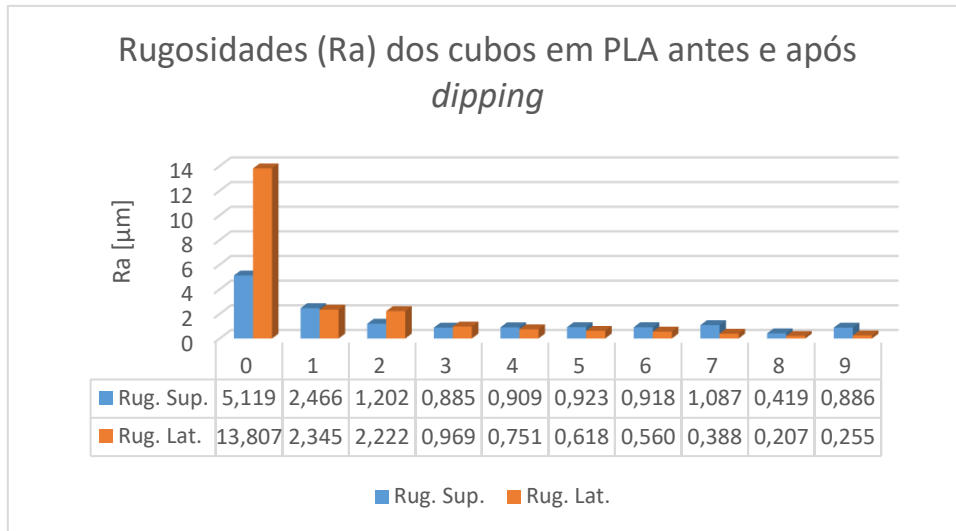


Figura 50 – Rugosidades Ra dos cubos em PLA antes e após dipping

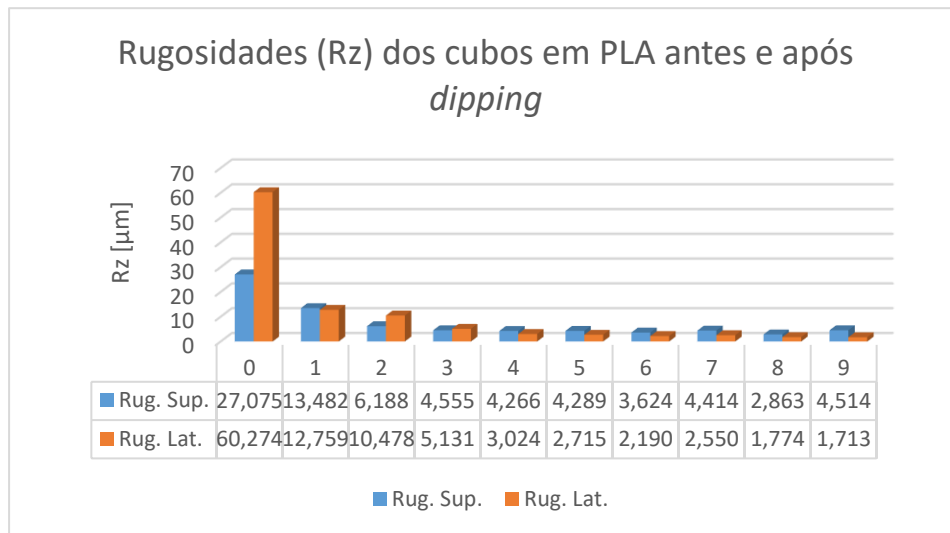


Figura 51 - Rugosidades Rz dos cubos em PLA antes e após dipping

Tabela 32 - Variação das rugosidades das superfícies superiores e laterais dos cubos em PLA após dipping

| Teste número | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup><br>Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup><br>Superfície Lateral [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
|              | 1  | 61,37 | 54,35   | 82,68 |
| 2            | 76,26  | 73,84 | 82,84   | 81,70 |
| 3            | 81,95  | 82,40 | 92,78   | 91,15 |
| 4            | 84,71  | 86,33 | 94,59   | 95,11 |
| 5            | 83,03  | 87,72 | 95,56   | 95,48 |
| 6            | 83,28  | 86,67 | 96,02   | 96,46 |
| 7            | 74,73  | 80,88 | 97,21   | 95,74 |
| 8            | 91,37  | 88,35 | 98,54   | 97,07 |
| 9            | 83,19  | 82,83 | 98,16   | 97,12 |

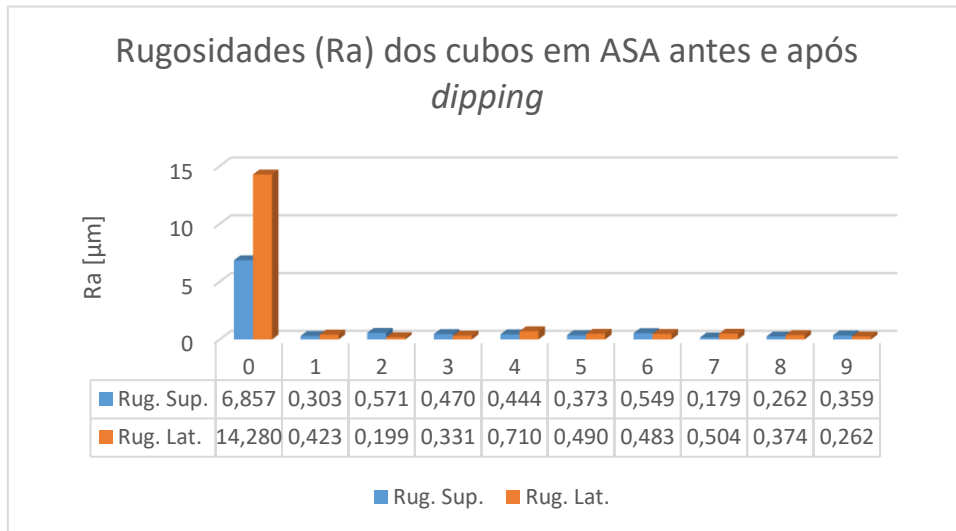


Figura 52 - Rugosidades Ra dos cubos em ASA antes e após dipping

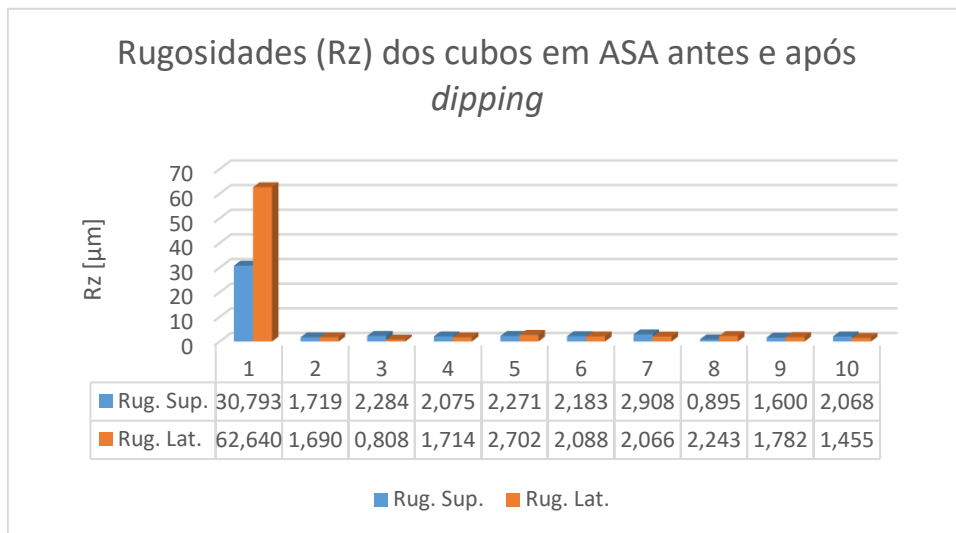


Figura 53 - Rugosidades Rz dos cubos em ASA antes e após dipping

Tabela 33 - Variação das rugosidades das superfícies superiores e laterais dos cubos em ASA após dipping

| Teste número | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Lateral [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 95,76  | 94,08 | 97,00   | 97,14 |
| 2            | 92,05  | 92,31 | 98,58   | 98,69 |
| 3            | 92,67  | 94,12 | 97,65   | 97,23 |
| 4            | 93,61  | 92,78 | 95,06   | 95,76 |
| 5            | 94,95  | 93,64 | 96,57   | 96,69 |
| 6            | 92,06  | 89,85 | 96,67   | 96,76 |
| 7            | 96,97  | 96,66 | 96,50   | 96,43 |
| 8            | 96,10  | 95,30 | 97,41   | 97,17 |
| 9            | 94,93  | 92,56 | 98,17   | 97,75 |

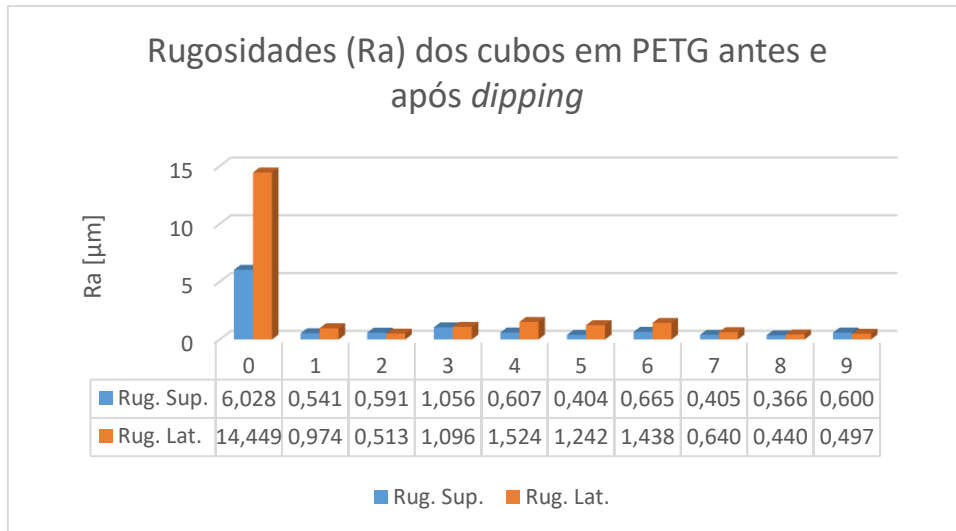


Figura 54 - Rugosidades Ra dos cubos em PETG antes e após dipping

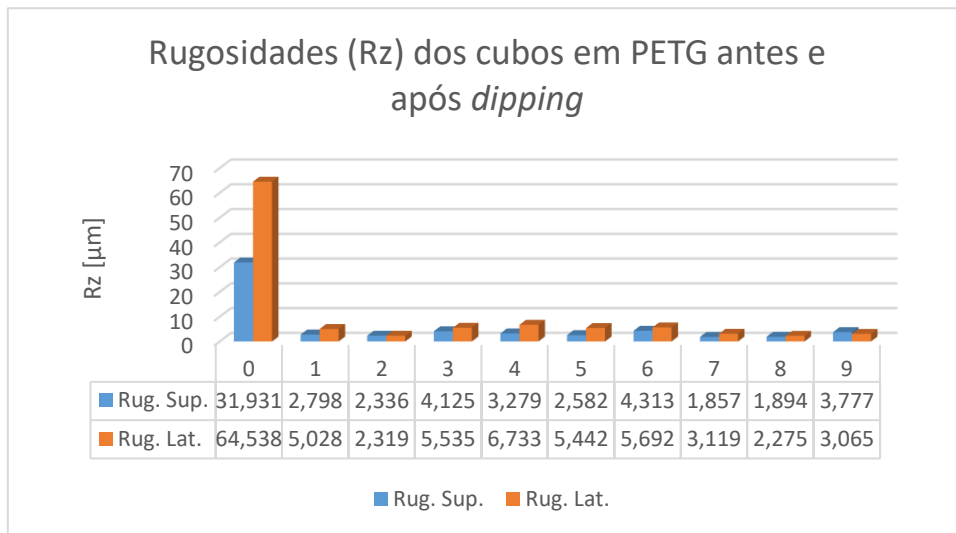


Figura 55 - Rugosidades Rz dos cubos em PETG antes e após dipping

Tabela 34 - Variação das rugosidades das superfícies superiores e laterais dos cubos em PETG após dipping

| Teste número | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Lateral [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 92,17  | 90,48 | 92,99   | 91,77 |
| 2            | 91,37  | 93,40 | 96,36   | 96,33 |
| 3            | 81,69  | 88,33 | 92,29   | 91,25 |
| 4            | 88,25  | 89,03 | 89,36   | 89,19 |
| 5            | 91,60  | 92,14 | 91,19   | 91,36 |
| 6            | 86,89  | 85,36 | 89,76   | 90,74 |
| 7            | 93,17  | 93,92 | 95,61   | 95,23 |
| 8            | 94,89  | 94,03 | 97,11   | 96,75 |
| 9            | 90,90  | 88,50 | 96,81   | 95,70 |

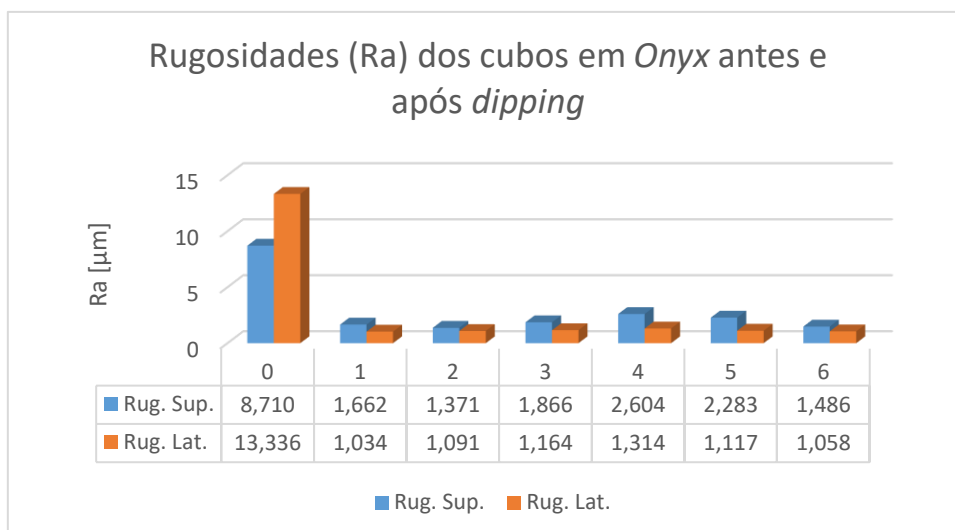


Figura 56 - Rugosidades Ra dos cubos em *Onyx* antes e após *dipping*

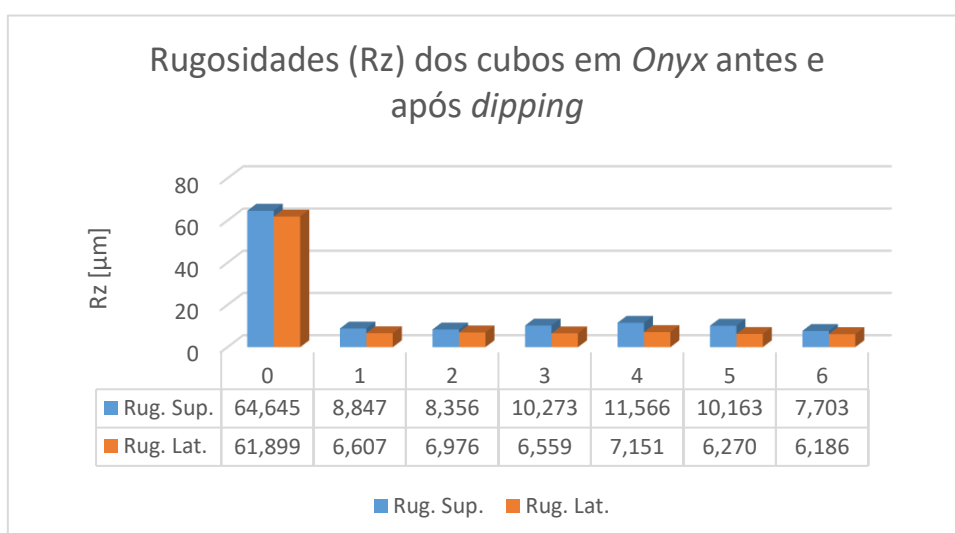


Figura 57 - Rugosidades Rz dos cubos em *Onyx* antes e após *dipping*

Tabela 35 - Variação das rugosidades das superfícies superiores e laterais dos cubos em *Onyx* após *dipping*

| Teste número | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Lateral [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 84,18  | 88,67 | 92,63   | 89,54 |
| 2            | 83,31  | 84,73 | 91,27   | 88,32 |
| 3            | 79,45  | 85,12 | 91,47   | 89,95 |
| 4            | 60,31  | 75,18 | 90,44   | 88,68 |
| 5            | 75,70  | 84,51 | 91,45   | 90,24 |
| 6            | 78,99  | 87,10 | 92,00   | 89,95 |

### 5.5 Vapour Smoothing

Após a produção e o pós-processamento *vapour smoothing* dos cubos, foram realizadas medições das rugosidades em cada superfície. Nas Figuras 58-63, pode-se observar os gráficos com as médias dos valores das rugosidades, Ra e Rz, de cada teste. Além disso, nas Tabelas A 55-57 do Anexo U estão apresentados os valores da variação das rugosidades, em percentagem.

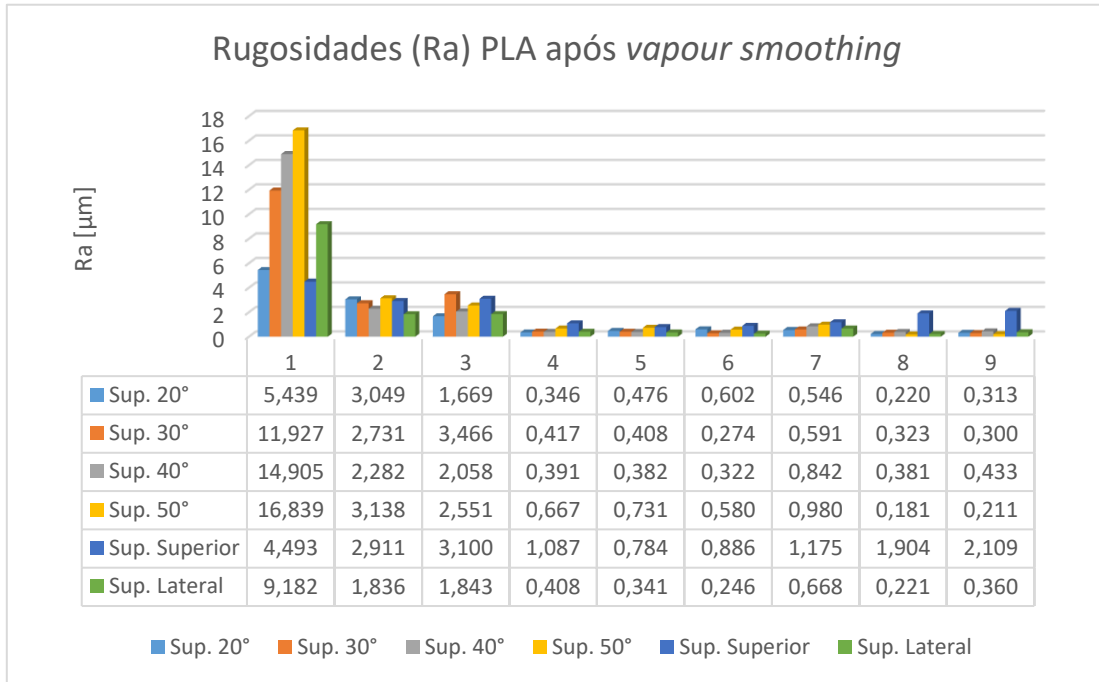


Figura 58 - Rugosidades Ra no PLA após *vapour smoothing*

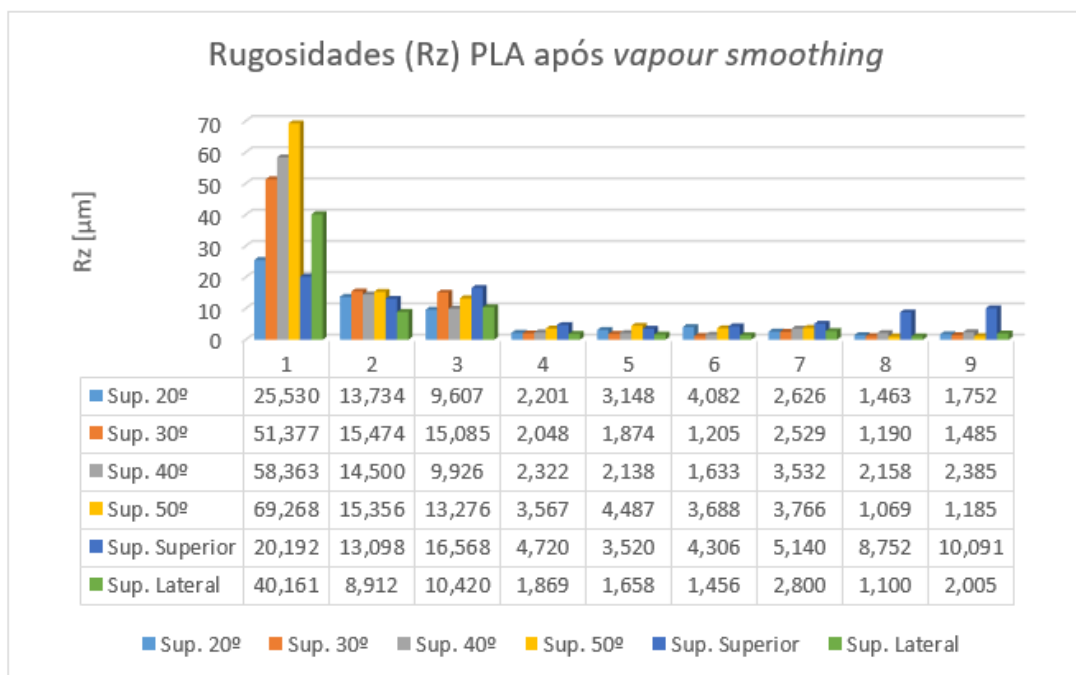


Figura 59 - Rugosidades Rz no PLA após *vapour smoothing*

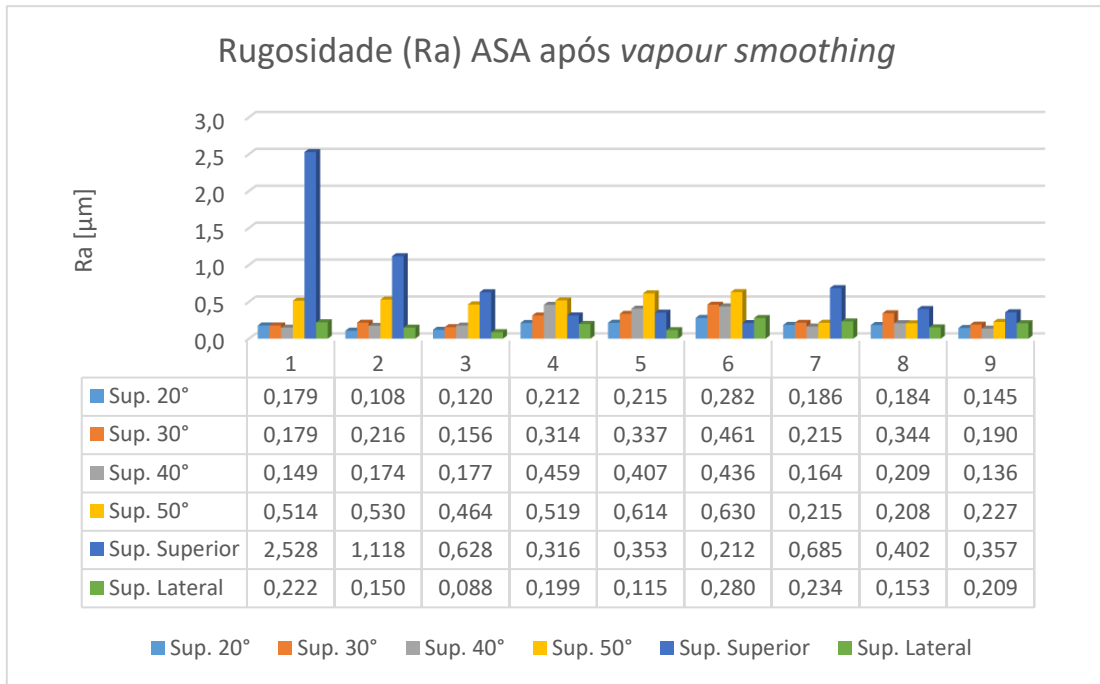


Figura 60 - Rugosidade Ra do ASA após *vapour smoothing*

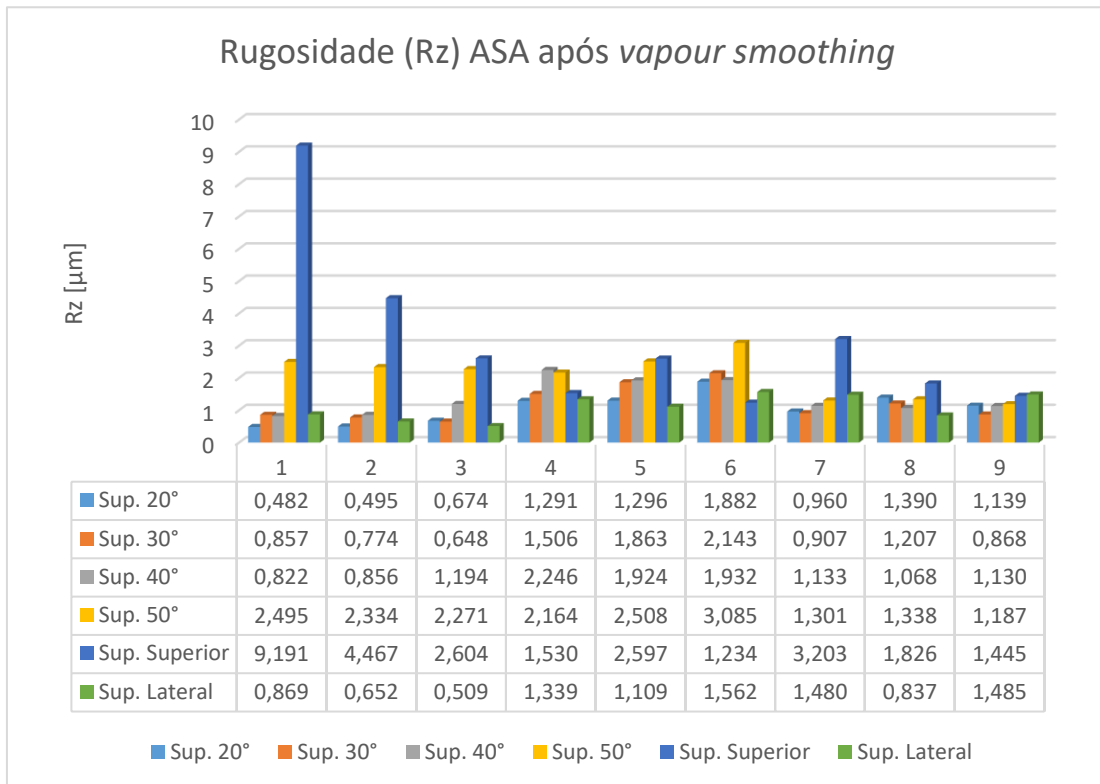


Figura 61 - Rugosidades Rz no ASA após *vapour smoothing*

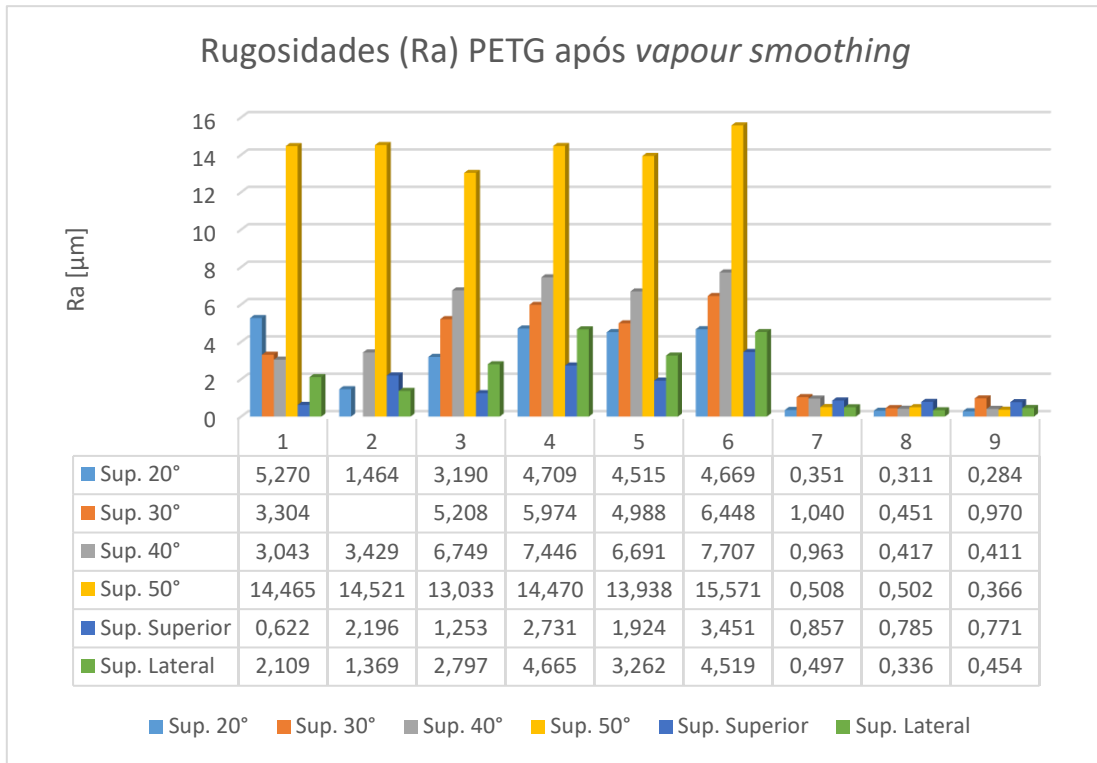


Figura 62 - Rugosidades Ra no PETG após *vapour smoothing*

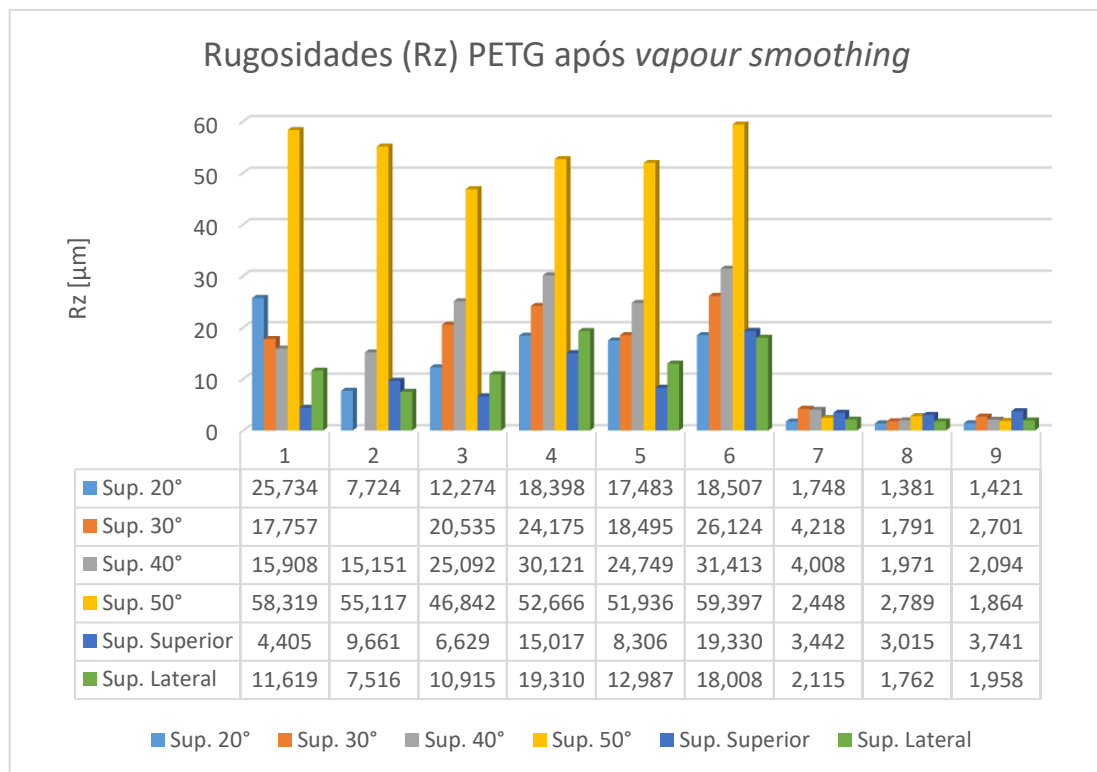


Figura 63 - Rugosidades Rz no PETG após *vapour smoothing*

### 5.6 Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono

Após a produção dos provetes e posteriores ensaios de tração, foram recolhidos os seus dados. Através destes, foram obtidas algumas propriedades mecânicas como o alongamento, o módulo de elasticidade e a tensão máxima de cedência. Depois de analisar os dados constatou-se que os ensaios dos provetes de *Onyx* ultrapassavam o tempo máximo estipulado pela norma, assim sendo, foram produzidos novos provetes e ensaiados, seguindo a norma ASTM D638 com uma velocidade de ensaio de 50 mm/s. Os valores médios dos resultados obtidos das amostras de cada teste estão apresentados nas Tabelas 36 e 37. Além desses resultados, pode-se observar nas Figuras 64 e 65 os gráficos tensão/deformação de um dos ensaios de cada material.



Figura 64 - Exemplo de um gráfico Tensão/Deformação de *Onyx*

Tabela 36 - Parâmetros e resultados dos ensaios de tração dos provetes em *Onyx*

| Nº teste | Espessura da camada [mm] | Raster Angle [°] | Temp. extrusão [°C] | Orientação | Módulo de Elasticidade [GPa] | Tensão máxima [MPa] | Along. [%] |
|----------|--------------------------|------------------|---------------------|------------|------------------------------|---------------------|------------|
| 1        | 0,20 mm                  | ± 45°            | 275°C               | Horizontal | 1,50                         | 40,64               | 27,86      |
| 2        | 0,20 mm                  | ± 45°            | 275°C               | Vertical   | 3,30                         | 61,51               | 13,91      |
| 3        | 0,10 mm                  | ± 45°            | 275°C               | Horizontal | 1,62                         | 42,85               | 17,90      |
| 4        | 0,10 mm                  | ± 45°            | 275°C               | Vertical   | 3,49                         | 67,38               | 16,45      |

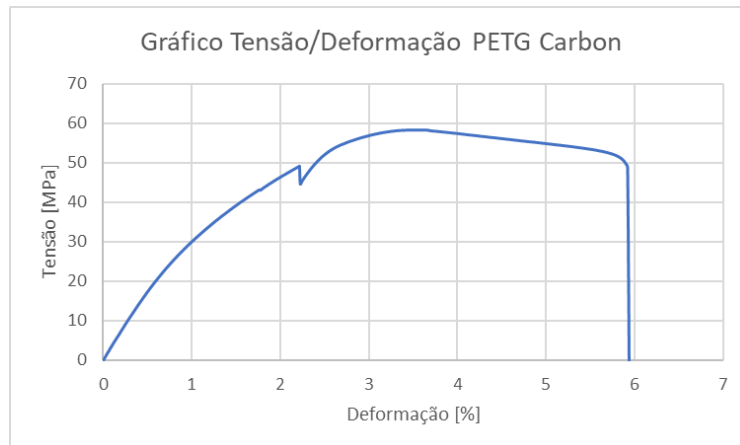


Figura 65 – Exemplo de um gráfico Tensão/Deformação de *PETG Carbon*

Tabela 37 - Parâmetros e resultados dos ensaios de tração dos provetes em *PETG Carbon*

| Nº teste | Espessura da camada [mm] | Raster Angle [°] | Temp. extrusão [°C] | Orientação | Módulo de Elasticidade [GPa] | Tensão máxima [MPa] | Along. [%] |
|----------|--------------------------|------------------|---------------------|------------|------------------------------|---------------------|------------|
| 1        | 0,20                     | ± 45             | 250                 | Horizontal | 4,10                         | 49,04               | 7,84       |
| 2        | 0,20                     | ± 45             | 250                 | Vertical   | 5,54                         | 54,69               | 5,74       |
| 3        | 0,10                     | ± 45             | 250                 | Horizontal | 4,49                         | 48,28               | 5,51       |
| 4        | 0,10                     | ± 45             | 250                 | Vertical   | 6,11                         | 58,02               | 5,75       |

### 5.7 Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono

Efetuada os ensaios dos provetes de *Onyx* reforçados com fibras contínuas de carbono, foram recolhidos e tratados os seus dados. A partir desses dados foram obtidas algumas propriedades mecânicas como o alongamento, o módulo de elasticidade e a tensão máxima de cedência. Na Tabela 38 estão apresentados esses valores. É de referir que todos os ensaios se consideraram inválidos devido à quebra dos provetes ocorrer na zona das amarras. Na Figura 66 encontra-se o gráfico tensão/deformação de um dos ensaios.

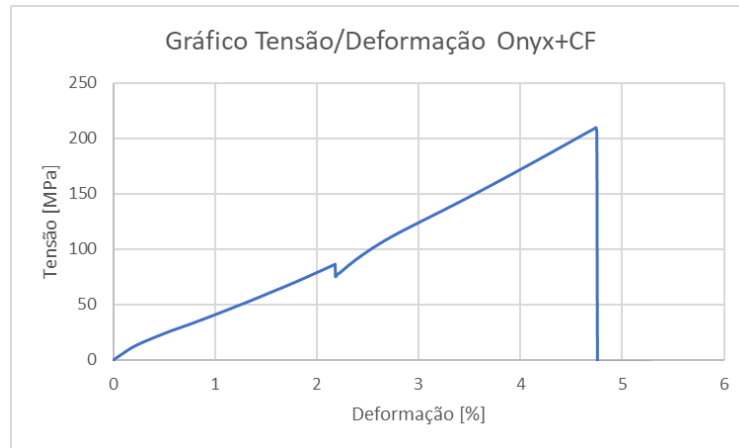


Figura 66 - Exemplo de gráfico Tensão/Deformação de *Onyx* com fibra contínua de carbono

Tabela 38 - Parâmetros e resultados dos ensaios de tração dos provetes em *Onyx* com fibra contínua de carbono

| Teste número | <i>Raster Angle</i> | Tipo de reforço                      | Número de camadas | Módulo de Elasticidade [GPa] | Tensão máxima [MPa] | Alongamento [%] |
|--------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| 1            | -                   | Concêntrico, 2 perímetros de fibra   | 18                | 14,86                        | 204,14              | 4,58            |
| 2            | -                   | Concêntrico, 4 perímetros de fibra   | 18                | 28,73                        | 379,36              | 6,01            |
| 3            | 0°, 45°, 90°, 135°  | Isotrópico com 2 perímetros de fibra | 6                 | 8,86                         | 95,82               | 5,77            |
| 4            | 0°, 45°, 90°, 135°  | Isotrópico com 2 perímetros de fibra | 12                | 16,09                        | 158,49              | 4,66            |
| 5            | 0°, 45°, 90°, 135°  | Isotrópico com 2 perímetros de fibra | 18                | 24,32                        | 240,46              | 6,05            |

# ANÁLISE CRÍTICA

6.1 CAPA DE TELEMÓVELI

6.2 FORK GRIPPER

6.3 PROVETES DE TRAÇÃO ASA E PC

6.4 CUBOS DE RUGOSIDADES COM DIFERENTE ESPESSURAS E CAMADAS

6.5 CUBOS DE RUGOSIDADES COM "IRONING"

6.6 LIXAGEM

6.7 SANDBLASTING

6.8 DIPPING

6.9 VAPOUR SMOOTHING

6.10 PROVETES COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS CURTAS DE CARBONO

6.11 PROVETES COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICAS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CARBONO



## 6 Análise Crítica

### 6.1 Capa de telemóvel

Com os Testes 1, 2 e 3 (Tabelas 4, 5 e 6 anteriormente referidas) foi possível verificar quais as melhores velocidades de impressão de modo a obter uma peça com bons acabamentos e no menor tempo possível, tanto de impressão como de pós-processamento. Após a análise das peças produzidas, observou-se que em todos os testes ocorreu desfasamento entre camadas, devido aos *overhangs* presentes, notando-se um menor desfasamento no Teste 1, em que se utilizou velocidades standard e um maior desfasamento no Teste 2, com velocidades superiores. O *stringing* foi outro problema detetado em todas as peças, sendo, por isso, necessário um pós-processamento em todos os testes. Este pós-processamento teve uma duração idêntica em todos estes, aproximadamente, de 20 minutos, e garantiu um aspeto visual bastante atrativo. O ensaio em que ocorreu menor acentuação deste defeito foi o Teste 1, possivelmente devido à não utilização do parâmetro “*Lift*”, mas que provocou um risco na superfície da capa de telemóvel. Posto isto, considerou-se que os melhores parâmetros a utilizar são os do Teste 1 pois, apesar de ter um tempo relativamente superior ao Teste 2, a qualidade final é superior porque existe um menor desfasamento entre camadas. Para além disso, possível remover os riscos obtidos selecionando a opção de “*Lift*”.

### 6.2 Fork Gripper

A aplicação do método Taguchi, com recurso ao software *MiniTab*, permitiu obter a análise gráfica e numérica em relação aos melhores conjuntos de parâmetros de impressão dos *fork grippers*, no que diz respeito à rugosidade e ao rigor dimensional.

De modo a estudar estes parâmetros e as suas influências, foram efetuados nove testes, tanto para os *fork grippers* em ASA como para os *fork grippers* em PC, seguindo uma matriz L9. Para cada um destes materiais, utilizando o método Taguchi, obteve-se um rácio S/N que permite a análise da variação de resultados, indicando o melhor conjunto de parâmetros. Tendo como objetivo a obtenção de menores valores de rugosidade e de desvios dimensionais, indica-se que a categoria do rácio S/N tem de ser o “menor é o melhor”.

Além deste método, também foi possível efetuar uma análise da variância (ANOVA) dos resultados obtidos. A ANOVA indica a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro, através o valor-p. Este valor-p só é significativo se for menor ou igual a 0,05 e, quanto menor for este valor maior impacto

terá o parâmetro em questão. Além disso, também permite a análise da dispersão de dados, de modo a entender a fiabilidade do processo através do coeficiente de determinação,  $R^2$ . É importante referir que ambas as análises se encontram detalhadas em anexo (Anexo M e Anexo N).

### 6.2.1 ASA

#### 6.2.1.1 Método Taguchi

A partir da utilização deste método obtiveram-se as seguintes conclusões:

- O aumento da espessura de camada traduz-se numa maior rugosidade Ra e Rz, tanto nas superfícies superiores como nas laterais;
- A percentagem de *infill* não apresenta uma tendência significativa nas rugosidades Ra e Rz das superfícies superiores e laterais;
- O desvio dimensional apresenta uma tendência de diminuição de desvios para menores percentagens de *infill*.

Na Tabela 39 estão representados os melhores valores dos parâmetros de impressão para cada propriedade, pelo método Taguchi.

Tabela 39 - Melhores parâmetro de impressão dos *fork grippers* em ASA, pelo método Taguchi

| Propriedade            | Espessura de Camada | % <i>infill</i> |
|------------------------|---------------------|-----------------|
| Ra Superfície Superior | 0,10 mm             | 30%             |
| Rz Superfície Superior | 0,10 mm             | 15%             |
| Ra Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 50%             |
| Rz Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 50%             |
| Desvio Dimensional     | 0,10 mm             | 15%             |

#### 6.2.1.2 Análise da Variância (ANOVA)

Com a análise da variância dos *fork grippers* em ASA, observou-se que a espessura de camada apresenta a maior influência na rugosidade e que a percentagem de *infill* tem um maior impacto no desvio dimensional. Na Tabela 40, estão representados os parâmetros com maior influência nas nessas propriedades.

Tabela 40 - Parâmetros com maior influência na rugosidade e no desvio dimensional nos *fork grippers* em ASA, pela ANOVA

| Propriedade            | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Ra Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Ra Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Desvio Dimensional     | % <i>Infill</i>               |

## 6.2.2 PC

### 6.2.2.1 Método Taguchi

Através da análise do método Taguchi dos *fork grippers* em PC, verificou-se que:

- As rugosidades, tanto das superfícies laterais como das superiores, não são muito influenciadas pela percentagem de *infill*;
- Com o aumento da espessura de camada ocorre um aumento da rugosidade das superfícies laterais;
- O desvio dimensional apresenta uma tendência de decréscimo de desvios para menores percentagens de *infill*.

Na Tabela 41 pode-se observar que a menor rugosidade e o menor desvio dimensional obtiveram-se com a menor espessura de camada.

Tabela 41 - Melhores parâmetros de impressão dos *fork grippers* em PC, pelo método Taguchi

| Propriedade            | Espessura de Camada | % <i>infill</i> |
|------------------------|---------------------|-----------------|
| Ra Superfície Superior | 0,10 mm             | 50%             |
| Rz Superfície Superior | 0,10 mm             | 50%             |
| Ra Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 30%             |
| Rz Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 30%             |
| Desvio Dimensional     | 0,10 mm             | 15%             |

### 6.2.2.2 Análise da Variância (ANOVA)

Na Tabela 42 pode-se constatar que o parâmetro com maior influência nos resultados obtidos dos *fork grippers* em PC foi a espessura de camada, sendo o parâmetro mais influente para todas as propriedades analisadas.

Tabela 42 - Parâmetros com maior influência na rugosidade e no desvio dimensional nos *fork grippers* em PC, pela ANOVA

| Propriedade            | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Ra Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Ra Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Desvio Dimensional     | Espessura de Camada           |

### 6.3 Provetes de Tração ASA e PC

Tanto para os provetes em ASA como para os provetes em PC, foram efetuados 18 testes, variando os parâmetros espessura de camada, temperatura de extrusão e *raster angle*, seguindo uma matriz L18. Para cada um destes materiais, utilizando o método Taguchi, obteve-se um rácio S/N que permite a análise da variação de resultados, indicando o melhor conjunto de parâmetros.

Para além disso, também foi possível efetuar uma análise da variância (ANOVA) dos resultados obtidos. Através desta análise conseguiu-se identificar a importância de cada parâmetro de impressão nas diferentes propriedades mecânicas obtidas e, além disso, também permitiu a análise da dispersão de dados.

Ambas as análises estão representadas de forma mais detalhada nos anexos (Anexo O e Anexo P).

#### 6.3.1 ASA

##### 6.3.1.1 Método Taguchi

Utilizando o método Taguchi, com os resultados obtidos dos ensaios de tração dos provetes em ASA, foi possível verificar as seguintes conclusões:

- O módulo de elasticidade apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão e com o aumento da espessura de camada;
- O alongamento apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão.

Com recurso à Tabela 43, pode-se observar os melhores parâmetros de impressão dos provetes em ASA, de modo a obter as melhores propriedades mecânicas.

Tabela 43 - Melhores parâmetros de impressão dos provetes de tração em ASA, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Temperatura de Extrusão | <i>Raster Angle</i> |
|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | 255°C                   | 0°                  |
| Tensão Máxima          | 0,20 mm             | 265°C                   | 0°                  |
| Alongamento            | 0,20 mm             | 255°C                   | ±45°                |

##### 6.3.1.2 Análise da Variância (ANOVA)

A análise da variância permitiu perceber a probabilidade de significância de cada parâmetro. Na Tabela 44 estão apresentados os parâmetros com maior impacto nas propriedades mecânicas dos provetes de tração em ASA.

Tabela 44 - Parâmetros com maior influência nas propriedades dos provetes de tração em ASA, pela ANOVA

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Espessura de Camada           |
| Tensão Máxima          | <i>Raster Angle</i>           |
| Alongamento            | Espessura de Camada           |

### 6.3.2 PC

#### 6.3.2.1 Método Taguchi

A partir da análise deste método dos provetes de tração em PC, observou-se que:

- O módulo de elasticidade apresenta uma tendência de incremento com o aumento da temperatura de extrusão;
- A tensão máxima apresenta uma tendência de incremento com o aumento da temperatura de extrusão;
- O facto do módulo de elasticidade e da tensão máxima terem melhores valores com o incremento da temperatura de extrusão pode indicar que se utilizaram temperaturas abaixo da mais adequada para este material.

Na Tabela 45 estão representados os melhores valores de impressão nas propriedades mecânicas dos provetes.

Tabela 45 - Melhores parâmetros de impressão para os provetes de tração em PC, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Temperatura de Extrusão | <i>Raster Angle</i> |
|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | 285°C                   | 0°                  |
| Tensão Máxima          | 0,20 mm             | 285°C                   | 0°                  |
| Alongamento            | 0,10 mm             | 265°C                   | 0°                  |

#### 6.3.2.2 Análise da Variância (ANOVA)

Na Tabela 46 pode-se verificar quais os parâmetros de impressão com maior impacto no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, nos provetes de tração em PC, pela ANOVA.

Tabela 46 - Parâmetro com maior influência nas propriedades dos provetes de tração em PC, pela ANOVA

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Espessura de Camada           |
| Tensão Máxima          | <i>Raster Angle</i>           |
| Alongamento            | Espessura de Camada           |

## 6.4 Cubos de Rugosidades com diferentes espessuras de camada

### 6.4.1 Cubos em PLA

Tal como esperado, através destes testes, verificou-se que a espessura de camada tem uma influência direta na rugosidade superficial em qualquer peça produzida por FDM, principalmente nas superfícies laterais. Após efetuar as medições das rugosidades de todas as amostras, constatou-se que, quanto menor a espessura de camada menor é a rugosidade nas superfícies laterais. Comparando a rugosidade Ra e Rz dos cubos de espessura de camada 0,30 mm, os cubos de espessura de camada 0,20 mm apresentaram reduções de 33,66% e 30,95%, respetivamente. Quanto aos cubos de espessura de camada de 0,10 mm, a rugosidade Ra e Rz reduziram em 65,61% e 56,74%, respetivamente, relativamente aos cubos de espessura de 0,30 mm.

No que toca à rugosidade das superfícies superiores, não se observou uma tendência diretamente proporcional à variação da espessura de camada, constatando-se uma maior rugosidade para a espessura de camada de 0,20 mm, seguindo-se a espessura de camada 0,30 mm e, por último, de 0,10 mm.

Em relação à influência no rigor dimensional, é importante referir que, para as variações das dimensões em questão, o paquímetro digital apresenta uma certa incerteza, não só pela sua incerteza inerente, mas, principalmente, devido ao facto das medições serem efetuadas de forma manual, traduzindo-se num considerável grau de incerteza. Apesar disso, efetuou-se cálculo dos volumes dos cubos medidos, concluindo que para a espessura de camada de 0,30 mm e de 0,20 mm ocorreu um aumento do volume, de 0,13% e 0,27%, respetivamente. Quanto aos cubos com espessura de camada de 0,10 mm deu-se o efeito oposto, resultando numa retração de 0,03%.

Na Figura 67, estão representados os gráficos das rugosidades das superfícies laterais e superiores dos cubos de diferentes espessuras de camada. A partir dos gráficos das rugosidades laterais, verifica-se a redução da amplitude da rugosidade ao longo da diminuição da espessura de camada e, além disso, nota-se uma maior uniformidade das amplitudes quanto maior for a espessura da mesma. Quanto aos perfis de rugosidades das superfícies superiores, nota-se uma redução da rugosidade em geral para a espessura de camada de 0,10 mm, apresentando menores declives. Uma possível razão para este fenómeno, é o facto de que o material depositado, que é semelhante ao da espessura de camada de 0,20 mm, acabar por ficar mais achatado, preenchendo os vales e reduzindo a rugosidade geral.

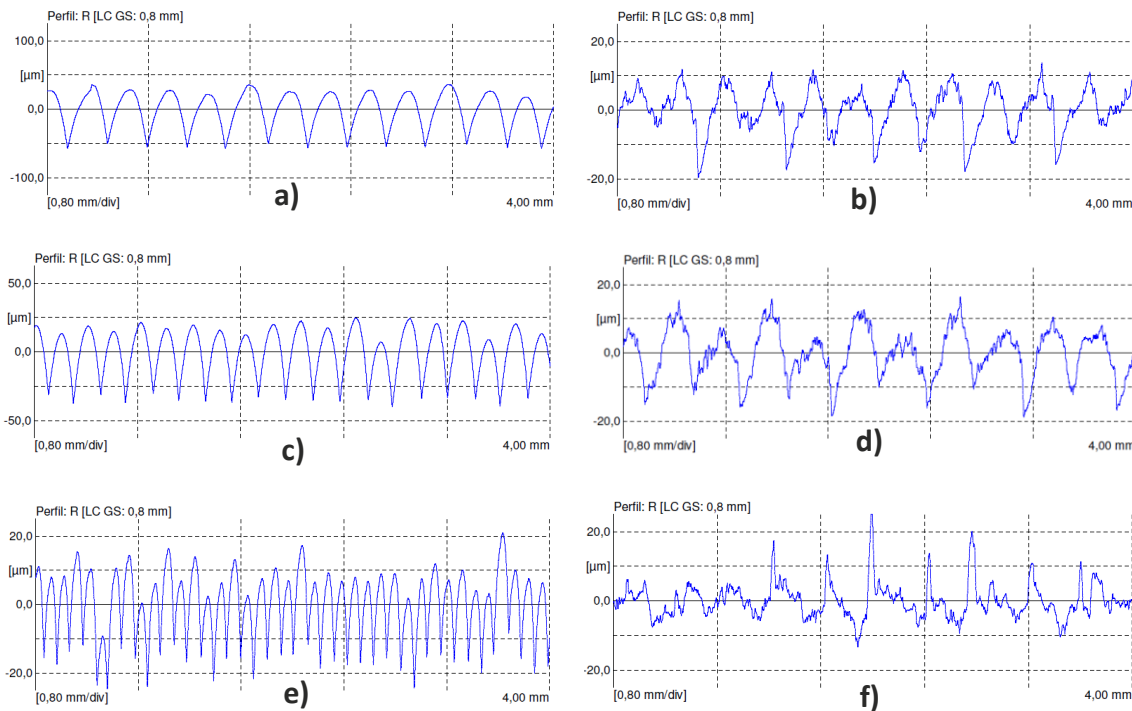


Figura 67 - Perfis de rugosidades dos cubos em PLA com diferentes espessuras de camada: a) Superfície lateral do cubo de 0,30 mm. b) Superfície superior do cubo de 0,30 mm c) Superfície lateral do cubo de 0,20 mm. d) Superfície superior do cubo de 0,20 mm. e) Superfície lateral do cubo de 0,10 mm. f) Superfície superior do cubo de 0,10 mm

#### 6.4.2 Cubos em ASA

Tal como nos cubos de rugosidade em PLA constatou-se que, quanto menor a espessura de camada, menor é a rugosidade nas superfícies laterais. A redução da rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  para uma espessura de 0,20 mm em relação aos cubos de espessura de camada 0,30 mm, foi de 36,55% e 29,18% e, para os cubos de espessura de camada 0,10 mm, foi de 63,78% e 55,60%, respetivamente.

A rugosidade das superfícies superiores, assim como nos cubos em PLA, não apresentou uma tendência diretamente proporcional à variação da espessura de camada, verificando-se uma maior rugosidade para a espessura de camada de 0,20 mm, seguindo-se a espessura de camada de 0,30 mm e, por último, de 0,10 mm.

Quanto à influência no rigor dimensional, a partir do cálculo dos volumes dos cubos medidos, constatou-se uma retração em todos testes, algo esperado, devido à retração térmica do material. Os valores das retrações foram de 1,20%, 0,77% e 1,20%, respetivamente para as espessuras de camada 0,30 mm, 0,20 mm e 0,10 mm.

Os gráficos das rugosidades das superfícies laterais e superiores dos cubos de diferentes espessuras de camada em ASA são muito idênticos aos gráficos obtidos dos cubos em PLA. Na Figura A 32 nota-se uma redução da amplitude da rugosidade ao longo da diminuição da espessura de camada e, além disso, observa-se uma maior uniformidade das amplitudes para uma maior espessura de camada.

### 6.4.3 Cubos em PETG

Como era expectável, observou-se que, quanto menor a espessura de camada, menor é a rugosidade nas superfícies laterais. A redução da rugosidade Ra e Rz nestas superfícies, para os cubos de espessura de camada de 0,20 mm em relação aos de 0,30 mm, foi de 32,16% e 27,84% e, para os cubos de espessura de camada 0,10 mm, foi de 59,94% e 49,46%, respetivamente.

Tal como para os outros materiais, constatou-se uma maior rugosidade nas superfícies superiores para a espessura de camada de 0,20 mm, seguindo-se a espessura de camada 0,30 mm e, por último, de 0,10 mm.

Após o cálculo dos volumes dos cubos medidos, constatou-se uma retração em todos testes. Os valores das retrações foram de 0,30%, 0,03% e 0,40%, respetivamente para as espessuras de camada 0,30, 0,20 e 0,10 mm.

A partir dos gráficos das rugosidades das superfícies laterais e superiores obtidos (Figura A 33), verificou-se, mais uma vez, uma diminuição da amplitude da rugosidade ao longo da diminuição da espessura de camada e que, com o aumento da espessura de camada ocorre uma maior uniformidade das amplitudes.

### 6.5 Cubos de Rugosidades com “Ironing”

Com a utilização desta opção em cubos com espessuras de camada de 0,20 mm, obteve-se uma menor rugosidade na superfície superior do cubo, quando comparada com a rugosidade da impressão do mesmo ficheiro STL sem a utilização desta opção. A redução da rugosidade foi de 46,42% em Ra e 46,17% em Rz.

Na Figura 68 pode-se observar um dos gráficos da rugosidade da superfície superior de um dos cubos com a opção “Ironing”. Neste gráfico, verifica-se que a rugosidade é bastante menor quando comparado com o gráfico dos cubos de rugosidades de espessura de camada 0,20 mm, notando-se menores declives e uma maior uniformização da amplitude dos cordões. Além disso, também se pode constatar que o número de vales e de picos é superior nos cubos com “Ironing”, porém com menores amplitudes.

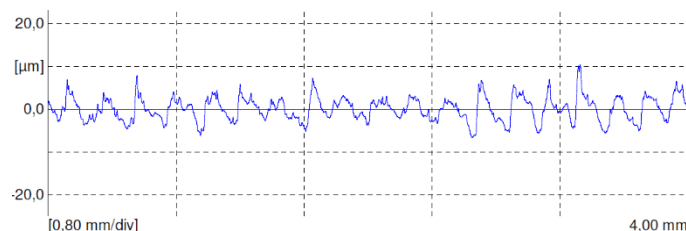


Figura 68 – Perfil de rugosidade da superfície superior de uma peça fabricada com a opção “Ironing”

## 6.6 Lixagem

Após a lixagem dos cubos em PLA, ASA e PETG e posteriores medições das rugosidades, estes foram observados e analisados de modo a entender o efeito da utilização de cada *grit*. A primeira conclusão retirada e inerente a todos os tipos de cubos, é que esta técnica de pós-processamento manual é uma técnica que exige tempo e a sua qualidade depende do operador.

### 6.6.1 Cubos em PLA

Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que, com esta técnica é possível garantir uma grande redução da rugosidade, com reduções de 98,28% e 97%, de Ra e Rz, respetivamente, para o teste em que se utilizaram as *grits* 220, 400, 800, 1200 e 2000.

Na Figura 69, estão representados os gráficos de perfil de rugosidades das superfícies lixadas. Através destes, é possível verificar a redução da rugosidade e a uniformização dos perfis ao longo do incremento das *grits*.

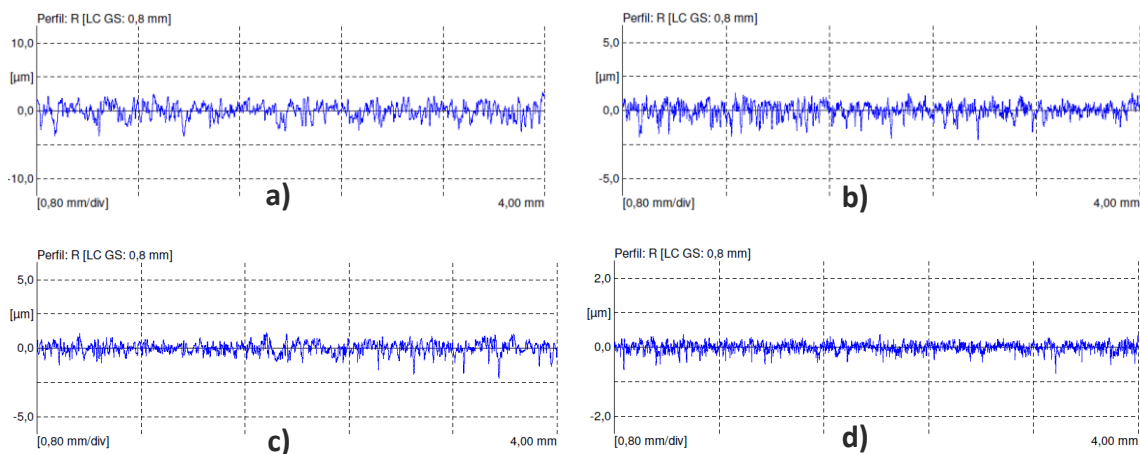


Figura 69 - Perfis de rugosidades dos cubos de PLA: a) Superfície lixada com *grits* 220 e 400. b) Superfície lixada com *grits* 220, 400 e 800. c) Superfície lixada com *grits* de 220, 400, 800 e 1200. d) Superfície lixada com *grits* 220, 400, 800, 1200 e 2000.

Utilizando as lixas de *grit* 220, 400, 800, 1200 e 2000, confere-se um acabamento superficial apelativo, garantindo uma superfície suave, com baixa rugosidade, brilhante e uniforme.

### 6.6.2 Cubos em ASA

Assim como nos cubos em PLA, com a aplicação desta técnica nos cubos em ASA obtiveram-se reduções máximas de 98,62% e 97,51%, de Ra e Rz, respetivamente. Com a utilização das lixas de *grit* 220, 400, 800, 1200 e 2000, obteve-se um acabamento semelhante aos cubos de PLA. Os gráficos dos perfis de rugosidade obtidos (Figura A 37) são, mais uma vez, semelhantes aos gráficos obtidos dos cubos em PLA que também foram lixados. Assim sendo, verifica-se uma diminuição da rugosidade e uma uniformização dos perfis ao longo do incremento das *grits*.

### 6.6.3 Cubos em PETG

Após a análise dos valores das rugosidades obtidas e respetivos gráficos de perfis de rugosidade (Figura A 38), verifica-se uma grande redução da rugosidade, conseguindo-se reduções de 98,97% e 98,04%, de Ra e Rz, respetivamente. Além disso, tal como para os outros materiais constata-se uma redução da rugosidade ao longo do incremento das *grits*, tal como uma uniformização dos perfis.

O acabamento superficial utilizando as lixas de *grit* 220, 400, 800, 1200 e 2000, tornou-se apelativo, garantindo uma superfície suave, com baixa rugosidade, brilhante e uniforme.

## 6.7 Sandblasting

A primeira observação a todos os tipos de materiais é que a utilização desta técnica conferiu uma redução da rugosidade e um aspeto *mate*, tanto nas superfícies superiores como nas laterais.

### 6.7.1 Cubos em PLA

Após a medição das superfícies constatou-se uma maior diminuição da rugosidade nas superfícies laterais, obtendo uma redução de 82,10% e 76,32%, de Ra e Rz, respetivamente. Quanto às superfícies superiores foi possível uma redução de 50,73% para Ra e 45,99% para Rz.

Na Figura 70 pode-se observar os perfis de rugosidade antes e após este pós-processamento. A partir destes gráficos é possível verificar a diminuição da rugosidade em ambas as superfícies, sendo que na superfície lateral observa-se uma redução da amplitude mais acentuada do que na superfície superior, modificando totalmente o perfil inicial. Para além disso, também se pode verificar uma semelhança nos perfis de rugosidades de ambas as superfícies após o *sandblasting*.

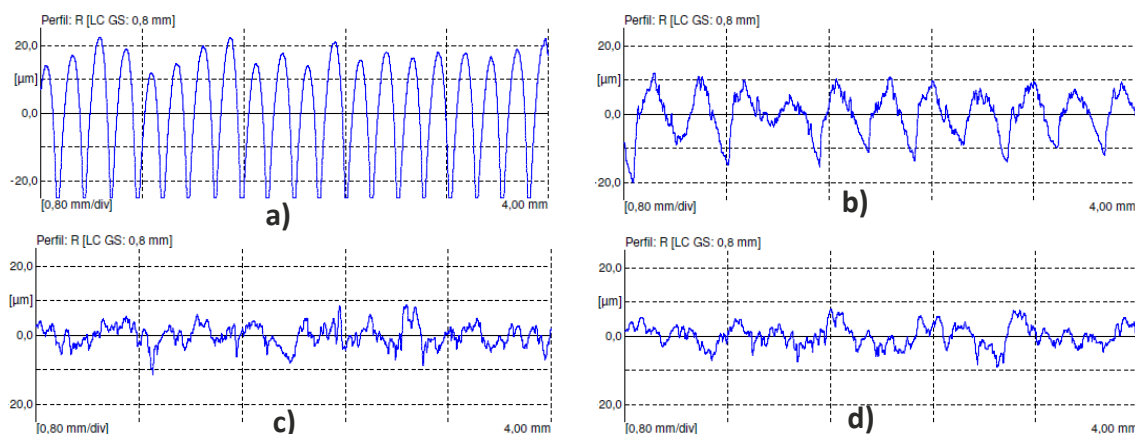


Figura 70 – Perfis de rugosidade dos cubos de PLA antes e após *sandblasting*: a) Superfície lateral antes de *sandblasting*. b) Superfície superior antes do pós-processamento. c) Superfície lateral após *sandblasting*. d) Superfície superior após *sandblasting*

### 6.7.2 Cubos em ASA

A aplicação desta técnica de pós-processamento, resultou numa redução de Ra e Rz em 80,59% e 76,26%, nas superfícies laterais e de 60,34% de Ra e 54,73% nas superfícies superiores.

Em anexo (Figura A 41) é possível observar os gráficos dos perfis de rugosidade dos cubos após a aplicação desta técnica. Nestes gráficos verifica-se uma diminuição da rugosidade em ambas as superfícies, sendo que na superfície lateral observa-se uma redução da amplitude mais acentuada do que na superfície superior, modificando por completo o perfil inicial.

### 6.7.3 Cubos em PETG

Tal como nos materiais anteriormente representados, constatou-se que as superfícies com uma maior redução da rugosidade foram as laterais, obtendo-se uma redução de 72,53% e 68,33%, de Ra e Rz, respetivamente. Quanto às superfícies superiores foi possível uma redução de 47,22% de Ra e 51,78% de Rz.

A partir dos gráficos dos perfis de rugosidade dos cubos em PETG, presentes na Figura A 42, observa-se uma diminuição da rugosidade em ambas as superfícies, com uma redução da amplitude mais acentuada na superfície lateral do que na superfície superior, alterando totalmente o perfil inicial.

## 6.8 Dipping

Após ser aplicada esta técnica de pós-processamento, foram efetuadas novas medições das dimensões, das rugosidades e do peso dos cubos. De modo a medir as dimensões dos cubos, foi utilizado o paquímetro, medindo-se os lados e as alturas três vezes cada. Foram efetuadas cinco medições da rugosidade, com o rugosímetro, nas superfícies superiores e nas superfícies laterais. Quanto à medição dos pesos dos cubos após o *dipping*, esta foi feita 48 horas após aplicar esta técnica. Por sua vez, foi elaborada uma análise a esses dados e uma posterior inspeção visual das amostras de modo a entender reação dos materiais com os reagentes.

Com recurso à microscopia 3D, foi possível observar e analisar a topografia das superfícies superiores e laterais dos cubos sujeitos ao *dipping*. É importante referir que, a área da superfície lida foi de 2 x 2 [mm] com um *cut-off* de 0,25 mm, não sendo estes os valores mais indicados para uma leitura de valores exatos. Apesar disso, estas leituras servem apenas para ter uma noção do impacto do pós-processamento na topografia e na ondulação dos diferentes testes efetuados.

Devido à elevada amplitude de ondulação das superfícies superiores e laterais, não foi possível efetuar a leitura destas com o microscópio 3D. Porém, através de medições efetuadas por um rugosímetro, foi possível obter um gráfico 3D da topografia em bruto.

### 6.8.1 Cubos em PLA

Como foi referido anteriormente, os cubos de PLA foram sujeitos a um pós-processamento de imersão nos reagentes MEK, acetona e diclorometano.

- **Dipping PLA em MEK**

Na Tabela 23 estão representados todos os valores das variações das rugosidades para todos os testes realizados após o *dipping*. Como é possível observar, no Teste 3 ocorreu a maior redução de rugosidade de Ra e Rz foi de 87,36% e 86,78%, respetivamente. Neste teste foram efetuados três ciclos de 30 segundos, obtendo-se superfícies lisas e com ligeiras marcas de *reflow*.

O aumento do peso da peça após este pós-processamento, num valor máximo de 1,20%, indicou que ocorreu uma absorção de MEK pela peça.

- **Dipping PLA em Acetona**

A imersão de cubos de PLA em acetona afetou nitidamente as superfícies dos mesmos. Na Tabela 23, observa-se que a maior redução da rugosidade das superfícies dos cubos, em média, ocorreu nas amostras do Teste 5, conseguindo-se uma redução da rugosidade de Ra e Rz de 89,65% e 91,57%, respetivamente. O tempo de imersão com melhores resultados foram de três ciclos de 30 segundos, obtendo-se superfícies lisas, com ligeiras marcas do *reflow* e um aspeto brilhante. É de referir que, um número mais elevado de ciclos traduz-se num deterioramento das superfícies.

Após uma análise à variação do peso das peças, observou-se que estas aumentaram o seu peso e, portanto, absorveram acetona durante este pós-processamento. Este aumento de peso atingiu com um valor máximo de 1,36%, sendo que quanto maior o tempo de imersão, maior foi o aumento do peso final.

- **Dipping PLA em Diclorometano**

Com esta técnica de pós-processamento foi possível obter reduções de rugosidades elevadas, conseguindo uma redução das rugosidades de Ra e Rz, de 94,95% e 92,71%, respetivamente. Estes valores são referentes ao Teste 8 da Tabela 32. Para este teste o tempo de imersão foi de 60 segundos, obtendo-se superfícies lisas, porém, com marcas esbranquiçadas. É de referir que, o Teste 9, no qual o tempo de imersão é superior as superfícies deterioraram-se.

Tal como nos cubos dos materiais anteriormente referidos, ocorreu um aumento do peso das amostras num valor máximo de 3,25% após o *dipping*, mostrando eu existiu absorção de diclorometano. Mais uma vez, quanto maior foi o tempo de imersão, maior foi o aumento do peso final.

### 6.8.1.1 Análise da topografia (microscopia 3D)

Devido à necessidade de reflexão de luz das superfícies para a obtenção de resultados através da microscopia 3D, as amostras sujeitas à imersão em MEK e diclorometano não foram analisadas.

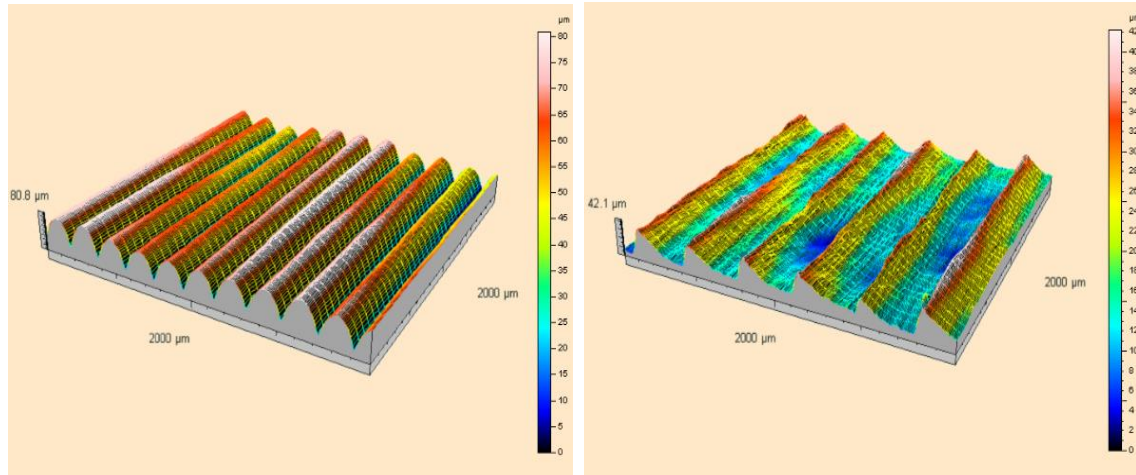


Figura 71 - a) Topografia 3D da superfície lateral (à esquerda) e superior (à direita) de um cubo em PLA sem pós-processamento

- **Dipping PLA em Acetona**

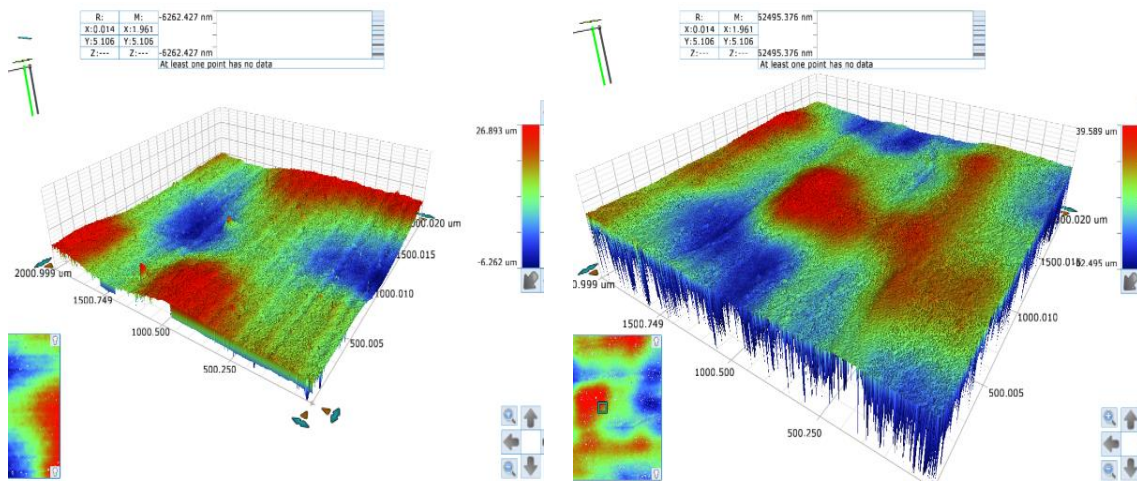


Figura 72 - Topografia 3D da superfície lateral (à esquerda) e superior (à direita) do Teste 4

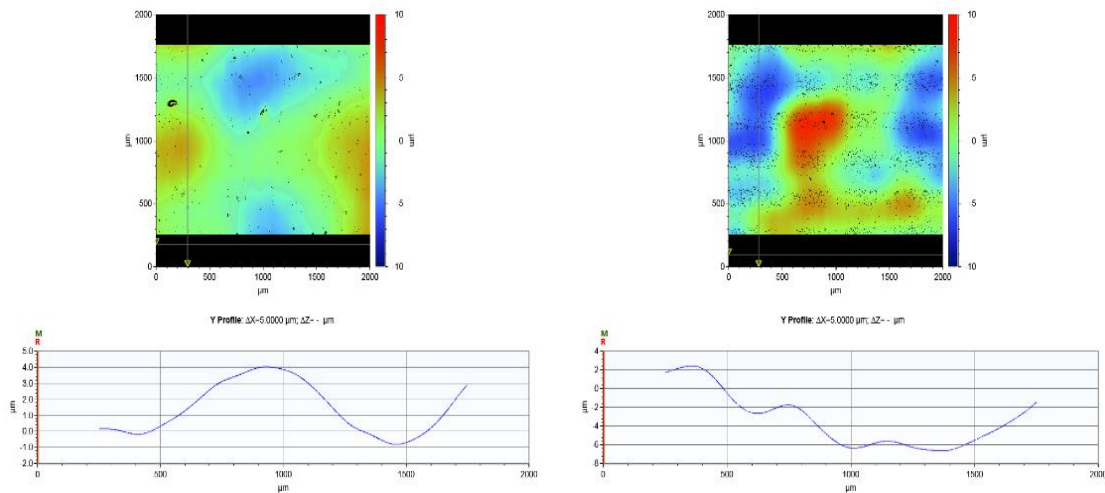


Figura 73 - Gráficos dos perfis e topografia 2D da ondulação da superfície lateral (à esquerda) e superior (à direita) do Teste 4

A partir dos gráficos 3D da topografia das superfícies laterais e superiores dos cubos do Teste 4, presentes nas Figuras 71-73, observa-se que a reação do PLA com a acetona causou um *reflow* que, por ação da gravidade e da energia superficial abateu o perfil em onda, preenchendo os vales existentes, resultando numa superfície com uma ondulação muito menor. Contudo, verificam-se diferenças entre as superfícies laterais e superiores, observando-se maiores amplitudes na topografia das últimas. Quanto à ondulação, com recurso aos gráficos do perfil e da topografia 2D da ondulação da Figura 73, observa-se uma maior ondulação na superfície superior com amplitudes de ondulação mais elevadas, obtendo-se um valor Wt de 8,034  $\mu\text{m}$  e 4,200  $\mu\text{m}$ , na superfície superior e lateral, respetivamente. Esta diferença entre as duas superfícies pode estar relacionada com os diferentes perfis inerentes a cada superfície, como também com o “escorrimento” não homogêneo do *reflow* em diferentes zonas da peça.

Quanto ao Teste 5, comparando as superfícies superiores com as do Teste 4, através dos gráficos 3D das topografias (Figura A 54, Anexo T) constata-se uma maior uniformização da superfície. Em relação à ondulação, analisando os gráficos respetivos, presentes na mesma figura, o Teste 5 revela uma menor amplitude de ondulação, obtendo um valor Wt inferior, de 4,902  $\mu\text{m}$ . Para as superfícies laterais obteve-se um valor Wt superior, de 7,657  $\mu\text{m}$ .

Para o Teste 6, comparando a superfície superior com os restantes testes, através do gráfico 3D da topografia (Figura A 55, Anexo T), esta aparenta uma topografia mais irregular. Com recurso ao gráfico do perfil e topografia 2D, presentes na mesma figura, observa-se uma menor amplitude da ondulação do que no Teste 4 e maior do que no Teste 5, obtendo-se um Wt de 5,181  $\mu\text{m}$ . Quanto às superfícies laterais, estas apresentam uma topografia mais uniforme do que no Teste 5, verificando-se apenas uma região com maior ondulação, porém, com uma amplitude considerável. A ondulação total obtida, Wt, foi de 7,360  $\mu\text{m}$ .

### 6.8.2 Cubos em ASA

- **Dipping ASA em MEK**

A imersão dos cubos de ASA em MEK, resultou em reduções bastante significativas na rugosidade superficial e no aspeto visual. O Teste 1, presente na Tabela 33, apresenta os melhores resultados, obtendo uma redução da rugosidade Ra e Rz, de 96,38% e 95,61%, respetivamente. Além disso, apresenta um ótimo acabamento superficial, eliminando praticamente o efeito escada e garantindo um aspeto brilhante. É importante salientar que, os testes com um tempo de imersão superior ao do Teste 1, sofreram degradação das superfícies.

Quanto à absorção de MEK pelos cubos, esta foi possível de analisar através do aumento de peso das amostras após o *dipping*, verificando-se um incremento máximo de 1,11%. Para um maior tempo de imersão observou-se um maior incremento do peso.

- **Dipping ASA em Acetona**

Utilizando a técnica de pós-processamento *dipping* em cubos de ASA em acetona, ocorreu a formação de um filme branco em todos os testes, porém, a rugosidade das superfícies sofreu uma grande redução. Para além disso, os cubos sujeitos a tempos de imersão maiores ou iguais a 60 segundos sofreram degradação das superfícies. Por esse motivo, o teste com melhores resultados obtidos, foi o Teste 4 (Tabela 33), em que foi estabelecido um tempo de imersão de 30 segundos. A redução das rugosidades Ra e Rz, foram de 94,34% e 94,27%, respetivamente.

Através do aumento de peso verificado após este pós-processamento, foi possível perceber que houve absorção de acetona pelos cubos. O maior incremento analisado foi de 0,70%, sendo que um maior tempo de imersão representou um maior aumento de peso.

- **Dipping ASA em Diclorometano**

A reação dos cubos de ASA em diclorometano, tal como na reação em acetona, originou um filme branco por toda a peça. Ainda assim, ocorreu uma redução bastante significativa das rugosidades superficiais. O Teste 7, apresentado na Tabela 33, provocou uma diminuição da rugosidade Ra e Rz, de 96,74% e 96,54%, obtendo os melhores resultados entre os testes de ASA em diclorometano.

Quanto à absorção de acetona pelos cubos, esta foi comprovada pelo incremento do peso num valor máximo de 1,51%.

### 6.8.2.1 Análise da topografia (microscopia 3D)

Com recurso à microscopia 3D, foi possível observar e analisar a topografia das superfícies laterais dos cubos sujeitos ao *dipping*. Devido à necessidade de reflexão de luz das superfícies para a obtenção de resultados através desta técnica, as amostras sujeitas aos reagentes acetona e diclorometano não foram analisadas devido à criação de um filme branco nas superfícies, que diminui a refletividade das mesmas.

Na Figura A 72 no Anexo T pode-se observar as topografias 3D da superfície superior e lateral de um cubo em ASA sem pós-processamento, de modo a entender o impacto desta técnica.

- **Dipping ASA em MEK**

Como referido anteriormente, a peças sujeitas à imersão com um tempo superior ao Teste 1, sofreram degradação da superfície, ocorrendo o aparecimento de poros. Posto isto, as superfícies do Teste 3 não foram analisadas. Nas Figura A 56-59 do Anexo T, estão representados os gráficos 3D da topografia das superfícies superiores e laterais dos Testes 1 e 2. Analisando estes gráficos verifica-se, em todas as amostras, a eliminação do efeito escada. Além disso, nas superfícies do Teste 2, observam-se, de forma evidente, os poros detetados na inspeção visual, que ocorrem devido ao tempo excessivo de exposição da peça ao reagente.

A partir dos gráficos do perfil e topografia 2D da ondulação da superfície superior do Teste 1 (Figura A 56)), pode-se observar uma superfície com ondulação evidente, mas com baixas amplitudes e bastante uniforme e com um Wt médio de 1,496  $\mu\text{m}$ . Quanto à superfície lateral (Figura A 58) nota-se uma ondulação menos uniforme com amplitudes mais expressivas, obtendo-se um valor médio de Wt de 2,560  $\mu\text{m}$ .

Como esperado, as superfícies das amostras do Teste 2 (Figura A 57 e 59), apresentaram maiores ondulações, notando-se de forma clara as depressões causadas pelos poros. Os valores médios obtidos de Wt foram de 2,492  $\mu\text{m}$  e 4,035  $\mu\text{m}$ , para as superfícies superior e laterais, respetivamente.

### 6.8.3 Cubos em PETG

- **Dipping PETG em MEK**

Esta técnica de pós-processamento originou uma grande diminuição da rugosidade e um aspeto brilhante dos cubos de PETG. Foi observado que a maior redução da rugosidade ocorreu no Teste 2 (Tabela 34), com um tempo de imersão de dois ciclos de 60 segundos, reduzindo a rugosidade Ra e Rz em 93,87% e 94,86%, respetivamente. É importante salientar que ocorreu um decréscimo da redução da rugosidade em comparação com o Teste 2, ao aplicar mais um ciclo, como sucedeu no Teste 3.

Visto que se observou um aumento máximo de 1,59% do peso após o *dipping*, constatou-se que ocorreu absorção de reagente pelas amostras.

- **Dipping PETG em Acetona**

A reação entre os cubos de PETG e a acetona provocou uma diminuição da rugosidade e um acabamento superficial brilhante em todos os testes realizados. A maior redução da rugosidade verificou-se nos cubos sujeitos aos parâmetros do Teste 5 (Tabela 34), com o Ra e o Rz a variarem em 91,39% e 91,75%, respetivamente. O tempo de imersão para este ensaio foi de dois ciclos de 120 segundos.

Mais uma vez, houve absorção do reagente pelas amostras, visto que o peso aumentou após este pós-processamento. O peso aumentou num valor máximo de 1,33%, em relação ao peso inicial.

- **Dipping PETG em Diclorometano**

A imersão dos cubos de PETG em diclorometano resultou numa redução da rugosidade, porém, também resultou no aparecimento de um filme esbranquiçado em todos os cubos testados. Nos Testes 8 e 9 (Tabela 34) verificou-se uma degradação das arestas superiores e, neste último teste, observou-se uma degradação das superfícies superiores. Posto isto, os melhores resultados foram obtidos nas amostras sujeitas aos parâmetros do Teste 7, ou seja, sujeitas a um tempo de imersão de 10 segundos. A redução da rugosidade Ra e Rz foi de 94,39% e 94,58%, respetivamente.

Em relação à absorção do diclorometano pela amostra, este foi comprovado pelo incremento do peso, num valor máximo de 6,58%.

Quanto à variação das dimensões dos cubos de PETG, verificou-se que após o dipping em diclorometano ocorreu uma diminuição das mesmas. No Teste 7 observou-se uma redução do volume dos cubos de 0,07%, no Teste 8 de 0,47% e, por último, o Teste 9 apresentou uma redução mais significativa de 1,27%. Estes valores confirmam que este é o reagente com maior impacto nos cubos de PETG.

### 6.8.3.1 *Análise da topografia (microscopia 3D)*

A criação de um filme esbranquiçado nas amostras dos Testes 7, 8 e 9, referentes à imersão dos cubos em diclorometano, tornou incapaz análise das superfícies destes, através da microscopia 3D, devido à baixa refletividade das mesmas.

Com o objetivo de entender o impacto desta técnica de pós-processamento nos cubos de PETG, na Figura A 73 do Anexo T estão representadas as topografias 3D das superfícies superior e lateral de um cubo neste material sem pós-processamento.

- **Dipping PETG em MEK**

A partir dos gráficos 3D da topografia das superfícies dos cubos, representados nas Figuras A 60-65 do Anexo T, verificou-se a influência do tempo de exposição na diminuição do perfil característico das superfícies laterais. Do Teste 1 para o Teste 2

esta diminuição do perfil é notória, já em relação ao Teste 3 ocorre uma certa estabilização. Quanto às superfícies superiores observa-se um “abatimento” dos perfis resultantes da deposição do material.

Com recurso aos gráficos dos perfis e das topografias da ondulação das superfícies laterais, no Teste 1 (Figura A 60) verifica-se uma não uniformidade da ondulação devido ao *reflow*, resultando num valor medio de Wt de 6,767  $\mu\text{m}$ . Quanto ao Teste 2, a ondulação característica do processo FDM é visível no gráfico do perfil de ondulação (Figura A 61), porém, possivelmente devido ao *reflow* não uniforme, notam-se amplitudes de ondulação maiores e uma topografia não homogénea, obtendo um valor médio de Wt de 7,173. No Teste 3 (Figura A 62), observa-se uma topografia idêntica à anterior, mas com menores amplitudes de ondulação, obtendo um valor Wt de 5,504  $\mu\text{m}$ .

Quanto às superfícies superiores, através da análise dos gráficos dos perfis e da topografia 2D da ondulação, observou-se uma diminuição da ondulação característica. O Teste 2 obteve o menor valor Wt, de 2,102  $\mu\text{m}$ , garantindo uma maior uniformidade do *reflow* do que nos Testes 1 e 3. Estes últimos obtiveram um valor médio de Wt, de 3,233  $\mu\text{m}$  e 3,844  $\mu\text{m}$ .

- **Dipping PETG em Acetona**

Nas Figuras A 66-71 do Anexo T, podem-se observar os gráficos 3D da topografia das superfícies dos cubos de PETG em acetona. A partir destes, verifica-se uma diminuição do perfil característico do processo de fabrico, devido ao *reflow* dos picos dos cordões que preenchem os vales entre eles. Esta observação foi mais evidente nas superfícies superiores.

Com a análise dos gráficos dos perfis e da topografia 2D da ondulação das superfícies laterais, observa-se a ondulação natural dos cordões e a ondulação devido ao *reflow* não uniforme em todos os testes, verificando-se um menor valor médio de Wt para o Teste 4, de 5,799  $\mu\text{m}$ . Quanto aos Testes 5 e 6, os valores de Wt foram de 7,682  $\mu\text{m}$  e 7,260  $\mu\text{m}$ , respetivamente.

Com recurso aos gráficos respetivos às superfícies superiores foi possível verificar que ocorreu uma ondulação bastante mais uniforme em relação às superfícies laterais. O Teste 5 apresenta o menor valor de Wt de 1,726  $\mu\text{m}$ , seguindo-se do Teste 6 com um valor de Wt de 2,043  $\mu\text{m}$  e, por último, o Teste 4 com um Wt de 3,362  $\mu\text{m}$ . A partir dos gráficos de perfil de ondulação observa-se a ondulação inerente aos cordões, mas com uma baixa amplitude e uniforme.

## 6.9 Vapour Smoothing

Com recurso à microscopia 3D, foi possível observar e analisar a topografia das superfícies laterais dos cubos sujeitos ao *vapour smoothing*. É importante referir que, a

área da superfície lida foi de 2 x 2 [mm] com um *cut-off* de 0,25 mm, não sendo estes os valores mais indicados para uma leitura de valores exatos. Apesar disso, esta análise permite ter uma noção do impacto do pós-processamento na topografia dos diferentes testes efetuados.

Visto não ter sido possível efetuar a leitura da superfície dos cubos sem pós-processamento com o microscópio 3D devido à elevada amplitude de ondulação das superfícies, através de medições efetuadas por um rugosímetro, foi possível obter um gráfico 3D da topografia em bruto.

Algo inerente a quase todos os testes efetuados através deste pós-processamento foi a ocorrência do *reflow* de material. Segundo Chohan, J.S., et al [100] os vapores criados através desta técnica diminuem a temperatura de transição vítrea dos materiais, “derretendo-os” de forma temporária e localizada. Através deste fenómeno, o material “escorre” devido à gravidade e à tensão superficial do material, preenchendo os vales e reduzindo os picos característicos deste processo de manufatura aditiva.

Antes e depois do pós-processamento, os rasgos dos cubos foram medidos, porém, verificou-se uma não uniformidade das medições, sendo que, para o mesmo teste, obtiveram-se variações tanto positivas como negativas. Razões para se obterem estes valores poderão ser a imprecisão da medição manual efetuada, a deformação das paredes dos rasgos e o *reflow* não uniforme. Nesta análise só se comentarão os resultados em que ocorreram resultados concordantes. Além das medições das dimensões dos rasgos, também se efetuou a medição do peso dos cubos antes e depois do *vapour smoothing*, sendo esta última medição realizada 48 horas após esta técnica de pós-processamento.

### 6.9.1 *Vapour Smoothing PLA*

- ***Vapour smoothing PLA em MEK***

Após a aplicação desta técnica utilizando MEK como reagente, observou-se uma menor influência na rugosidade quando comparado com a técnica de *dipping*. Contudo, o Teste 3 (Figura 58 e 59) obteve uma redução da rugosidade significativa, com uma rugosidade média Ra e Rz de 86,92% e 84,49%, respetivamente. É de salientar que, em todos os testes deste grupo de PLA em MEK, verifica-se um *reflow* não uniforme. O tempo de exposição deste teste foi de 4 ciclos de 15 segundos.

Com a pesagem dos cubos depois do pós-processamento, observou-se que ocorreu absorção do reagente, visto que se verificou um incremento do peso em todos os testes. Um maior tempo de exposição ao reagente resultou num maior aumento do peso, assim sendo, o Teste 3 obteve o maior valor de 0,93%.

- **Vapour smoothing PLA em Acetona**

A reação dos cubos PLA com os vapores de acetona proporcionou uma redução bastante expressiva da rugosidade e garantiu um aspeto brilhante das superfícies. Porém, verificou-se um *reflow* não uniforme a partir do terceiro ciclo de 120 segundos e uma degradação das superfícies angulares a partir do quarto ciclo. Assim sendo, considerou-se que o Teste 4 (Figura 58 e 59) obteve os melhores resultados, garantindo um *reflow* uniforme, superfícies brilhantes e uma redução da rugosidade Ra e Rz de 97,56% e 96,88%.

É importante referir que, em todas as amostras ocorreu uma ligeira deformação em algumas superfícies, o que possivelmente se poderá evitar através do incremento do número de perímetros das peças. Além desse defeito, constatou-se uma ligeira degradação das superfícies superiores.

Após a pesagem dos cubos constatou-se a absorção do reagente da mesma forma que ocorreu no PLA. Assim sendo, o maior incremento de peso ocorreu no Teste 6, com um valor de 2,54%.

- **Vapour smoothing PLA em Diclorometano**

Com a utilização desta técnica de pós-processamento foi possível uma redução da rugosidade acentuada e um aspeto brilhante das superfícies. A maior redução da rugosidade superficial verificou-se no Teste 8 (Figura 58 e 59), que com um tempo de tratamento superficial de 2 ciclos de 5 minutos obtiveram-se reduções de 98,45% e 98,09%, em Ra e Rz, respetivamente. Além disso, constatou-se um valor de Ra da superfície angular de 50° de 0,181  $\mu\text{m}$  e um Rz de 1,069  $\mu\text{m}$ , sendo o valor mais baixo entre todas as superfícies de cubos de PLA observadas quando sujeitas ao *vapour smoothing*. Contudo, é de salientar que neste teste ocorre uma ligeira degradação da superfície superior, apresentando pequenos poros. Para tempos de superiores ao tempo de exposição do Teste 8 nota-se uma degradação da superfície acentuada, não só na superfície superior como também nas superfícies angulares.

O Teste 7, também apresenta valores interessantes, observando-se uma redução da rugosidade Ra e Rz de 95,99% e 95,96%, respetivamente, e sem a ocorrência de poros na superfície superior.

Tal como se verificou para os reagentes anteriores, ocorreu um incremento do peso dos cubos, devido à absorção dos reagentes pelo material da peça. O maior incremento foi de 5,51% para o Teste 9.

#### 6.9.1.1.1 Análise da topografia (microscopia 3D)

Devido à necessidade de reflexão de luz das superfícies para a obtenção de resultados através desta técnica, as amostras sujeitas aos vapores de MEK não foram analisadas.

Na Figura 74 pode-se observar a topografia 3D em bruto da superfície lateral de um cubo de *vapour smoothing* em PLA.

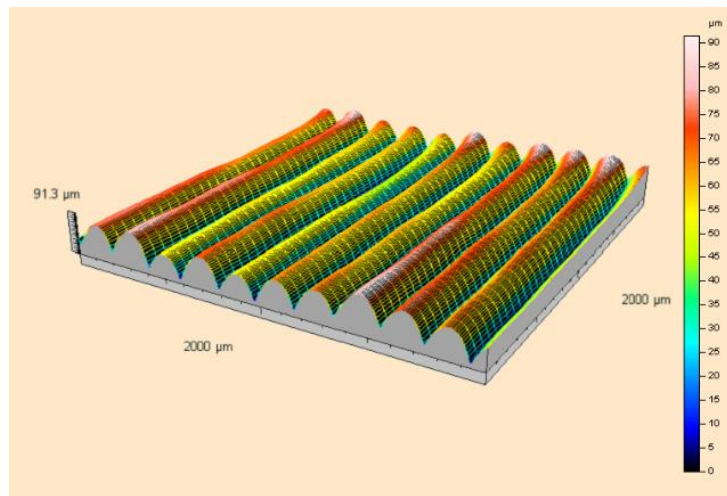


Figura 74 - Topografia 3D da superfície lateral de um cubo de *vapour smoothing* em PLA sem pós-processamento

- ***Vapour smoothing* PLA em Acetona**

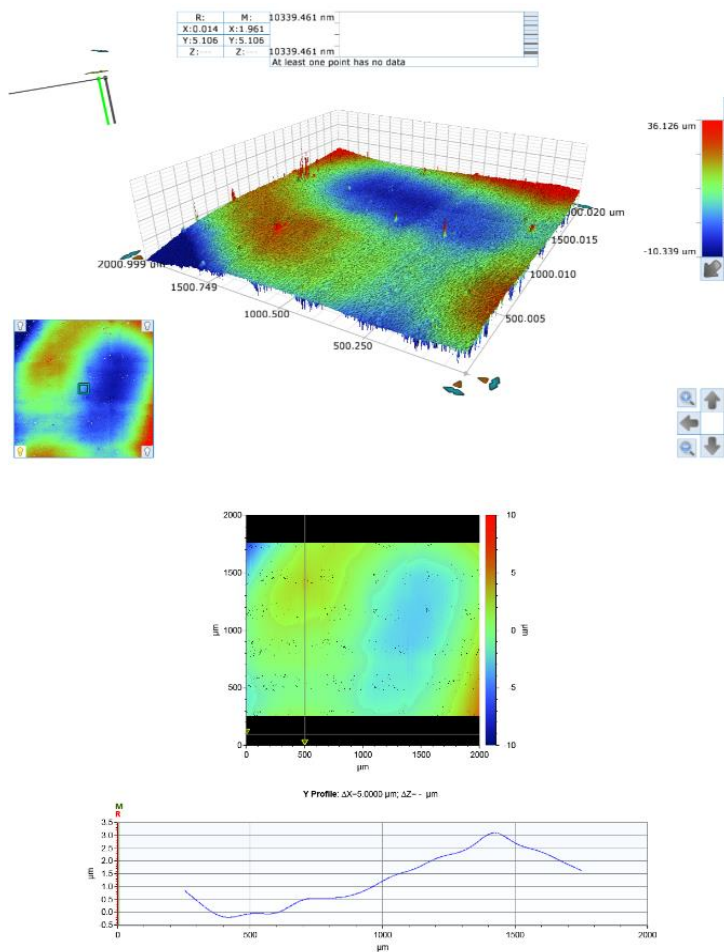


Figura 75 - Topografia 3D (acima) e gráficos de perfil e topografia 2D da ondulação (abaixo) do Teste 4

A partir dos gráficos 3D da topografia, representados na Figura 75 e nas Figuras A 83 e 84 do Anexo U, observa-se que a reação do PLA com os vapores de acetona causou um *reflow* que, por ação da gravidade e da energia superficial abateu o perfil em onda, preenchendo os vales existentes, resultando numa superfície com uma ondulação muito menor, em todos os testes.

Através do gráfico da ondulação e respetiva imagem 2D da superfície do Teste 4, presente na Figura 75, verifica-se uma redução da ondulação causada pelo processo de fabrico. Apesar disso, observa-se uma certa ondulação possivelmente derivada da não uniformidade do *reflow*. A ondulação média obtida, Wt, foi de 3,467  $\mu\text{m}$ .

Para o Teste 5, observou-se uma redução muito significativa, tal como no teste anterior. No gráfico do perfil da ondulação observa-se uma ondulação mais regular, com um Wt de 3,395  $\mu\text{m}$ .

Como já foi referido anteriormente, o Teste 6 apresentava um *reflow* pouco uniforme, resultando em manchas visíveis. Devido a estas manchas, a leitura da superfície foi mais complicada, originando falhas no gráfico da topografia, visíveis na Figura A 84, Anexo U. O gráfico do perfil da ondulação mostra uma menor uniformidade do perfil, apresentando mais ondulação e um Wt de 5,303  $\mu\text{m}$ .

- **Vapour smoothing PLA em Diclorometano**

A partir dos gráficos 3D da topografia, presentes nas Figuras A 85-87 do Anexo U, verificaram-se diferenças significativas no perfil bruto da topografia, de teste para teste. No gráfico do Teste 7 (Figura A 85)) a ondulação causada pelas diferentes camadas é evidente, notando-se também uma certa ondulação possivelmente derivada do *reflow* não uniforme. Quanto ao Teste 8, a ondulação originada pelos cordões é muito menos evidente e, mais uma vez, nota-se uma ondulação que provavelmente se deve ao *reflow* não uniforme. Por fim, no Teste 9, observa-se algumas ondulações características do processo de produção, porém, uma forma mais uniforme da superfície.

No gráfico 2D e do perfil da ondulação do Teste 7, observam-se as ondas características dos cordões e, além disso, a não uniformidade do *reflow* que se traduz em várias zonas com diferentes valores de ondulação. O Wt médio obtido foi de 5,061  $\mu\text{m}$ .

Quanto ao Teste 8, a partir do gráfico 2D e do perfil da ondulação, presente na Figura A 86, verifica-se uma ondulação acentuada no meio do gráfico, que como referido anteriormente, deu-se devido à não uniformidade do *reflow*. Tal como esperado, não se observam ondulações evidentes devido aos cordões. Neste teste, o valor médio de Wt foi de 5,798  $\mu\text{m}$ .

Por último, através do gráfico 2D e do perfil de ondulação obtidos do Teste 9 (Figura A 87), pode-se constatar uma maior uniformização da superfície, em relação aos testes anteriores. No perfil de ondulação obtido nota-se essa menor ondulação geral, porém

também se faz notar a ondulação provocada pelo processo aditivo. O valor médio do Wt foi de 1,997  $\mu\text{m}$ , bastante inferior em relação aos demais.

#### 6.9.1.2 *Vapour smoothing ASA*

- ***Vapour smoothing ASA com MEK***

A reação dos cubos de ASA aos vapores de MEK originou uma redução da rugosidade superficial, conferindo um aspeto brilhante a todas as amostras. Em todos os testes para este pós-processamento observou-se uma degradação das superfícies angulares de 40° e 50°, com o aparecimento de poros. No Teste 1 (Figura 60 e 61) as peças estiveram em contacto com os vapores durante um período de 6 minutos, garantindo uma variação da rugosidade, em média, de 98,68% e 98,63% em Ra e Rz, respetivamente. Quanto ao Teste 2, em que a peça esteve sujeita aos vapores de MEK durante 7,5 minutos, verificou-se, o aparecimento de poros nas superfícies angulares de 20° e 30°, ocorrendo uma redução não tão acentuada da rugosidade quanto a do Teste 1. Em relação ao Teste 3, a peça apresenta, em geral, um deterioramento generalizado, notando-se pequenos poros nas superfícies laterais e com maiores dimensões nas superfícies de 40° e 50°. O tempo de exposição aos vapores, deste último teste, foi de 9 minutos.

Após uma análise à variação do peso das peças, observou-se que estas aumentaram o seu peso e, portanto, absorveram MEK durante este pós-processamento. Este aumento de peso atingiu com um valor máximo de 2,12%, sendo que quanto maior o tempo de exposição, maior foi o aumento do peso final.

- ***Vapour smoothing ASA com Acetona***

Após a exposição dos cubos de ASA aos vapores de acetona, observou-se um efeito acentuado, tanto na rugosidade superficial como no aspeto visual. Tal como nos cubos de ASA em MEK, verificou-se, em todas as amostras, a degradação das superfícies angulares de 40° e 50°. Para além dessas superfícies, também as superfícies superiores se degradaram, com o aparecimento de poros, sendo que, com o incremento do tempo de exposição, maior foi a presença desse defeito. As superfícies laterais não apresentaram qualquer defeito visível. Quanto às superfícies de 20° e 30°, no Teste 4 obteve-se um bom acabamento sem defeitos visíveis, porém no Teste 5 e 6 ocorreu degradação da aresta comum às duas superfícies e verificou-se o aparecimento de poros na superfície de 30°. Posto isto, apesar do Teste 4 não apresentar os melhores valores de Ra, considerou-se ser o teste com melhores resultados em geral. Os valores de Ra não ficam muito abaixo dos melhores resultados, sendo que se obteve uma rugosidade média de Ra e Rz de 98,17% e 97,76%, respetivamente. O tempo de exposição das amostras deste teste, aos vapores de acetona, foi de 5 minutos.

Após a pesagem dos cubos constatou-se a absorção de acetona da mesma forma que ocorreu com o reagente MEK. Assim sendo, o maior incremento de peso ocorreu no Teste 6, com um valor de 2,35%.

- **Vapour smoothing ASA com Diclorometano**

A utilização desta técnica de pós-processamento com diclorometano resultou num acabamento superficial bastante apelativo e numa diminuição de rugosidades bastante significativa. Tal como se verificou no *dipping* com os reagentes anteriores, todas as amostras sofreram degradação das superfícies angulares de 40° e 50°, mas com um grau de severidade bastante inferior. Apesar disso, esse fenómeno não ocorreu em nenhuma das outras superfícies. Quanto à aresta de ligação das superfícies de 20° e 30°, esta apresentou uma certa ondulação, com menor impacto no Teste 7. Sendo que, a média das rugosidades Ra e Rz apresentam valores semelhantes, o Teste 7 foi considerado o ensaio com melhores resultados, garantindo uma redução da rugosidade Ra de 98,83% e Rz de 98,44%. O tempo de exposição dos cubos de *vapour smoothing* de ASA ao diclorometano foi de 5 minutos.

Quanto ao desvio dimensional medido através dos rasgos, observou-se uma concordância dos valores medidos, sendo que para todos os testes ocorreu uma diminuição das larguras dos rasgos. O maior desvio ocorreu para o Teste 9 com um valor de 0,13 mm.

Tal como nos cubos dos materiais anteriormente referidos, ocorreu um aumento do peso das amostras num valor máximo de 2,58% após o *vapour smoothing* mostrando que existiu absorção de diclorometano. Mais uma vez, quanto maior foi o tempo de exposição da peça ao reagente, maior foi o aumento do peso final.

#### 6.9.1.2.1 Análise da topografia (microscopia 3D)

Na Figura A 100 do Anexo U pode-se observar a topografia 3D da superfície lateral dos cubos de *vapour smoothing* em ASA antes do pós-processamento.

- **Vapour Smoothing ASA em MEK**

A partir dos gráficos 3D da topografia, das Figuras A 88-90 do Anexo U, observa-se que a reação do ASA com os vapores de MEK originou um *reflow* que preencheu os vales existentes, resultando numa superfície com uma ondulação muito menor, em todos os testes. Este *reflow* conseguiu abater o perfil em onda por ação da gravidade e da energia superficial. Apesar disso, é possível identificar nos três testes as marcas das camadas inerentes a este processo de fabrico, mas com uma menor evidência do que na peça sem pós-processamento.

Através do gráfico da ondulação e respetiva imagem 2D da superfície do Teste 1, presente na Figura A 88, constatou-se que estes pós-processamento reduziu de forma

muito significativa a da ondulação inerente ao processo aditivo. Porém, observa-se uma certa ondulação da peça que pode estar associada ao facto da não uniformidade do *reflow*. A ondulação média obtida, Wt, foi de 4,035  $\mu\text{m}$ .

Para o Teste 2, com recurso ao gráfico e imagem topográfica 2D da ondulação, da Figura A 89, observou-se uma redução muito significativa da ondulação devido aos cordões de cada camada, tal como no teste anterior. Contudo, observa-se uma ondulação menor relativamente ao Teste 1, obtendo um Wt médio de 2,907  $\mu\text{m}$ .

Quanto ao Teste 3, através do gráfico do perfil e imagem 2D da ondulação (Figura A 90), verifica-se uma ondulação idêntica à anterior, obtendo-se um valor Wt médio de 2,832  $\mu\text{m}$ .

- **Vapour Smoothing ASA em Acetona**

Com recurso ao gráfico 3D da topografia das superfícies laterais dos cubos sujeitos a vapores de acetona (Figura A 91-93, Anexo U), observa-se uma diminuição evidente da ondulação do perfil inerente ao processo de manufatura aditiva, ainda assim, é possível notar o início e o fim de cada camada em todos os testes realizados. Além disso, também se verifica o aparecimento de pequenos poros nas superfícies, provavelmente devido a parâmetros o tempo de exposição e a temperatura que acabam por degradar a superfície, e uma certa ondulação que pode dever-se ao *reflow* não uniforme.

Na Figura A 91, pode-se observar o gráfico do perfil e a topografia 2D da ondulação do Teste 4. A partir destes, notam-se as ligeiras ondulações derivadas do processo de fabrico e uma ondulação por toda a superfície, talvez devido ao *reflow*, traduzindo-se num valor médio Wt de 3,693  $\mu\text{m}$ .

Para o Teste 5, através da Figura A 92, constata-se que este tem o mesmo comportamento que o Teste 4, obtendo-se um valor de Wt ligeiramente inferior, de 3,413  $\mu\text{m}$ .

Por fim, observando o gráfico do perfil e a topografia 2D da ondulação do Teste 6, presentes na Figura A 93, nota-se uma maior presença da ondulação dos cordões, mas uma superfície mais uniforme. Neste teste, o valor médio da ondulação, Wt, obtido foi de 2,337  $\mu\text{m}$ .

- **Vapour Smoothing ASA em Diclorometano**

A reação do ASA aos vapores de diclorometano, resultou numa diminuição significativa da altura e da ondulação de cada camada, através do *reflow*, como se pode analisar nos gráficos 3D da topografia das superfícies laterais (Figura A 94-96). Além disso, tal como nos teste realizados com vapores de acetona, surgiram pequenas porosidades nas superfícies, possivelmente devido às mesmas razões constatadas anteriormente.

Os gráficos e topográficas dos Testes 7 e 9, apresentam uma ondulação idêntica, verificando-se uma ondulação ligeira diretamente ligada ao processo de fabrico e uma ondulação mais acentuada provavelmente resultante do *reflow*. Os valores de Wt obtidos foram de 2,948  $\mu\text{m}$  e 2,817  $\mu\text{m}$ , para o Teste 7 e 9 respetivamente.

Quanto ao Teste 8, com recurso ao gráfico do perfil e topografia 2D da superfície, observa-se uma ondulação com menor amplitude em relação aos outros testes, resultando num valor de Wt de 1,819  $\mu\text{m}$ .

### 6.9.1.3 Vapour Smoothing PETG

- **Vapour smoothing PETG em MEK**

A reação dos cubos de PETG aos vapores de MEK originou uma redução da rugosidade, mas com um aspeto visual não apelativo, observando-se um *reflow* não uniforme e com pouco efeito, e deformação das superfícies superiores, em todas as amostras. Considerou-se que o Teste 3 foi o que apresentou melhores resultados, no qual a ocorrência destes defeitos foi menor. Quanto aos valores das médias da diminuição das rugosidades obtidas, neste teste, estas foram de 68,16% e 71,03%, de Ra e Rz, respetivamente. O tempo de exposição destas peças foi de 25 minutos.

Após a pesagem das peças depois do pós-processamento verificou-se um incremento do peso. Posto isto, considerou-se que ocorreu absorção do reagente pelo material, obtendo um valor máximo de 0,93%. Além disso, observou-se que quanto maior o tempo de exposição maior é o aumento da peça.

- **Vapour smoothing PETG em Acetona**

A reação dos cubos de PETG aos vapores de acetona também não foi a desejada, como aconteceu na reação aos vapores de MEK. Tal como nos testes anteriores, o *reflow* ocorrido não foi uniforme, observando-se manchas em todas as superfícies. O aspeto visual de todas as amostras é semelhante, por isso, o melhor tempo de exposição considerado, foi o do Teste 5, por apresentar menores valores de rugosidade. Para esse tempo de exposição, 10 minutos, a redução da rugosidade foi de 65,37% e 68,41%, de Ra e Rz, respetivamente.

O desvio dimensional dos rasgos foi concordante, notando-se maiores desvios para maiores tempos de exposição e uma diminuição da largura dos rasgos. O maior desvio dimensional obtido foi de 0,45 mm para o Teste 6.

Com análise da variação do peso das amostras após o *vapour smoothing* constatou-se um aumento do peso, devido à absorção de acetona, tal como sucedeu nos testes com MEK. Posto isto, o maior incremento ocorreu no Teste 6, obtendo uma variação de 2,54%.

- **Vapour smoothing PETG em Diclorometano**

A exposição dos cubos de PETG aos vapores de diclorometano, originou uma redução da rugosidade superficial, conferindo um aspeto brilhante a todas as amostras. Como todos os testes são semelhantes em termos de aspeto visual, os melhores parâmetros deste pós-processamento foram os do Teste 8, no qual se obtiveram as reduções de rugosidade mais significativas. Os valores destas reduções foram de 97,73% e 97,43%, de Ra e Rz, respetivamente e o tempo de exposição destas amostras foi de 9 minutos. É importante referir que, em todas as peças, ocorreu uma perda de adesão entre os perímetros e o *infill* nas arestas comuns às superfícies angulares, possivelmente devido a tensões residuais após a aplicação deste pós-processamento.

Quanto ao desvio dimensional dos rasgos, pode-se dizer que este foi concordante, visto que ocorreu uma diminuição da largura em todos os rasgos. O maior desvio ocorreu para o Teste 9, com uma variação de 0,52 mm.

Tal como nos reagentes referidos anteriormente, constatou-se um aumento de peso dos das amostras. Este aumento deveu-se à absorção de diclorometano pela peça. Um maior o tempo de exposição aos vapores traduz-se num maior aumento de peso da peça. O Teste 9 apresentou um valor máximo de 5,51%.

#### 6.9.1.3.1 Análise da topografia (microscopia 3D)

Os testes realizados nas amostras de PETG com vapores de MEK e acetona, não foram sujeitos à leitura pois, para além de não apresentarem tanta refletividade das superfícies laterais e tornar o processo de leitura mais difícil, considerou-se que o acabamento superficial obtido não apresentava qualidade suficiente. Na Figura A 101 do Anexo U está representada a superfície lateral de um cubo em PETG antes do *vapour smoothing*.

- **Vapour Smoothing PETG em Diclorometano**

Com recurso aos gráficos 3D das topografias das superfícies laterais dos cubos sujeitos aos vapores de diclorometano (Figura A 97-99, Anexo U), observou-se uma diminuição evidente da ondulação do perfil inerente ao processo de manufatura aditiva. Para além disso, verificou-se uma ondulação geral da superfície possivelmente devido ao *reflow* não uniforme, originado pela técnica de pós-processamento.

Na Figura A 97, pode-se observar o gráfico do perfil e a topografia 2D da ondulação do Teste 7. A partir destes, identificam-se ligeiras ondulações derivadas do processo de fabrico e uma ondulação não uniforme por toda a superfície, provavelmente devido ao *reflow*, traduzindo-se num valor médio Wt de 3,188  $\mu\text{m}$ .

Para o Teste 9, através da Figura A 99, verifica-se um comportamento idêntico ao Teste 7, mais com maiores amplitudes da ondulação, obtendo-se um valor de Wt de 3,880  $\mu\text{m}$ .

Por fim, observando o gráfico do perfil e a topografia 2D da ondulação, presentes na Figura A 98), referente ao Teste 8, nota-se uma superfície mais uniforme, com menores amplitudes de ondulação resultando num o valor médio da ondulação,  $Wt$  de  $1,815 \mu\text{m}$ .

### *6.10 Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de carbono*

Tal como na análise dos provetes de tração em ASA e PC, foi aplicado o método Taguchi nos ensaios dos provetes em *Onyx* e *PETG Carbon*. Através deste método, é possível obter um rácio S/N que permite a análise de variação de resultados, indicando o melhor conjunto de parâmetros para cada propriedade.

Além deste método, também foi efetuada uma análise da variância (ANOVA) os resultados obtidos. Com esta análise conseguiu-se identificar a importância de cada parâmetro nas características a estudar.

É importante salientar que nos Anexos V e X, tanto o método Taguchi como a ANOVA, estão descritos de forma mais detalhada, para os dois materiais.

#### *6.10.1 Onyx*

##### *6.10.1.1 Método Taguchi*

Com recurso ao método Taguchi, através dos resultados obtidos dos ensaios de tração dos provetes de *Onyx* obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A espessura de camada não apresenta um impacto significativo nas propriedades módulo de elasticidade e tensão máxima. Quanto à orientação de construção, este parâmetro já apresenta uma tendência significativa;
- Os melhores resultados obtidos para as propriedades anteriores foram para uma espessura de camada de  $0,10 \text{ mm}$  e a orientação de construção vertical;
- Ambos os parâmetros indicaram um sentido oposto no alongamento, quando comparados com os anteriores. Apresentando melhores valores para espessuras de camada de  $0,20 \text{ mm}$  e orientação de construção horizontal.

Na Tabela 47 estão representados os melhores valores dos parâmetros para cada propriedade mecânica estudada.

Tabela 47 - Melhores parâmetros de produção para os provetes de tração em *Onyx*, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Orientação de Construção |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Tensão Máxima          | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Alongamento            | 0,20 mm             | Horizontal               |

### 6.10.1.2 Análise de Variância (ANOVA)

A partir da análise da variância observou-se que o parâmetro com maior influência em todas as propriedades mecânicas foi a orientação de construção (Tabela 48).

Tabela 48 - Parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas dos provetes de tração em *Onyx*, pela ANOVA

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Orientação de construção      |
| Tensão Máxima          | Orientação de construção      |
| Alongamento            | Orientação de construção      |

Uma possível razão para a significância da orientação de construção, principalmente nas propriedades módulo de elasticidade e tensão máxima, pode-se dever ao facto de os provetes produzidos na vertical terem mais camadas com perímetros com o mesmo sentido aos esforços de tração, traduzindo-se num aumento destas duas propriedades.

### 6.10.2 PETG Carbon

#### 6.10.2.1 Método Taguchi

Utilizando o método Taguchi, com os resultados obtidos dos ensaios de tração dos provetes em *Onyx*, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Tanto para o módulo de elasticidade como para a tensão máxima, a espessura de camada não apresenta uma tendência muito significativa. Quanto à orientação, esta apresenta uma linha de tendência bastante significativa;
- Os melhores resultados obtidos para o módulo de elasticidade e tensão máxima foram a espessura de camada de 0,10 mm e a orientação de construção vertical;
- Para o alongamento, tanto a espessura de camada como a orientação de construção apresentam uma linha de tendência representativa.

Na Tabela 49, estão apresentados os melhores resultados para cada propriedade mecânica analisada.

Tabela 49 - Melhores parâmetros de impressão para os provetes de tração em *PETG Carbon*, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Orientação de Construção |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Tensão Máxima          | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Alongamento            | 0,20 mm             | Horizontal               |

### 6.10.2.2 Análise da Variância (ANOVA)

Na Tabela 50, pode-se observar os parâmetros com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, pela análise da variância.

Tabela 50 - Parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas dos provetes de tração em *PETG Carbon*, pela ANOVA

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Orientação de construção      |
| Tensão Máxima          | Orientação de construção      |
| Alongamento            | Espessura de camada           |

Tal como sucedeu para os provetes em *Onyx*, o módulo de elasticidade e a tensão máxima são muito influenciados pelo parâmetro orientação de construção, apresentando um incremento dos resultados com a orientação vertical. A possível justificação para este comportamento do material é a mesma do que a apresentada para o *Onyx*.

### 6.11 Provetes compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de tração dos provetes de *Onyx* reforçados com fibras contínuas de carbono, foi realizada uma análise da influência do volume de fibras contínuas, da direção da fibra e dos tipos de deposição de fibra, concêntrico ou isotrópico.

Na Tabela 51 estão representados os valores do volume de fibra e da matriz para cada teste realizado.

Tabela 51 - Volumes de matriz e de fibras contínuas de carbono nos provetes compósitos

| Teste | Volume da Matriz ( <i>Onyx</i> )<br>[cm <sup>3</sup> ] | Volume de Fibra Contínua<br>de Carbono [cm <sup>3</sup> ] |
|-------|--|---|
| 1     | 6,03   | 1,46  |
| 2     | 4,67   | 2,86  |
| 3     | 6,21   | 1,21  |
| 4     | 4,90   | 2,41  |
| 5     | 3,98   | 3,61  |

Pela análise das Tabelas 38 e 51, verifica-se que o volume de fibras representa uma grande influência nas propriedades mecânicas, sendo que, para os provetes de tipo de reforço concêntrico, um incremento de 2 perímetros, ou seja, um incremento de 96% de volume de fibras, resultou num aumento da tensão máxima de, aproximadamente, 86% e um aumento do módulo de elasticidade de 93%. Para o alongamento, verificou-se um aumento de cerca de 31%. Quanto aos provetes com o tipo de reforço isotrópico, com *raster angle* das fibras de 0°, 45°, 90° e 135° e dois perímetros de fibra, com o aumento do número de camadas e, conseqüentemente, do volume de fibras, observou-se um aumento de aproximadamente 65% da tensão máxima. Para além disso, verificou-se que o módulo de elasticidade aumentou cerca de 82% e o alongamento foi de 24%, para um incremento de 99% volume de fibras. O Teste 5, teve um aumento de volume de fibras de 50% em relação ao Teste 4, traduzindo-se numa melhoria das suas propriedades mecânicas, apresentando um incremento de 52% da tensão máxima, 51% do módulo de elasticidade e 30% do alongamento.

É possível notar que, o tipo de reforço, concêntrico ou isotrópico, apresenta uma grande influência, principalmente na tensão máxima e no módulo de elasticidade, sendo que, o resultado com melhores propriedades mecânicas foi o Teste 2, apesar deste apresentar um menor volume de fibras. Posto isto, a razão para este fenómeno deve-se à direção das fibras contínuas, visto que, no tipo de reforço concêntrico a maior parte das fibras depositadas têm o mesmo sentido que as forças que foram aplicadas no ensaio de tração.

Nos primeiros ensaios de tração realizados, observou-se que a fratura dos provetes ocorreu imediatamente a seguir à zona das amarras. Assim, foram colocados *tabs* de modo a tentar reduzir a tensão nessa zona e de forma que não ocorresse escorregamento. Contudo, o problema persistiu, verificando-se a quebra dos provetes imediatamente a seguir à zona das amarras. Possíveis razões para a ocorrência deste defeito são, a não garantia da colocação correta do provete na máquina de tração, o aperto nas amarras em demasia, ou a não garantia da transmissão das tensões aplicadas na matriz às fibras de carbono de forma homogénea, resultando na quebra na zona de maior tensão.

Por último, constatou-se que, apesar dos provetes em *Onyx* terem uma geometria e parâmetros de produção diferentes, a adição de fibras representa um grande impacto nas propriedades mecânicas, principalmente na tensão máxima, obtendo-se um aumento de 563% em relação aos melhores valores resultantes dos ensaios dos provetes em *Onyx* não reforçados com fibras contínuas.

# CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

7.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS



## 7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

A presente dissertação consistiu em estudar e analisar diversos parâmetros de impressão FDM e o pós-processamento de peças produzidas através desta tecnologia.

Em suma, verificou-se que todos os objetivos deste trabalho foram cumpridos, desde o estudo da influência parâmetros de produção no tempo de produção, no acabamento superficial e nas propriedades mecânicas, em polímeros virgens e compósitos, ao estudo de técnicas de pós-processamento em diversos materiais a implementar na empresa. Na Tabela 52 estão apresentadas as principais conclusões retiradas para cada objetivo estipulado.

Tabela 52 - Principais conclusões obtidas para cada objetivo

| Objetivos   | Resultados Obtidos  |
|---|---|
|   | A partir das capas de telemóvel, produzidas em TPU, constatou-se que a velocidade de impressão tem bastante influência na qualidade final da peça produzida. O aumento da velocidade, em relação à velocidade standard, refletiu-se numa diminuição do tempo de produção, porém, também na diminuição da qualidade superficial da capa de telemóvel   |
| Estudo da influência de parâmetros de produção no tempo de produção, no acabamento superficial e na resistência mecânica. | Com a produção dos <i>fork grippers</i> em ASA e PC e posterior análise, observou-se que: o aumento da espessura de camada se traduz numa maior rugosidade Ra e Rz, nas superfícies laterais; a percentagem de <i>infill</i> não apresenta uma tendência significativa nas rugosidades Ra e Rz das superfícies superiores e laterais; o desvio dimensional apresenta uma tendência de diminuição para menores percentagens de <i>infill</i> ; a espessura de camada apresenta a maior influência na rugosidade. |
|   | Através dos ensaios dos provetes de tração em ASA e PC verificaram-se as seguintes conclusões: nos provetes   |

| Objetivos  | Resultados Obtidos   |
|--|--|
| <p>Estudo de técnicas de pós-processamento, tanto físicas como químicas, de vários tipos de materiais.</p> | <p>em ASA, o módulo de elasticidade apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão, ocorrendo em sentido inverso para os provetes em PC; o alongamento apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão nos provetes em ASA; a espessura de camada foi o parâmetro com maior influência no módulo de elasticidade e no alongamento; e, por fim, o <i>raster angle</i> apresenta maior impacto na tensão máxima, em ambos os materiais.</p> <p>A lixagem, através da utilização das <i>grits</i> 220, 400, 800, 1200 e 2000, garantiu uma redução muito significativa da rugosidade e um acabamento superficial suave, brilhante e uniforme, em todos os materiais. A maior redução de rugosidade deu-se para os cubos de PETG com reduções de Ra de, aproximadamente, 99%.</p> <p>O <i>sandblasting</i> conferiu uma redução da rugosidade e um aspeto <i>mate</i>, tanto nas superfícies superiores como nas laterais, em todos os materiais. As maiores reduções de Ra foram de 82% e de 60% para as superfícies laterais e superiores, respetivamente.</p> <p>Quanto ao <i>dipping</i>, nos cubos de PLA ocorreram diferentes efeitos para cada reagente utilizado. Algo inerente a todos testes foi a redução acentuada da rugosidade em todas as superfícies analisadas. A maior redução da rugosidade observou-se nos cubos imersos em diclorometano, obtendo-se um decréscimo de, aproximadamente, 95% e 93% de Ra e Rz respetivamente. O tempo de imersão em diclorometano foi de 60 segundos.</p> <p>Quanto aos cubos de ASA, a maior redução de rugosidades, tal como nos cubos em PLA, ocorreu com a imersão em diclorometano. Os valores obtidos desta redução foram de cerca de 97%, tanto para Ra como para Rz. Estas amostras estiveram em contacto com o reagente durante 20 segundos.</p> <p>Para o PETG, observou-se que a diminuição da rugosidade era muito semelhante nas reações com</p> |

| Objetivos   | Resultados Obtidos   |
|---|--|
|   | <p>MEK e com diclorometano. Posto isto, considerou-se que o melhor resultado obtido foi com o MEK, visto que se obteve um aspeto visual mais atrativo. A redução de rugosidade Ra e Rz foi de, aproximadamente, 94% e de 95% respetivamente. Quanto ao tempo de imersão das amostras, este foi de 2 ciclos de 60 segundos.</p> <p>Por último, com o pós-processamento <i>vapour smoothing</i> no PLA, verificou-se que o reagente que garantiu maior redução de rugosidade foi a acetona, resultando num decréscimo da aproximadamente, 98% e 97% de Ra e Rz, respetivamente. O tempo de exposição para a obtenção destes resultados foi de 2 ciclos de 120 segundos.</p> <p>Todos os reagentes tiveram um grande impacto na redução da rugosidade dos cubos em ASA. O MEK e o diclorometano apresentaram valores semelhantes em relação a essa redução. Assim, foi escolhido como melhor resultado a reação do ASA com o MEK, por apresentar um melhor acabamento superficial e uma diminuição da rugosidade de quase 99% para Ra e Rz. Este resultado deriva de um tempo de exposição de 6 minutos.</p> <p>A reação do PETG aos vapores de MEK e acetona não foi significativa. Os melhores resultados obtiveram-se com o diclorometano, garantindo um aspeto visual brilhante e uma redução da rugosidade, Ra e Rz, de 97,73% e de 97,43%, respetivamente. Quanto ao tempo de exposição, este foi de 9 minutos.</p> |
| <p>Estudo da influência de parâmetros de produção de peças produzidas com materiais compósitos de matriz polimérica (nylon ou PETG) reforçados com fibras curtas de carbono e/ou fibras contínuas de carbono.</p> | <p>A partir dos ensaios dos provetes de <i>Onyx</i> e PETG Carbon observou-se que o parâmetro com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima foi a orientação de construção, obtendo-se os melhores resultados com a orientação vertical nas primeiras duas propriedades mecânicas. A possível razão para este acontecimento deve-se ao facto de que esta orientação promove um maior número de camadas em que os cordões depositados têm o mesmo sentido que os esforços de tração aplicados, garantindo, assim, valores mais elevados do módulo de elasticidade e da tensão</p>   |

---

| Objetivos | Resultados Obtidos  |
|-----------|---|
|           | <p>máxima.</p> <p>Com estes ensaios dos provetes reforçados com fibras contínuas de carbono, foi possível entender que o volume de fibras representa um grande impacto nas propriedades mecânicas, sendo que, com o aumento deste parâmetro, obtiveram-se maiores valores dos módulos de elasticidade e de tensões máximas. Porém, outro parâmetro muito influente é o tipo de reforço e a direção das fibras, visto que o maior módulo de elasticidade e tensão máxima resultaram dos provetes com o tipo de reforço concêntrico, não sendo estes os que continham um maior volume de fibras. Estes provetes garantiram um módulo de elasticidade de 28,73 GPa, uma tensão máxima de 379,36 MPa e um alongamento de 6,01%. Além disso, verificou-se um aumento da tensão máxima de 563% em relação ao melhor resultado dos provetes em <i>Onyx</i> sem adição de fibras contínuas.</p> |

---

## 7.2 Proposta de trabalhos futuros

O PC, devido às suas propriedades mecânicas, é um material de bastante procura a nível industrial, por isso, seria interessante para trabalhos futuros, um estudo mais aprofundado sobre a influência de parâmetros nas suas características. Além disso, também poderiam ser testados diferentes técnicas de pós-processamento neste material visto que, por vezes, são requeridas peças com bom acabamento superficial e baixas rugosidades, por parte dos clientes.

Apesar dos bons resultados obtidos neste trabalho, seria fundamental testar não só diferentes tempos de exposição do material ao reagente, como também, variar as temperaturas de operação e as concentrações dos reagentes utilizados, nos diferentes pós-processamentos. Para além disso, ao longo do trabalho, constatou-se a falta de estudos publicados sobre o pós-processamento de alguns dos materiais utilizados, como por exemplo, *dipping* de PLA em MEK, ou qualquer pós-processamento químico em PETG. Portanto, como trabalho futuro seria importante realizar uma investigação mais aprofundada acerca destes temas.

Por fim, neste trabalho os desvios dimensionais foram registados recorrendo a um aparelho manual, o que pode originar uma menor fiabilidade do processo. Assim, no futuro, estes testes poderiam ser repetidos utilizando um aparelho de medição automática como, por exemplo, uma *coordinate measuring machine* (CMM).

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 8 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Gardan, J., *Additive manufacturing technologies for polymer composites: State-of-the-art and future trends*, in *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*. 2020, Elsevier. p. 3-15.
2. Pelleg, J., *Additive and Traditionally Manufactured Components: A Comparative Analysis of Mechanical Properties - Chapter One - What is additive manufacturing?*, 2020: Additive Manufacturing Materia.
3. *ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
4. Redwood, B., F. Schffer, and B. Garret, *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*, 2017: 3D Hubs.
5. Dizon, J.R.C., A.H. Espera Jr, Q. Chen, and R.C. Advincula, *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Additive Manufacturing, 2018, **20**: p. 44-67.
6. Saptarshi, S.M. and C. Zhou, *Basics of 3D Printing: Engineering Aspects*, in *3D Printing in Orthopaedic Surgery*. 2019, Elsevier. p. 17-30.
7. Stansbury, J.W. and M.J. Idacavage, *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. Dental Materials, 2016, **32**(1): p. 54-64.
8. Ngo, T.D., 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, 2018, **143**: p. 172-196.
9. Attaran, M., *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons, 2017, **60**(5): p. 677-688.
10. Velu, R., F. Raspall, and S. Singamneni, *Chapter 8 - 3D printing technologies and composite materials for structural applications*, in *Green Composites for Automotive Applications*, G. Koronis and A. Silva, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 171-196.
11. Wohlers, T., I. Campbell, O. Diegel, J. Kowen, and T. Caffrey, *Wohlers Report 2017*. 2017: Fort Collins.
12. Wohlers, T., I. Campbell, O. Diegel, J. Kowen, and T. Caffrey, *Wohlers Report 2019*. 2019: Fort Collins.
13. AMFG, *The Additive Manufacturing Landscape 2019*. 2019.
14. Singh, T., S. Kumar, and S. Sehgal, *3D printing of engineering materials: A state of the art review*. Materials Today: Proceedings, 2020, **28**: p. 1927-1931.
15. Teixeira, O. and E. Atzeni, *Residual stresses and heat treatments of Inconel 718 parts manufactured via metal laser beam powder bed fusion: an overview*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, **113**: p. 1-24.
16. Mostafaei, A., A.M. Elliott, J.E. Barnes, F. Li, W. Tan, C.L. Cramer, P. Nandwana, and M. Chmielus, *Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, and challenges*. Progress in Materials Science, 2020: p. 100707.
17. Dutta, B., *Directed Energy Deposition (DED) Technology*, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2020, Elsevier.
18. Shahrubudin, N., T.C. Lee, and R. Ramlan, *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*. Procedia Manufacturing, 2019, **35**: p. 1286-1296.

19. Dilag, J., T. Chen, S. Li, and S.A. Bateman, *Design and direct additive manufacturing of three-dimensional surface micro-structures using material jetting technologies*. Additive Manufacturing, 2019, **27**: p. 167-174.
20. Tee, Y.L., P. Tran, M. Leary, P. Pille, and M. Brandt, *3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis*. Additive Manufacturing, 2020, **36**: p. 101558.
21. Singh, R., A. Gupta, O. Tripathi, S. Srivastava, B. Singh, A. Awasthi, S.K. Rajput, P. Sonia, P. Singhal, and K.K. Saxena, *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview*. Materials Today: Proceedings, 2020, **26**: p. 3058-3070.
22. Barros, R., F.J.G. Silva, R.M. Gouveia, A. Saboori, G. Marchese, S. Biamino, A. Salmi, and E. Atzeni, *Laser Powder Bed Fusion of Inconel 718: Residual Stress Analysis Before and After Heat Treatment*. Metals, 2019, **9**(12): p. 1290.
23. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker, *Powder bed fusion processes*, in *Additive Manufacturing Technologies*. 2015, Springer. p. 107-145.
24. Helfesrieder, N., A. Lechler, and A. Verl, *Method for generating manufacturable, topology-optimized parts for Laminated Layer Manufacturing*. Procedia CIRP, 2020, **93**: p. 38-43.
25. Khosravani, M.R. and T. Reinicke, *On the environmental impacts of 3D printing technology*. Applied Materials Today, 2020, **20**: p. 100689.
26. Daminabo, S.C., S. Goel, S.A. Grammatikos, H.Y. Nezhad, and V.K. Thakur, *Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems*. Materials Today Chemistry, 2020, **16**: p. 100248.
27. González-Henríquez, C.M., M.A. Sarabia-Vallejos, and J. Rodríguez-Hernández, *Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications*. Progress in Polymer Science, 2019, **94**: p. 57-116.
28. Kowsari, K., B. Zhang, S. Panjwani, Z. Chen, H. Hingorani, S. Akbari, N.X. Fang, and Q. Ge, *Photopolymer formulation to minimize feature size, surface roughness, and stair-stepping in digital light processing-based three-dimensional printing*. Additive Manufacturing, 2018, **24**: p. 627-638.
29. Ligon, S.C., R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, *Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing*. Chemical Reviews, 2017, **117**(15): p. 10212-10290.
30. Provaggi, E. and D.M. Kalaskar, *2 - 3D printing families: Laser, powder, nozzle based techniques*, in *3D Printing in Medicine*, D.M. Kalaskar, Editor. 2017, Woodhead Publishing. p. 21-42.
31. Wickramasinghe, S., T. Do, and P. Tran, *FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments*. Polymers, 2020, **12**(7): p. 1529.
32. Makerbot. 2020; Available from: <https://www.makerbot.com/3d-printers/replicator-educators-edition/>.
33. Wakimoto, T., R. Takamori, S. Eguchi, and H. Tanaka, *Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'*, in *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2018, Association for Computing Machinery: Montreal QC, Canada. p. Paper LBW110.
34. Kampker, A., J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, and S. Hohenstein, *Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems*. Procedia CIRP, 2019, **81**: p. 815-819.
35. Gebhardt, A., J. Kessler, and L. Thurn, *5 - Perspectives and Strategies of Additive Manufacturing*, in *3D Printing (Second Edition)*, A. Gebhardt, J. Kessler, and L. Thurn, Editors. 2019, Hanser. p. 137-165.
36. Gouveia, R.M., F.J. Silva, E. Atzeni, D. Sormaz, J.L. Alves, and A.B. Pereira, *Effect of scan strategies and use of support structures on surface quality and hardness of L-PBF AlSi10Mg Parts*. Materials, 2020, **13**(10): p. 2248.

37. Teixeira, O., L. Pinto Ferreira, and E. Atzeni, *A Review of Heat Treatments on Improving the Quality and Residual Stresses of the Ti-6Al-4V Parts Produced by Additive Manufacturing*. *Metals*, 2020, **10**: p. 1006.
38. Gao, W., Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, and P.D. Zavattieri, *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. *Computer-Aided Design*, 2015, **69**: p. 65-89.
39. Chua, C.K., C.H. Wong, and W.Y. Yeong, *Chapter One - Introduction to 3D Printing or Additive Manufacturing*, in *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*, C.K. Chua, C.H. Wong, and W.Y. Yeong, Editors. 2017, Academic Press. p. 1-29.
40. Solomon, I.J., P. Sevel, and J. Gunasekaran, *A review on the various processing parameters in FDM*. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
41. Mwema, F. and E. Akinlabi, *Fused Deposition Modeling: Strategies for Quality Enhancement*, 2020.
42. Chohan, J.S., R. Singh, and K.S. Boparai, *Vapor smoothing process for surface finishing of FDM replicas*. *Materials Today: Proceedings*, 2020, **26**: p. 173-179.
43. Dey, A. and N. Yodo, *A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, **3**(3): p. 64.
44. Masood, S.H., *10.04 - Advances in Fused Deposition Modeling*, in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G.F. Batalha, C.J. Van Tyne, and B. Yilbas, Editors. 2014, Elsevier: Oxford. p. 69-91.
45. Rayegani, F. and G.C. Onwubolu, *Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **73**(1): p. 509-519.
46. Sukindar, N.A., M.k.a. Mohd ariffin, B.T. Baharudin, C. Jaafar, and M.I.S. Ismail, *Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3D printing*. *Jurnal Teknologi*, 2016, **78**(10).
47. Alafaghani, A.a., A. Qattawi, B. Alrawi, and A. Guzman, *Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach*. *Procedia Manufacturing*, 2017, **10**: p. 791-803.
48. Jaisingh Sheoran, A. and H. Kumar, *Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research*. *Materials Today: Proceedings*, 2020, **21**: p. 1659-1672.
49. Motaparti, K.P., G. Taylor, M.-C. Leu, K. Chandrashekhara, J. Castle, and M. Matlack, *Effects of build parameters on compression properties for ULTEM 9085 parts by fused deposition modeling*. *Proceedings of the 27<sup>th</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016: p 964-977.
50. Kačergis, L., R. Mitkus, and M. Sinapius, *Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures*. *Smart Materials and Structures*, 2019, **28**(10): p. 105042.
51. Mohamed, O.A., S.H. Masood, and J.L. Bhowmik, *Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects*. *Advances in Manufacturing*, 2015, **3**(1): p. 42-53.
52. Nancharaiah, T., D.R. Raju, and V.R. Raju, *An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components*. *International Journal on Emerging Technologies*, 2010, **1**(2): p. 106-111.
53. Nuñez, P., A. Rivas, E. García-Plaza, E. Beamud, and A. Sanz-Lobera, *Dimensional and surface texture characterization in fused deposition modelling (FDM) with ABS plus*. *Procedia Engineering*, 2015, **132**: p. 856-863.
54. Srinivasan, R., W. Ruban, A. Deepanraj, R. Bhuvanesh, and T. Bhuvanesh, *Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling*. *Materials Today: Proceedings*, 2020, **27**: p. 1838-1842.

55. Wang, P., B. Zou, H. Xiao, S. Ding, and C. Huang, *Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, **271**: p. 62-74.
56. Wankhede, V., D. Jagetiya, A. Joshi, and R. Chaudhari, *Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis*. Materials Today: Proceedings, 2020, **27**: p. 2117-2120.
57. Mora, S.M., J.C. Gil, and A.M.C. López, *Influence of manufacturing parameters in the dimensional characteristics of ABS parts obtained by FDM using reverse engineering techniques*. Procedia Manufacturing, 2019, **41**: p. 968-975.
58. Hsiang Loh, G., E. Pei, J. Gonzalez-Gutierrez, and M. Monzón, *An Overview of Material Extrusion Troubleshooting*. Applied Sciences, 2020, **10**(14): p. 4776.
59. Simplify3D. *Print Quality Troubleshooting Guide*. 2020; Available from: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>.
60. Spoerk, M., 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, 2018, **47**(1): p. 17-24.
61. Jennings, A. *Troubleshooting Guide to Common 3D Printing Problems*. 2020 [cited 2020 8/12/2020]; Available from: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>.
62. Godec, D., S. Cano, C. Holzer, and J. Gonzalez-Gutierrez, *Optimization of the 3D Printing Parameters for Tensile Properties of Specimens Produced by Fused Filament Fabrication of 17-4PH Stainless Steel*. Materials, 2020, **13**(3): p. 774.
63. Galati, M., P. Minetola, G. Marchiandi, E. Atzeni, F. Calignano, A. Salmi, and L. Iuliano, *A methodology for evaluating the aesthetic quality of 3D printed parts*. Procedia CIRP, 2019, **79**: p. 95-100.
64. Bryll, K., E. Piesowicz, P. Szymański, W. Ślęczka, and M. Pijanowski, *Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing Technology*. MATEC Web Conf., 2018, **237**: p. 02006.
65. Bourell, D., J.P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, and A. Clare, *Materials for additive manufacturing*. CIRP Annals, 2017, **66**(2): p. 659-681.
66. Kumar, S.B., J. Jeevamalar, P. Ramu, G. Suresh, and K. Senthilnathan, *Evaluation in 4D printing – A review*. Materials Today: Proceedings, 2021, **45**: p. 1433-1437.
67. Mitchell, A., U. Lafont, M. Hołyńska, and C. Semprimoschnig, *Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications*. Additive Manufacturing, 2018, **24**: p. 606-626.
68. Prusa, J., *3D Printing Handbook*, 2020: Prusa Research.
69. Filamentive. *PET vs PETg Filament - What's The Difference?* 16/12/2020]; Available from: <https://www.filamentive.com/pet-vs-petg-filament-whats-the-difference/>.
70. Mohammadizadeh, M., A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, *3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis*. Composites Part B: Engineering, 2019, **175**: p. 107112.
71. Shanmugam, V., D.J.J. Rajendran, K. Babu, S. Rajendran, A. Veerasimman, U. Marimuthu, S. Singh, O. Das, R.E. Neisiany, M.S. Hedenqvist, F. Berto, and S. Ramakrishna, *The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing*. Polymer Testing, 2020: p. 106925.
72. Markforged. *Onyx*. 2020 16/12/2020]; Available from: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>.
73. Nakagawa, Y., K.-i. Mori, and T. Maeno, *3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, **91**(5): p. 2811-2817.
74. Justo, J., L. Távara, L. García-Guzmán, and F. París, *Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites*. Composite Structures, 2018, **185**: p. 537-548.

75. Agarwal, K., S.K. Kuchipudi, B. Girard, and M. Houser, *Mechanical properties of fiber reinforced polymer composites: A comparative study of conventional and additive manufacturing methods*. Journal of Composite Materials, 2018, **52**(23): p. 3173-3181.
76. Park, S.-J. and M.-K. Seo, *Chapter 6 - Element and Processing*, in *Interface Science and Technology*, S.-J. Park and M.-K. Seo, Editors. 2011, Elsevier. p. 431-499.
77. Wang, R.-M., S.-R. Zheng, and Y.G. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*, 2011: Elsevier.
78. Hamouda, H., *Chapter 16 - Thermal and Fire Protective Fabric Systems*, in *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)*, M. Kutz, Editor. 2018, William Andrew Publishing. p. 323-341.
79. Markforged. *HSHT Fiberglass*. 2020 16/12/2020]; Available from: <https://markforged.com/materials/continuous-fibers/hsht-fiberglass>.
80. Ning, F., W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, *Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling*. Composites Part B: Engineering, 2015, **80**: p. 369-378.
81. Ning, F., W. Cong, Y. Hu, and H. Wang, *Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties*. Journal of Composite Materials, 2017, **51**(4): p. 451-462.
82. Blok, L.G., M.L. Longana, H. Yu, and B.K.S. Woods, *An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites*. Additive Manufacturing, 2018, **22**: p. 176-186.
83. Sardinha, M., P. Diogo, C. Vicente, M. Leite, A. Ribeiro, and L. Reis, *Effect of fiber fraction and orientation on the mechanical properties of nylon reinforced with fiberglass by continuous fiber fabrication*, 2019.
84. Armstrong, C. *Post processing for FDM printed parts*. 20/12/2020]; Available from: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#introduction>.
85. Gregurić, L. *3D Printing Post-Processing: 10 Easy Techniques*. 2020 20/12/2020]; Available from: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>.
86. Chohan, J.S. and R. Singh, *Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications*. Rapid Prototyping Journal, 2017.
87. BigRep. *3D Printing Post Processing*. 20/12/2020]; Available from: <https://bigrep.com/post-processing/>.
88. Beamlar. *Post-processing in 3D printing*. 2019 20/12/2020]; Available from: <https://www.beamlar.com/post-processing-3d-printing/>.
89. Wohlers, T., I. Campbell, O. Diegel, J. Kowen, and T. Caffrey, *Wohlers Report 2018*. 2018: Fort Collins.
90. Mazlan, S.N., M.R. Alkahari, F. Ramli, N. Maidin, M.N. Sudin, A. Zolkaply, and P. Akademia Baru, *Surface Finish and Mechanical Properties of FDM Part After Blow Cold Vapor Treatment*. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2018, **48**: p. 148-155.
91. Valerga, A.P., M. Batista, S.R. Fernandez-Vidal, and A.J. Gamez, *Impact of chemical post-processing in fused deposition modelling (FDM) on polylactic acid (PLA) surface quality and structure*. Polymers, 2019, **11**(3): p. 566.
92. Kalyan, K., J. Singh, G.S. Phull, S. Soni, H. Singh, and G. Kaur, *Integration of FDM and vapor smoothing process: Analyzing properties of fabricated ABS replicas*. Materials Today: Proceedings, 2018, **5**(14): p. 27902-27911.
93. Gajdoš, I., E. Spišák, L. Kaščák, and V. Krasinskyi. *Surface finish techniques for FDM parts*. in *Materials Science Forum*. 2015. **818**: p. 45-48.
94. Khan, M. and S. Mishra, *Minimizing surface roughness of ABS-FDM build parts: An experimental approach*. Materials Today: Proceedings, 2020, **26**: p. 1557-1566.

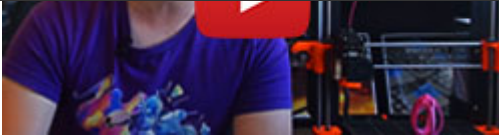
95. Singh, R., S. Singh, I.P. Singh, F. Fabbrocino, and F. Fraternali, *Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process*. Composites Part B: Engineering, 2017, **111**: p. 228-234.
96. Research, P. *First Layer Calibration*. 2021; Available from: [https://help.prusa3d.com/en/article/first-layer-calibration\\_112364](https://help.prusa3d.com/en/article/first-layer-calibration_112364).
97. Galantucci, L.M., F. Lavecchia, and G. Percoco, *Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts*. CIRP annals, 2009, **58**(1): p. 189-192.
98. Jin, Y., Y. Wan, B. Zhang, and Z. Liu, *Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, **240**: p. 233-239.
99. Dickson, A.N., J.N. Barry, K.A. McDonnell, and D.P. Dowling, *Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2017, **16**: p. 146-152.
100. Chohan, J.S., R. Singh, K.S. Boparai, R. Penna, and F. Fraternali, *Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications*. Composites Part B: Engineering, 2017, **117**: p. 138-149.
101. Martín, D.M., D. Amantia, M. Faccini, O.A. Almirall, M.G. Anguera, and L. Aubouy, *Method for polishing polyamide objects obtained by additive manufacturing or 3d printing techniques*. 2020, Google Patents.

**ANEXOS**



## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO A – Fichas Técnicas Máquinas FDM



## MAKER'S MUSE: MK3 REVIEW

"The smarts, the removable print surface and dependable quality make it perfect for design and prototyping." [Watch the video...](#)



## 3D INSIDER: MK3 REVIEW

"It is without a doubt the best 3D printer under \$1,000 (...) It offers outstanding quality for a reasonable price and comes with a truckload of features." [Read more...](#)

# FULL FEATURES LIST (APRIL 2021 EDITION)

## BASIC INFORMATION

- **Build volume:** 25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")
- **Layer height:** 0.05 - 0.35 mm
- **Nozzle:** 0.4mm default, wide range of other diameters/nozzles supported
- **Filament diameter:** 1.75 mm
- **Supported materials:** Wide range of thermoplastics, including PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Polycarbonate), CPE, PVA/BVOH, HIPS, PP (Polypropylene), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill and other filled materials.
- **Max travel speed:** 200+ mm/s
- **Max nozzle temperature:** 300 °C / 572 °F
- **Max heated temperature:** 120 °C / 248 °F
- **Extruder:** Direct Drive, Bondtech gears, E3D V6 hotend
- **Print surface:** Removable magnetic steel sheets with different surface finishes, heatbed with cold corners compensation
- **Safety features:** IR filament sensor, high-quality Delta PSU with Power Panic, 3 thermistors, RPM monitoring
- **LCD Screen:** Monochromatic LCD
- **Kit box dimensions:** 11 kg, 24×42×43 cm; 9.5×16.5×16.9 in (X×Y×Z)
- **Assembled printer box dimensions:** 11 kg, 54×52×48 cm; 21×20.5×18.9 in (X×Y×Z)
- **Printer dimensions (without spool):** 7 kg, 50×55×40 cm; 19.6×21.6×15.7 in (X×Y×Z)
- **Power consumption:** PLA settings: 80W / ABS settings: 120W



## ADVANCED FEATURES

- **Controller:** EINSY RAMBo 8-bit board with Trinamic 2130 drivers (256 microstepping), co-developed with Ultimachine, sensorless homing for X and Y axes
- **Mesh Bed Leveling:** Advanced high-quality SuperPINDA sensor (Super Prusa INDuction Autoleveling sensor)
- **Print sheet profiles:** Firmware supports print sheet profiles to store Live Z calibration data to enable quick switching between different print sheets.
- **Filament sensor:** IR sensor built-in, supports filament auto-loading. Print pauses when filament runs out.
- **Power Panic:** Hardware-based, single G-code line accuracy
- **Ethernet connection:** via Raspberry Pi (optional)
- **Wi-Fi connection:** via Raspberry Pi (optional)
- **Advanced sensors:** 3 thermistors, fans RPM monitoring, SuperPINDA
- **Calibration:** Automatic, Mesh Bed Leveling, SelfTest
- **Print medium:** SD card (16 GB card included)
- **Firmware update:** via PC (USB cable)
- **PSU:** Custom-made Delta PSU with hardware-based power panic
- **Advanced features:** Automatic filament loading, steel sheet profiles, Octoprint compatibility and more
- **New features introduced through firmware upgrades**

## 6 REASONS TO BUY THE MK3S+

# 1

### GREAT USER SUPPORT

We offer **24/7 tech support via live chat and email in seven languages**. Our printers come with **detailed instructions and guides** for easy assembly and maintenance. You can also visit our knowledge base, community forum, Facebook groups and official Blog, where we publish useful 3D printing tips and tricks, contests and more!

# 2

### FUN TO ASSEMBLE

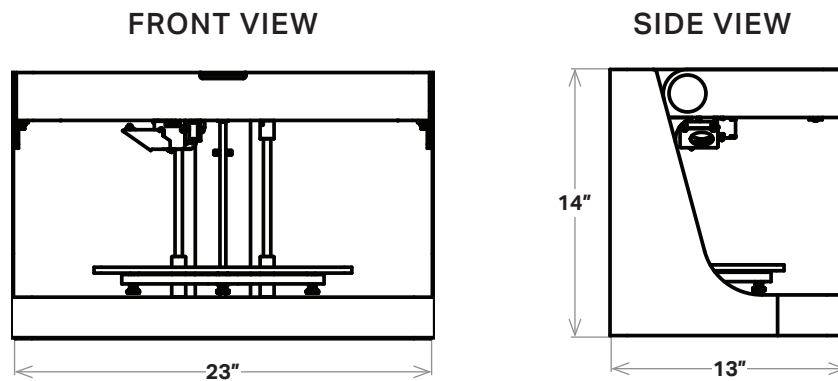
The MK3S+ assembly kit is an **excellent first step into the world of 3D printing**. You will get to know your 3D printer inside out and find out how it works! The **assembly is quite easy**, requires no soldering, all cables are cut to length and ready to be plugged in. The **assembly instructions are easy to follow** and all texts are translated into 8 languages. All of this makes the kit **very friendly to younger builders**, too!

PRODUCT SPECIFICATIONS

# Mark Two (Gen 2)

Replace machined aluminum tooling—jigs, jaws, and fixtures—with stronger parts for a fraction of the price. The Mark Two combines our unique continuous carbon fiber reinforcement with workhorse reliability for versatile parts with 26x the strength of ABS, ready same-day for use straight off the printer.

|                           |                           |   |
|---------------------------|---------------------------|---|
| <b>Printer Properties</b> | <b>Process</b>            | Fused filament fabrication, Continuous Filament Fabrication |
|                           | <b>Build Volume</b>       | 320 x 132 x 154 mm (12.6 x 5.2 x 6 in)                      |
|                           | <b>Weight</b>             | 16 kg (35 lbs)  |
|                           | <b>Machine Footprint</b>  | 584 x 330 x 355 mm (23 x 13 x 14 in)                        |
|                           | <b>Print Bed</b>          | Kinematic coupling — flat to within 160 µm                  |
|                           | <b>Extrusion System</b>   | Second-generation extruder, out-of-plastic detection        |
|                           | <b>Power</b>              | 100–240 VAC, 150 W (2 A peak)                               |
|                           | <b>RF Module</b>          | Operating Band 2.4 GHz Wi-Fi Standards 802.11 b/g/n         |
| <b>Materials</b>          | <b>Plastics Available</b> | Onyx, Nylon White   |
|                           | <b>Fibers Available</b>   | Carbon fiber, fiberglass, Kevlar®, HSHT fiberglass          |
|                           | <b>Tensile Strength</b>   | 800 MPa (25.8x ABS, 2.6x 6061-T6 Aluminum) *                |
|                           | <b>Tensile Modulus</b>    | 60 GPa (26.9x ABS, 0.87x 6061-T6 Aluminum) *                |
| <b>Part Properties</b>    | <b>Layer Height</b>       | 100 µm default, 200 µm maximum                              |
|                           | <b>Infill</b>             | Closed cell infill: multiple geometries available           |
| <b>Software</b>           | <b>Supplied Software</b>  | Eiger Cloud (Other options available at cost)               |
|                           | <b>Security</b>           | Two-factor authentication, org admin access, single sign-on |



\* Continuous carbon fiber data. **Note:** All specifications are approximate and subject to change without notice.

## 9.2 ANEXO B – Fichas técnicas dos Filamentos

Version: 1.0

Last update: 20-09-2018

## TECHNICAL DATA SHEET

### Prusament PLA by Prusa Polymers



PLA is the most commonly used filament. It's biodegradable, easy to print, and very strong. The perfect choice for printing large objects thanks to its low thermal expansion (little to no warping) and for printing tiny parts because of its low melting temperature.

**APPLICATIONS:** Concept models, functional prototypes, low-wear toys, etc.

**NOT SUITABLE FOR:** Long term outdoor usage because of low temperature resistance (up to 60 °C).

**POST-PROCESSING:** Wet sanding. Without water you'll quickly start heating the plastic by friction, it will melt locally and make it hard to keep sanding.

### IDENTIFICATION:

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Trade name</b>    | Prusament PLA                          |
| <b>Chemical name</b> | Poly(lactic acid)                      |
| <b>Usage</b>         | FDM 3D printing                        |
| <b>Manufacturer</b>  | Prusa Polymers, Prague, Czech Republic |

### RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Nozzle Temperature [°C]</b>  | 210 ± 10  |
| <b>Heatbed Temperature [°C]</b> | 40-60     |
| <b>Print Speed [mm/s]</b>       | up to 200 |

## TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

| Physical Properties                         | Typical Value | Method         |
|---|---------------|----------------|
| Peak Melt Temperature [°C]                  | 145-160       | ISO 11357      |
| Glass Transition Temperature [°C]           | 55-60         | ISO 11357      |
| MFR [g/10min](1)                            | 10.4          | ISO 1133       |
| MVR [cm <sup>3</sup> /10min](1)             | 9.4           | ISO 1133       |
| Specific Gravity [g/cm <sup>3</sup> ]       | 1.24          | ISO 1183       |
| Moisture Absorption 24 hours [%](2)         | 0.3           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 7 days [%](2)           | 0.3           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 4 weeks [%](2)          | 0.3           | Prusa Polymers |
| Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C] | 55            | ISO 75         |
| Tensile Yield Strength Filament [MPa]       | 57.4 ± 0.4    | ISO 527-1      |

## MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS(3):

| Property / print direction                     | Horizontal | Vertical X, Y-Axis | Vertical Z-Axis | Method    |
|--|------------|--------------------|-----------------|-----------|
| Tensile Modulus [GPa]                          | 2,2 ± 0,1  | 2,4 ± 0,1          | 2,3 ± 0,1       | ISO 527-1 |
| Tensile Yield Strength [MPa]                   | 50,8 ± 2,4 | 59,3 ± 1,9         | 37,6 ± 4,0      | ISO 527-1 |
| Elongation at Yield Point [%]                  | 2,9 ± 0,3  | 3,2 ± 0,1          | 1,9 ± 0,3       | ISO 527-1 |
| Impact Strength Charpy(4) [kJ/m <sup>2</sup> ] | 12,7 ± 0,7 | 13,7 ± 0,7         | 5,0 ± 1,4       | ISO 179-1 |

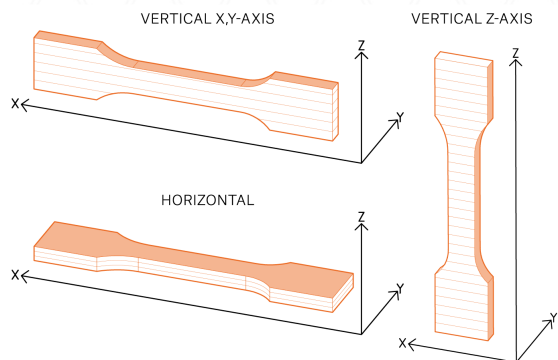
(1) 2,16 kg; 210 °C |

(2) 28 °C; humidity 37 %

(3) Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to print testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PLA Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top: 0 Bottom: 0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 215°C all layers; bed temperature 60°C all layers; other parameters set to default | (4) Charpy Unnotched, edgewise direction of blow according to ISO 179-1

### Disclaimer

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injures or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



# TECHNICAL DATA SHEET

## Prusament PETG by Prusa Polymers



PETG is one of the most commonly used filaments. It is an excellent choice for printing mechanically stressed parts. Compared to PLA, it is more heat resistant, more flexible and less brittle.

**APPLICATIONS:** The typical use of PETG is printing functional and mechanical parts. Thanks to good layer adhesion it is also suitable for waterproof prints.

**NOT SUITABLE FOR:** Not suitable for tiny parts

**POST-PROCESSING:** When post-processing PETG, it's possible to use both dry and wet sanding.

### IDENTIFICATION:

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Trade name</b>    | Prusament PETG                         |
| <b>Chemical name</b> | Copolyester                            |
| <b>Usage</b>         | FDM 3D printing                        |
| <b>Diameter</b>      | 1.75 ± 0.02 mm                         |
| <b>Manufacturer</b>  | Prusa Polymers, Prague, Czech Republic |

### RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Nozzle Temperature [°C]</b>  | 250 ± 10  |
| <b>Heatbed Temperature [°C]</b> | 80 ± 10   |
| <b>Print Speed [mm/s]</b>       | up to 200 |

## TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

| Physical Properties                         | Typical Value | Method         |
|---|---------------|----------------|
| Specific Gravity [g/cm <sup>3</sup> ]       | 1.27          | ISO 1183       |
| Moisture Absorption 24 hours [%](1)         | 0.2           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 7 days [%](1)           | 0.3           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 4 weeks [%](1)          | 0.3           | Prusa Polymers |
| Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C] | 68            | ISO 75         |
| Tensile Yield Strength Filament [MPa]       | 46 ± 1        | ISO 527        |

## MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS(2):

| Property / print direction                     | Horizontal | Vertical X,Y-Axis | Vertical Z-Axis | Method    |
|--|------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Tensile Yield Strength [MPa]                   | 47 ± 2     | 50 ± 1            | 30 ± 5          | ISO 527-1 |
| Tensile Modulus [GPa]                          | 1.5 ± 0.1  | 1.5 ± 0.1         | 1.4 ± 0.1       | ISO 527-1 |
| Elongation at Yield Point [%]                  | 5.1 ± 0.1  | 5.1 ± 0.1         | 2.5 ± 0.5       | ISO 527-1 |
| Impact Strength Charpy(3) [kJ/m <sup>2</sup> ] | NB(C)(4)   | NB(4)             | 5 ± 1           | ISO 179-1 |

(1) 30 °C; humidity 30 %

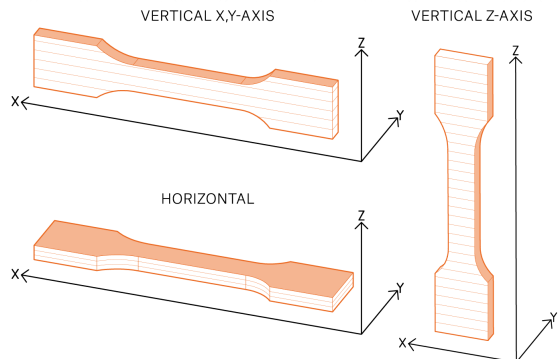
(2) Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to make testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PETG Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top:0 Bottom:0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 100mm/s; extrusion multiplier 1.07; extruder temperature 260°C all layers; bed temperature 90°C all layers; other parameters set default

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

(4) NB (no break); C (complete break) in brackets second most frequent type of failure > 1/3

### Disclaimer

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injures or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



# TECHNICAL DATA SHEET

## Prusament ASA by Prusa Polymers



ASA is widely used filament in FDM 3D printing. It is mechanically resistant material. Compared to PLA and PETG it is more heat resistant.

**APPLICATIONS:** Printing of mechanical and functional parts suitable for outdoor usage.

**NOT SUITABLE FOR:** Printing of large parts might be complicated or need advanced user approach.

**POST-PROCESSING:** ASA can be post-processed by Acetone vapours.

### IDENTIFICATION:

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Trade name</b>    | Prusament ASA                          |
| <b>Chemical name</b> | Acrylonitrile-Styrene-Acrylate         |
| <b>Usage</b>         | FDM 3D printing                        |
| <b>Diameter</b>      | 1.75 ± 0.02 mm                         |
| <b>Manufacturer</b>  | Prusa Research, Prague, Czech Republic |

### RECOMMENDED PRINT SETTINGS:

|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| <b>Nozzle Temperature [°C]</b>  | 260 ± 5                      |
| <b>Heatbed Temperature [°C]</b> | 110 ± 5                      |
| <b>Print Speed [mm/s]</b>       | up to 200                    |
| <b>Cooling Fan Speed [%]</b>    | 30 % (0-50 %*)               |
| <b>Skirt height</b>             | up to height of printed part |

\*Depends on geometry of printed object, to improve overhangs and bridges set 30% or higher cooling in Slic3r, for larger prints without bridges cooling off can work better. Brim 3mm and more can improve adhesion of edges and corners to build-sheet in case of larger objects.

## TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

| Physical Properties                         | Typical Value | Method         |
|---|---------------|----------------|
| Specific Gravity [g/cm <sup>3</sup> ]       | 1.07          | ISO 1183       |
| MFR [g/10min](1)                            | 21            | ISO 1133       |
| MVR [cm <sup>3</sup> /10min](1)             | 22            | ISO 1133       |
| Moisture Absorption 24 hours [%](2)         | 0.23          | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 7 days [%](2)           | 0.25          | Prusa Polymers |
| Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C] | 93            | ISO 75         |
| Heat Deflection Temperature (1,80 MPa) [°C] | 86            | ISO 75         |
| Tensile Yield Strength Filament [MPa]       | 40 ± 1        | ISO 527        |

## MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS(3):

| Property / print direction                     | Horizontal | Vertical X,Y-Axis | Vertical Z-Axis | Method    |
|--|------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Tensile Yield Strength [MPa]                   | 42 ± 1     | 43 ± 1            | 9 ± 1           | ISO 527-1 |
| Tensile Modulus [GPa]                          | 1,6 ± 0,1  | 1,7 ± 0,1         | 1,4 ± 0,1       | ISO 527-1 |
| Elongation at Yield Point [%]                  | 3,3 ± 0,1  | 3,3 ± 0,2         | 0,6 ± 0,1       | ISO 527-1 |
| Impact Strength Charpy(4) [kJ/m <sup>2</sup> ] | 40 ± 10    | 39 ± 5            | ~2              | ISO 179-1 |
| Impact S.Charpy notch.(5) [kJ/m <sup>2</sup> ] | 14 ± 1     | 13 ± 1            | ~2              | ISO 179-1 |

(1) 220°C; 10kg |

(2) 28 °C; humidity 37 %

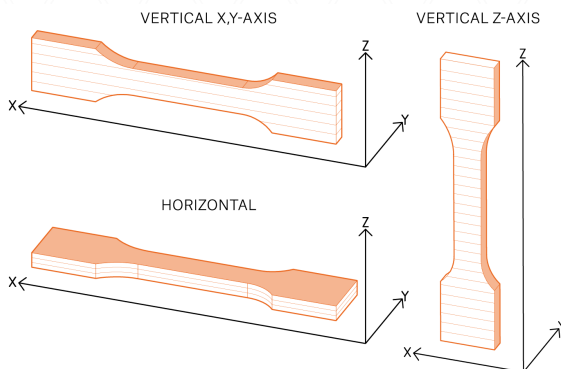
(3) Original Prusa i3 MK3S 3D printer was used to make testing specimens. Slic3r Prusa Edition v2.0.0 was used to create G-codes with following settings: Prusament ASA; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2 mm); solid layers Top:0 Bottom:0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 265°C all layers; bed temperature 110°C all layers; other parameters set default

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

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

### Disclaimer

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Research can not carry any responsibility for injuries or any loss caused by using of Prusament ASA material. Before use ASA material read properly all the details in available safety data sheet (SDS).



## ASA Extrafill

### Description:

Thanks to mechanical properties is ASA filament ideal for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday usage including outdoor applications.

The advantage of this material is its excellent weather resistance, high retention of physical features and low level of yellowing.

ASA has a higher rigidity than ABS and thus it is suitable for demanding applications. Another advantage is its good dimensional stability.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.



| Physical properties | Typical Value                     | Test Method | Test Condition |
|---------------------|-----------------------------------|-------------|----------------|
| Material density    | 1,07 g/cm <sup>3</sup>            | ASTM D792   |                |
| Melt flow index     | 5 g/10 min                        |             | 220 °C, 10 kg  |
| Diameter tolerance  | ± 0,05 mm                         |             |                |
| Weight              | 750 g of filament (+ 250 g spool) |             |                |

| Mechanical properties | Typical Value | Test Method | Test Condition      |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------------|
| Tensile strength      | 40 MPa        | ASTM D638   | 50 mm/min           |
| Elongation at break   | 35 %          | ASTM D638   | 50 mm/min           |
| Tensile modulus       | 1726 MPa      | ASTM D638   | 1 mm/min            |
| Flexural strength     | 62 MPa        | ASTM D790   | at yield, 15 mm/min |
| Flexural modulus      | 1814 MPa      | ASTM D790   | 15 mm/min           |
| Izod impact strength  | 441 J/m       | ASTM D256   | 23 °C, 1/8"         |
| Rockwell hardness     | 92            | ASTM D785   | R-Scale             |

| Thermal properties          | Typical Value | Test Method | Test Condition |
|-----------------------------|---------------|-------------|----------------|
| Heat distortion temperature | 86 °C         | ASTM D648   | 1,8 MPa        |
|                             | 96 °C         | ASTM D648   | 0,45 MPa       |
| Vicat softening temperature | 94 °C         | ASTM D1525  | 50 °C/h, 5 kg  |

| Printing properties | Recommended       | Notes   |
|---------------------|-------------------|---|
| Print temperature   | 240-255 °C        | Recommended settings!<br>It may differ according to the printer and the object. |
| Hot pad             | 90-105 °C         | Try your own settings before printing.  |
| Bed adhesive        | 3Dlac, glue stick |   |

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

# Technical Data Sheet

## Prusament PC Blend by Prusa Polymers

### Identification:

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Trade name</b>    | Prusament PC Blend                          |
| <b>Chemical name</b> | Polycarbonate blend                         |
| <b>Usage</b>         | FDM/FFF 3D printing                         |
| <b>Diameter</b>      | 1.75 ± 0.03 mm                              |
| <b>Manufacturer</b>  | Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic |

### Recommended print settings:

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Nozzle Temperature [°C]</b>  | 275 ± 10                                 |
| <b>Heatbed Temperature [°C]</b> | 110 ± 10                                 |
| <b>Print Speed [mm/s]</b>       | up to 200                                |
| <b>Cooling Fan Speed [%]</b>    | 20 % (0 – 30 %*)                         |
| <b>Brim</b>                     | for parts bigger than 5 cm use 4 mm brim |

\*Depends on geometry of printed object, to improve overhangs and bridges set 20% or higher cooling in PrusaSlicer, for larger prints without bridges cooling off can work better. Brim 3 mm and more can improve adhesion of edges and corners to build-sheet in case of larger objects.

### Typical material properties

| Physical Properties                                | Typical Value | Method         |
|--|---------------|----------------|
| <b>MFR [g/10 min](1)</b>                           | 22            | ISO 1133       |
| <b>MVR [cm<sup>3</sup>/10 min](1)</b>              | 20            | ISO 1133       |
| <b>Moisture Absorption 24 hours [%](2)</b>         | 1.0           | Prusa Polymers |
| <b>Moisture Absorption 7 days [%](2)</b>           | 0.5           | Prusa Polymers |
| <b>Heat Deflection Temperature (0.45 MPa) [°C]</b> | 113           | ISO 75         |
| <b>Heat Deflection Temperature (1.80 MPa) [°C]</b> | 93            | ISO 75         |
| <b>Tensile Yield Strength Filament [MPa]</b>       | 58 ± 1        | ISO 527        |
| <b>Hardness - Shore D</b>                          | 79            | Prusa Polymers |

(1) 265 °C; 5 kg

(2) 23 °C; humidity 40 %

### Mechanical properties of printed testing specimens(3)

| Property\Print Direction                              | Horizontal | Vertical xz | Vertical z | Method    |
|---|------------|-------------|------------|-----------|
| <b>Tensile Yield Strength [MPa]</b>                   | 65 ± 2     | 63 ± 1      | 36 ± 4     | ISO 527-1 |
| <b>Tensile Modulus [GPa]</b>                          | 1.9 ± 0.1  | 1.7 ± 0.1   | 1.6 ± 0.1  | ISO 527-1 |
| <b>Elongation at Yield Point [%]</b>                  | 5.7 ± 0.2  | 5.7 ± 0.2   | 2.6 ± 0.3  | ISO 527-1 |
| <b>Impact Strength Charpy (4) [kJ/m<sup>2</sup>]</b>  | 95 ± 5     | NB          | N/A        | ISO 179-1 |
| <b>Impact S. Charpy notch. (5) [kJ/m<sup>2</sup>]</b> | 9 ± 1      | 7 ± 1       | N/A        | ISO 179-1 |

(3) Original Prusa i3 MK3S 3D printer was used to make testing specimens. PrusaSlicer-2.1.1 was used to create G-codes with following settings: Prusament PC Blend; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top:0 Bottom:0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 275°C all layers; bed temperature 120°C all layers; extrusion multiplier 1.02; print cooling off; other parameters set default

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

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

#### Disclaimer

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

## Flexfill 98A

### Description:

Flexfill 98A is semi-flexible filament that offers great mechanical properties. High tear and tensile strength and wear performance guarantee the durability of 3D printed products.

It has high abrasion resistance, toughness, great chemical and thermal resistance. The filament is good for printing of dynamically stressed parts, for example sealings.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,10 mm, which is strictly controlled throughout the production.



| Physical properties   | Typical Value                        | Test Method   | Test Condition                 |
|-----------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| Material density      | 1,23 g/cm <sup>3</sup>               | ISO 1183-1  |                                |
| Diameter tolerance    | ± 0,10 mm                            |   |                                |
| Weight                | 500 g of filament<br>(+ 250 g spool) |   |                                |
| Mechanical properties | Typical Value                        | Test Method   | Test Condition                 |
| Tensile strength      | 53,7 MPa                             | DIN 53504   | at break, 200 mm/min           |
| Tensile stress        | 12,1 MPa                             | DIN 53504   | 10% elongation,<br>200 mm/min  |
|                       | 22,1 MPa                             | DIN 53504   | 50% elongation,<br>200 mm/min  |
|                       | 28,4 MPa                             | DIN 53504   | 100% elongation,<br>200 mm/min |
|                       | 37,8 MPa                             | DIN 53504   | 300% elongation,<br>200 mm/min |
| Elongation at break   | 318 %                                | DIN 53504   | 200 mm/min                     |
| Hardness              | 98 Shore A                           | ISO 7619-1  |                                |
|                       | 60 Shore D                           | ISO 7619-1  |                                |
| Tear strength         | 170 kN/m                             | ISO 34-1  | 500 mm/min                     |
| Abrasion              | 23 mm <sup>3</sup>                   | ISO 4649  | method A                       |
| Printing properties   | Recommended                          | Notes   |                                |
| Print temperature     | 220-240 °C                           | Recommended settings!<br>It may differ according to the printer and the object. |                                |
| Hot pad               | 50-60 °C                             | Try your own optimization before printing.                                      |                                |
| Bed adhesive          | Magigoo                              | For easy removing of the object.  |                                |

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

# Composites

| Plastic Matrix                | Test (ASTM)       | Onyx | Onyx FR          | Nylon W |
|-------------------------------|-------------------|------|------------------|---------|
| Tensile Modulus (GPa)         | D638              | 1.4  | 1.3              | 1.7     |
| Tensile Stress at Yield (MPa) | D638              | 36   | 29               | 51      |
| Tensile Strain at Yield (%)   | D638              | 25   | 33               | 4.5     |
| Tensile Stress at Break (MPa) | D638              | 30   | 31               | 36      |
| Tensile Strain at Break (%)   | D638              | 58   | 58               | 150     |
| Flexural Strength (MPa)       | D790 <sup>1</sup> | 81   | 79               | 50      |
| Flexural Modulus (GPa)        | D790 <sup>1</sup> | 3.6  | 4.0              | 1.4     |
| Heat Deflection Temp (°C)     | D648 B            | 145  | 145              | 41      |
| Flame Resistance              | UL94              | —    | V-0 <sup>2</sup> | —       |
| Izod Impact - notched (J/m)   | D256-10 A         | 330  | —                | 110     |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )  | —                 | 1.2  | 1.2              | 1.1     |

Dimensions and Construction of Plastic Test Specimens:

- Tensile test specimens: ASTM D638 type IV beams
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

All Markforged composite machines are equipped to print Onyx. Nylon White is available on the Mark Two and X7. Onyx FR is available on X3, X5, and X7.

Markforged parts are primarily composed of plastic matrix. Users may add one type of fiber reinforcement in each part, enhancing its material properties.

1. Measured by a method similar to ASTM D790. Thermoplastic-only parts do not break before end of flexural test.

2. Onyx FR is UL 94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm.

| Fiber Reinforcement             | Test (ASTM)       | Carbon | Kevlar® | Fiberglass | HSHT FG |
|---------------------------------|-------------------|--------|---------|------------|---------|
| Tensile Strength (MPa)          | D3039             | 800    | 610     | 590        | 600     |
| Tensile Modulus (GPa)           | D3039             | 60     | 27      | 21         | 21      |
| Tensile Strain at Break (%)     | D3039             | 1.5    | 2.7     | 3.8        | 3.9     |
| Flexural Strength (MPa)         | D790 <sup>1</sup> | 540    | 240     | 200        | 420     |
| Flexural Modulus (GPa)          | D790 <sup>1</sup> | 51     | 26      | 22         | 21      |
| Flexural Strain at Break (%)    | D790 <sup>1</sup> | 1.2    | 2.1     | 1.1        | 2.2     |
| Compressive Strength (MPa)      | D6641             | 320    | 97      | 140        | 192     |
| Compressive Modulus (MPa)       | D6641             | 54     | 28      | 21         | 21      |
| Compressive Strain at Break (%) | D6641             | 0.7    | 1.5     | —          | —       |
| Heat Deflection Temp (°C)       | D648 B            | 105    | 105     | 105        | 150     |
| Izod Impact - notched (J/m)     | D256-10 A         | 960    | 2000    | 2600       | 3100    |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )    | —                 | 1.4    | 1.2     | 1.5        | 1.5     |

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

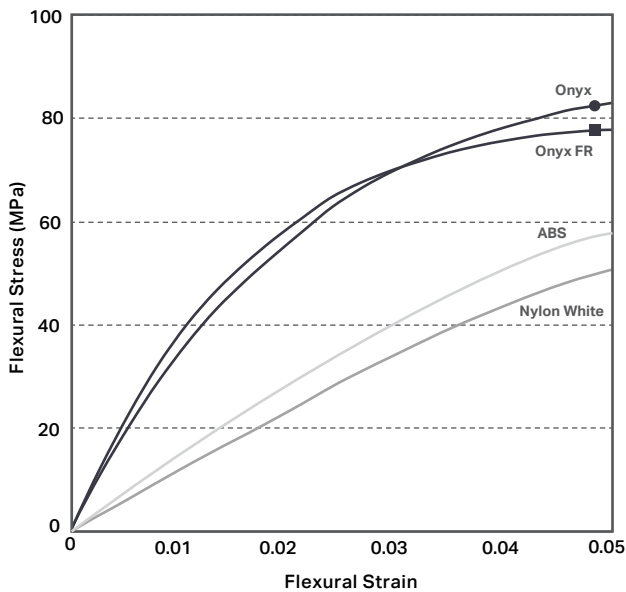
This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

# Composites

Markforged composite printers use a base plastic matrix reinforced with continuous fibers. Combining the materials during printing yields composite parts far stronger, stiffer, and more robust than conventional 3D printed plastics.

## Plastic Matrix

In Fused Filament Fabrication (FFF), a printer heats thermoplastic filament to near melting point and extrudes it through its nozzle, building a plastic matrix layer by layer. Plastics can be reinforced by any one type of fiber.



● **Onyx** Flexural Strength: 81 MPa

Onyx is a chopped carbon fiber reinforced nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

■ **Onyx FR** Flexural Strength: 79 MPa

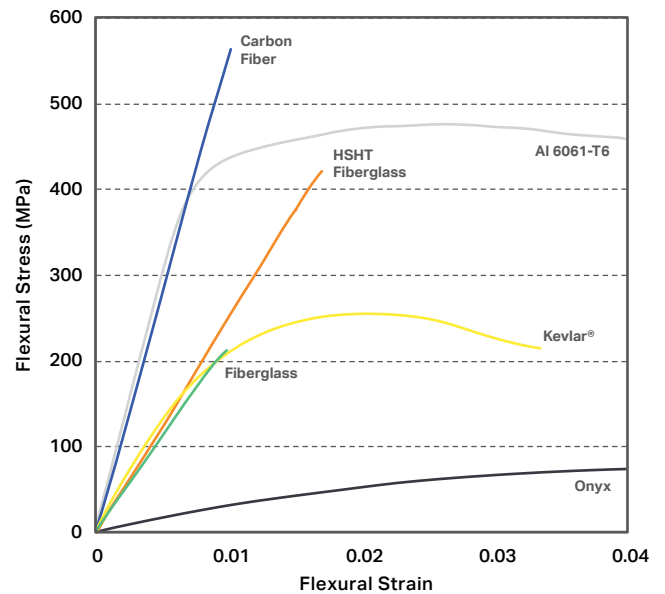
Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

● **Nylon White** Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

## Fiber Reinforcement

Continuous Filament Fabrication (CFF) is proprietary technology that reinforces plastic printed parts with continuous fibers on each layer of a part. Users can control the layers reinforced, amount, orientation, and type of reinforcing fiber.



● **Carbon Fiber** Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

● **Fiberglass** Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

● **Kevlar®** Flexural Strength: 240 MPa

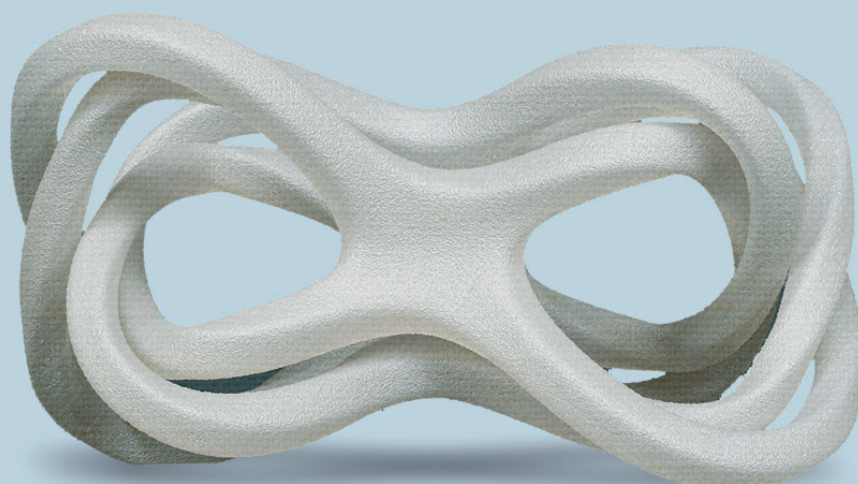
Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

● **HSHF Fiberglass** Flexural Strength: 420 MPa

High Strength High Temperature (HSHF) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.



## PETG CARBON KIMYA



**PETG CARBON** has an excellent tensile modulus. PETG is reinforced with carbon fibers

| NO DELAMINATION | HIGH RIGIDITY

| REINFORCMENT | POST-PRINTING PROCESSES POSSIBLE

### FILAMENT PROPERTIES

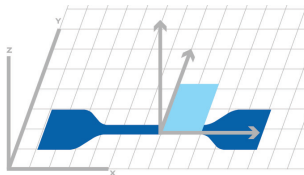
| DESCRIPTION            | TEST METHODS                          | UNITS             | VALUES                   |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Diameter               | INS-6712                              | mm                | 1.75 ± 0.1<br>2.85 ± 0.1 |
| Density                | ISO 1183                              | g/cm <sup>3</sup> | 1.317                    |
| Humidity rate          | INS-6711                              | ppm               | < 10,000                 |
| MFI (@225°C – 2.16 kg) | ISO 1133                              | g/10min           | 9.7                      |
| Glass temperature tg   | ISO 11357 DSC (10°C/min – 20 à 280°C) | °C                | 76                       |
| Melting temperature tf | ISO 11357 DSC (10°C/min – 20 à 280°C) | °C                | n/a                      |

## PRINT PARAMETERS AND SPECIMENS DIMENSIONS

|                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| <b>PRINT AXIS</b>            | XY                 |
| <b>PRINT SPEED</b>           | 50 mm/s            |
| <b>INFILL</b>                | 100% - rectilinear |
| <b>INFILL ANGLE</b>          | 45°/-45°           |
| <b>EXTRUSION TEMPERATURE</b> | 225°C              |
| <b>PLATFORM TEMPERATURE</b>  | 60°C               |

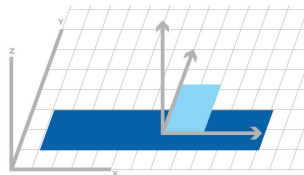
## RESULTS

### TENSILE TEST



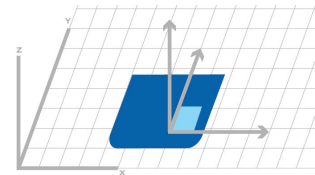
Dim.(mm): 75x12.5x2  
Specimen type: ISO 527-5A

### BENDING TEST - CHARPY IMPACT



Dim. (mm): 80x10x4

### HARDNESS



Dim.(mm): 45x45x4

## PRINTED SPECIMENS PROPERTIES

|                      | PROPERTIES                              | TEST METHODS | UNITS   | VALUES |
|----------------------|---|--------------|---------|--------|
| <b>TENSILE TEST</b>  | Tensile modulus                         | ISO 527      | MPa     | 4,015  |
|                      | Tensile strength                        | ISO 527      | MPa     | 52.9   |
|                      | Elongation @tensile strength            | ISO 527      | %       | 2.4    |
|                      | Tensile stress @break                   | ISO 527      | MPa     | 41.3   |
|                      | Tensile elongation @break               | ISO 527      | %       | 3.4    |
| <b>BENDING TEST</b>  | Flexural modulus                        | ISO 178      | MPa     | 2,987  |
|                      | Flexural stress @3.5%                   | ISO 178      | MPa     | 80.4   |
|                      | Flexural strength                       | ISO 178      | MPa     | >80    |
|                      | Deformation @flexural strength          | ISO 178      | %       | >4*    |
| <b>CHARPY IMPACT</b> | Charpy impact strength (notched type A) | ISO 179      | kJ/m2   | 4.03   |
| <b>HARDNESS</b>      | Hardness                                | ISO 868      | Shore D | 76.4   |

\*According to ISO 178, end of the test at 5% deformation even if there is no specimen break

The results presented are the averaged values of the PETG CARBON 1.75mm range.  
For each test, 5 specimens per reference, previously placed at least 24 hours in climatic chamber (23°C - hygrométrie : 50%) have been tested.

### 9.3 ANEXO C – Reagentes utilizados



Figura A 1 - a) Metil-etil-cetona. b) Acetona. c) Diclorometano

## 9.4 ANEXO D - Tabelas Limites Material-Máquina

### 9.4.1 Bridges

Tabela A 1 - Análise da qualidade das *bridges* do filamento Prusament PLA

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |          |          |       | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|-------|---|
|                     | Excelente                  | Boa      | Razoável | Má    |   |
| 0,30 mm             | 1-35 mm                    | 40-60 mm | 70 mm    | -     | -   |
| 0,20 mm             | 1-35 mm                    | 40-70 mm | -        | -     | Ocorrência de <i>stringing</i> .                                    |
| 0,15 mm             | 1-35 mm                    | 40-60 mm | 70 mm    | -     | Ocorrência de <i>stringing</i> .                                    |
| 0,10 mm             | 1-10 mm                    | -        | 11-60 mm | 70 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado e falha de alguns cordões. |

Tabela A 2 - Análise da qualidade das *bridges* do filamento Prusament PETG

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |          |          |          | Observações                                     |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|----------|---|
|                     | Excelente                  | Boa      | Razoável | Má       |   |
| 0,30 mm             | 1-35 mm                    | 40-60 mm | 70 mm    | -        | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,20 mm             | 1-17 mm                    | 18-45 mm | -        | 50-70 mm | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,15 mm             | 1-16 mm                    | 17-40 mm | -        | 45-70 mm | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,10 mm             | -                          | 1-9 mm   | -        | 10-70 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> .                |

Tabela A 3 - Análise da qualidade das *bridges* do filamento Prusament ASA

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |          |          |       | Observações  |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|-------|--|
|                     | Excelente                  | Boa      | Razoável | Má    |  |
| 0,30 mm             | 1-45 mm                    | 50-70 mm | -        | -     | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> .          |
| 0,20 mm             | 1-30 mm                    | 35-70 mm | -        | -     | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> .          |
| 0,15 mm             | 1-40 mm                    | -        | 45-70 mm | -     | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> acentuado. |
| 0,10 mm             | 1-45 mm                    | -        | 50-60 mm | 70 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado.                |

Tabela A 4 - Análise da qualidade das bridges do filamento *Fillamentum ASA*

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |          |          |          | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|----------|---|
|                     | Excelente                  | Boa      | Razoável | Má       |   |
| 0,30 mm             | 1-40 mm                    | 45-70 mm | -        | -        | Algumas <i>bridges</i> intermédias com um ou outro cordão solto.    |
| 0,20 mm             | 1-30 mm                    | 35-60 mm | 70 mm    | -        | -   |
| 0,15 mm             | 1-40 mm                    | -        | -        | 45-70 mm | -   |
| 0,10 mm             | 1-19 mm                    | 20-30 mm | 35-50 mm | 60-70 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado e falha de alguns cordões. |

Tabela A 5 - Análise da qualidade das *bridges* do filamento *Prusament PC Blend*

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |          |          |          | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|----------|---|
|                     | Excelente                  | Boa      | Razoável | Má       |   |
| 0,30 mm             | 1-70 mm                    | -        | -        | -        | Algumas <i>bridges</i> intermédias com menor qualidade por serem extremidades da peça e esta ter empenado.                                  |
| 0,20 mm             | 1-35 mm                    | 40-60 mm | -        | 70 mm    | Ocorrência de <i>stringing</i> . Algumas <i>bridges</i> intermédias com menor qualidade por serem extremidades da peça e esta ter empenado. |
| 0,15 mm             | -                          | 1-35 mm  | 40-45 mm | 50-70 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> . Algumas <i>bridges</i> intermédias com menor qualidade por serem extremidades da peça e esta ter           |

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |     |          |          | Observações  |
|---------------------|----------------------------|-----|----------|----------|--|
|                     | Excelente                  | Boa | Razoável | Má       |  |
| 0,10 mm             | 1-20 mm                    | -   | -        | 25-70 mm | empenado.<br>Ocorrência de <i>stringing</i> . Largura de alguns cordões inconstante. |

Tabela A 6 - Análise da qualidade das *bridges* do filamento *Fillamentum Flexfill TPU 98A*

| Espessura de camada | Qualidade da <i>bridge</i> |     |          |         | Observações                                     |
|---------------------|----------------------------|-----|----------|---------|---|
|                     | Excelente                  | Boa | Razoável | Má      |   |
| 0,30 mm             | -                          | -   | -        | 1-20 mm | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,20 mm             | -                          | .   | -        | 1-20 mm | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,15 mm             | -                          | -   | 1-2 mm   | 3-20 mm | Ocorrência de <i>blobs</i> e <i>stringing</i> . |
| 0,10 mm             | -                          | -   | 1-4 mm   | 5-20 mm | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado.       |

#### 9.4.2 Overhang

Tabela A 7 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Prusament PLA*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações   |
|---------------------|------------------------------|-----------|---|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |   |
| 0,30 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | -   |
| 0,20 mm             | 0-55°                        | 60°-70°   | Defeito nas arestas laterais.   |
| 0,15 mm             | 0-65°                        | 70°       | -   |
| 0,10 mm             | 0-40°                        | 45°-70°   | Defeito nas arestas laterais.<br>Ocorre desfasamento entre camadas aos 70°. |

Tabela A 8 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Prusament PETG*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações                      |
|---------------------|------------------------------|-----------|----------------------------------|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |                                  |
| 0,30 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | -                                |
| 0,20 mm             | 0-60°                        | 65°-70°   | Ocorrência de <i>stringing</i> . |
| 0,15 mm             | 0-55°                        | 60°-70°   | Ocorrência de <i>stringing</i> . |
| 0,10 mm             | 0-40°                        | 45°-70°   | Defeito nas arestas laterais.    |

Tabela A 9 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Prusament ASA*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações                   |
|---------------------|------------------------------|-----------|-------------------------------|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |                               |
| 0,30 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | -                             |
| 0,20 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |
| 0,15 mm             | 0-60°                        | 60°-70°   | -                             |
| 0,10 mm             | 0-40°                        | 45°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |

Tabela A 10 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Fillamentum ASA*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações                   |
|---------------------|------------------------------|-----------|-------------------------------|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |                               |
| 0,30 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | -                             |
| 0,20 mm             | 0-55°                        | 60°-70°   | -                             |
| 0,15 mm             | 0-55°                        | 60°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |
| 0,10 mm             | 0-45°                        | 50°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |

Tabela A 11 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Prusament PC Blend*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações                   |
|---------------------|------------------------------|-----------|-------------------------------|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |                               |
| 0,30 mm             | 0-55°                        | 60°-70°   | -                             |
| 0,20 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |
| 0,15 mm             | 0-55°                        | 55°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |
| 0,10 mm             | 0-40°                        | 45°-70°   | Defeito nas arestas laterais. |

Tabela A 12 - Análise da qualidade dos *overhangs* do filamento *Fillamentum Flexfill TPU 98A*

| Espessura de camada | Qualidade do <i>Overhang</i> |           | Observações                      |
|---------------------|------------------------------|-----------|----------------------------------|
|                     | Capaz                        | Não Capaz |                                  |
| 0,30 mm             | 0-50°                        | 55°-70°   | -                                |
| 0,20 mm             | 0-70°                        | -         | Ocorrência de <i>stringing</i> . |
| 0,15 mm             | 0-65°                        | 70°       | Ocorrência de <i>stringing</i> . |
| 0,10 mm             | 0-45°                        | 50°-70°   | Defeito nas arestas laterais.    |

### 9.4.3 *Concavidades*

Tabela A 13 - Análise da qualidade das *concavidades* do filamento *Prusament PLA*

| Espessura de camada | Qualidade das <i>Concavidades</i> |         |           | Observações                                |
|---------------------|-----------------------------------|---------|-----------|--|
|                     | Ovalização                        | Capaz   | Não Capaz |  |
| 0,30 mm             | 1-5 mm                            | 6-8 mm  | 9-17 mm   | -  |
| 0,20 mm             | 1-5 mm                            | 6-14 mm | 15-17 mm  | -  |
| 0,15 mm             | 1-4 mm                            | 5-13 mm | 14-17 mm  | -  |
| 0,10 mm             | 1-6 mm                            | 7-13 mm | 14-17 mm  | Ocorrência acentuada de <i>stringing</i> . |

Tabela A 14 - Análise da qualidade das concavidades do filamento *Prusament PETG*

| Espessura de camada | Qualidade das Concavidades |         |           | Observações                                |
|---------------------|----------------------------|---------|-----------|--|
|                     | Ovalização                 | Capaz   | Não Capaz |  |
| 0,30 mm             | 1-5 mm                     | 6-8 mm  | 9-17 mm   | -  |
| 0,20 mm             | 1-5 mm                     | 6-11 mm | 12-17 mm  | -  |
| 0,15 mm             | 1-5 mm                     | 6-13 mm | 12-17 mm  | -  |
| 0,10 mm             | 1-4 mm                     | 5-7 mm  | 8-17 mm   | Ocorrência acentuada de <i>stringing</i> . |

Tabela A 15 - Análise da qualidade das concavidades do filamento *Prusament ASA*

| Espessura de camada | Qualidade das Concavidades |         |           | Observações                                |
|---------------------|----------------------------|---------|-----------|--|
|                     | Ovalização                 | Capaz   | Não Capaz |  |
| 0,30 mm             | 1-5 mm                     | 6-8 mm  | 9-17 mm   | -  |
| 0,20 mm             | 1-4 mm                     | 5-13 mm | 14-17 mm  | -  |
| 0,15 mm             | 1-4 mm                     | 5-10 mm | 11-17 mm  | Ocorrência de <i>stringing</i> .           |
| 0,10 mm             | 1-4 mm                     | 5-8 mm  | 9-17 mm   | Ocorrência acentuada de <i>stringing</i> . |

Tabela A 16 - Análise da qualidade das concavidades do filamento *Fillamentum ASA*

| Espessura de camada | Qualidade das concavidades |         |           | Observações                  |
|---------------------|----------------------------|---------|-----------|------------------------------|
|                     | Ovalização                 | Capaz   | Não Capaz |                              |
| 0,30 mm             | 1-5 mm                     | 6-10 mm | 11-17 mm  | -                            |
| 0,20 mm             | 1-4 mm                     | 5-8 mm  | 9-17 mm   | Ocorrência de empeno.        |
| 0,15 mm             | 1-4 mm                     | 5-8 mm  | 9-17 mm   | -                            |
| 0,10 mm             | 1-4 mm                     | 5-7 mm  | 8-17 mm   | Defeito nas arestas do arco. |

Tabela A 17 - Análise da qualidade das concavidades do filamento *Prusament PC Blend*

| Espessura de camada | Qualidade das Concavidades |         |           | Observações                      |
|---------------------|----------------------------|---------|-----------|----------------------------------|
|                     | Ovalização                 | Capaz   | Não Capaz |                                  |
| 0,30 mm             | 1-4 mm                     | 5-7 mm  | 8-17 mm   | -                                |
| 0,20 mm             | 1-3 mm                     | 4-11 mm | 12-17 mm  | -                                |
| 0,15 mm             | 1-3 mm                     | 4-11 mm | 12-17 mm  | Ocorrência de <i>stringing</i> . |
| 0,10 mm             | 1-4 mm                     | 5-8 mm  | 9-17 mm   | Ocorrência de <i>stringing</i> . |

#### 9.4.4 Convexidades

Tabela A 18 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento *Prusament PLA*

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |   |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,20 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> .  |
| 0,15 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> .  |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> e defeito nas arestas da circunferência. |

Tabela A 19 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento *Prusament PETG*

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |   |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | -   |
| 0,20 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> .  |
| 0,15 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> .  |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> e defeito nas arestas da circunferência. |

Tabela A 20 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento Prusament ASA

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |   |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,20 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,15 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> e defeito nas arestas da circunferência. |

Tabela A 21 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento Fillamentum ASA

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |   |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,20 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,15 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> e defeito nas arestas da circunferência. |

Tabela A 22 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento Prusament PC Blend

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações   |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |   |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,20 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,15 mm             | Capaz                      | Capaz                | Capaz                      | -   |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Capaz                | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> e defeito nas arestas da circunferência. |

Tabela A 23 - Análise da qualidade dos cubos concavidades/convexidades do filamento *Filamentum Flexfill TPU 98A*

| Espessura de camada | Qualidade do Cubo          |                      |                            | Observações  |
|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|--|
|                     | Concavidade circunferência | Concavidade interior | Convexidade circunferência |  |
| 0,30 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | Ocorrência de <i>under-extrusion</i> e <i>stringing</i> acentuado. |
| 0,20 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | Ocorrência de <i>under-extrusion</i> e <i>stringing</i> acentuado. |
| 0,15 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado e <i>ringing</i> .        |
| 0,10 mm             | Não capaz                  | Não capaz            | Capaz                      | Ocorrência de <i>stringing</i> acentuado e <i>ringing</i> .        |

### 9.5 ANEXO E – Tabela dos parâmetros de impressão dos fork grippers

Tabela A 24 -Parâmetros de impressão dos fork grippers em ASA e PC

| Teste número | Espessura da camada | Infill            | Velocidade de impressão | Fan | Retração | Lift   |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------------|-----|----------|--------|
| 1            | 0,20 mm             | 15%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 2            | 0,20 mm             | 30%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 3            | 0,20 mm             | 50%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 4            | 0,15 mm             | 15%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 5            | 0,15 mm             | 30%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 6            | 0,15 mm             | 50%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 7            | 0,10 mm             | 15%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 8            | 0,10 mm             | 30%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 9            | 0,10 mm             | 50%<br>Triangular | Standard                | On  | 1,2 mm   | 0,6 mm |

### 9.6 ANEXO F – Tabela dos parâmetros de impressão dos Provetes de Tração em ASA e PC

Tabela A 25 – Parâmetros de impressão dos provetes de tração em ASA e PC

| Teste número | Espessura da camada | Infill | Raster Angle | Temperatura de extrusão (ASA/PC) | Retração | Lift   |
|--------------|---------------------|--------|--------------|----------------------------------|----------|--------|
| 1            | 0,20 mm             | 100%   | ± 45°        | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 2            | 0,20 mm             | 100%   | 0°/90°       | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 3            | 0,20 mm             | 100%   | 0°           | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 4            | 0,20 mm             | 100%   | ± 45°        | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 5            | 0,20 mm             | 100%   | 0°/90°       | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 6            | 0,20 mm             | 100%   | 0°           | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 7            | 0,20 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 8            | 0,20 mm             | 100%   | 0°/90°       | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 9            | 0,20 mm             | 100%   | 0°           | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 10           | 0,10 mm             | 100%   | ± 45°        | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 11           | 0,10 mm             | 100%   | 0°/90°       | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 12           | 0,10 mm             | 100%   | 0°           | 255°C/265°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 13           | 0,10 mm             | 100%   | ± 45°        | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 14           | 0,10 mm             | 100%   | 0°/90°       | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 15           | 0,10 mm             | 100%   | 0°           | 265°C/275°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 16           | 0,10 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 17           | 0,10 mm             | 100%   | 0°/90°       | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |
| 18           | 0,10 mm             | 100%   | 0°           | 275°C/285°C                      | 1,2 mm   | 0,6 mm |

### 9.7 ANEXO G – Tabelas de parâmetros do pós-processamento dipping

Tabela A 26 - Parâmetros utilizados para o pós-processamento dipping no material PLA

| Teste número | Material | Solvente | Tempo         | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura          |
|--------------|----------|----------|---------------|-------------|--------|--------|---------------|
| 1            | PLA      | MEK      | 1 ciclo 30 s  | 60°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 2            | PLA      | MEK      | 2 ciclos 30 s | 60°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 3            | PLA      | MEK      | 3 ciclos 30 s | 60°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 4            | PLA      | Acetona  | 2 ciclos 30 s | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 5            | PLA      | Acetona  | 3 ciclos 30 s | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 6            | PLA      | Acetona  | 4 ciclos 30 s | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 7            | PLA      | DCM      | 30 s          | -           | 150 ml | Ar     | -             |
| 8            | PLA      | DCM      | 60 s          | -           | 150 ml | Ar     | -             |
| 9            | PLA      | DCM      | 90 s          | -           | 150 ml | Ar     | -             |

Tabela A 27 - Parâmetros utilizados para o pós-processamento dipping no material ASA

| Teste número | Material | Solvente | Tempo | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura |
|--------------|----------|----------|-------|-------------|--------|--------|------|
| 1            | ASA      | MEK      | 60 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 2            | ASA      | MEK      | 120 s | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 3            | ASA      | MEK      | 180 s | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 4            | ASA      | Acetona  | 30 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 5            | ASA      | Acetona  | 60 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 6            | ASA      | Acetona  | 90 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 7            | ASA      | DCM      | 20 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 8            | ASA      | DCM      | 40 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |
| 9            | ASA      | DCM      | 60 s  | -           | 150 ml | Ar     | -    |

Tabela A 28 - Parâmetros utilizados para o pós-processamento *dipping* no material PETG

| Teste número | Material | Solvente | Tempo             | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura             |
|--------------|----------|----------|-------------------|-------------|--------|--------|------------------|
| 1            | PETG     | MEK      | 1 ciclo<br>60 s   | 70°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 2            | PETG     | MEK      | 2 ciclos<br>60 s  | 70°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 3            | PETG     | MEK      | 3 ciclos<br>60 s  | 70°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 4            | PETG     | Acetona  | 1 ciclo<br>120 s  | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 5            | PETG     | Acetona  | 2 ciclos<br>120 s | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 6            | PETG     | Acetona  | 3 ciclos<br>120 s | 50°C        | 300 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 7            | PETG     | DCM      | 10 s              | -           | 150 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 8            | PETG     | DCM      | 2 ciclos<br>10 s  | -           | 150 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |
| 9            | PETG     | DCM      | 3 ciclos<br>10 s  | -           | 150 ml | Ar     | 30 min a<br>40°C |

### 9.9 ANEXO I – Tabelas de parâmetros do pós-processamento vapour smoothing

Tabela A 30 - Parâmetros pós-processamento vapour smoothing em PLA

| Teste Número | Material | Solvente                        | Tempo             | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura          |
|--------------|----------|---------------------------------|-------------------|-------------|--------|--------|---------------|
| 1            | PLA      | MEK                             | 2 ciclos<br>15 s  | 75°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 2            | PLA      | MEK                             | 3 ciclos<br>15 s  | 75°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 3            | PLA      | MEK                             | 4 ciclos<br>15 s  | 75°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 4            | PLA      | Acetona                         | 2 ciclos<br>120 s | 55°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 5            | PLA      | Acetona                         | 3 ciclos<br>120 s | 55°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 6            | PLA      | Acetona                         | 4 ciclos<br>120 s | 55°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 7            | PLA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 5 min             | 40°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 8            | PLA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 2 ciclos<br>5min  | 40°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |
| 9            | PLA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 3 ciclos<br>5 min | 40°C        | 200 ml | Ar     | 30 min a 40°C |

Tabela A 31 - Parâmetros pós-processamento *vapour smoothing* em ASA

| Teste Número | Material | Solvente                        | Tempo   | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura |
|--------------|----------|---------------------------------|---------|-------------|--------|--------|------|
| 1            | ASA      | MEK                             | 6 min   | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 2            | ASA      | MEK                             | 7,5 min | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 3            | ASA      | MEK                             | 9 min   | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 4            | ASA      | Acetona                         | 5 min   | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 5            | ASA      | Acetona                         | 7 min   | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 6            | ASA      | Acetona                         | 9 min   | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 7            | ASA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 5 min   | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 8            | ASA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 7,5 min | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 9            | ASA      | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 10 min  | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |

Tabela A 32 - Parâmetros pós-processamento *vapour smoothing* em PETG

| Teste Número | Material | Solvente                        | Tempo    | Temperatura | Qtd.   | Arref. | Cura |
|--------------|----------|---------------------------------|----------|-------------|--------|--------|------|
| 1            | PETG     | MEK                             | 15 min   | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 2            | PETG     | MEK                             | 20 min   | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 3            | PETG     | MEK                             | 25 min   | 75°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 4            | PETG     | Acetona                         | 7,5 min  | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 5            | PETG     | Acetona                         | 10 min   | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 6            | PETG     | Acetona                         | 12,5 min | 55°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 7            | PETG     | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 7 min    | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 8            | PETG     | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 9 min    | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |
| 9            | PETG     | CH <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> | 11 min   | 40°C        | 200 ml | Ar     | -    |

### 9.10 ANEXO J - Tabela de parâmetros de impressão dos provetes de tração em Onyx e PETG Carbon

Tabela A 33 - Parâmetros de impressão dos provetes de tração em Onyx e PETG Carbon

| Teste número | Espessura da camada | Infill | Raster Angle | Temperatura de extrusão (Onyx/PETG Carbon) | Retração | Orientação | Lift       |
|--------------|---------------------|--------|--------------|--|----------|------------|------------|
| 1            | 0,20 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/250°C                                | 1,2 mm   | Horizontal | - / 0,3 mm |
| 2            | 0,20 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/250°C                                | 1,2 mm   | Vertical   | - / 0,3 mm |
| 3            | 0,10 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/250°C                                | 1,2 mm   | Horizontal | - / 0,3 mm |
| 4            | 0,10 mm             | 100%   | ± 45°        | 275°C/250°C                                | 1,2 mm   | Vertical   | - / 0,3 mm |

### 9.11 ANEXO K – Tabela de parâmetros de impressão dos provetes de tração reforçados com fibras contínuas de carbono

Tabela A 34 - Parâmetros de impressão dos provetes de tração reforçados com fibras contínuas de carbono

| Teste número | Espessura da camada | <i>Infill</i> | <i>Raster Angle</i>      | Temperatura de extrusão | Tipo de reforço                               | Número de camadas |
|--------------|---------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|---|-------------------|
| 1            | 0,20 mm             | 100%          | -                        | 275°C                   | Concêntrico,<br>2 perímetros de fibra         | 18                |
| 2            | 0,20 mm             | 100%          | -                        | 275°C                   | Concêntrico,<br>4 perímetros de fibra         | 18                |
| 3            | 0,20 mm             | 100%          | 0°, 45°,<br>90°,<br>135° | 275°C                   | Isotrópico<br>com 2<br>perímetros de<br>fibra | 6                 |
| 4            | 0,20 mm             | 100%          | 0°, 45°,<br>90°,<br>135° | 275°C                   | Isotrópico<br>com 2<br>perímetros de<br>fibra | 12                |
| 5            | 0,20 mm             | 100%          | 0°, 45°,<br>90°,<br>135° | 275°C                   | Isotrópico<br>com 2<br>perímetros de<br>fibra | 18                |

9.12 ANEXO L – Imagens das capas de telemóveis dos Teste 2 e 3, após produção e pós-processamento

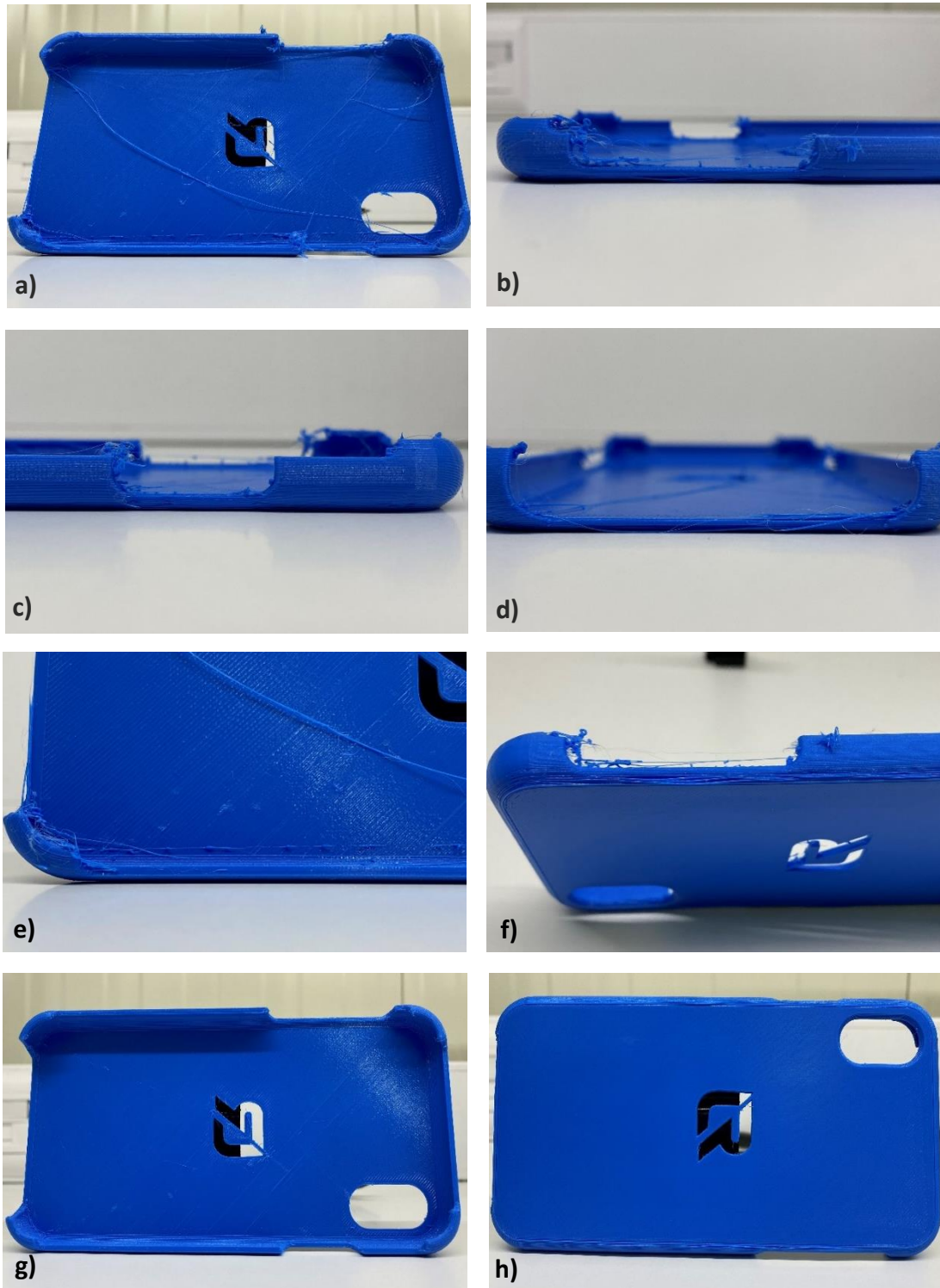


Figura A 2 - a) Frente da capa de telemóvel (Teste 2). b) Detalhe de stringing do lado esquerdo. c) Detalhe de stringing no lado direito. d) Detalhe de stringing e desfasamento entre camadas na parte de baixo. e) Marcas na camada superior do interior da capa. f) Desfasamento entre camadas na lateral esquerda. g) Frente da capa com pós-processamento. h) Traseira da capa com pós-processamento.

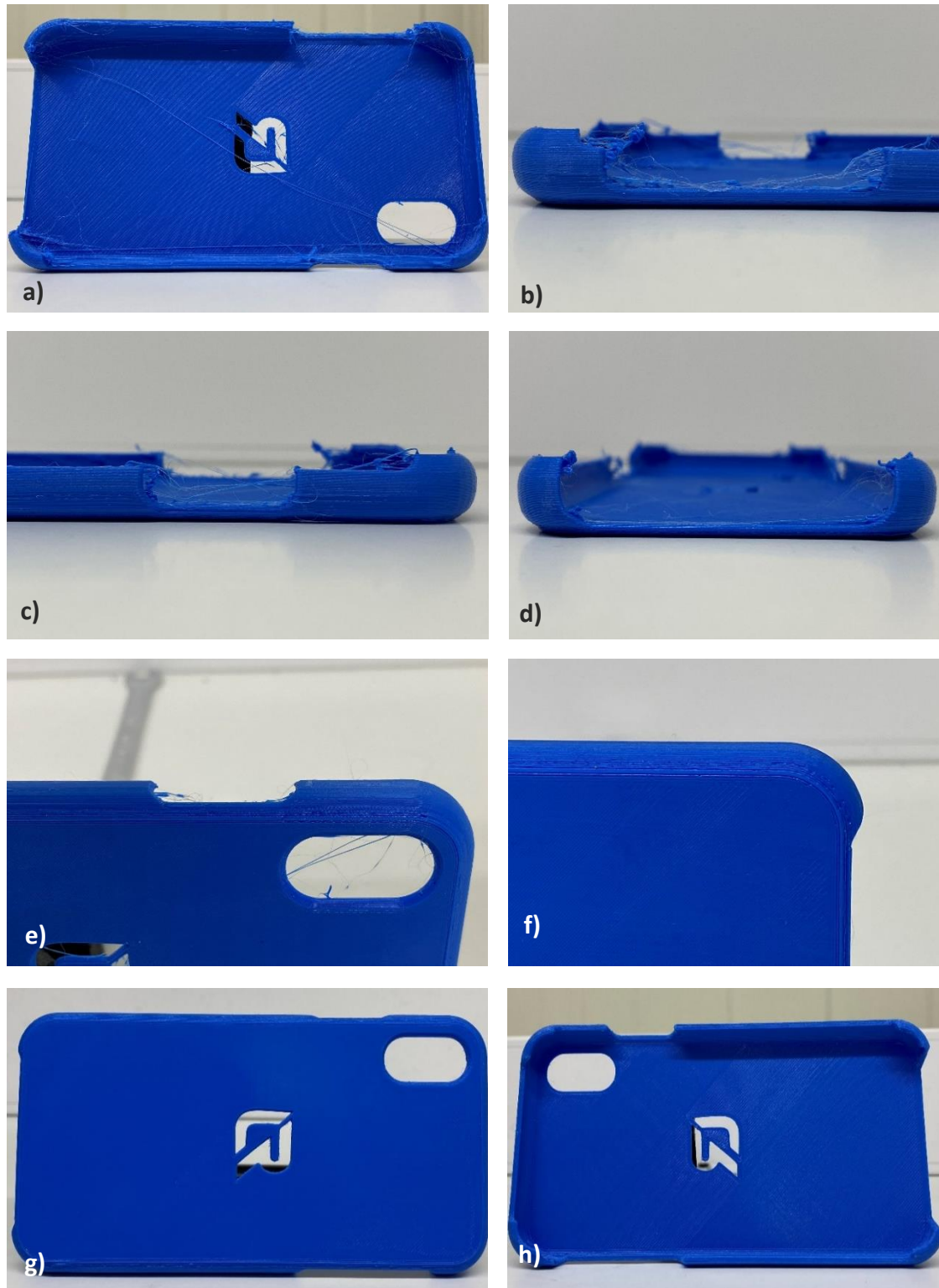


Figura A 3 - a) Frente da capa de telemóvel (Teste 3). b) Detalhe de stringing do lado esquerdo. c) Detalhe de stringing no lado direito. d) Detalhe de stringing e desfasamento entre camadas na parte de inferior. e) Desfasamento entre camadas na lateral direita. f) Desfasamento entre camadas na lateral esquerda. g) Frente da capa com pós-processamento. h) Traseira da capa com pós-processamento.

### 9.13 ANEXO M – Método Taguchi e ANOVA dos fork grippers em ASA

#### 9.13.1 Método Taguchi

Na Figura A 4 está representado um gráfico do rácio S/N, o qual indica os melhores parâmetros em relação aos resultados obtidos da rugosidade Ra das superfícies superiores das amostras. Através deste gráfico, pode-se observar que os melhores parâmetros para a obtenção de menores valores da rugosidade Ra da superfície superior foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 30%.

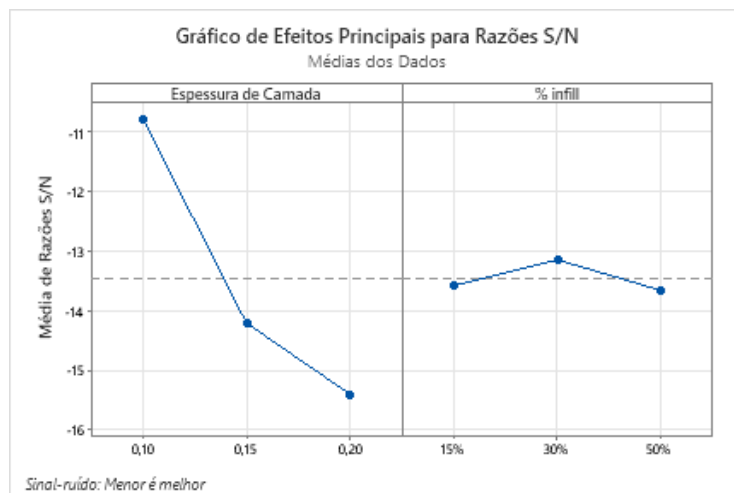


Figura A 4 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Ra das superfícies superiores

O gráfico S/N da Figura A 5, diz respeito à rugosidade Rz da superfície superior dos *fork grippers*. Os melhores parâmetros obtidos para esta característica foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 15%.

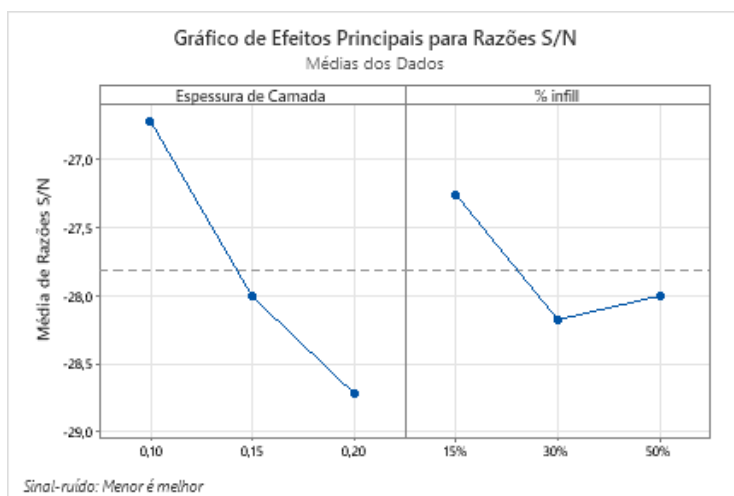


Figura A 5 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Rz das superfícies superiores

Na Figura A 6 está representado o gráfico S/N da rugosidade Ra das superfícies laterais. Os melhores parâmetros para esta característica foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 50%.

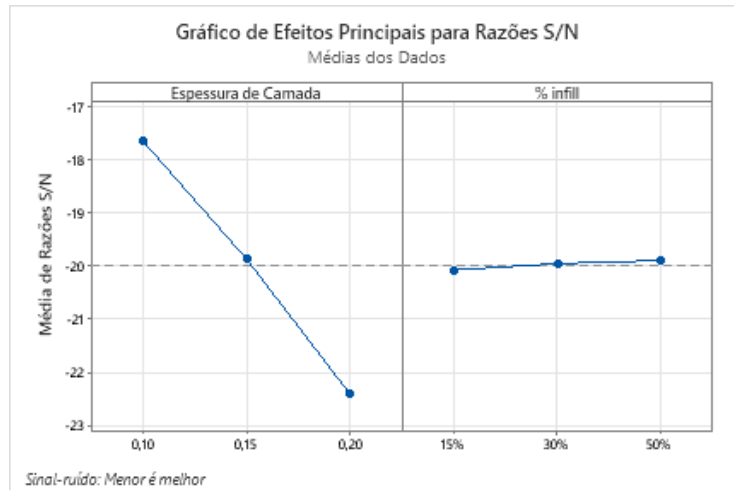


Figura A 6 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Ra das superfícies laterais

Quanto à rugosidade Rz da superfície lateral, a partir da Figura A 7, pode-se observar que os melhores valores obtidos para o menor valor desta característica foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 50%.

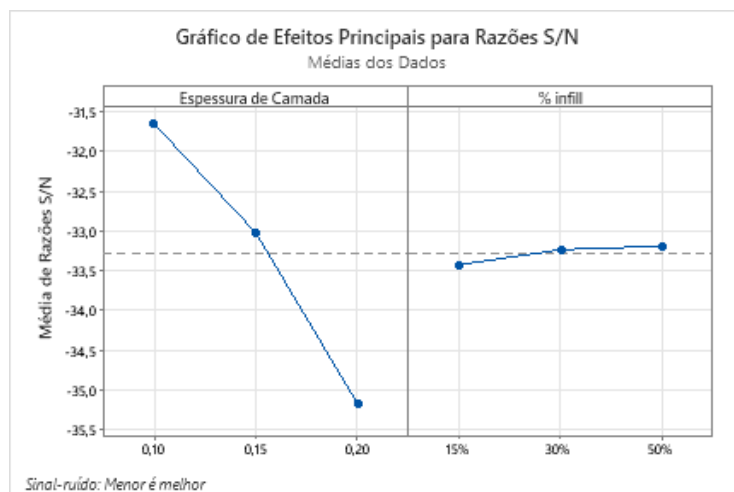


Figura A 7 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Rz das superfícies laterais

Com recurso às Figuras A 6 e 7, verifica-se que, tal como na rugosidade das superfícies superiores, as rugosidades das superfícies laterais não são muito influenciadas pela percentagem de *infill*, sendo que a linha de tendência não apresenta uma variação

representativa. Neste caso, observa-se que a espessura de camada apresenta uma tendência mais significativa.

Na Figura A 8, pode-se observar o gráfico S/N do desvio dimensional medido, verificando-se alguma significância dos dois parâmetros. Quanto aos melhores valores de impressão obtidos, estes foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 15%.

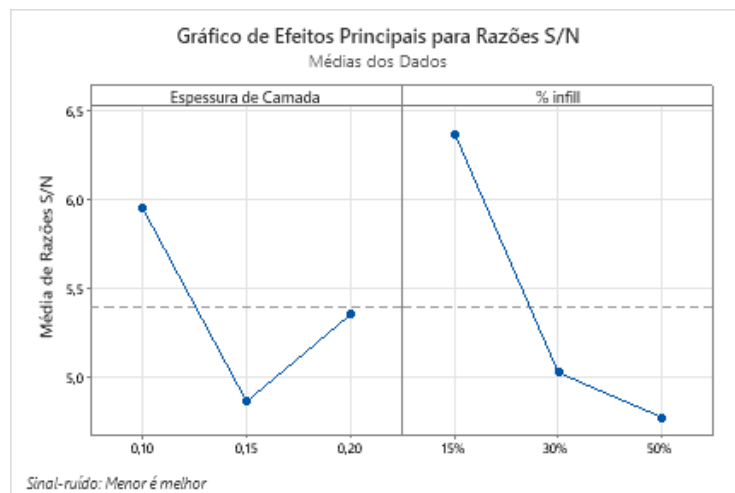


Figura A 8 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados do desvio dimensional

Na Tabela A 35 estão apresentados os melhores parâmetros de impressão dos *fork grippers* em ASA para cada característica, pelo método Taguchi. Em suma, tanto a rugosidade das superfícies superiores como das laterais, apresentam uma tendência de menor rugosidade para menores espessuras de camada. Quanto ao desvio dimensional, este apresenta uma tendência de aumento de desvios para maiores percentagens de *infill*.

Tabela A 35 - Melhores parâmetros de impressão, pelo método Taguchi

| Propriedade            | Espessura de Camada | % infill |
|------------------------|---------------------|----------|
| Ra Superfície Superior | 0,10 mm             | 30%      |
| Rz Superfície Superior | 0,10 mm             | 15%      |
| Ra Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 50%      |
| Rz Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 50%      |
| Desvio Dimensional     | 0,10 mm             | 15%      |

### 9.13.1.1 Análise da Variância (ANOVA)

A ANOVA indica a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro, através o valor-p. Este valor-p só é significativo se for menor ou igual a 0,05 e, quanto menor for este valor maior impacto terá o parâmetro em questão. Além disso, com recurso a esta análise também é possível analisar a fiabilidade do modelo através do coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Na Figura A 9, pode-se observar a linha de tendência dos resultados da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores das amostras, apresentando um coeficiente de determinação de 83,83% e 80,30%, respetivamente.

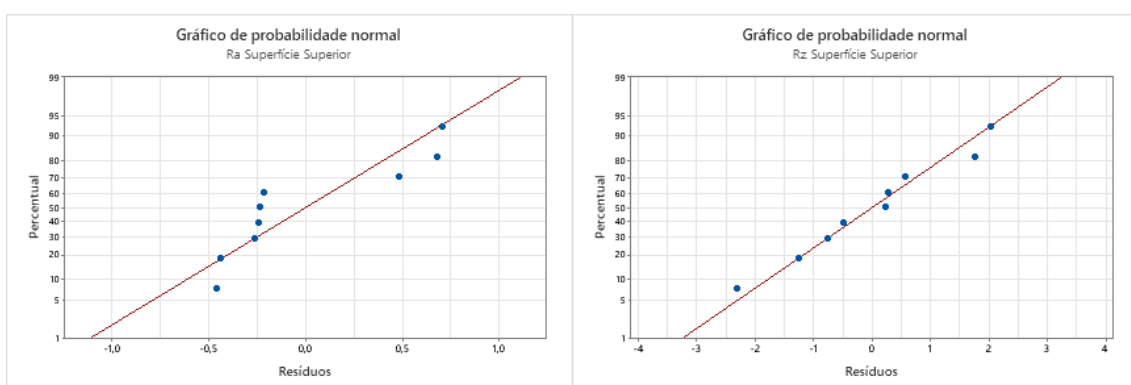


Figura A 9 - Linhas de tendência dos resultados da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores

A partir da TABELA A 36, verifica-se que a espessura de camada é o parâmetro com maior influência para os resultados da rugosidade Ra das superfícies superiores, obtendo o menor valor-p, 0,027. Em relação a Rz, apesar do valor-p da espessura de camada ser superior a 0,05, o valor-p da percentagem de *infill* é muito superior. Posto isto, considerou-se que o parâmetro com maior influência é a espessura de camada.

Tabela A 36 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores

| Parâmetro           | Ra Superfície Superior |        | Rz Superfície Superior |        |
|---------------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
|                     | Valor-p                | $R^2$  | Valor-p                | $R^2$  |
| Espessura de Camada | 0,027                  | 83,83% | 0,055                  | 80,30% |
| % <i>infill</i>     | 0,823                  |        | 0,302                  |        |

Na Figura A 10, estão representados os gráficos da linha de tendência dos valores das rugosidades Ra e Rz das superfícies laterais, verificando-se um coeficiente de determinação de 99,09% e de 99,46%, respetivamente.

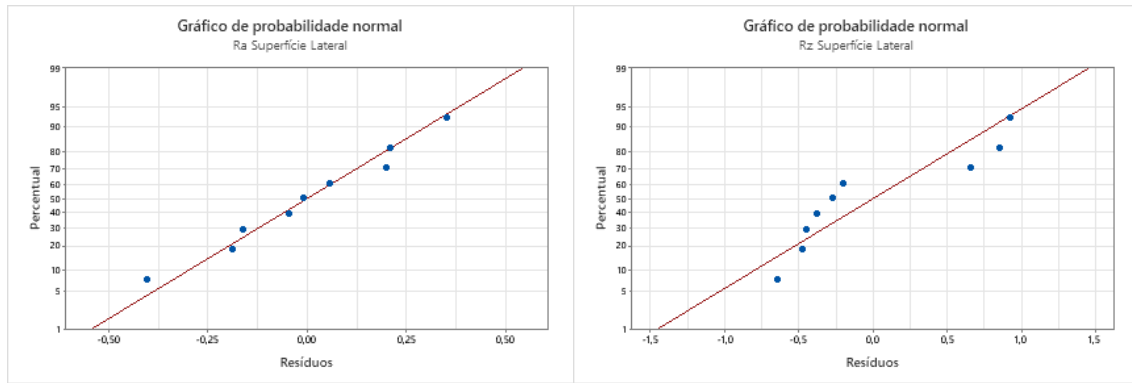


Figura A 10 - Linhas de tendência dos resultados da rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais

Em relação aos valores da rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais, na TABELA A 37 verificou-se que tanto para Ra como para Rz, o parâmetro com maior influência é a espessura de camada, obtendo um valor-p de 0,000 em ambas.

Tabela A 37 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais

| Parâmetro           | Ra Superfície Lateral |                | Rz Superfície Lateral |                |
|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
|                     | Valor-p               | R <sup>2</sup> | Valor-p               | R <sup>2</sup> |
| Espessura de Camada | 0,000                 | 99,09%         | 0,000                 | 99,46%         |
| <i>% infill</i>     | 0,623                 |                | 0,244                 |                |

Na Figura A 11, pode-se observar o gráfico de tendência dos resultados do desvio dimensional, onde se verifica alguma dispersão de dados, sendo que o coeficiente de determinação foi de 66,93%.

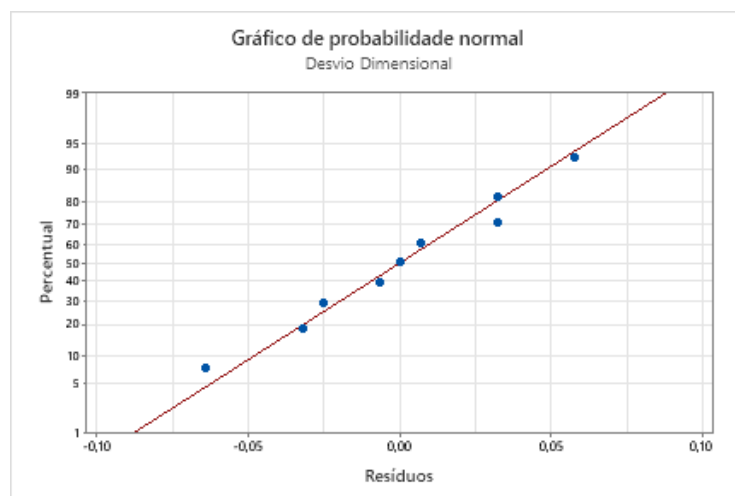


Figura A 11 – Linha de tendência dos resultados do desvio dimensional

Na Tabela A 38 verifica-se que os ambos os parâmetros apresentam valores-p superiores a 0,05. Neste caso, o menor valor-p é referente ao parâmetro percentagem de *infill*, posto isto, considerou-se que este reflete uma maior influência no desvio dimensional.

Tabela A 38 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do desvio dimensional

| Parâmetro           | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada | 0,385   | 66,93%         |
| % <i>Infill</i>     | 0,172   |                |

Em conclusão, na Tabela A 39, estão representados os parâmetros com maior influência nos resultados obtidos.

Tabela A 39 - Parâmetros mais significativos na rugosidade e no desvio dimensional, pela análise da variância

| Propriedade            | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Ra Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Ra Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Desvio Dimensional     | % <i>Infill</i>               |

## 9.14 ANEXO N – Método Taguchi e ANOVA dos fork grippers em PC

### 9.14.1 Método Taguchi

Na Figura A 12 está representado um gráfico do rácio S/N, que indica os melhores parâmetros em relação aos resultados obtidos da rugosidade Ra das superfícies superior das amostras. Através deste gráfico pode-se observar que os melhores parâmetros para a obtenção de rugosidade Ra menores da superfície superior são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % infill – 50%.

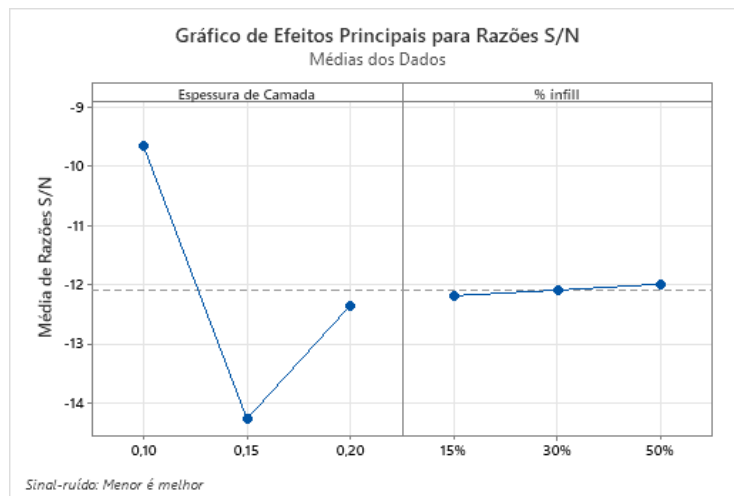


Figura A 12 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Ra das superfícies superiores

O gráfico S/N, presente na Figura A 13, que diz respeito à rugosidade Rz da superfície superior dos *fork grippers*, é bastante semelhante ao gráfico da Figura A 13, sendo que os melhores parâmetros obtidos, são os mesmos:

- Espessura de camada – 0,10 mm
- % infill – 50%.

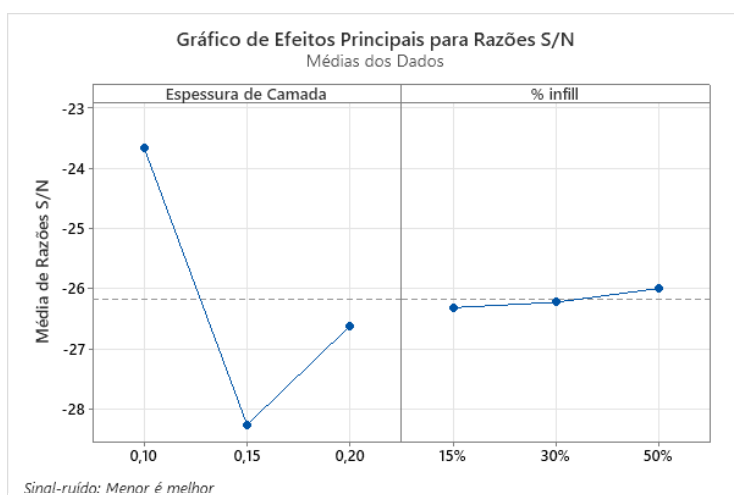


Figura A 13 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Rz das superfícies superiores

Ambos os gráficos mostram que a percentagem de *infill* não apresenta uma tendência muito considerável, enquanto que a espessura de camada apresenta uma tendência mais representativa.

Na Figura A 14 está representado o gráfico S/N da rugosidade Ra das superfícies laterais. Os melhores valores para esta característica são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 30%.

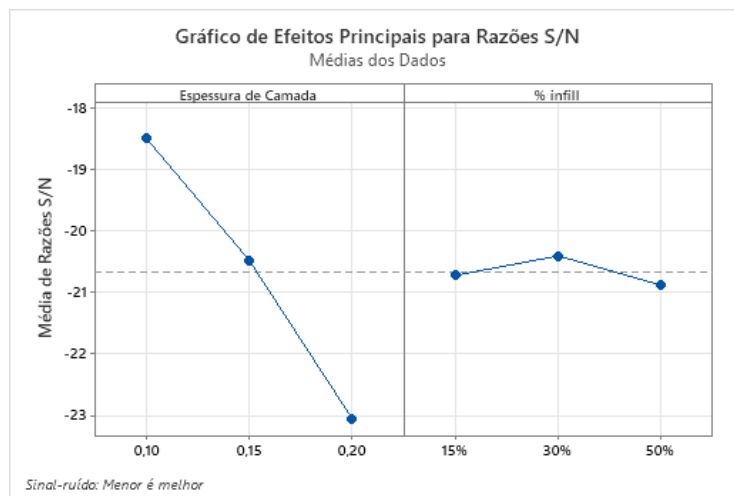


Figura A 14 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Ra das superfícies laterais

Quanto à rugosidade Rz da superfície lateral, através da Figura A 15, pode-se observar que os melhores valores obtidos para o menor valor desta característica foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 30%.

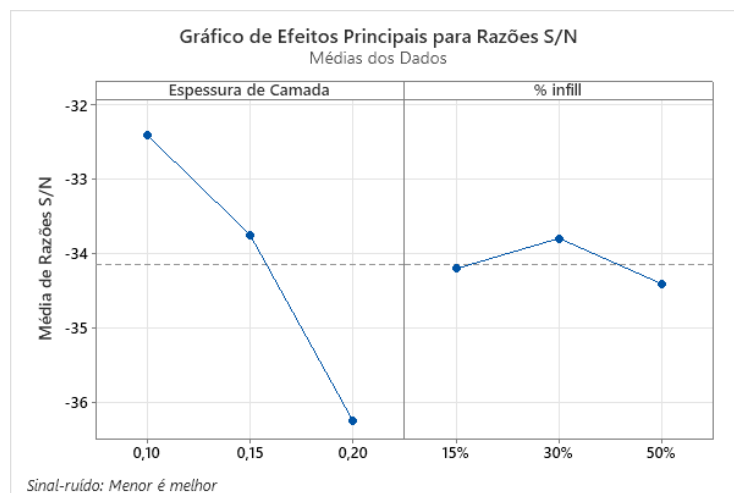


Figura A 15 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade Rz das superfícies laterais

Com recurso às Figuras A 14 e 15, constata-se que, tal como na rugosidade das superfícies superiores, as rugosidades das superfícies laterais também não são muito influenciadas pela percentagem de *infill*. Além disso, observa-se que a espessura de camada apresenta uma tendência mais significativa.

Na Figura A 16, pode-se observar o gráfico S/N do desvio dimensional medido, verificando-se a significância de ambos os parâmetros. Quanto aos melhores valores de impressão obtidos, estes foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- % *infill* – 15%.

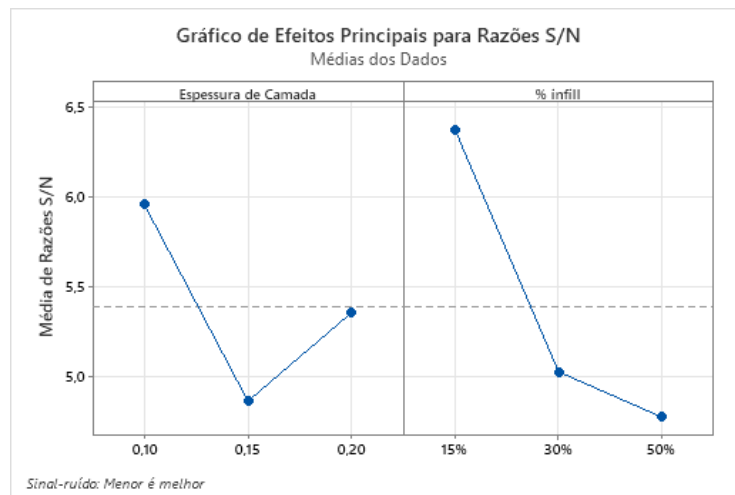


Figura A 16 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados do desvio dimensional

Na Tabela A 40 estão apresentados os melhores parâmetros de impressão dos *fork grippers* em PC para cada propriedade, pelo método Taguchi.

Tabela A 40 - Melhores parâmetros de impressão, pelo método Taguchi

| Propriedade            | Espessura de Camada | % infill |
|------------------------|---------------------|----------|
| Ra Superfície Superior | 0,10 mm             | 50%      |
| Rz Superfície Superior | 0,10 mm             | 50%      |
| Ra Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 30%      |
| Rz Superfície Lateral  | 0,10 mm             | 30%      |
| Desvio Dimensional     | 0,10 mm             | 15%      |

Em suma, observou-se que a menor rugosidade e o menor desvio dimensional se obtiveram com a menor espessura de camada, 0,10 mm. Para além disso, tal como sucedeu com os *fork grippers* em ASA, o desvio dimensional apresenta uma tendência de aumento de desvios para maiores percentagens de *infill*. Quanto às rugosidades laterais, estas apresentam uma diminuição para menores valores da espessura de camada.

### 9.14.2 Análise da Variância (ANOVA)

Como já foi referido anteriormente, o valor-p só é significativo se for menor ou igual a 0,05 e, quanto menor for este valor, maior impacto terá este parâmetro em questão. Além disso, com recurso a esta análise também é possível analisar a fiabilidade do modelo através do coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Na Figura A 17, pode-se observar a linha de tendência dos resultados da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores das amostras. Quanto à fiabilidade do modelo verifica-se um valor de  $R^2$  de 79,39% para Ra e 83,98 para Rz.

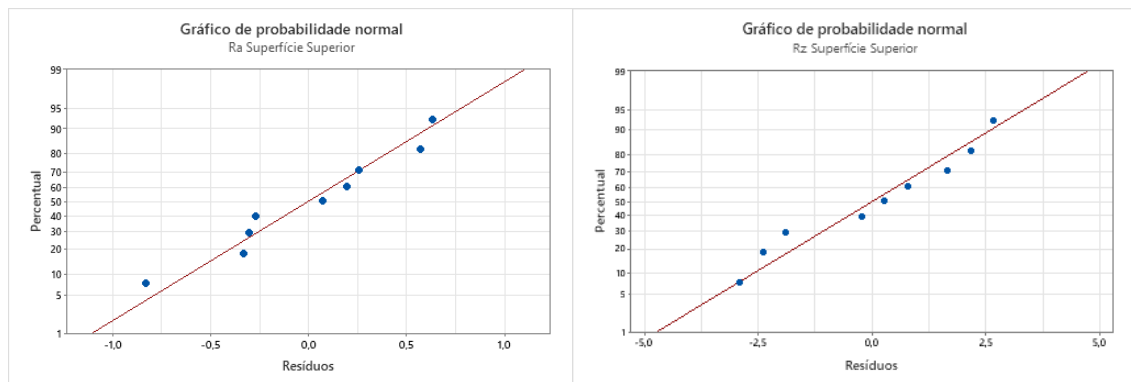


Figura A 17 - Linhas de tendência da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores

Na Tabela A 41, verifica-se que a espessura de camada é o parâmetro com maior influência para os resultados da rugosidade Ra e Rz das superfícies superior, obtendo o menor valor-p de 0,043 e 0,026, respetivamente.

Tabela A 41 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da rugosidade Ra e Rz das superfícies superiores

| Parâmetro           | Ra Superfície Superior |        | Rz Superfície Superior |        |
|---------------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
|                     | Valor-p                | $R^2$  | Valor-p                | $R^2$  |
| Espessura de Camada | 0,043                  | 79,39% | 0,026                  | 83,98% |
| % infill            | 0,992                  |        | 0,984                  |        |

Na Figura A 18, estão representados os gráficos da linha de tendência dos valores das rugosidades Ra e Rz das superfícies laterais. O coeficiente de determinação para Ra foi de 98,24% e de 92,16% para Rz.

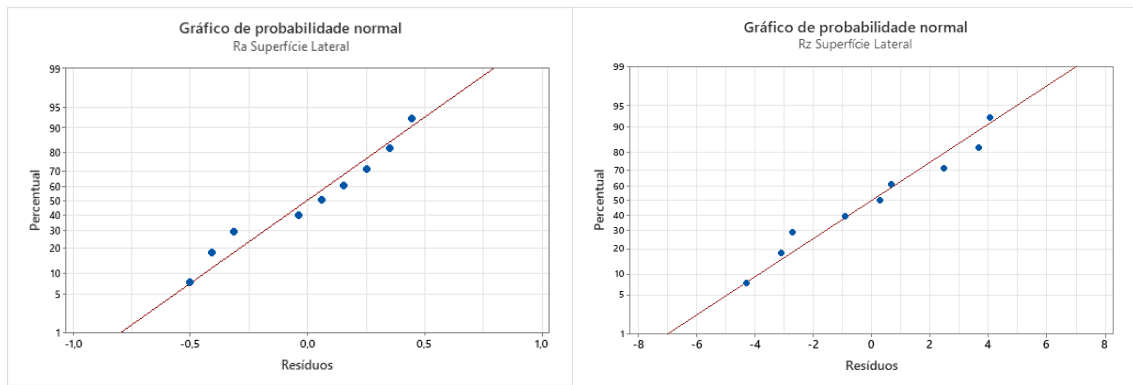


Figura A 18 - Linhas de tendência da rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais

Quanto à rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais, na Tabela A 42, verifica-se que tanto para Ra como para Rz, o parâmetro com maior influência é a espessura de camada, obtendo um valor-p de 0,000 e de 0,006, respetivamente.

Tabela A 42 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da rugosidade Ra e Rz das superfícies laterais

| Parâmetro           | Ra Superfície Lateral |                | Rz Superfície Lateral |                |
|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
|                     | Valor-p               | R <sup>2</sup> | Valor-p               | R <sup>2</sup> |
| Espessura de Camada | 0,000                 | 98,24%         | 0,006                 | 92,16%         |
| % infill            | 0,547                 |                | 0,767                 |                |

Na Figura A 19, pode-se observar a linha de tendência dos resultados do desvio dimensional.

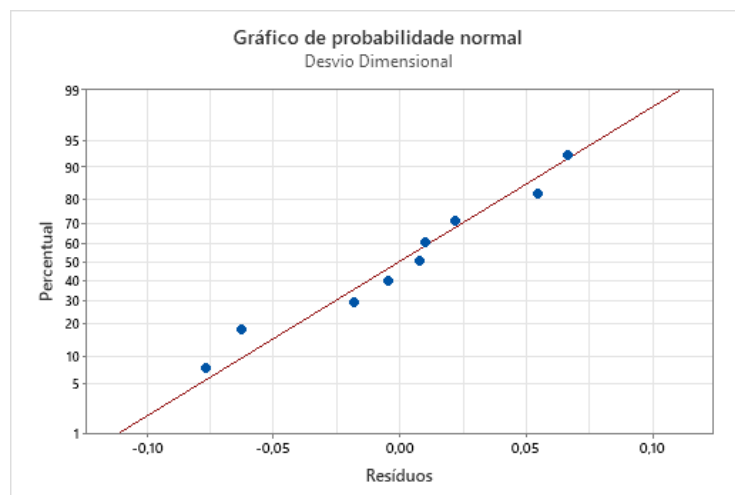


Figura A 19 - Linha de tendência do desvio dimensional

Na Tabela A 43 verifica-se que os ambos os parâmetros apresentam valores-p superiores a 0,05. Neste caso, o menor valor-p é referente ao parâmetro espessura de camada, posto isto, considerou-se que este reflete ligeiramente maior influência no desvio dimensional.

Tabela A 43 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do desvio dimensional

| Parâmetro           | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada | 0,072   | 83,95%         |
| % <i>Infill</i>     | 0,081   |                |

A partir da Tabela A 44 pode-se constatar que o parâmetro com maior influência nos resultados obtidos dos *fork grippers* em ASA foi a espessura de camada, sendo o parâmetro mais influente para todas as propriedades analisadas.

Tabela A 44 - Parâmetros mais significativos na rugosidade e no desvio dimensional, pela análise da variância

| Propriedade            | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Ra Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Superior | Espessura de Camada           |
| Ra Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Rz Superfície Lateral  | Espessura de Camada           |
| Desvio Dimensional     | Espessura de Camada           |

## 9.15 ANEXO O – Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em ASA

### 9.15.1 Método Taguchi

Na Figura A 20 está representado um gráfico do rácio S/N, o qual indica os melhores parâmetros em relação aos resultados obtidos do módulo de elasticidade. Através deste gráfico, pode-se observar que os melhores parâmetros para a obtenção de módulo de elasticidade mais elevado foram:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Temperatura de extrusão – 255°C;
- *Raster angle* – 0°.

A partir destes gráficos, verifica-se que o módulo de elasticidade apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão e com o aumento da espessura de camada.

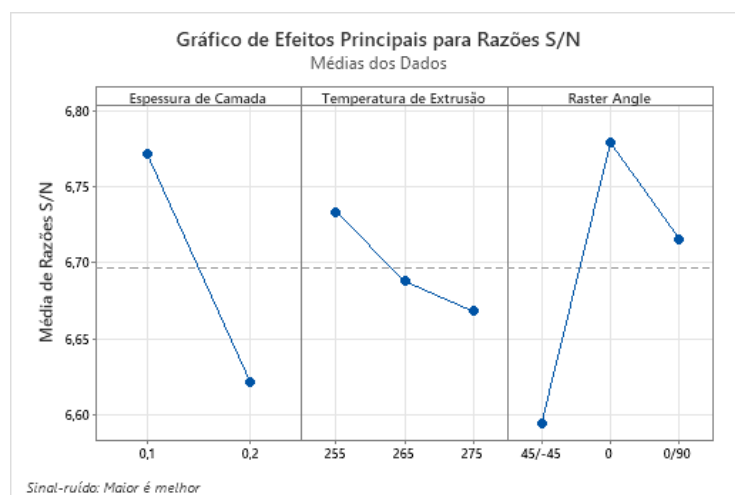


Figura A 20 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do módulo de elasticidade

Quanto à tensão máxima, na Figura A 21, pode-se observar os melhores parâmetros de impressão, sendo estes:

- Espessura de camada – 0,20 mm;
- Temperatura de extrusão – 265°C;
- *Raster angle* – 0°.

Verifica-se ainda, que o *raster angle* apresenta uma maior influência do que os restantes parâmetros, apresentado um declive bastante acentuado da variação.

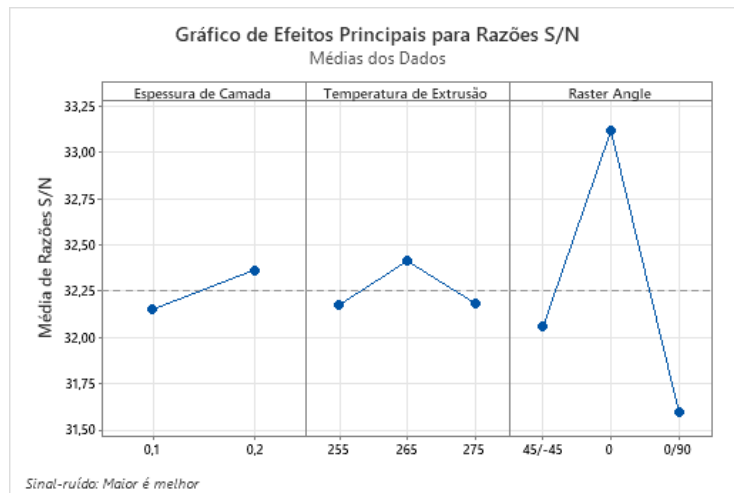


Figura A 21 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da tensão máxima

Na Figura A 22 está representado o gráfico S/N do alongamento. Os melhores valores para esta propriedade mecânica foram:

- Espessura de camada – 0,20 mm;
- Temperatura de extrusão – 255°C;
- *Raster angle* –  $\pm 45^\circ$ .

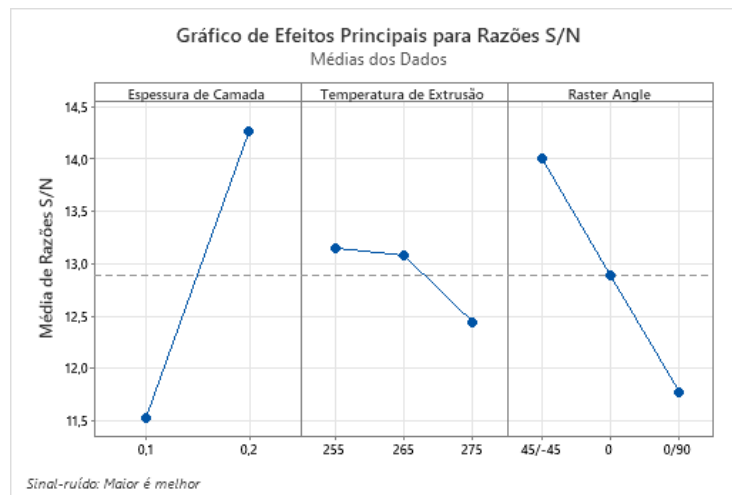


Figura A 22 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados do alongamento

A variação da linha de tendência mais acentuada ocorre na espessura de camada, sendo esta a propriedade com maior influência no alongamento. Além disso, o alongamento apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura de extrusão.

Na Tabela A 45 estão apresentados os melhores parâmetros de impressão dos provetes em ASA, pelo método Taguchi.

Tabela A 45 - Melhores parâmetros de impressão, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Temperatura de Extrusão | <i>Raster Angle</i> |
|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | 255°C                   | 0°                  |
| Tensão Máxima          | 0,20 mm             | 265°C                   | 0°                  |
| Alongamento            | 0,20 mm             | 255°C                   | ±45°                |

### 9.15.2 Análise da Variância (ANOVA)

Mais uma vez, a análise da variância permite perceber a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro. Além disso, esta análise ainda fornecer valores de coeficientes de determinação que permitem tirar conclusões à cerca da fiabilidade do processo.

Na Figura A 23, pode-se observar a linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade.

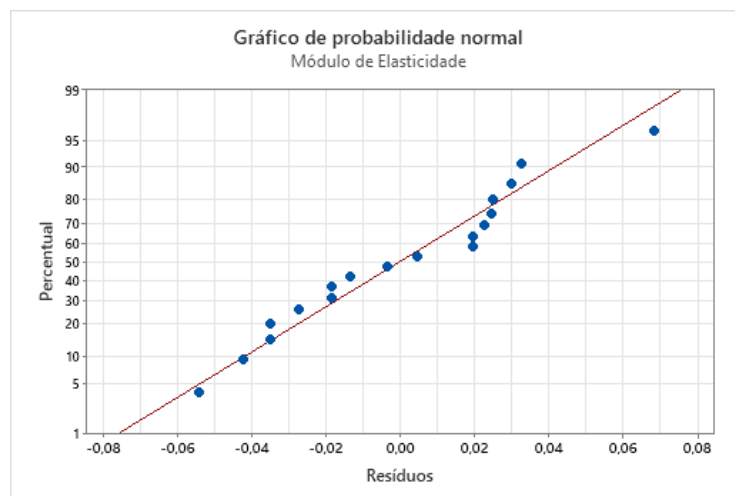


Figura A 23 - Linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade

Na Tabela A 46, verifica-se que a espessura de camada é o parâmetro com maior influência para os resultados do módulo de elasticidade, obtendo o menor valor-p, de 0,060. Quanto à fiabilidade do modelo obteve-se um valor de  $R^2$  de 43,91%.

Tabela A 46 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do módulo de elasticidade

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,060   | 43,91%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,750   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,148   |                |

No gráfico, da Figura A 24, pode-se observar a linha de tendência de resultados da tensão máxima.

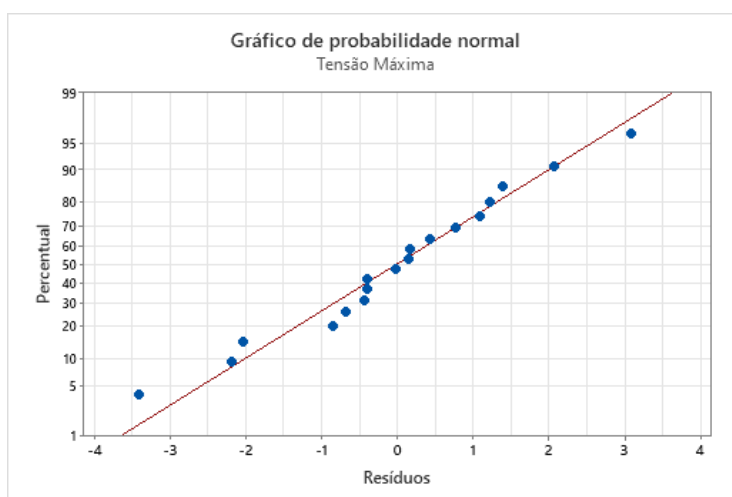


Figura A 24 - Linha de tendência dos resultados da tensão máxima

Na Tabela A 47, pode-se constatar que o parâmetro com maior contribuição na tensão máxima é o *raster angle*, apresentando o menor valor-p, de 0,000. Esta análise apresenta uma maior fiabilidade do que a anterior, obtendo-se um valor R<sup>2</sup> de 80,72%.

Tabela A 47 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da tensão máxima

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,371   | 80,72%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,553   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,000   |                |

No gráfico presente na Figura A 25, está representada a linha de tendência do alongamento, verificando alguma dispersão de valores.

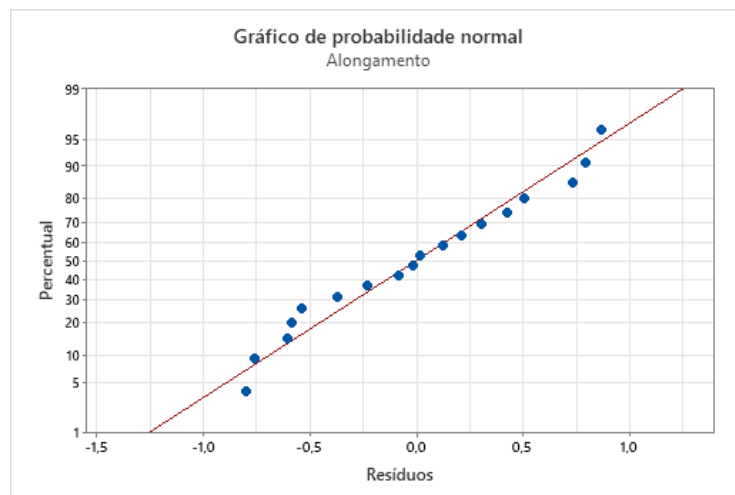


Figura A 25 - Linha de tendência dos resultados do alongamento

Na Tabela A 48, estão indicados os resultados da análise da variância, obtendo-se um valor-p de 0,000, referente à espessura de camada. Posto isto, este parâmetro apresenta um maior impacto no alongamento.

Tabela A 48 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do alongamento

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,000   | 74,26%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,453   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,024   |                |

Por último, na Tabela A 49, pode-se observar os parâmetros com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, pela análise da variância.

Tabela A 49 - Parâmetros com maior influência em cada propriedade mecânica, pela análise da variância

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Espessura de Camada           |
| Tensão Máxima          | <i>Raster Angle</i>           |
| Alongamento            | Espessura de Camada           |

## 9.16 ANEXO P - Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em PC

### 9.16.1 Método Taguchi

Na Figura A 26 está representado um gráfico do rácio S/N, o qual indica os melhores parâmetros em relação aos resultados obtidos do módulo de elasticidade. Através deste gráfico pode-se observar que os melhores parâmetros para a obtenção de um maior módulo de elasticidade são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Temperatura de extrusão – 285°C;
- *Raster angle* – 0°.

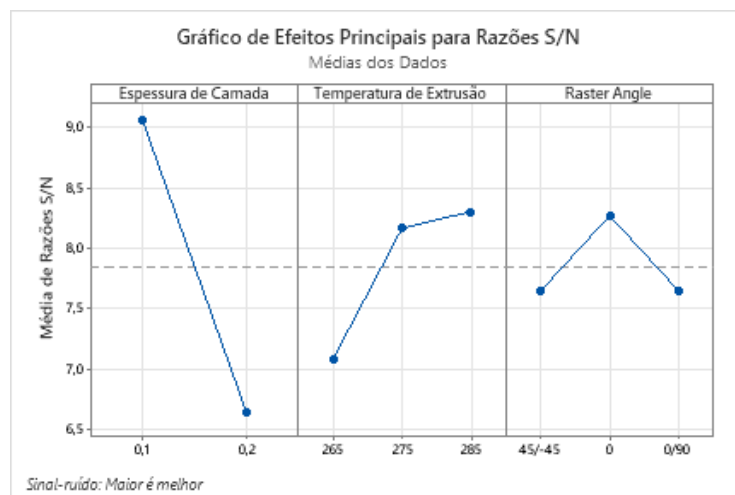


Figura A 26 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do módulo de elasticidade

A variação da linha de tendência dos diferentes parâmetros indica a sua influência. Assim, conclui-se que a espessura de camada apresenta maior influência. Além disso, o módulo de elasticidade apresenta uma tendência de incremento com o aumento da temperatura de extrusão.

Quanto à tensão máxima, na Figura A 27, pode-se constatar os melhores parâmetros de impressão, sendo estes:

- Espessura de camada – 0,20 mm;
- Temperatura de extrusão – 265°C;
- *Raster angle* – 0°.

Além disso, verificou-se que a tensão máxima apresenta uma tendência de incremento com o aumento da espessura de camada e da temperatura de extrusão.

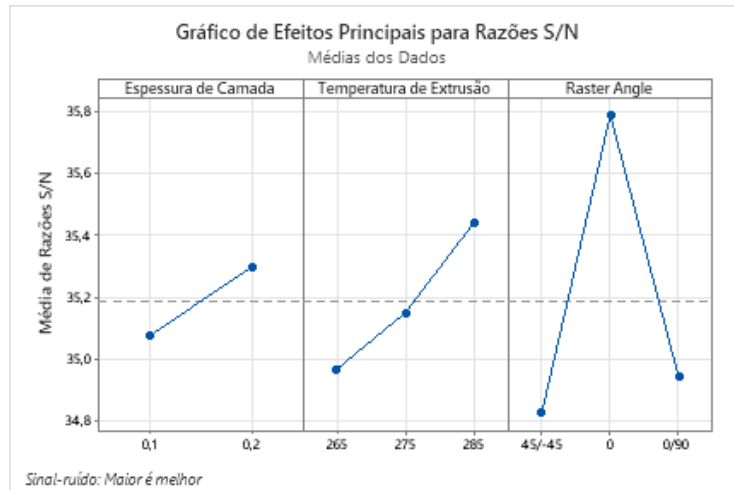


Figura A 27 - Gráfico do rácio S/N dos resultados da tensão máxima

Na Figura A 28 está representado o gráfico S/N do alongamento. Os melhores valores para esta propriedade mecânica são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Temperatura de extrusão – 265°C;
- *Raster angle* – 0°.

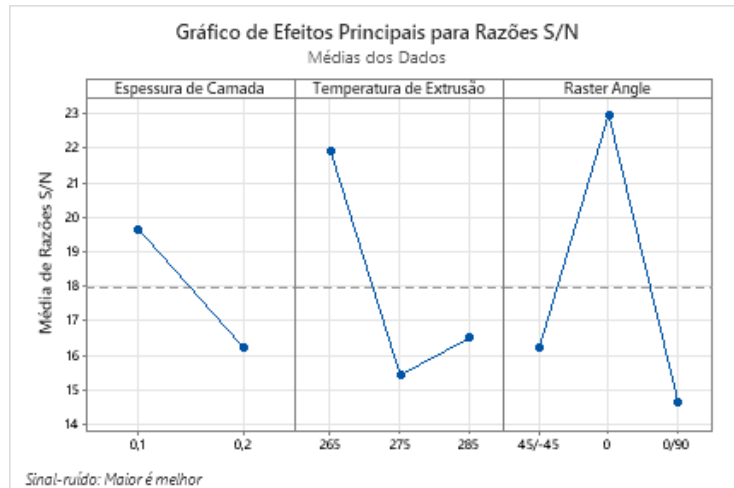


Figura A 28 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do alongamento

Analisando os gráficos da Figura A 28, verifica-se que uma tendência de diminuição do alongamento com o aumento da espessura de camada.

Na Tabela A 50 estão apresentados os melhores parâmetros de impressão dos provetes em PC, pelo método Taguchi.

Tabela A 50 - Melhores parâmetros de impressão, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Temperatura de Extrusão | Raster Angle |
|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | 285°C                   | 0°           |
| Tensão Máxima          | 0,20 mm             | 285°C                   | 0°           |
| Alongamento            | 0,10 mm             | 265°C                   | 0°           |

### 9.16.2 Análise da Variância (ANOVA)

A ANOVA, através o valor-p, indica a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro, como mencionado anteriormente. Para valores-p inferiores a 0,05, o impacto do parâmetro em questão será maior com o decréscimo destes valores. Quanto menor a 0,05 for o valor-p, maior a impacto terá o parâmetro em questão. Para além disso, esta análise permite avaliar a fiabilidade do modelo através do coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Na Figura A 29, pode-se observar a linha de tendência de resultados do módulo de elasticidade. O coeficiente de determinação para esta propriedade mecânica do material é de 75,40%, mostrando que o processo pode ser considerado fiável.

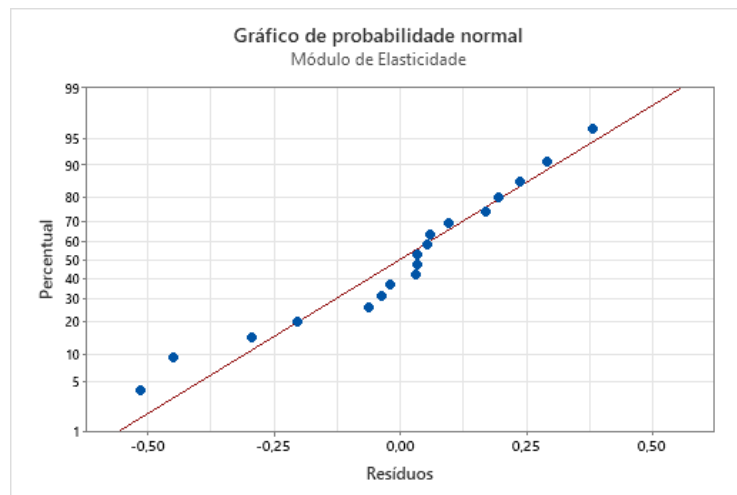


Figura A 29 - Linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade

Na TABELA A 51, verifica-se que a espessura de camada é o parâmetro com maior influência para os resultados do módulo de elasticidade, obtendo o menor valor-p, de 0,000.

Tabela A 51 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do módulo de elasticidade

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,000   | 75,40%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,101   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,416   |                |

No gráfico, da Figura A 30, pode-se observar a linha de tendência de resultados da tensão máxima.

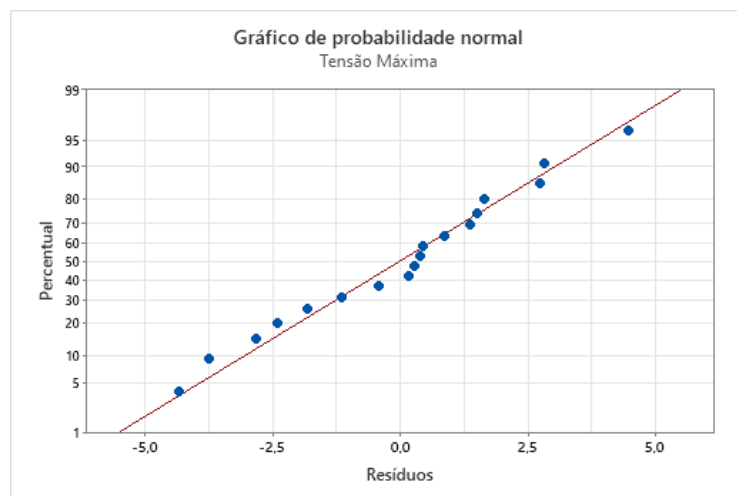


Figura A 30 - Linha de tendência dos resultados do módulo da tensão máxima

Na Tabela A 52, pode-se constatar que o parâmetro com maior contribuição na tensão máxima é o *raster angle*, apresentando o menor valor-p, de 0,004. Através desta análise obteve-se um valor de R<sup>2</sup> de 65,61%.

Tabela A 52 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da tensão máxima

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,358   | 65,61%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,225   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,004   |                |

No gráfico presente na Figura A 31, está representada a linha de tendência do alongamento, verificando-se uma dispersão acentuada dos valores, com um R<sup>2</sup> de 29,26%.

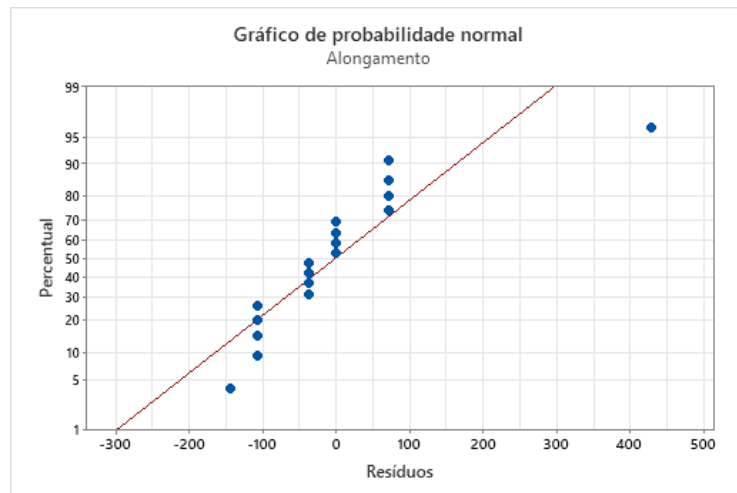


Figura A 31 - Linha de tendência dos resultados do alongamento

Na Tabela A 53, estão indicados os resultados da análise da variância, sendo que estes não apresentam grande significância devido aos valores obtidos serem bastante superiores a 0,05. Porém, o valor-p mais baixo obtido foi de 0,342, referente à espessura de camada. Posto isto, este parâmetro representa o maior impacto no alongamento.

Tabela A 53 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do alongamento

| Parâmetro               | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada     | 0,342   | 29,26%         |
| Temperatura de Extrusão | 0,401   |                |
| <i>Raster Angle</i>     | 0,394   |                |

Por último, na Tabela A 54, pode-se observar os parâmetros com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, pela análise da variância.

Tabela A 54 - Parâmetros com maior influência em cada propriedade mecânica, pela análise da variância

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Espessura de Camada           |
| Tensão Máxima          | <i>Raster Angle</i>           |
| Alongamento            | Espessura de Camada           |

### 9.17 ANEXO Q – Perfis de Rugosidade dos cubos de diferentes espessuras de camada

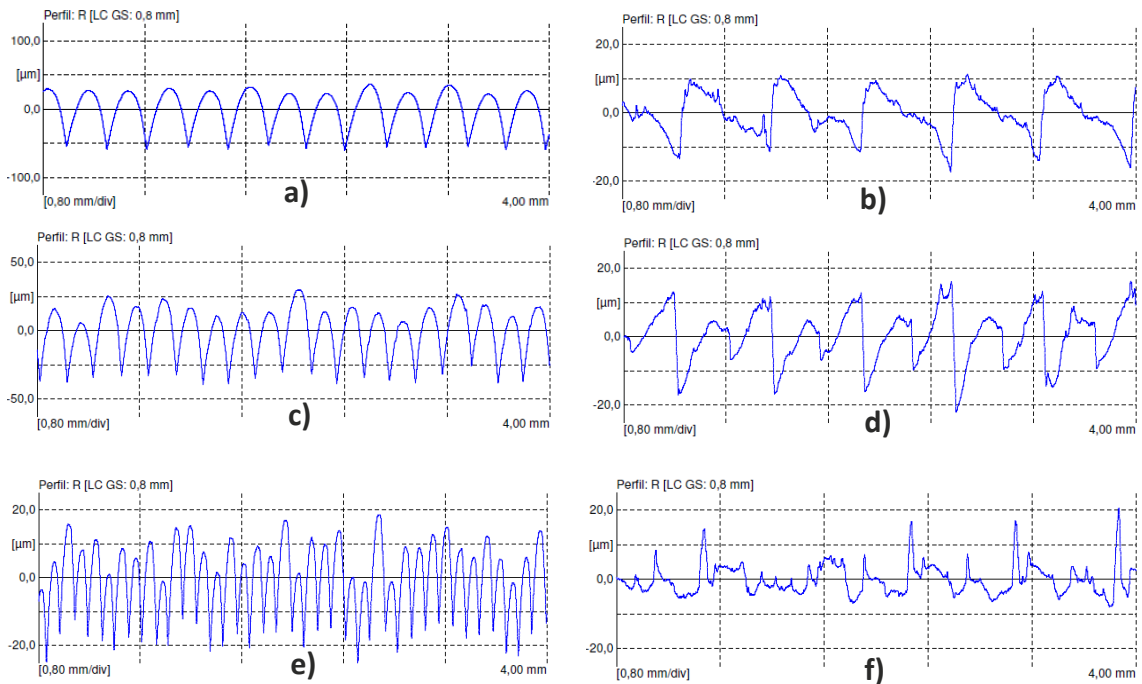


Figura A 32 -Perfis de rugosidades dos cubos em ASA com diferentes espessuras de camada: a) Superfície lateral do cubo de 0,30 mm. b) Superfície superior do cubo de 0,30 mm c) Superfície lateral do cubo de 0,20 mm. d) Superfície superior do cubo de 0,20 mm. e) Superfície lateral do cubo de 0,10 mm. f) Superfície superior do cubo de 0,10 mm

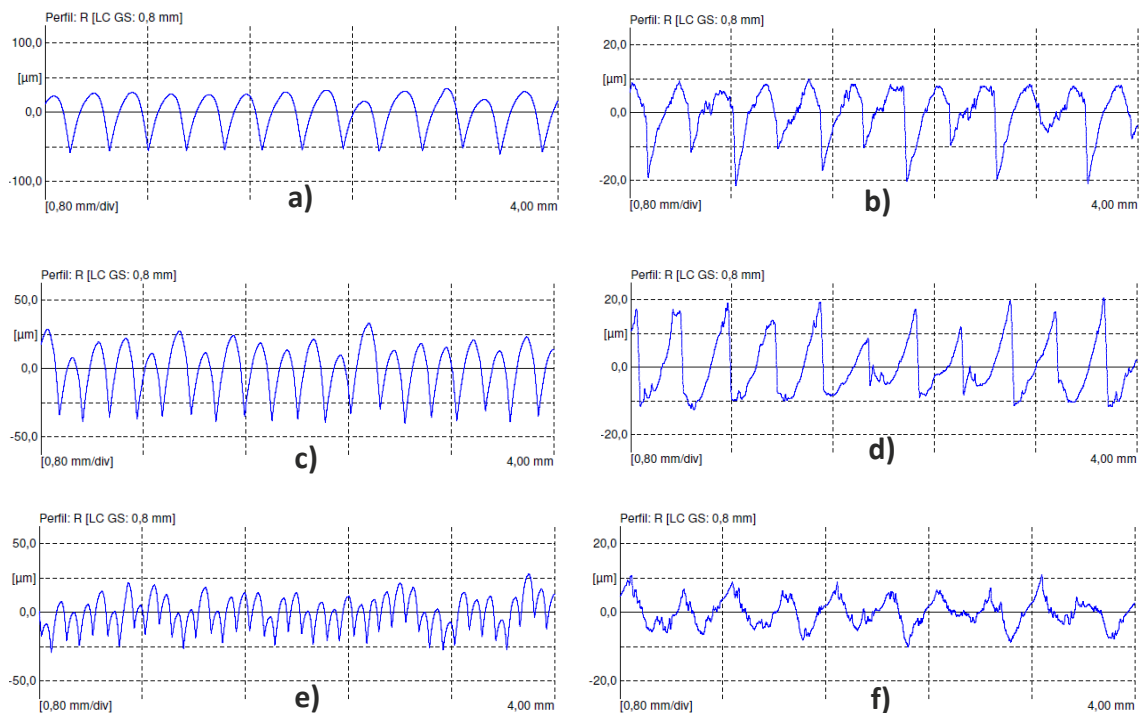


Figura A 33 -Perfis de rugosidades dos cubos em PETG com diferentes espessuras de camada: a) Superfície lateral do cubo de 0,30 mm. b) Superfície superior do cubo de 0,30 mm c) Superfície lateral do cubo de 0,20 mm. d) Superfície superior do cubo de 0,20 mm. e) Superfície lateral do cubo de 0,10 mm. f) Superfície superior do cubo de 0,10 mm

## 9.18 ANEXO R – Cubos após lixagem

### 9.18.1 Fotos dos cubos de rugosidades após lixagem

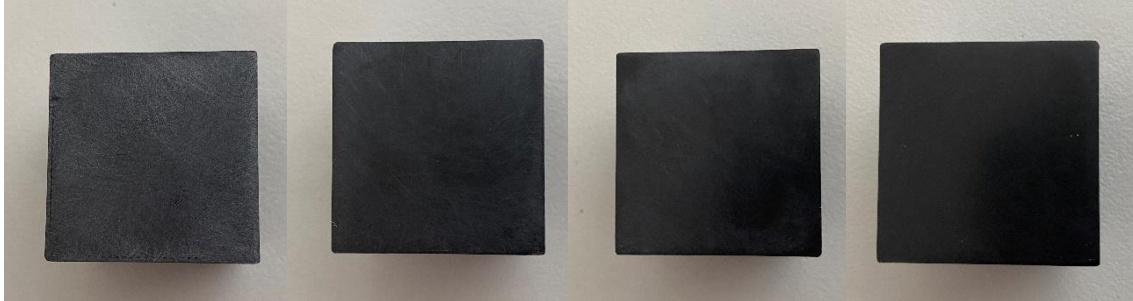


Figura A 34 – Resultado das superfícies lixadas dos cubos em PLA, Teste 1, 2, 3 e 4 respetivamente

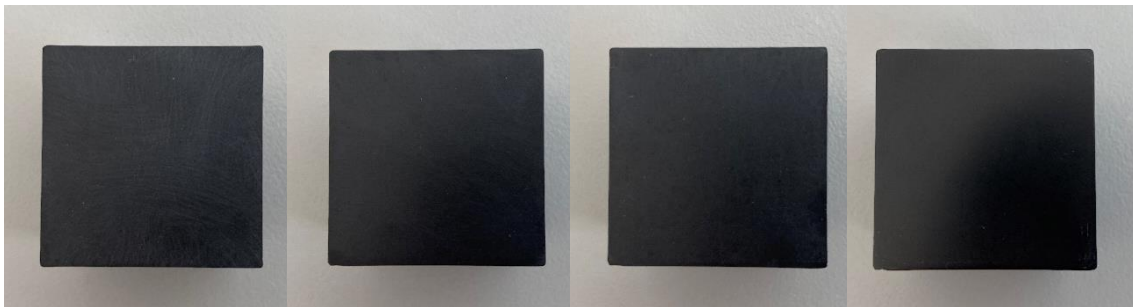


Figura A 35 - Resultado das superfícies lixadas dos cubos em ASA, Teste 1, 2, 3 e 4 respetivamente

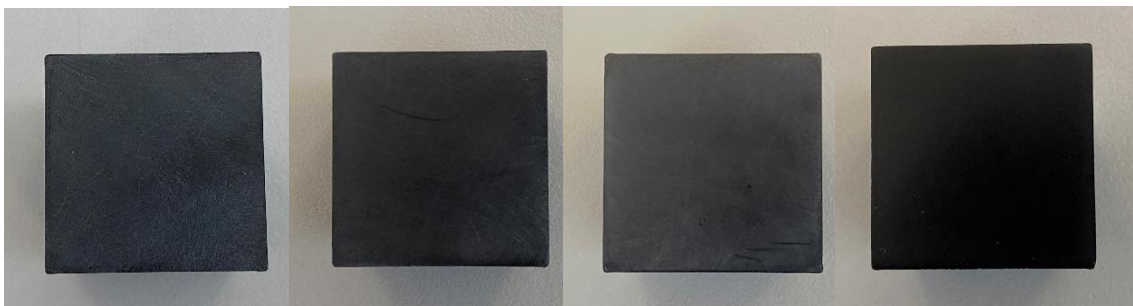


Figura A 36 - Resultado das superfícies lixadas dos cubos em PETG, Teste 1, 2, 3 e 4 respetivamente

### 9.18.2 Perfis de Rugosidade dos cubos de lixagem

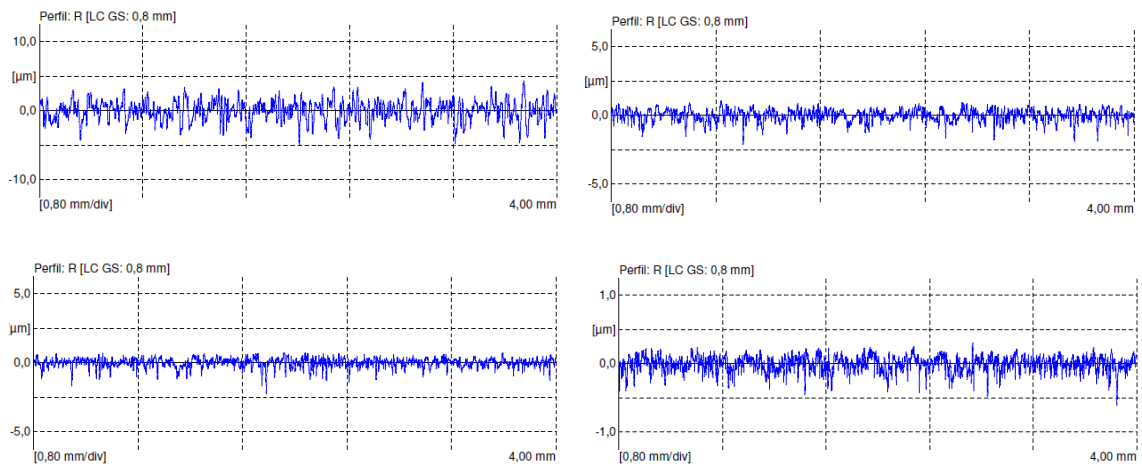


Figura A 37 – Perfis de rugosidades dos cubos de ASA: a) Superfície lixada com *grits* 220 e 400. b) Superfície lixada com *grits* 220, 400 e 800. c) Superfície lixada com *grits* de 220, 400, 800 e 1200. d) Superfície lixada com *grits* 220, 400, 800, 1200 e 2000.

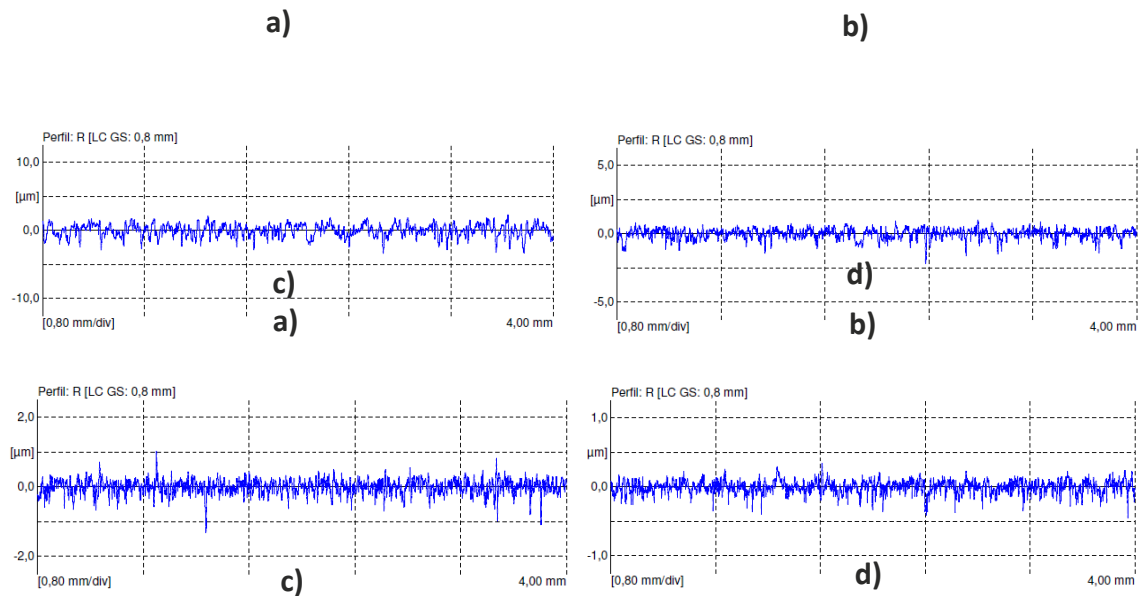


Figura A 38 - Perfis de rugosidades dos cubos de PETG: a) Superfície lixada com *grits* 220 e 400. b) Superfície lixada com *grits* 220, 400 e 800. c) Superfície lixada com *grits* de 220, 400, 800 e 1200. d) Superfície lixada com *grits* 220, 400, 800, 1200 e 2000.

## 9.19 ANEXO S – Cubos de sandblasting

### 9.19.1 Fotos dos cubos após sandblasting

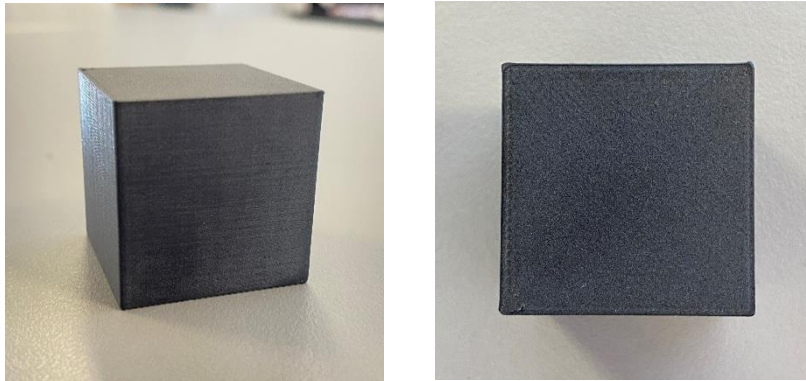


Figura A 39 - Cubos de PLA após sandblasting

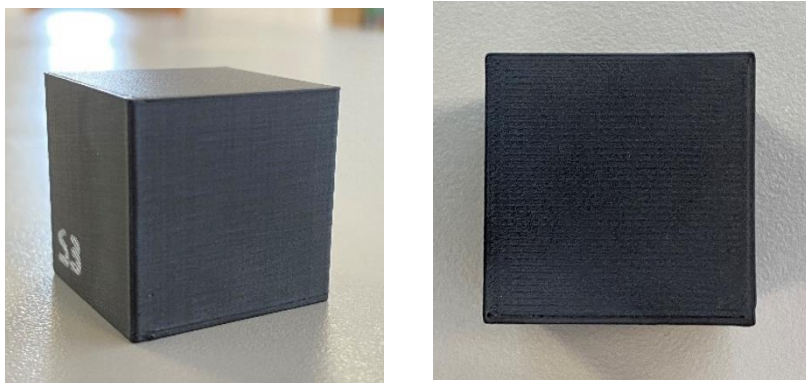


Figura A 40 - Cubos de ASA após sandblasting

### 9.19.1 Perfis de Rugosidade dos cubos de sandblasting

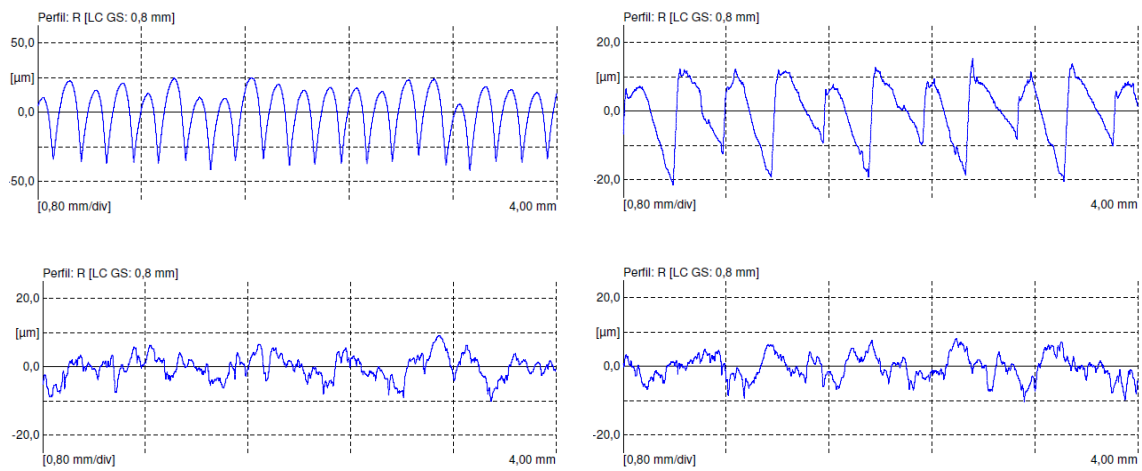


Figura A 41 – Perfis de rugosidade dos cubos de ASA antes e após sandblasting: a) Superfície lateral antes de sandblasting. b) Superfície superior antes do pós-processamento. c) Superfície lateral após sandblasting. d) Superfície superior após sandblasting

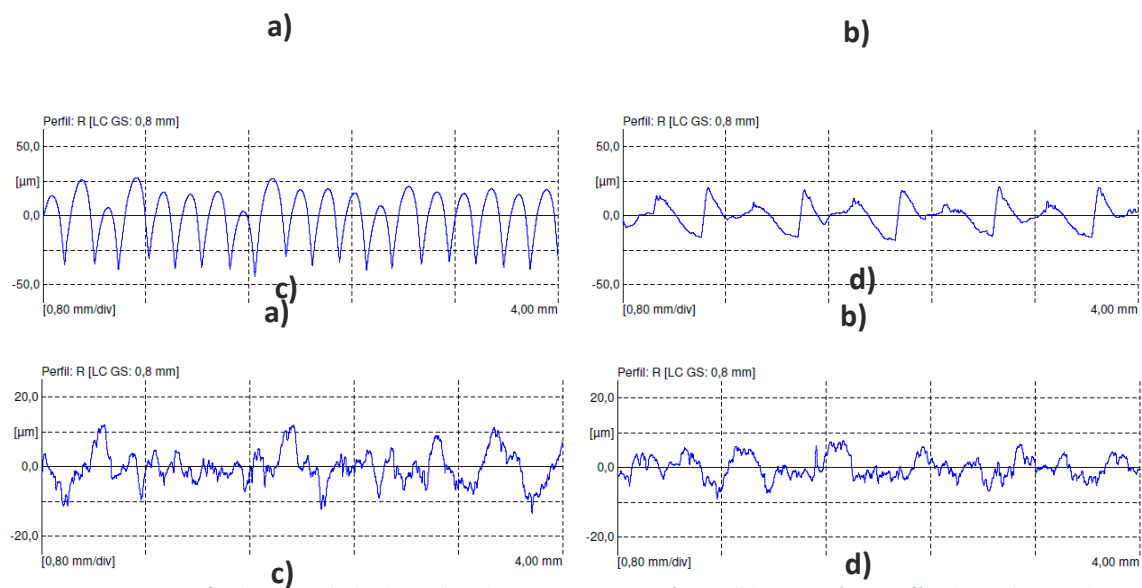


Figura A 42 - Perfis de rugosidade dos cubos de PETG antes e após sandblasting: a) Superfície lateral antes de sandblasting. b) Superfície superior antes do pós-processamento. c) Superfície lateral após sandblasting. d) Superfície superior após sandblasting

## 9.20 ANEXO T – Cubos de rugosidades após dipping

### 9.20.1 Fotos dos cubos de rugosidades após dipping

- **Cubos de PLA**

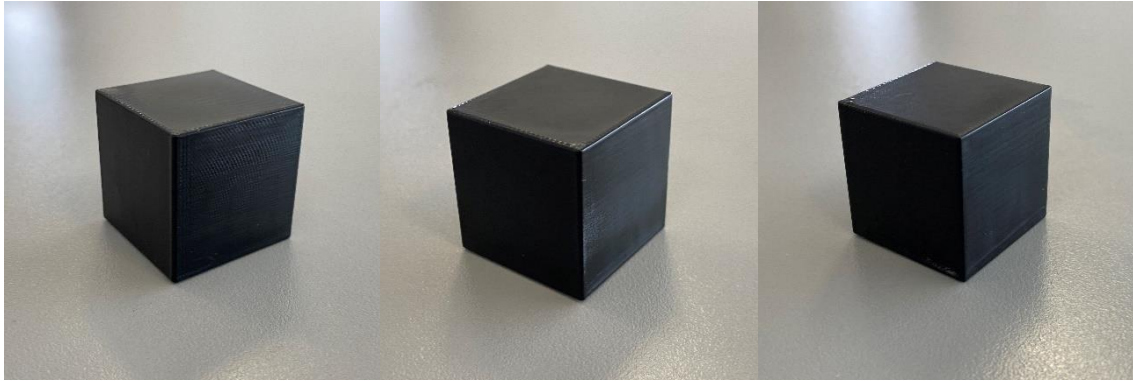


Figura A 43 - *Dipping* PLA em MEK, Teste 1,2 e 3 respetivamente

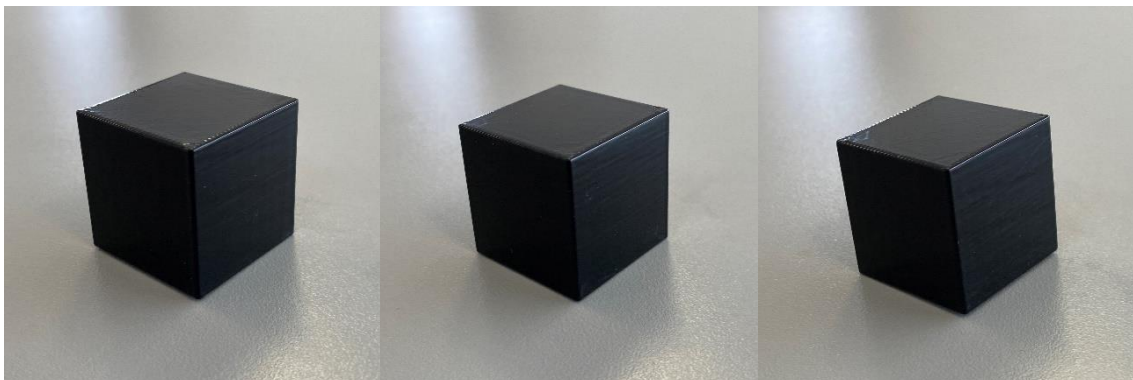


Figura A 44 - *Dipping* PLA em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

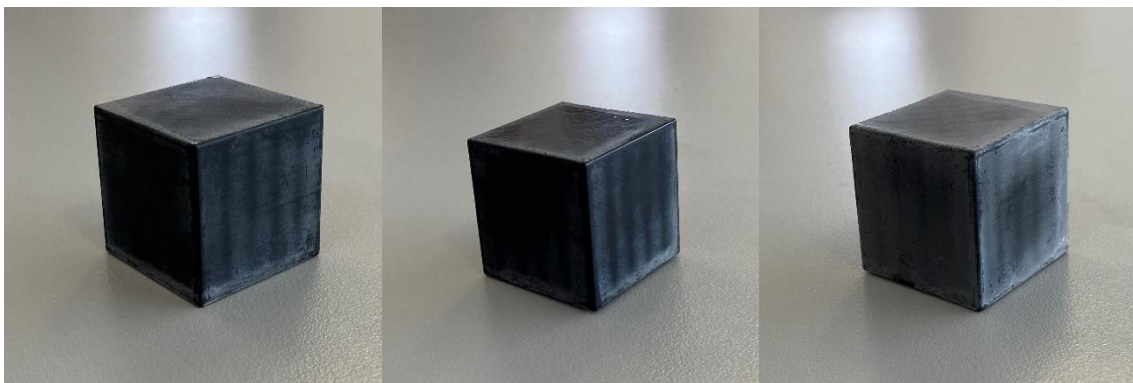


Figura A 45 - *Dipping* PLA em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

- **Cubos de ASA**

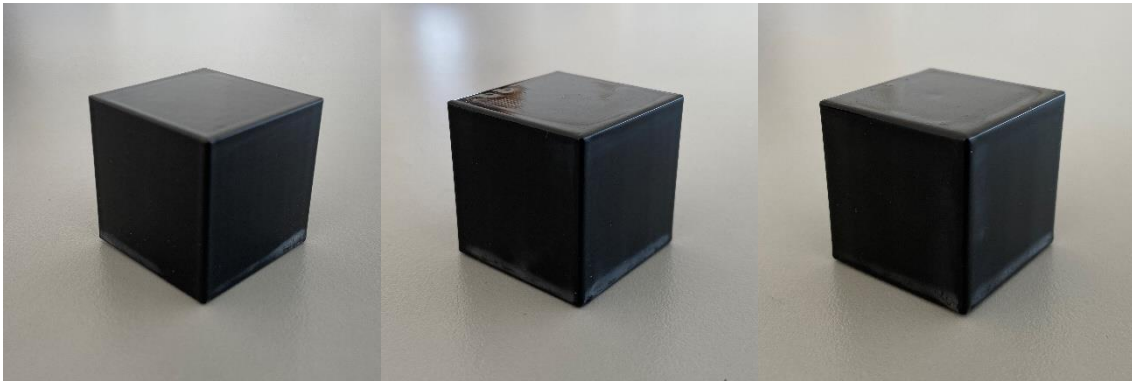


Figura A 46 - *Dipping* ASA em MEK, Teste 1, 2 e 3 respetivamente

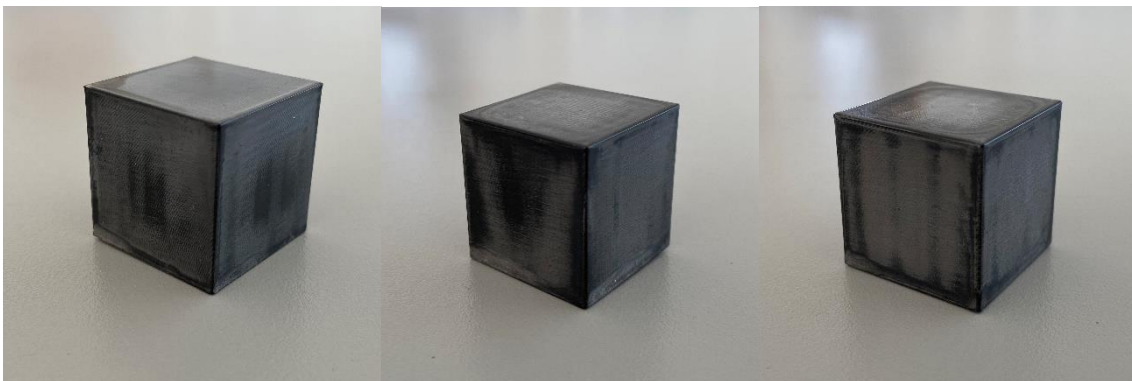


Figura A 47 - *Dipping* ASA em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

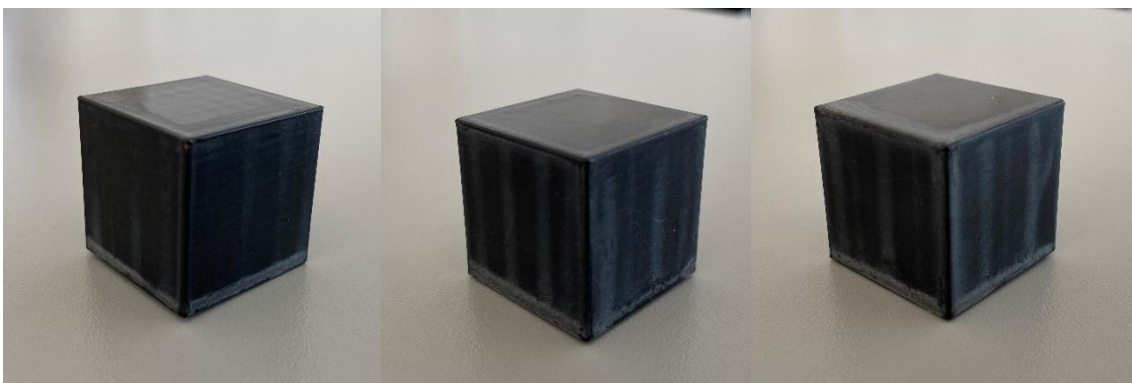


Figura A 48 - *Dipping* ASA em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

- **Cubos de PETG**

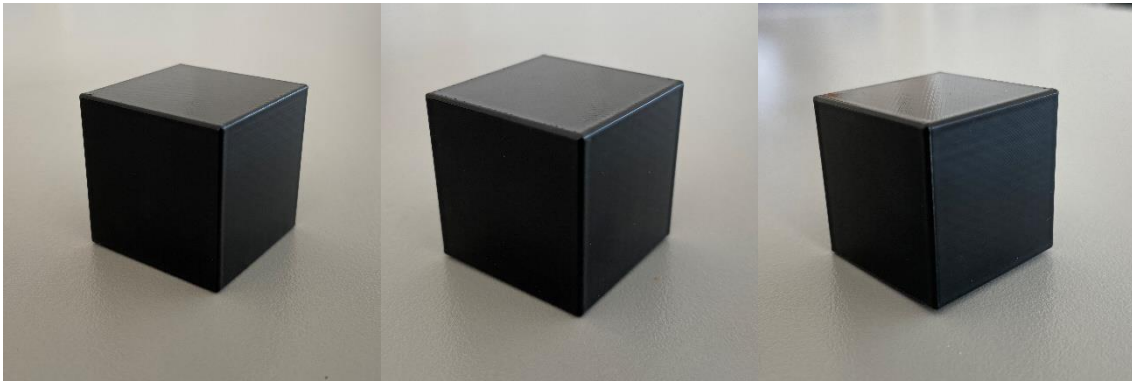


Figura A 49 - *Dipping* PETG em MEK, Teste 1, 2 e 3 respetivamente

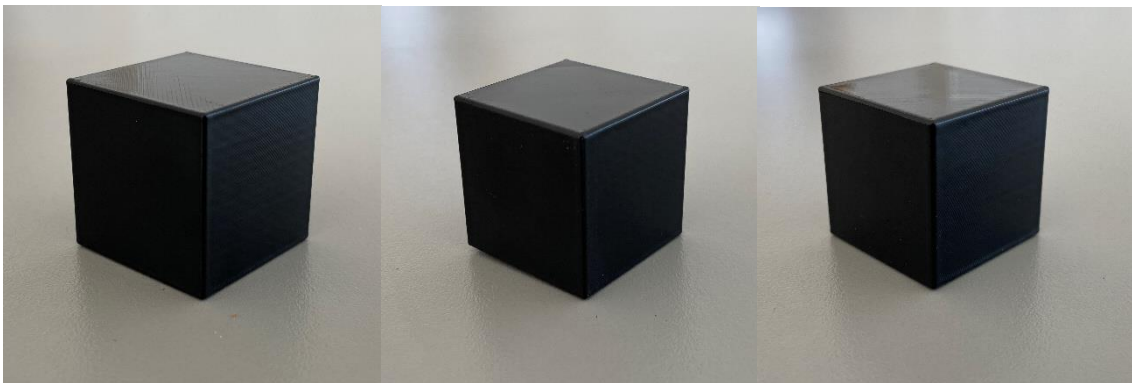


Figura A 50 - *Dipping* PETG em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

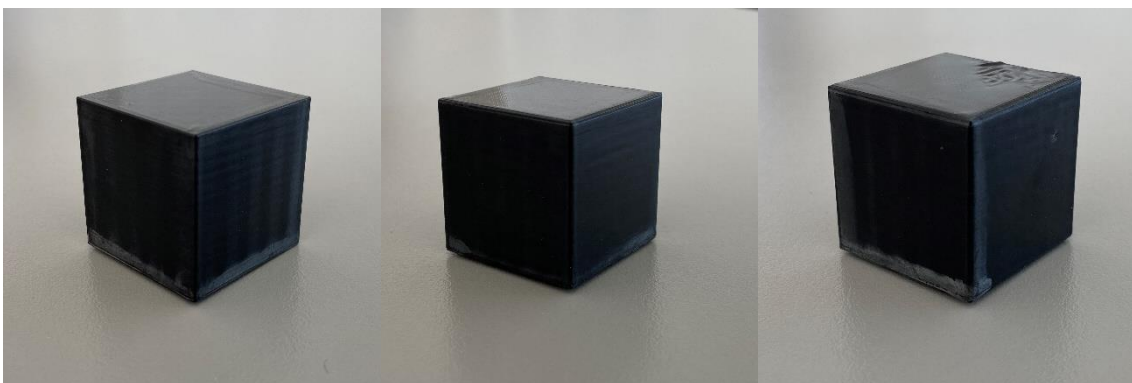


Figura A 51 - *Dipping* PETG em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

9.20.2 Microscopia 3D cubos dipping

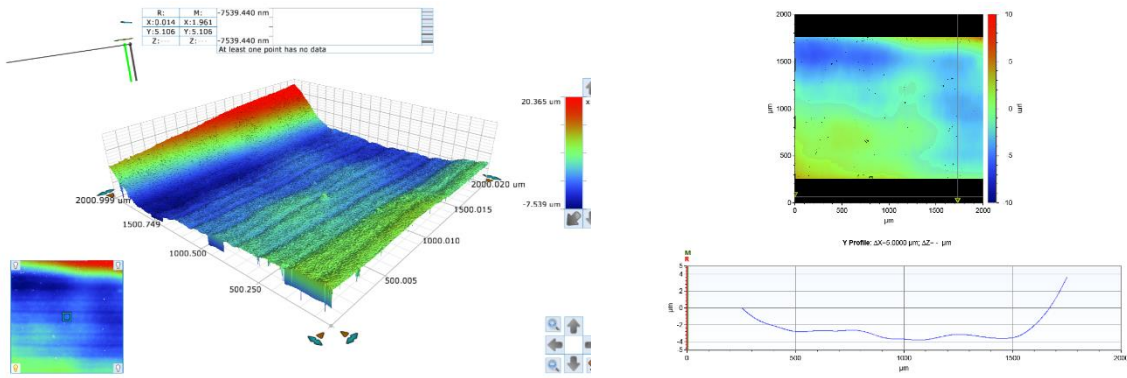
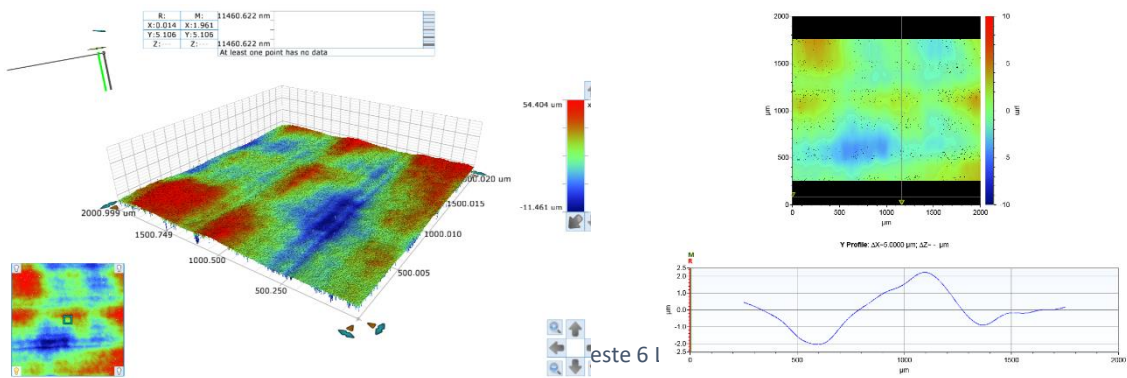
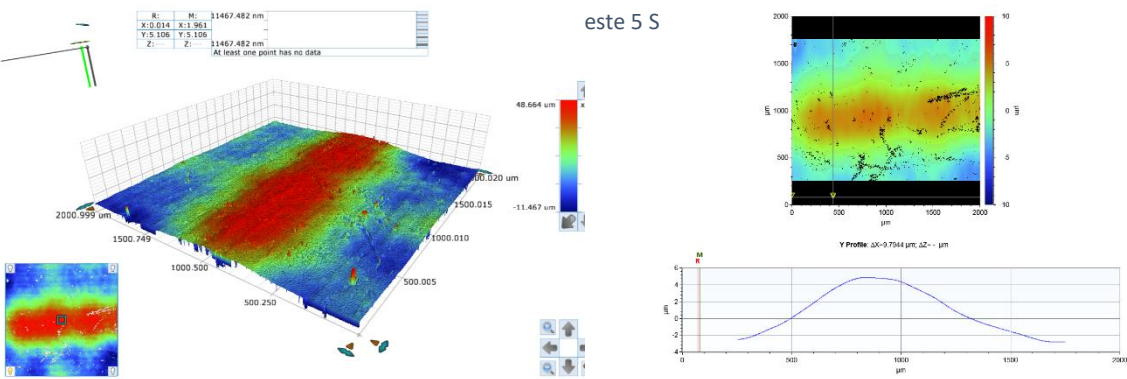


Figura A 52 - PLA Teste 5 Lateral



este 6 I



este 5 S

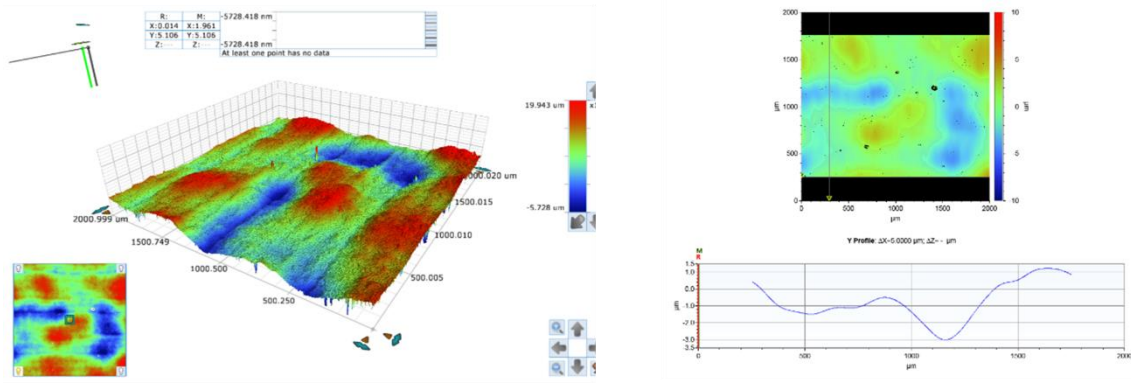


Figura A 55 - PLA Teste 6 Superior

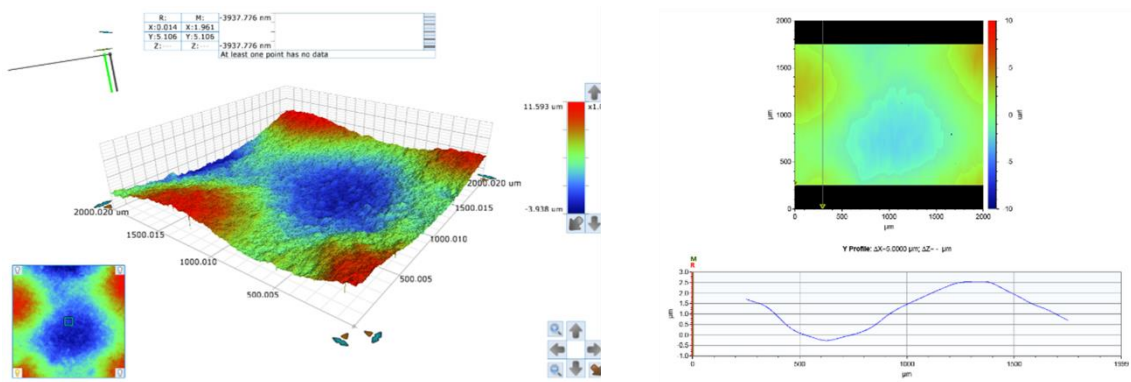


Figura A 56 - ASA Teste 1 Lateral

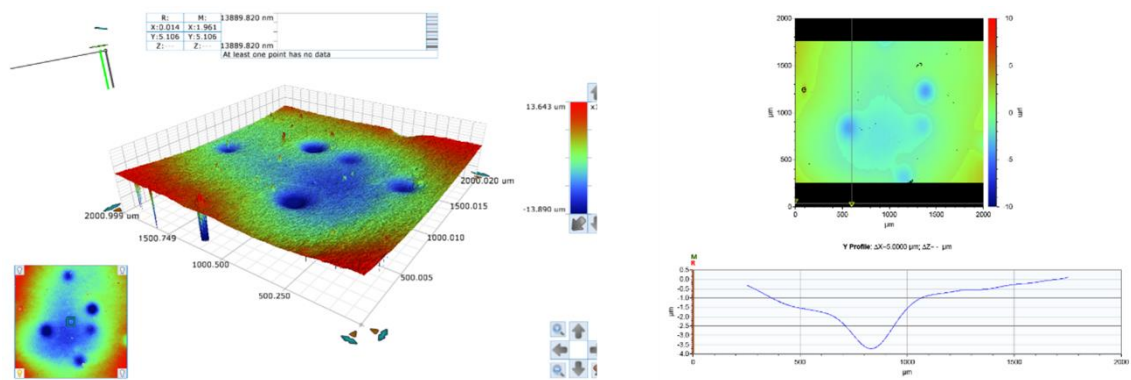


Figura A 57 - ASA Teste 2 Lateral

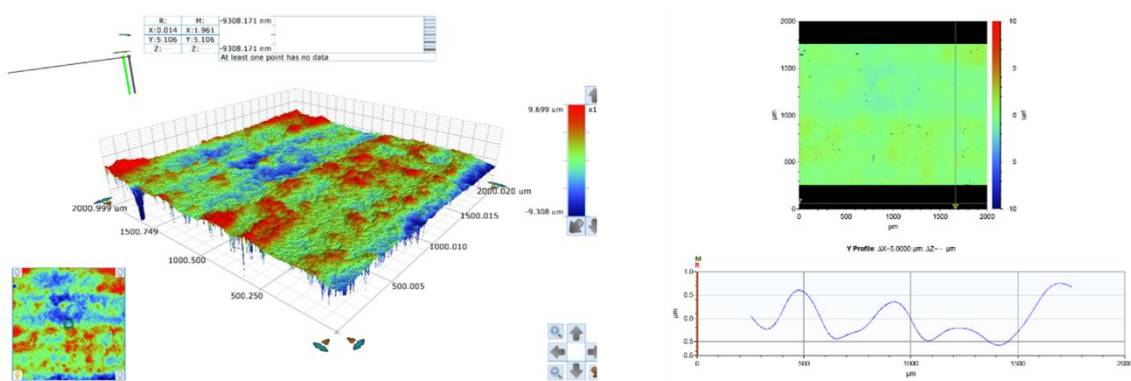


Figura A 58 - ASA Teste 1 Superior

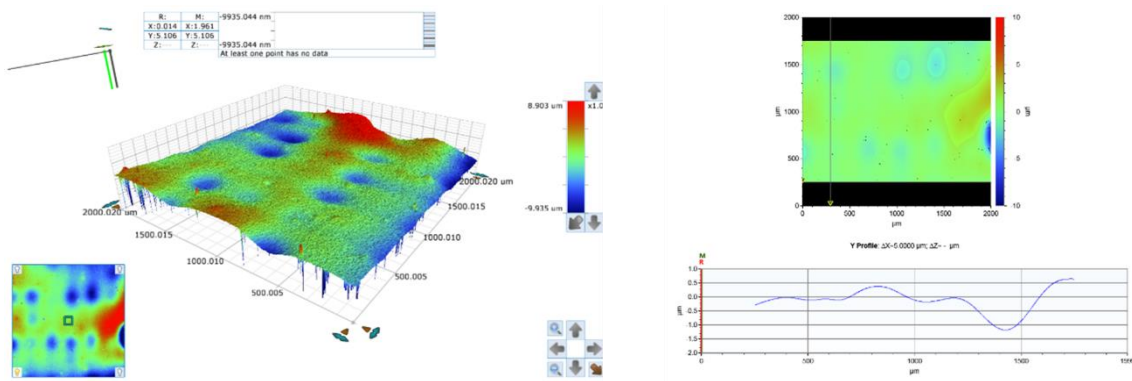


Figura A 59 - ASA Teste 2 Superior

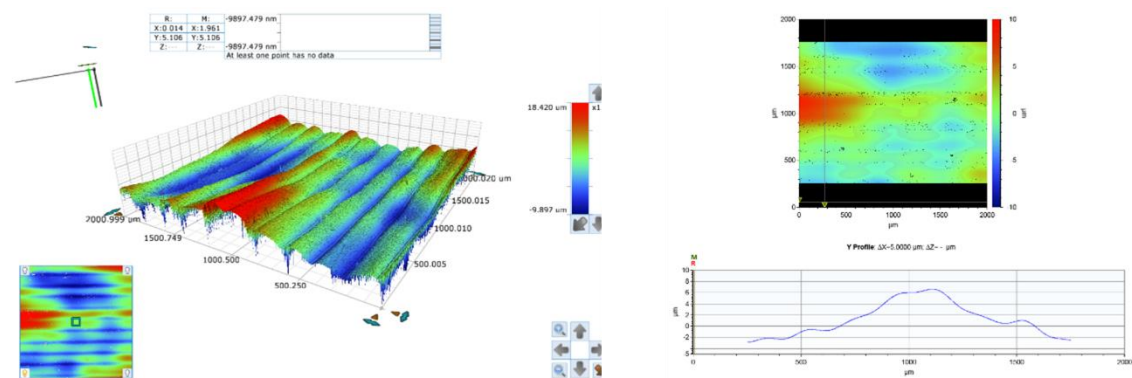


Figura A 60 - PETG Teste 1 Lateral

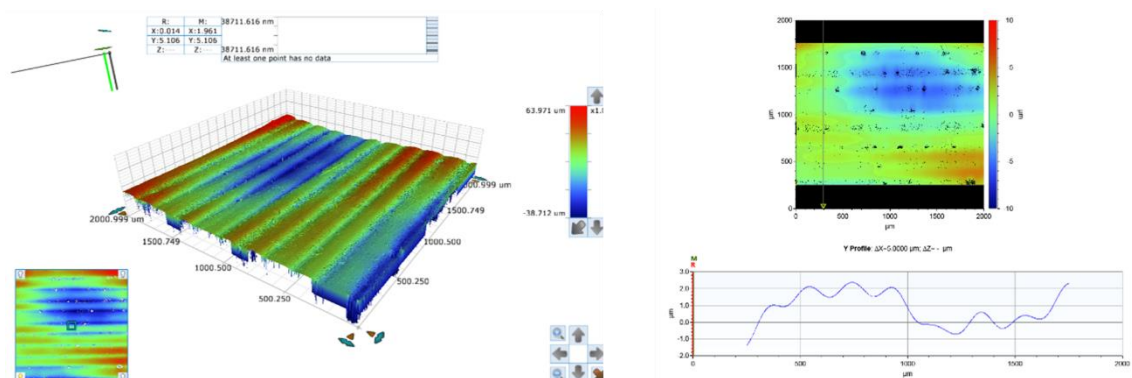


Figura A 61 - PETG Teste 2 Lateral

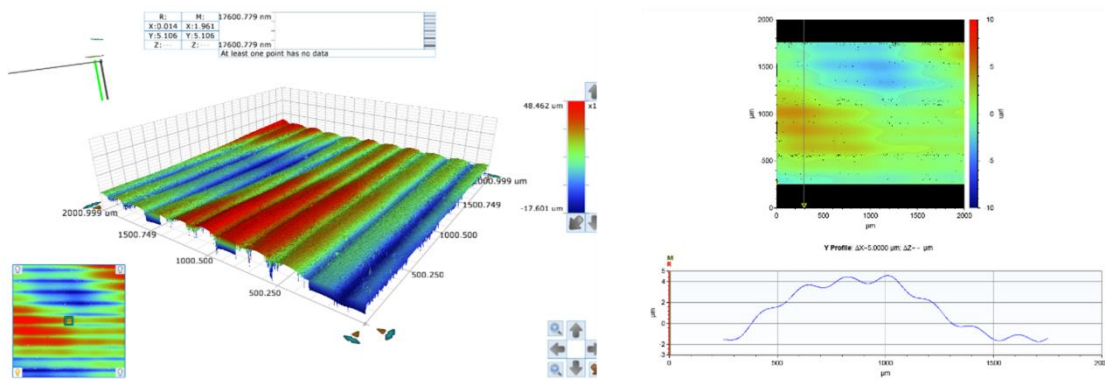


Figura A 62 - PETG Teste 3 Lateral

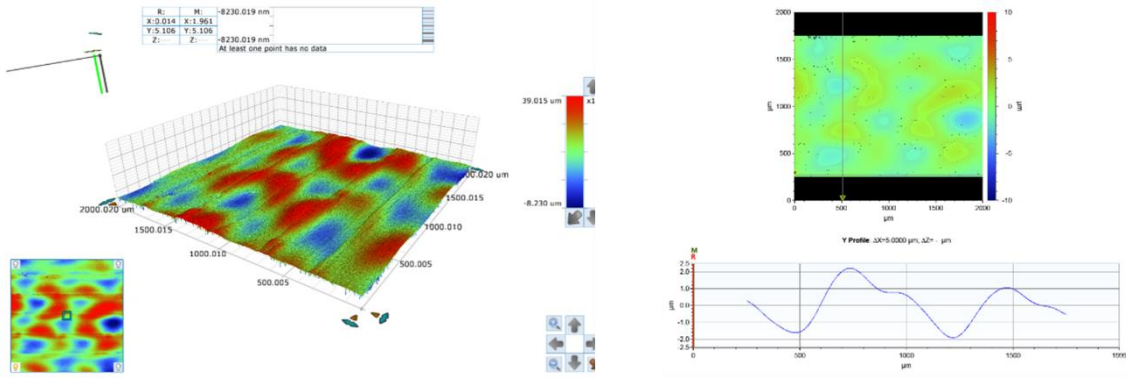


Figura A 63 - PETG Teste 1 Superior

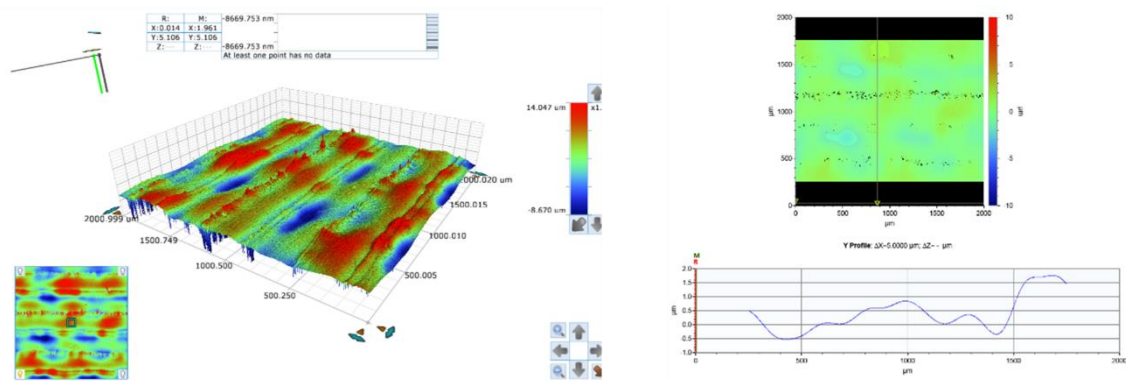


Figura A 64 - PETG Teste 2 Superior

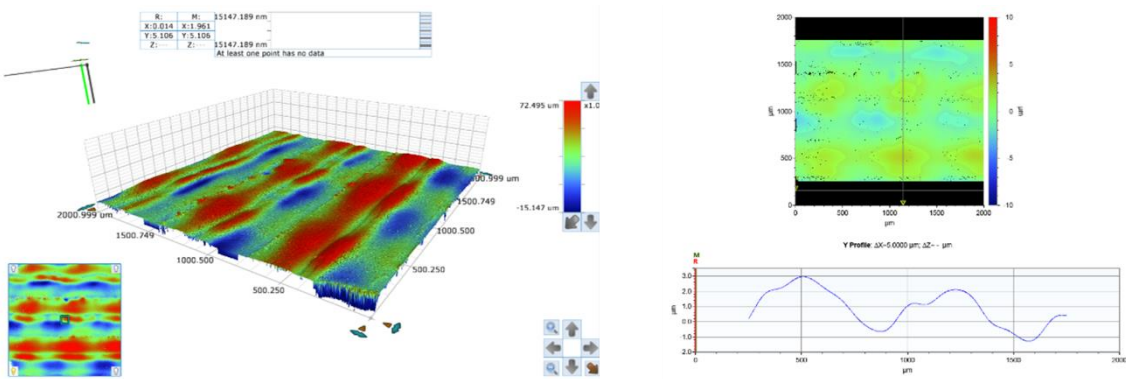


Figura A 65 - PETG Teste 3 Superior

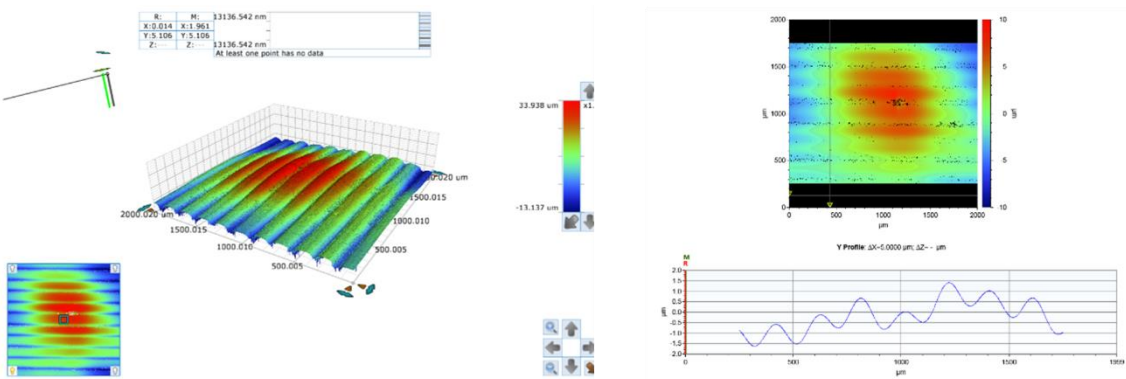


Figura A 66 - PETG Teste 4 Lateral

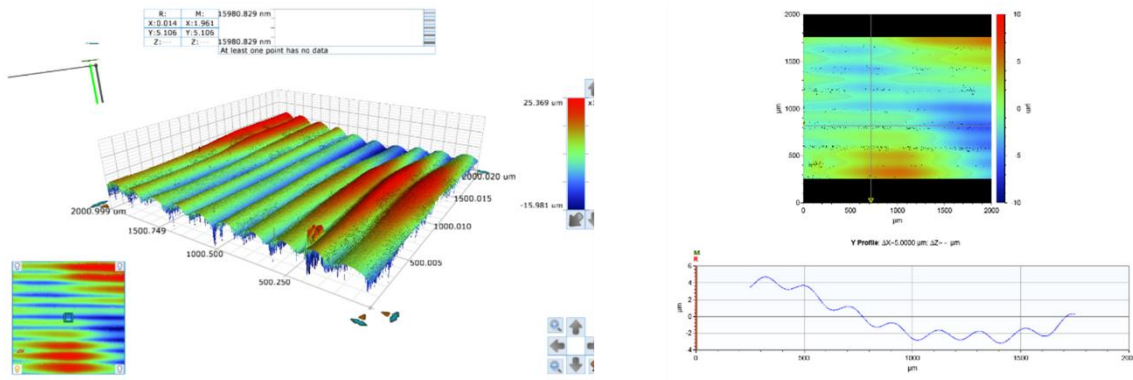


Figura A 67 - PETG Teste 5 Lateral

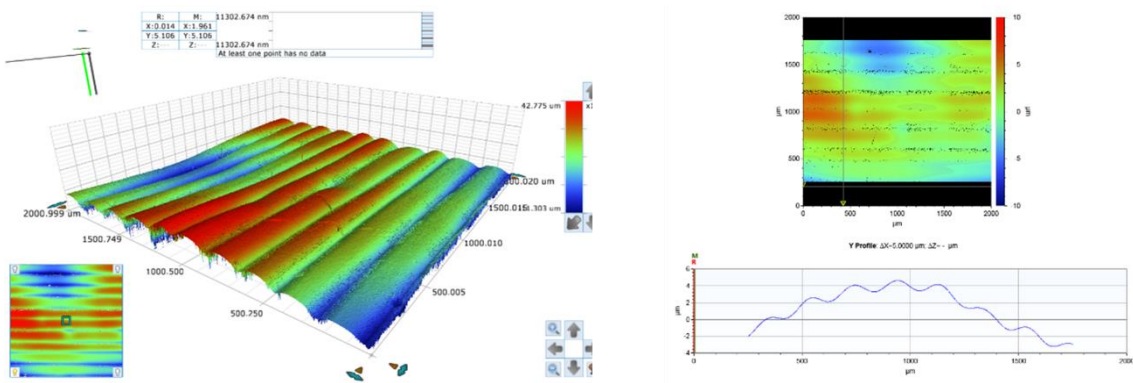


Figura A 68 - PETG Teste 6 Lateral

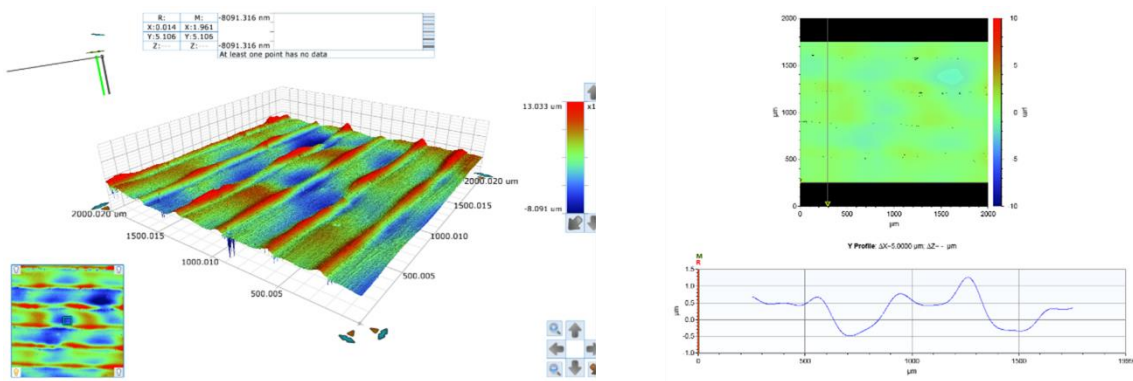


Figura A 69 - PETG Teste 4 Superior

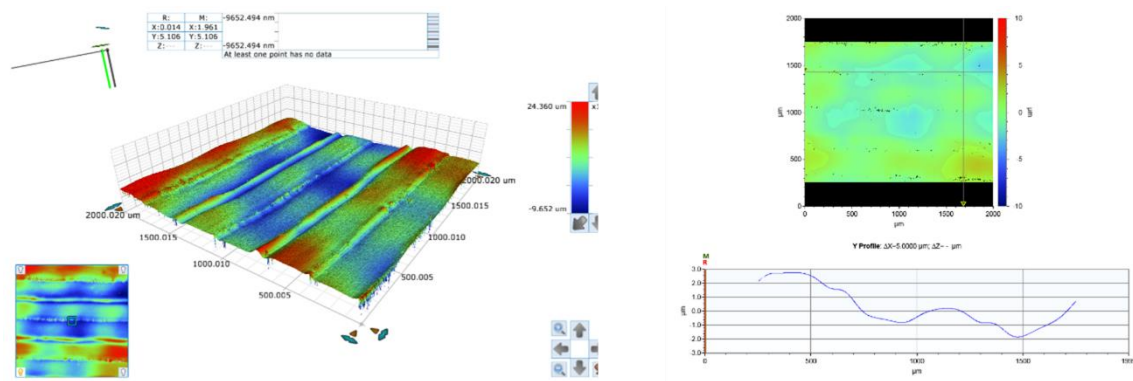


Figura A 70 - PETG Teste 5 Superior

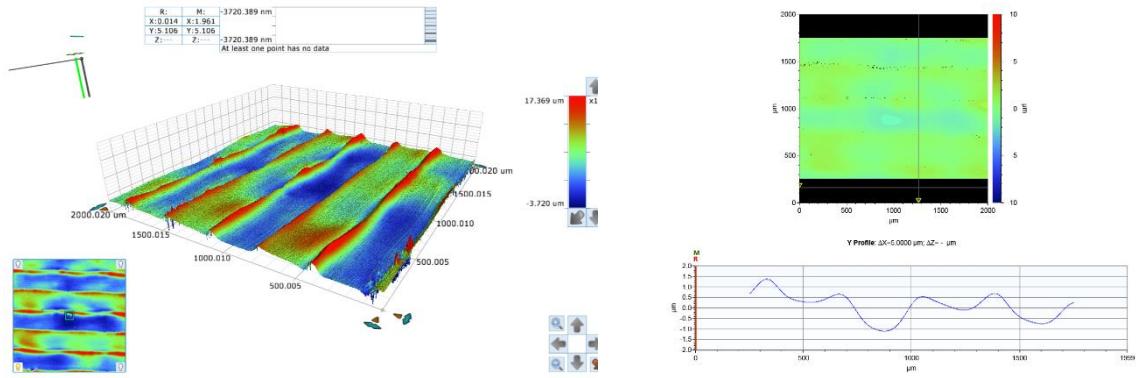
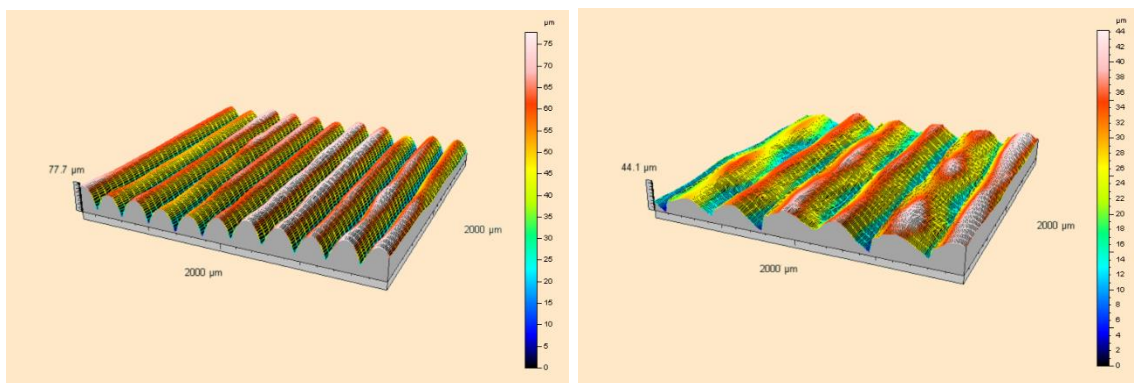
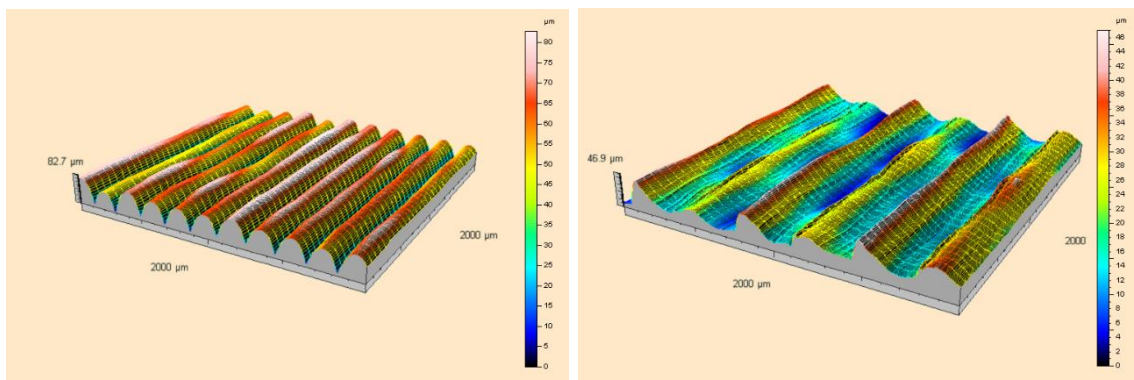


Figura A 71 - PETG Teste 6 Superior

Figura A 72 - Topografia 3D da superfície lateral (à esquerda) e superior (à direita) de um cubo em ASA antes do pós-processamento *dipping*Figura A 73 - Topografia 3D da superfície lateral (à esquerda) e superior (à direita) de um cubo em PETG antes do pós-processamento *dipping*

## 9.21 ANEXO U -Cubos após vapour smoothing

### 9.21.1 Variação da rugosidade nos cubos de vapour smoothing

Tabela A 55 - 9.24 Variação da rugosidade nos cubos de *vapour smoothing* em PLA

| Teste número | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície Lateral [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície 20° [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície 30° [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície 40° [%] |       | Variação da rugosidade <sup>[1]</sup> na Superfície 50° [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 21,82  | 25,50 | 36,64   | 36,94 | 64,96   | 62,34 | 27,56   | 29,62 | 14,62   | 18,87 | 39,88   | 34,54 |
| 2            | 49,34  | 51,67 | 87,33   | 86,01 | 80,36   | 79,74 | 83,42   | 78,80 | 86,93   | 79,84 | 88,80   | 85,49 |
| 3            | 46,05  | 38,87 | 87,28   | 83,64 | 89,25   | 85,83 | 78,95   | 79,33 | 88,21   | 86,20 | 90,89   | 87,45 |
| 4            | 81,08  | 82,58 | 97,19   | 97,06 | 97,77   | 96,75 | 97,47   | 97,19 | 97,76   | 96,77 | 97,62   | 96,63 |
| 5            | 86,36  | 87,01 | 97,65   | 97,40 | 96,94   | 95,36 | 97,52   | 97,43 | 97,81   | 97,03 | 97,39   | 95,76 |
| 6            | 84,58  | 84,11 | 98,30   | 97,71 | 96,12   | 93,98 | 98,34   | 98,35 | 98,16   | 97,73 | 97,93   | 96,51 |
| 7            | 79,55  | 81,03 | 95,39   | 95,60 | 96,48   | 96,13 | 96,41   | 96,54 | 95,18   | 95,09 | 96,50   | 96,44 |
| 8            | 66,87  | 67,71 | 98,48   | 98,27 | 98,58   | 97,84 | 98,04   | 98,37 | 97,82   | 97,00 | 99,35   | 98,99 |
| 9            | 63,30  | 62,77 | 97,52   | 96,85 | 97,98   | 97,42 | 98,18   | 97,97 | 97,52   | 96,68 | 99,25   | 98,88 |

Tabela A 56 - Variação da rugosidade nos cubos de *vapour smoothing* em ASA

| Teste número | Variação da rugosidade[1] na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície Lateral [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 20° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 30° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 40° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 50° [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 74,53  | 80,40 | 98,39   | 98,58 | 98,91   | 99,34 | 98,91   | 98,77 | 99,19   | 98,91 | 98,02   | 97,56 |
| 2            | 88,74  | 90,47 | 98,91   | 98,94 | 99,34   | 99,32 | 98,68   | 98,89 | 99,05   | 98,86 | 97,96   | 97,71 |
| 3            | 93,67  | 94,45 | 99,36   | 99,17 | 99,27   | 99,07 | 99,05   | 99,07 | 99,03   | 98,41 | 98,21   | 97,78 |
| 4            | 96,82  | 96,74 | 98,56   | 97,82 | 98,71   | 98,22 | 98,09   | 97,84 | 97,50   | 97,01 | 98,00   | 97,88 |
| 5            | 96,45  | 94,46 | 99,16   | 98,19 | 98,69   | 98,22 | 97,95   | 97,33 | 97,79   | 97,44 | 97,63   | 97,54 |
| 6            | 97,87  | 97,37 | 97,97   | 97,45 | 98,29   | 97,41 | 97,19   | 96,93 | 97,62   | 97,43 | 97,57   | 96,98 |
| 7            | 93,10  | 93,17 | 98,31   | 97,59 | 98,87   | 98,68 | 98,69   | 98,70 | 99,11   | 98,49 | 99,17   | 98,73 |
| 8            | 95,95  | 96,11 | 98,89   | 98,64 | 98,88   | 98,09 | 97,91   | 98,27 | 98,86   | 98,58 | 99,20   | 98,69 |
| 9            | 96,40  | 96,92 | 98,48   | 97,58 | 99,12   | 98,43 | 98,84   | 98,76 | 99,26   | 98,50 | 99,13   | 98,84 |

Tabela A 57 - Variação da rugosidade nos cubos de *vapour smoothing* em PETG

| Teste número | Variação da rugosidade[1] na Superfície Superior [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície Lateral [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 20° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 30° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 40° [%] |       | Variação da rugosidade[1] na Superfície 50° [%] |       |
|--------------|--|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
|              | Ra   | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    | Ra  | Rz    |
| 1            | 95,34  | 93,05 | 84,87   | 81,71 | 65,18   | 59,45 | 80,08   | 74,64 | 83,74   | 79,07 | 43,85   | 42,77 |
| 2            | 83,57  | 84,76 | 90,18   | 88,17 | 90,33   | 87,83 |   |       | 81,67   | 80,06 | 43,63   | 45,91 |
| 3            | 90,62  | 89,55 | 79,93   | 82,82 | 78,92   | 80,66 | 68,59   | 70,67 | 63,93   | 66,98 | 49,41   | 54,03 |
| 4            | 79,57  | 76,32 | 66,53   | 69,61 | 68,89   | 71,01 | 63,98   | 65,47 | 60,21   | 60,36 | 43,83   | 48,32 |
| 5            | 85,60  | 86,90 | 76,59   | 79,56 | 70,17   | 72,45 | 69,92   | 73,58 | 64,24   | 67,43 | 45,89   | 49,03 |
| 6            | 74,17  | 69,51 | 67,58   | 71,66 | 69,15   | 70,84 | 61,12   | 62,68 | 58,81   | 58,66 | 39,56   | 41,71 |
| 7            | 93,59  | 94,57 | 96,43   | 96,67 | 97,68   | 97,25 | 93,73   | 93,97 | 94,86   | 94,73 | 98,03   | 97,60 |
| 8            | 94,12  | 95,24 | 97,59   | 97,23 | 97,94   | 97,82 | 97,28   | 97,44 | 97,77   | 97,41 | 98,05   | 97,26 |
| 9            | 94,23  | 94,10 | 96,74   | 96,92 | 98,12   | 97,76 | 94,15   | 96,14 | 97,80   | 97,24 | 98,58   | 98,17 |

### 9.21.2 Fotos dos cubos após vapour smoothing

- **PLA**

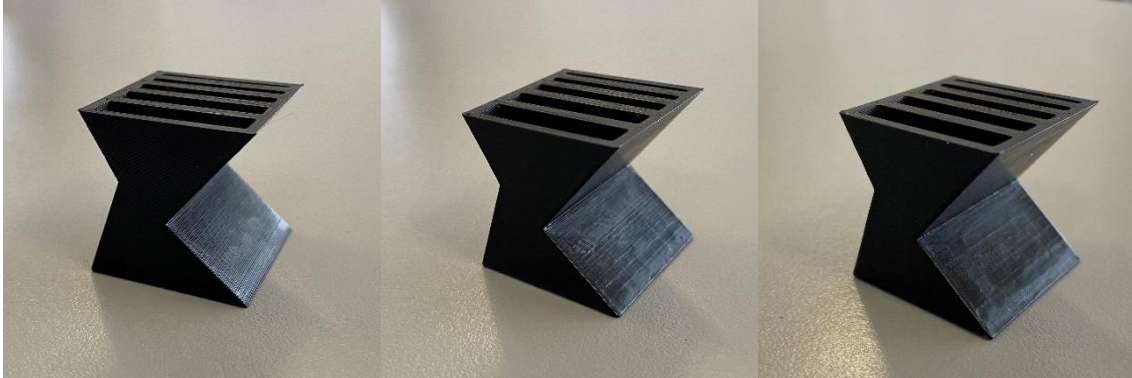


Figura A 74 - *Vapour Smoothing* PLA em MEK, Teste 1, 2 e 3 respetivamente

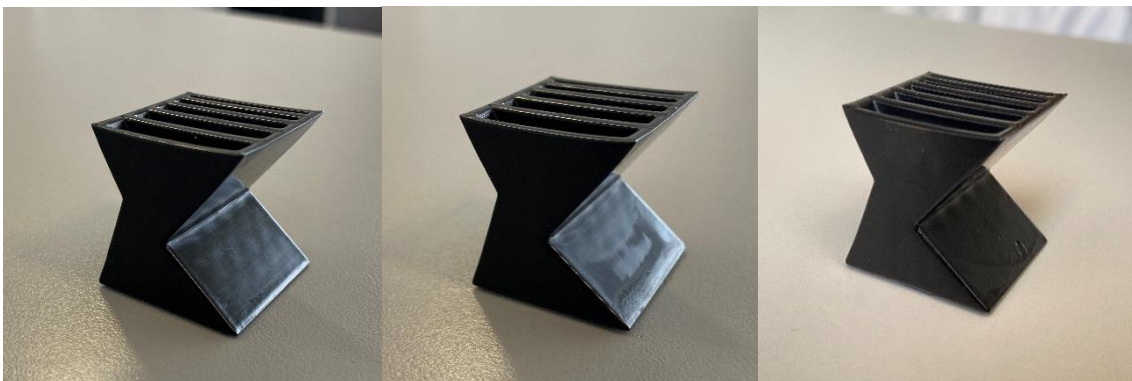


Figura A 75 – *Vapour smoothing* PLA em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

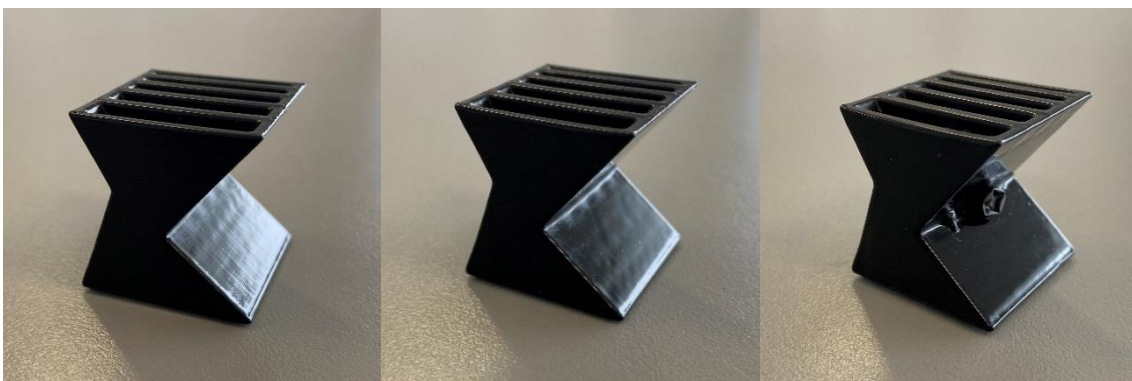


Figura A 76 - *Vapour smoothing* PLA em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

- ASA

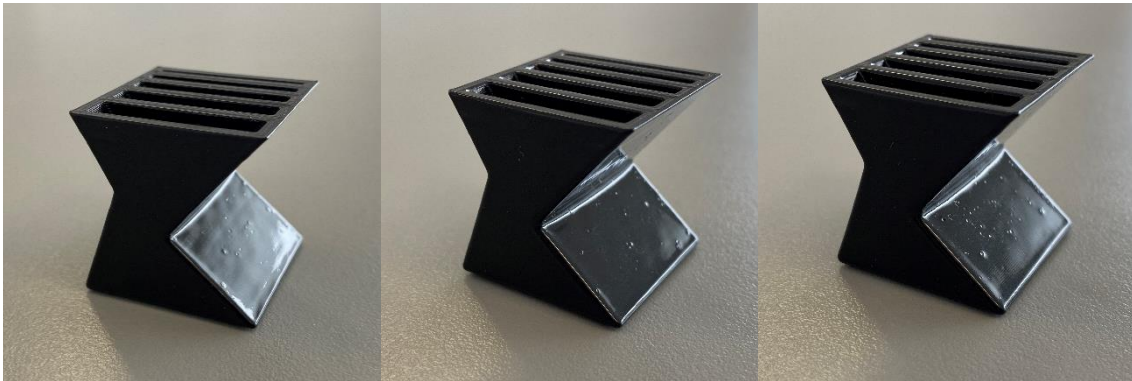


Figura A 77 *Vapour Smoothing* ASA em MEK, Teste 1, 2 e 3 respetivamente

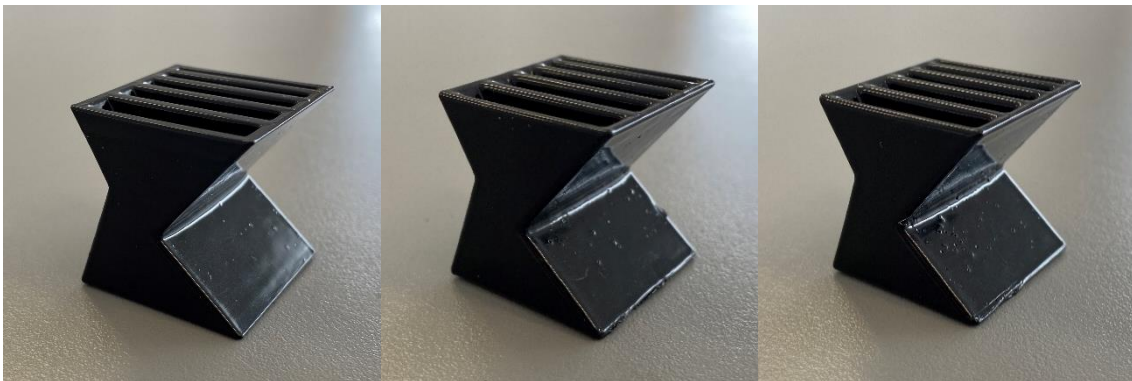


Figura A 78 *Vapour smoothing* ASA em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

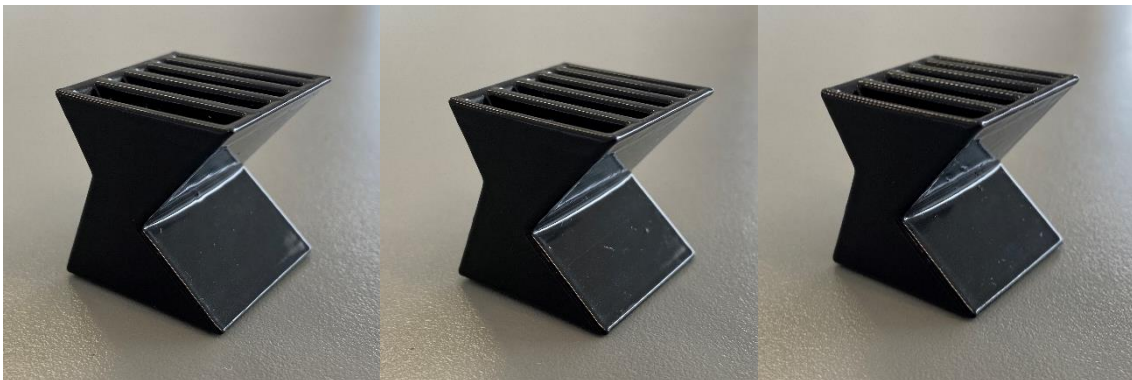


Figura A 79 *Vapour smoothing* ASA em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

- **PETG**

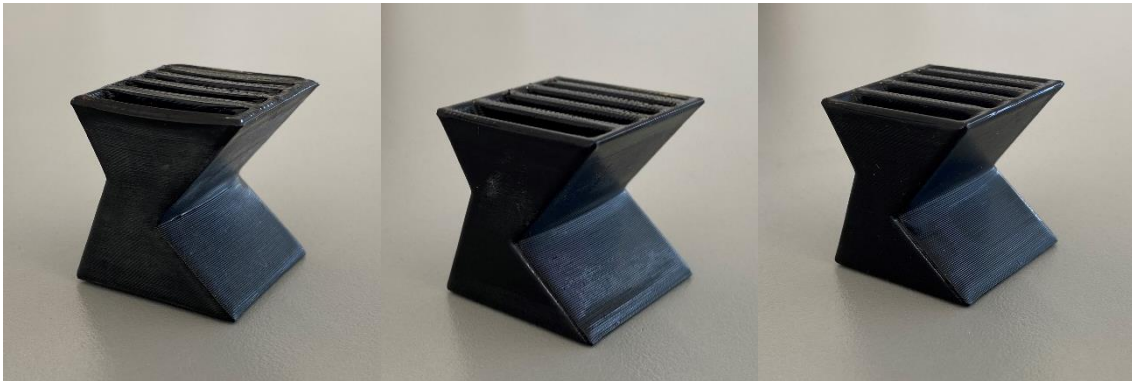


Figura A 80 *Vapour Smoothing* PETG em MEK, Teste 1, 2 e 3 respetivamente

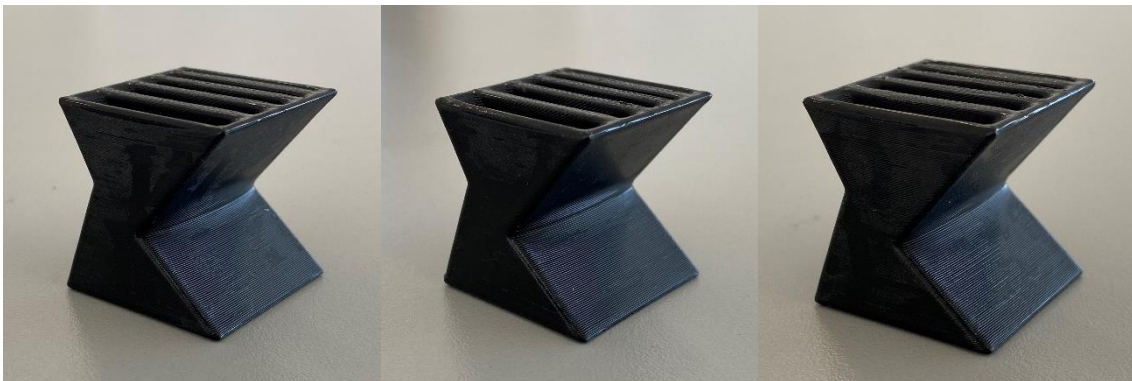


Figura A 81 *Vapour Smoothing* PETG em acetona, Teste 4, 5 e 6 respetivamente

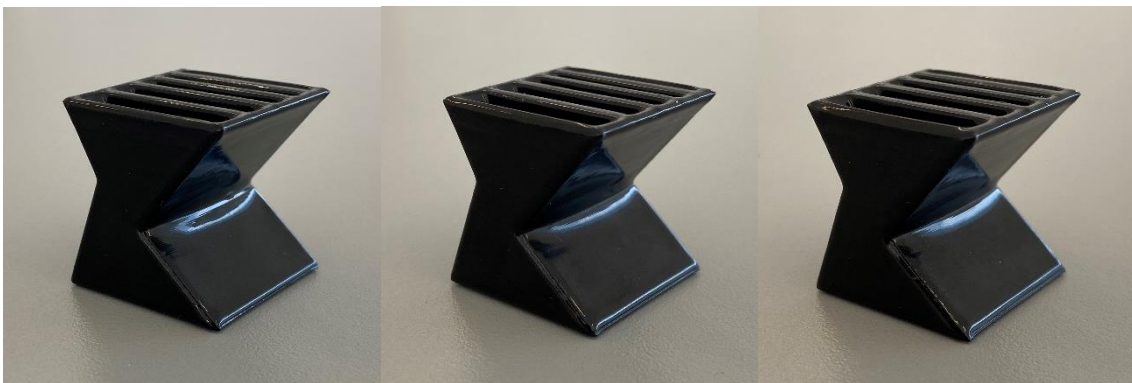


Figura A 82 - *Vapour Smoothing* PETG em diclorometano, Teste 7, 8 e 9 respetivamente

9.21.3 Microscopia 3D cubos vapour smoothing

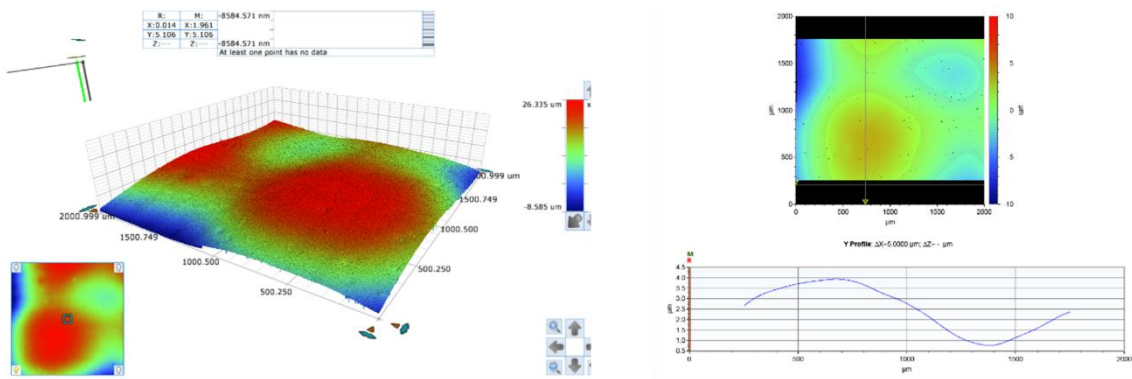


Figura A 83 - PLA Teste 5

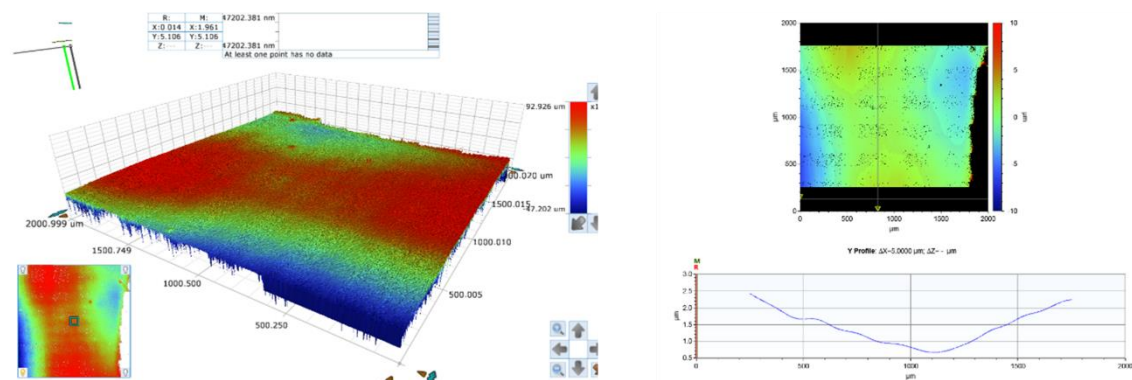


Figura A 84 - PLA Teste 6

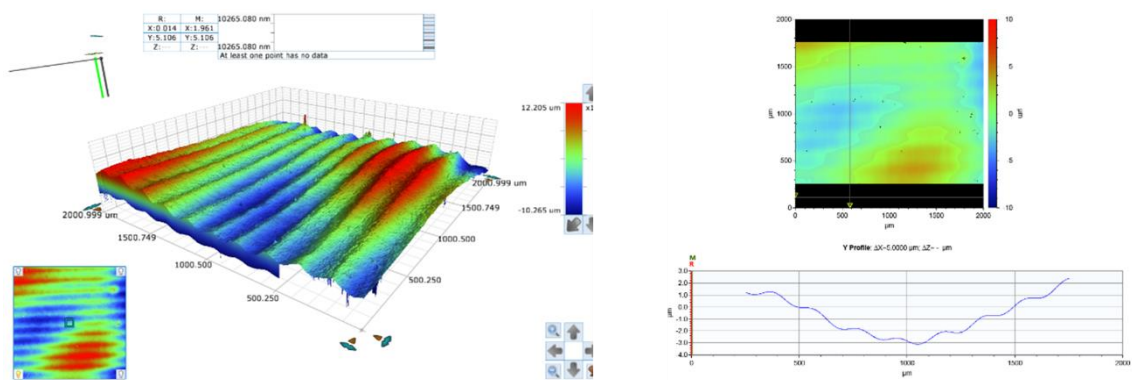


Figura A 85 - PLA Teste 7

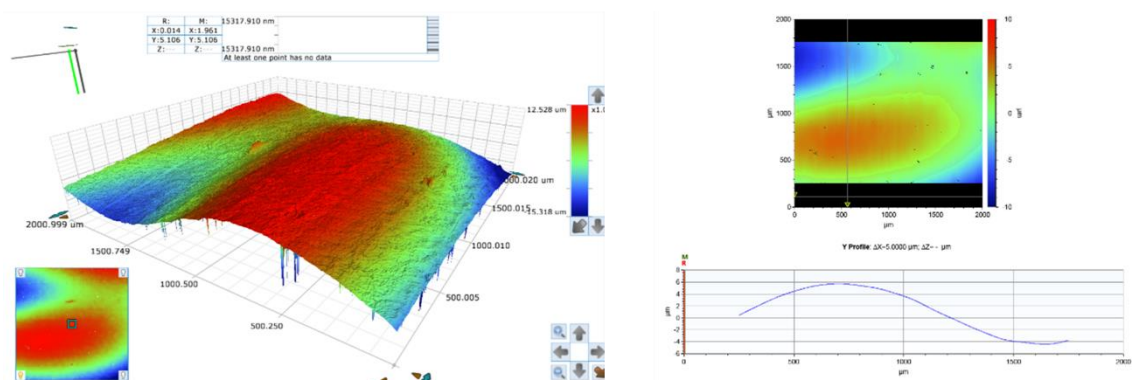


Figura A 86 - PLA Teste 8

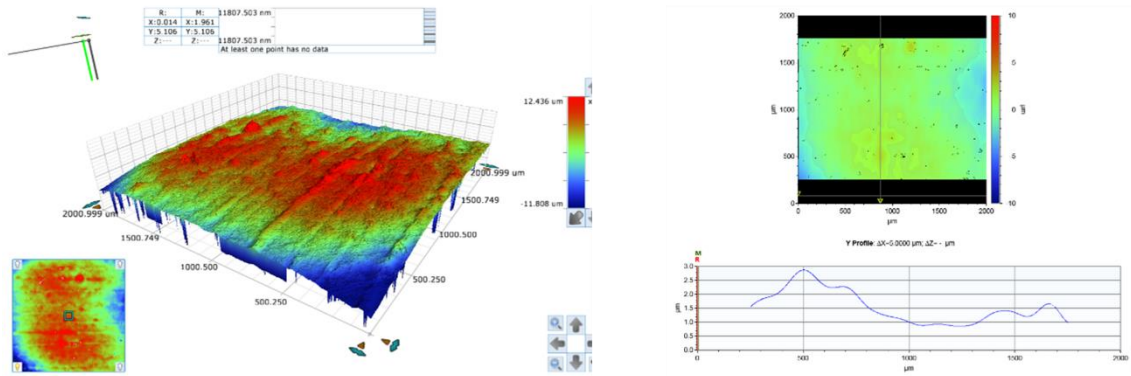


Figura A 87 - PLA Teste 9

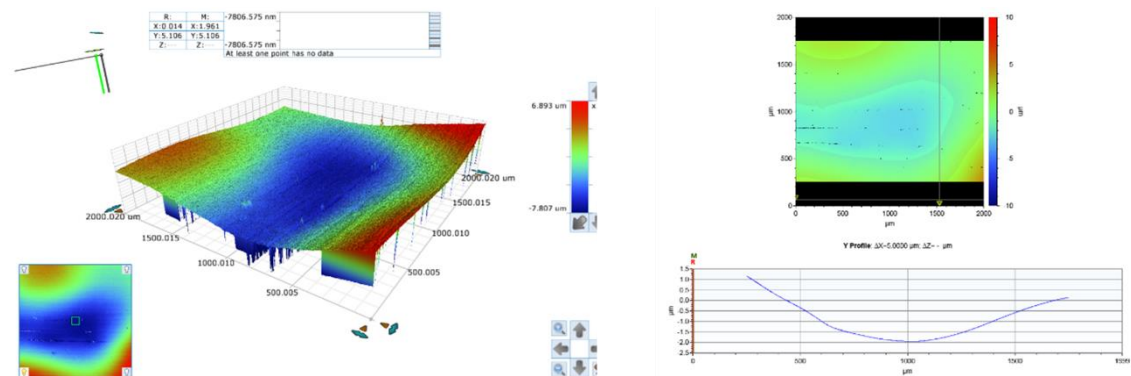


Figura A 88 - ASA Teste 1

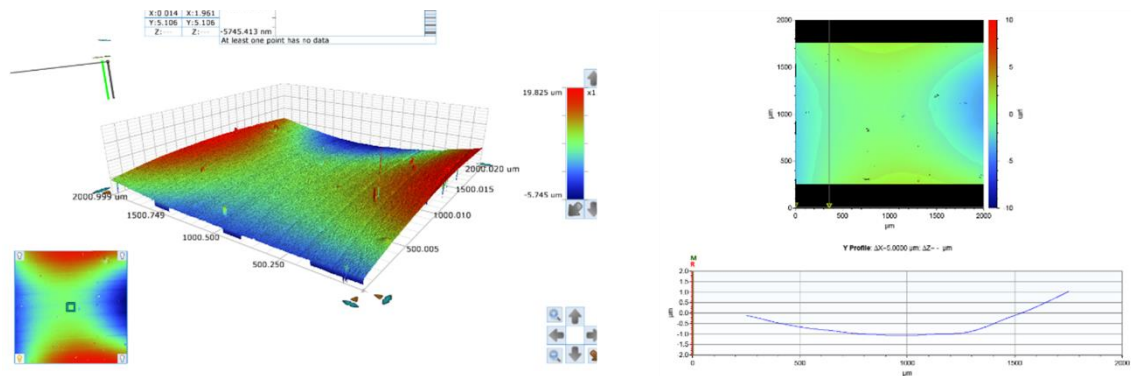


Figura A 89 - ASA Teste 2

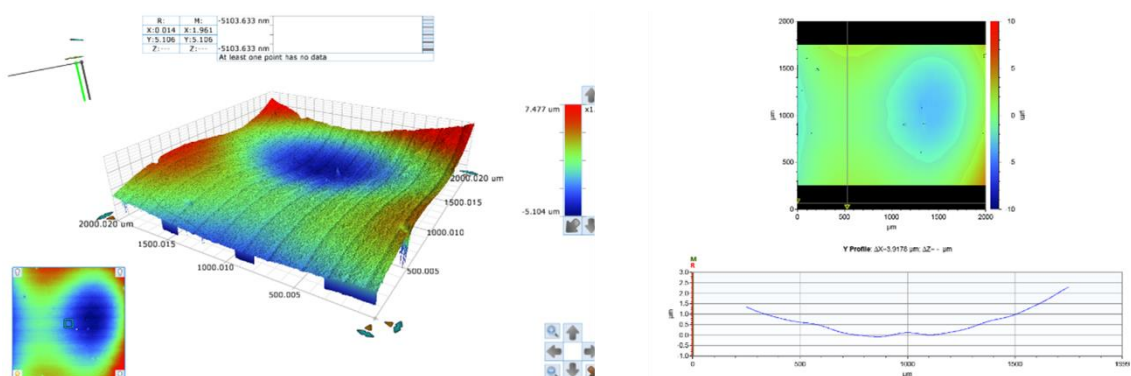


Figura A 90 - ASA Teste 3

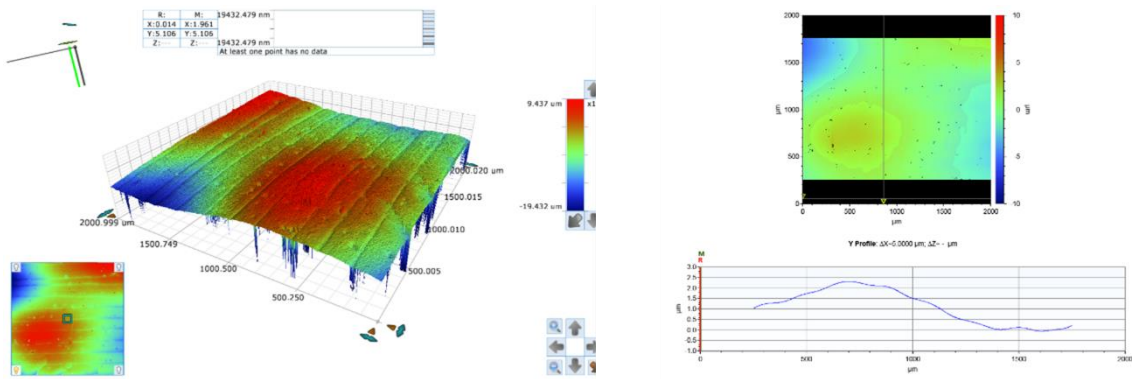


Figura A 91 - ASA Teste 4

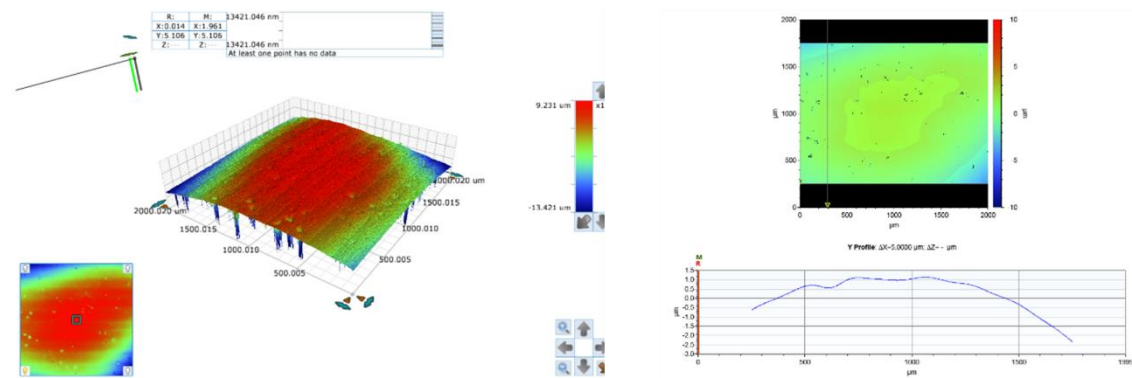


Figura A 92 - ASA Teste 5

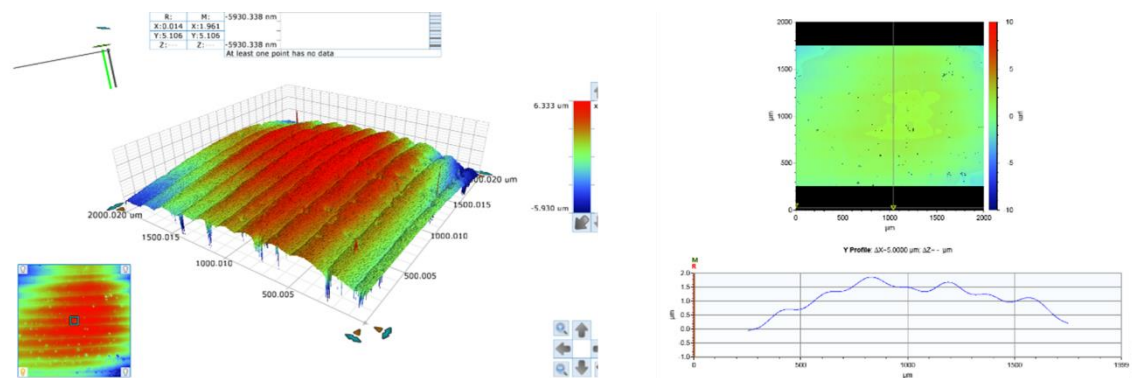


Figura A 93 - ASA Teste 6

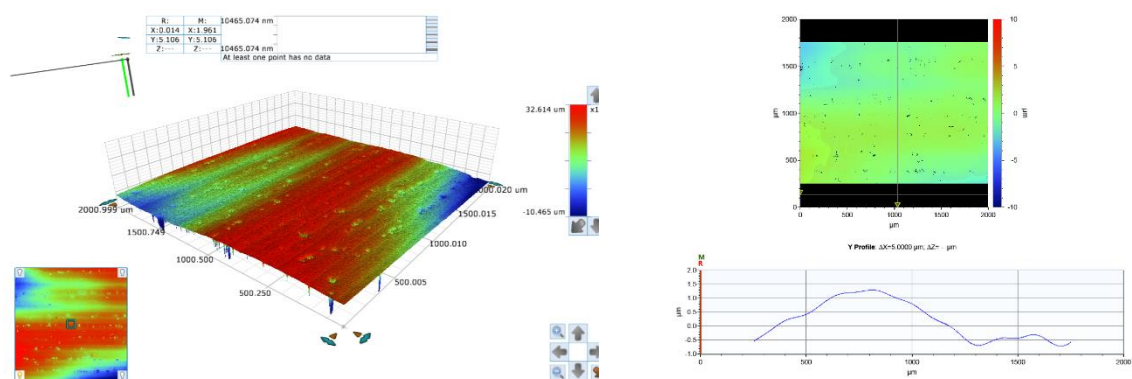


Figura A 94 - ASA Teste 7

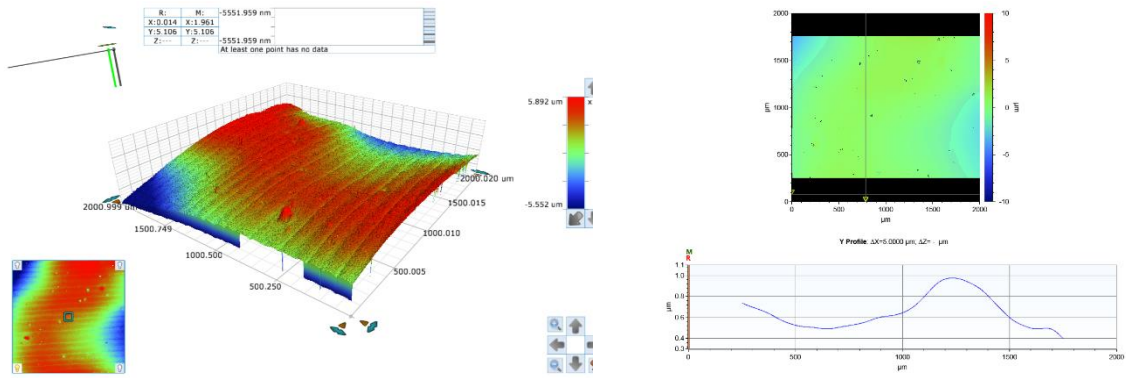


Figura A 95 - ASA Teste 8

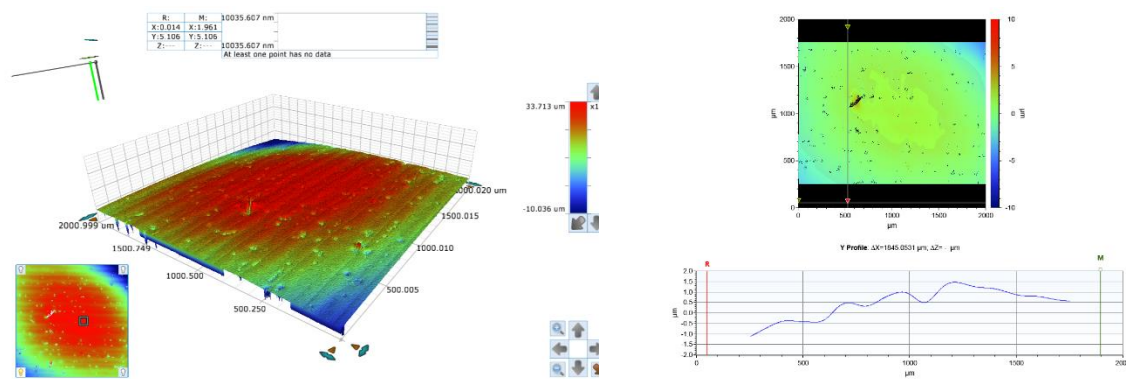


Figura A 96 - ASA Teste 9

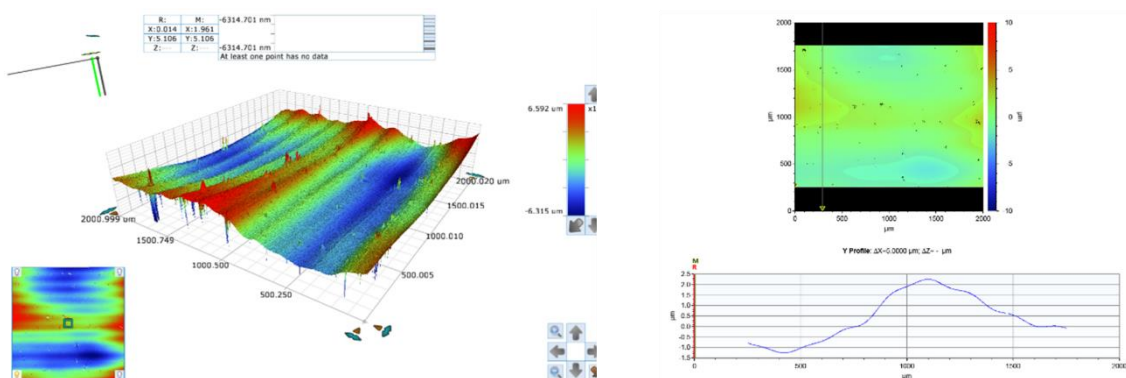


Figura A 97 - PETG Teste 7

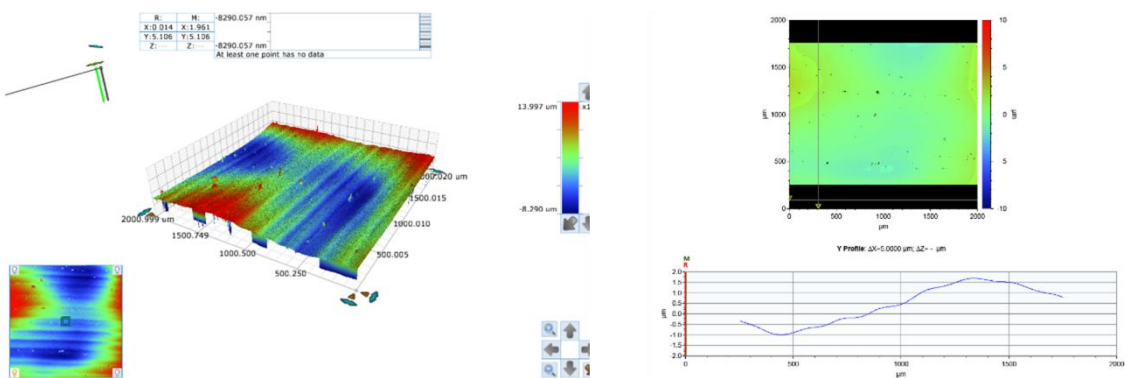


Figura A 98 - PETG Teste 8

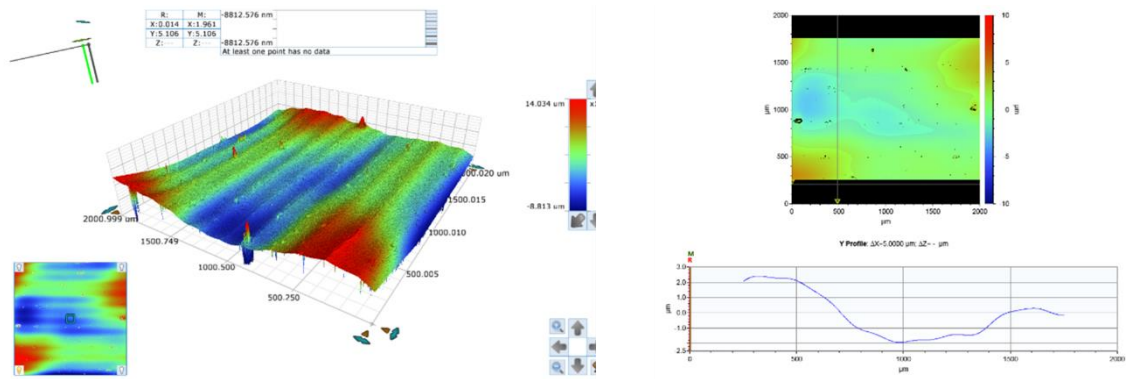
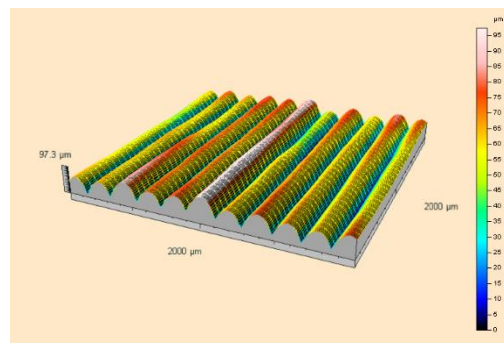
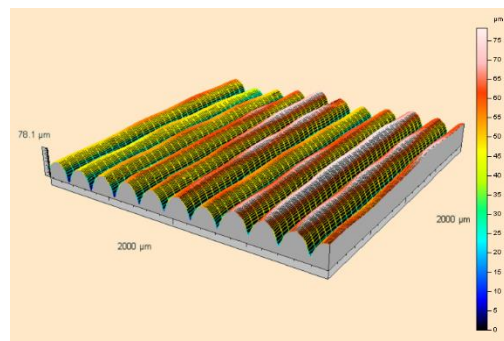


Figura A 99 - PETG Teste 9

Figura A 100 - Topografia 3D da superfície lateral do cubo de *vapor smoothing* em ASA sem pós-processamentoFigura A 101 - Topografia 3D da superfície lateral do cubo de *vapor smoothing* em PETG sem pós-processamento

## 9.22 ANEXO V – Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração em Onyx

### 9.22.1 Método Taguchi

A partir do gráfico do rácio S/N, na Figura A 102, pode-se verificar quais os melhores conjuntos de parâmetros em relação aos valores obtidos do módulo de elasticidade, sendo estes os seguintes:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Orientação de construção – Vertical.

A espessura de camada apresenta um declive ténue, indicando que não apresenta uma grande influência no módulo de elasticidade.

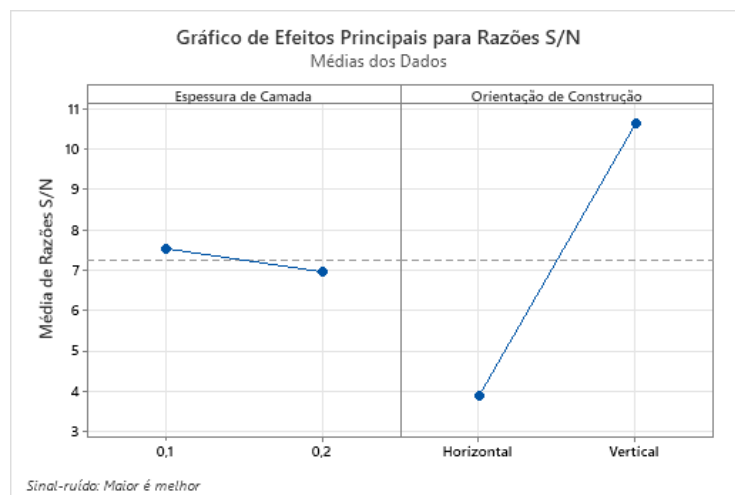


Figura A 102 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do módulo de elasticidade

Quanto à tensão máxima, na Figura A 103 pode-se observar que os melhores dos parâmetros para esta propriedade mecânica são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Orientação de construção – Vertical.

Tal como para o módulo de elasticidade, verifica-se uma baixa influência da espessura de camada e um declive significativo da orientação de construção, obtendo o mesmo conjunto de melhores parâmetros.

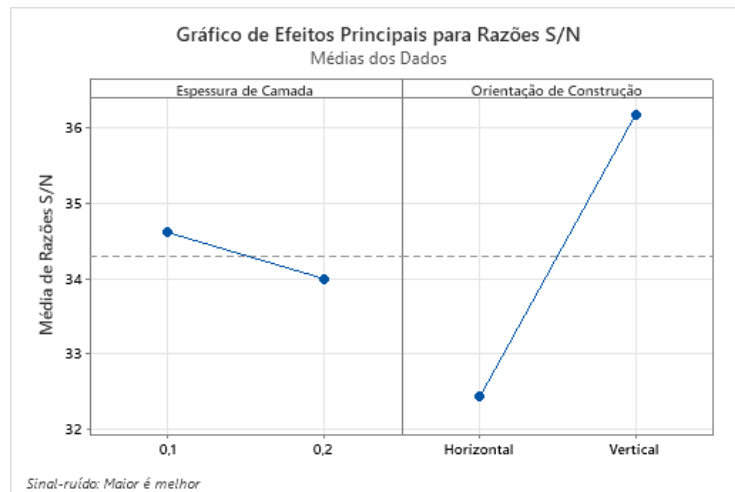


Figura A 103 - Gráfico do rácio S/N dos resultados da tensão máxima

Na Figura A 104 está apresentado o gráfico do rácio S/N dos melhores parâmetros de produção para o alongamento. O melhor conjunto de parâmetros é:

- Espessura de camada – 0,20 mm;
- Orientação de construção – Horizontal.

Ao contrário das outras propriedades mecânicas, para um maior alongamento, são requeridas uma espessura de camada menor, 0,10 mm, e uma orientação de construção horizontal.

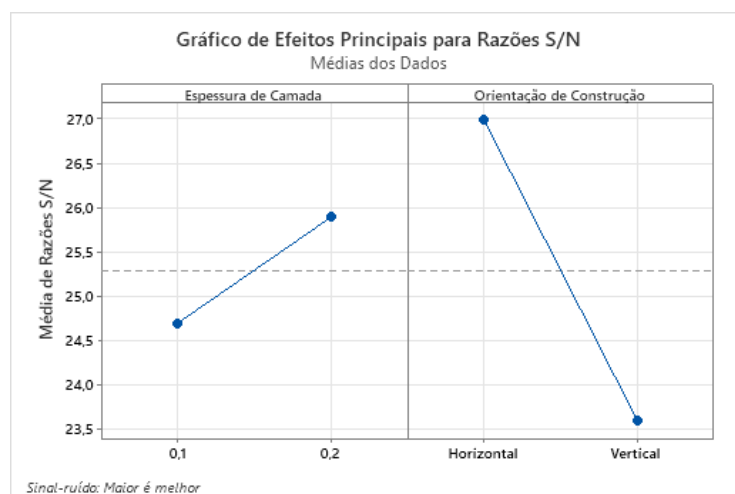


Figura A 104 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do alongamento

Na Tabela A 58 estão representados os melhores parâmetros obtidos, para cada propriedade mecânica analisada, segundo o método Taguchi.

Tabela A 58 - Melhores parâmetros de produção, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Orientação de Construção |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Tensão Máxima          | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Alongamento            | 0,20 mm             | Horizontal               |

Uma razão possível para a relevante significância da orientação de construção no aumento da tensão máxima, pode-se dever ao facto de os provetes produzidos na vertical terem mais camadas com perímetros com o mesmo sentido aos esforços de tração, traduzindo-se num aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade.

### 9.22.2 Análise da Variância (ANOVA)

A ANOVA, através do valor-p, indica a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro. Para valores-p inferiores a 0,05, quanto menor for este valor maior o impacto do parâmetro em questão. Além disso, também é possível analisar a fiabilidade do modelo através do coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Na Figura A 105, pode-se observar a linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade. O coeficiente de determinação para esta propriedade mecânica do material foi de 99,96%, mostrando que o processo pode ser considerado fiável.

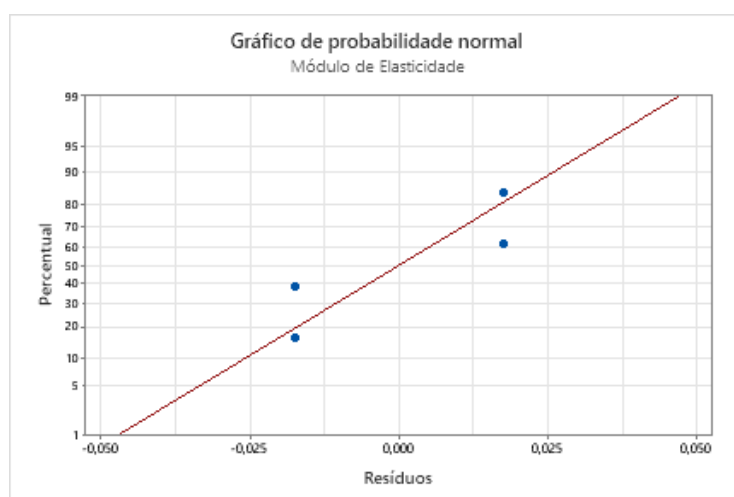


Figura A 105 - Linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade do Onyx

Na Tabela A 106, verifica-se que a orientação de construção é o parâmetro que apresenta um impacto mais significativo no módulo de elasticidade, obtendo um valor-p de 0,012.

Tabela A 59 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do módulo de elasticidade

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,141   | 99,96%         |
| Orientação de Construção | 0,012   |                |

No gráfico da Figura XXXX, pode-se observar a linha de tendência dos resultados da tensão máxima. Este processo considerou-se fiável por apresentar um coeficiente de determinação de 99,34%.

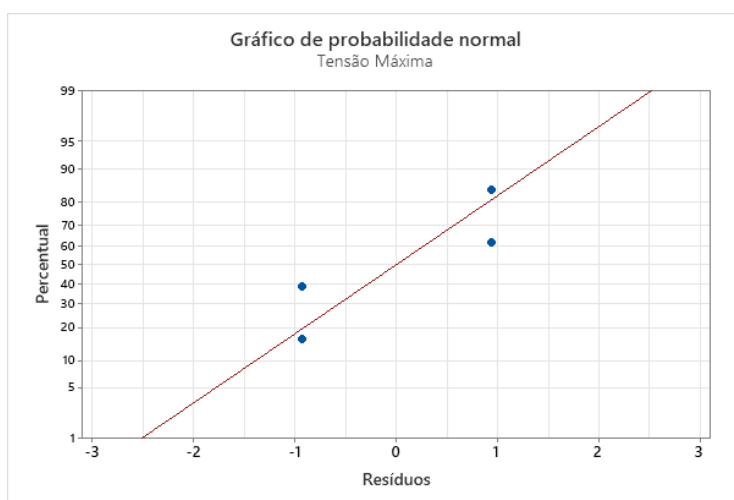


Figura A 106 - Linha de tendência dos resultados da tensão máxima do *Onyx*

A partir da Tabela A 60 pode-se constatar que a orientação de construção é o parâmetro com maior influência na tensão máxima dos provetes de *Onyx*, apresentando o menor valor-p, de 0,053.

Tabela A 60 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da tensão máxima

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,280   | 99,34%         |
| Orientação de Construção | 0,053   |                |

No gráfico presente na Figura A 107, está representada a linha de tendência do alongamento, verificando-se um R<sup>2</sup> de 65,16%.

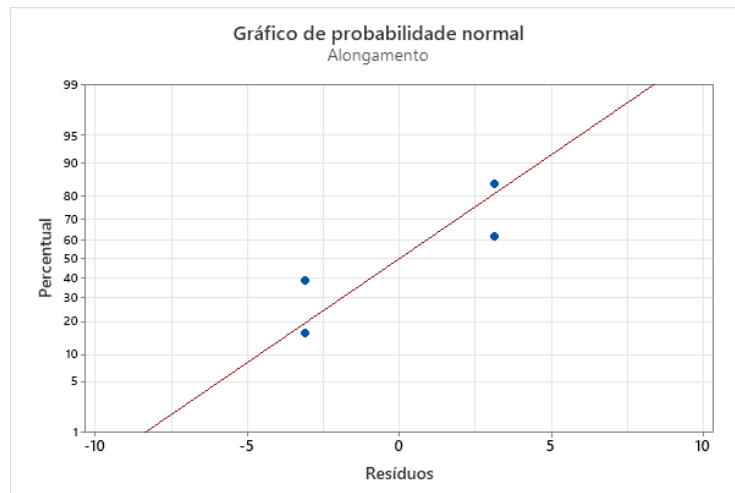


Figura A 107 - Linha de tendência dos resultados do alongamento do Onyx

Na Tabela A 61 verifica-se que os resultados obtidos a partir da análise da variância, os parâmetros estudados não apresentam uma influência significativa nesta propriedade, visto que os valores-p são bastante superiores a 0,050. Apesar disso, considerou-se que o parâmetro com maior influência é a orientação de construção, por apresentar o menor valor-p, de 0,434.

Tabela A 61 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do alongamento

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,659   | 65,16%         |
| Orientação de Construção | 0,434   |                |

Por último, na Tabela A 62, pode-se observar os parâmetros com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, pela análise da variância.

Tabela Anexos 62 - Parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas, pela análise da variância

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Orientação de construção      |
| Tensão Máxima          | Orientação de construção      |
| Alongamento            | Orientação de construção      |

## 9.23 ANEXO X - Método Taguchi e ANOVA dos Provetes de Tração PETG Carbon

### 9.23.1.1 Método Taguchi

Com o gráfico do rácio S/N, apresentado na Figura A 108, constata-se que os melhores conjuntos de parâmetros em relação aos resultados obtidos do módulo de elasticidade são os seguintes:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Orientação de construção – Vertical.

O declive da linha de tendência mostra que a orientação de construção tem maior influência.

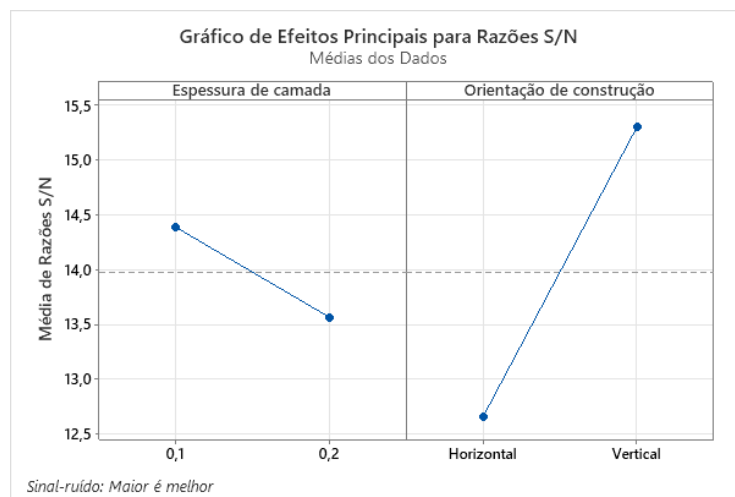


Figura A 108 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do módulo de elasticidade

Na Figura A 109 está representado o gráfico S/N da tensão máxima. Os melhores valores para esta propriedade mecânica são:

- Espessura de camada – 0,10 mm;
- Orientação de construção – Vertical.

A orientação de construção apresenta uma linha de tendência bastante mais significativa do que o parâmetro espessura de camada.

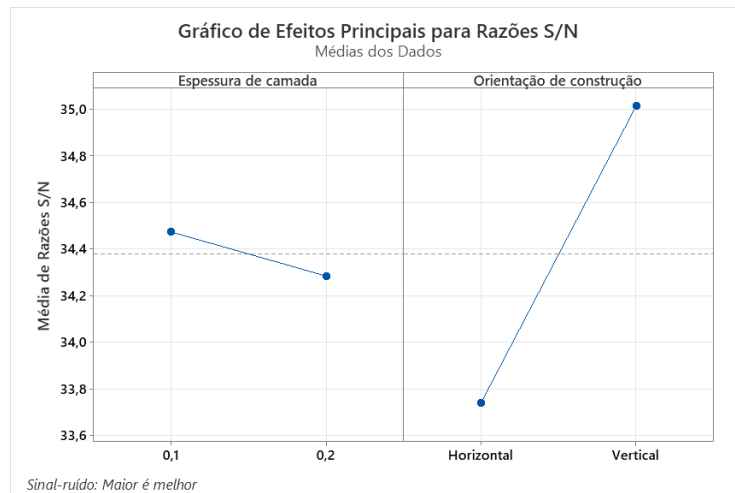


Figura A 109 - Gráfico do rácio S/N da tensão máxima

Quanto ao alongamento, na Figura A 110, pode-se observar que os melhores parâmetros de impressão são:

- Espessura de camada – 0,20 mm;
- Orientação de construção – Horizontal.

Nestes gráficos verifica-se que ambos os parâmetros apresentam uma linha de tendência significativa.

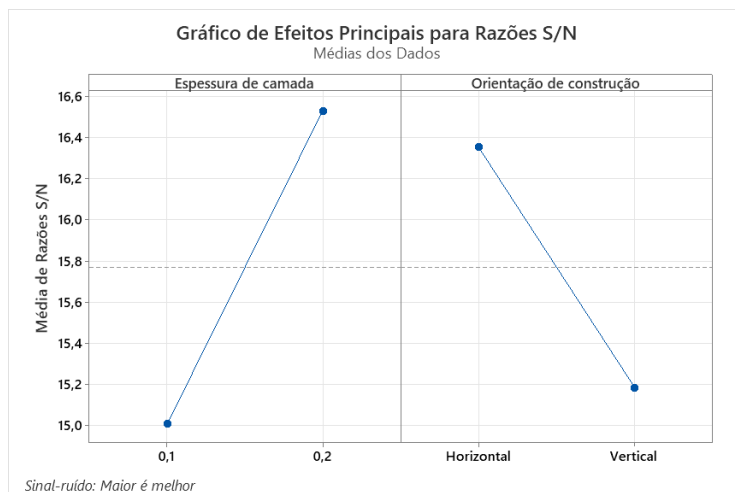


Figura A 110 - Gráfico do rácio S/N dos resultados do alongamento

Na Tabela A 63, estão apresentados os melhores resultados para cada propriedade mecânica analisada.

Tabela A 63 - Melhores parâmetros de produção, pelo método Taguchi

| Propriedade Mecânica   | Espessura de Camada | Orientação de Construção |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Tensão Máxima          | 0,10 mm             | Vertical                 |
| Alongamento            | 0,20 mm             | Horizontal               |

Os melhores parâmetros de produção para cada propriedade dos provetes de *PETG Carbon* foram os mesmos que se obtiveram para os provetes de *Onyx*. A possível razão para a relevante significância da orientação de construção no aumento da tensão máxima, é a mesma indicada para o material anterior, ou seja, os provetes produzidos na vertical terem mais camadas com perímetros com o mesmo sentido aos esforços de tração, garantindo resultados mais elevados.

### 9.23.1.2 Análise da Variância (ANOVA)

Mais uma vez, a análise da variância permite perceber a percentagem de contribuição ou probabilidade de significância de cada parâmetro. Além disso, esta análise ainda fornecer valores de coeficientes de determinação que permitem tirar conclusões à cerca da fiabilidade do processo.

Na Figura A 111, pode-se observar a linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade.

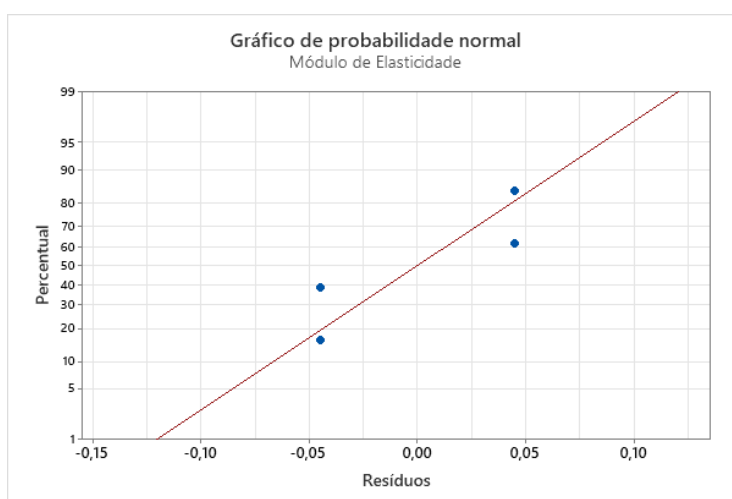


Figura A 111 - Linha de tendência dos resultados do módulo de elasticidade do *PETG Carbon*

Na Tabela A 64, verifica-se que a orientação de construção é o parâmetro com maior influência para os resultados do módulo de elasticidade, obtendo o menor valor-p, de 0,037.

Tabela A 64 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do módulo de elasticidade

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,118   | 99,69%         |
| Orientação de Construção | 0,037   |                |

No gráfico, da Figura A 112, pode-se observar a linha de tendência de resultados da tensão máxima.

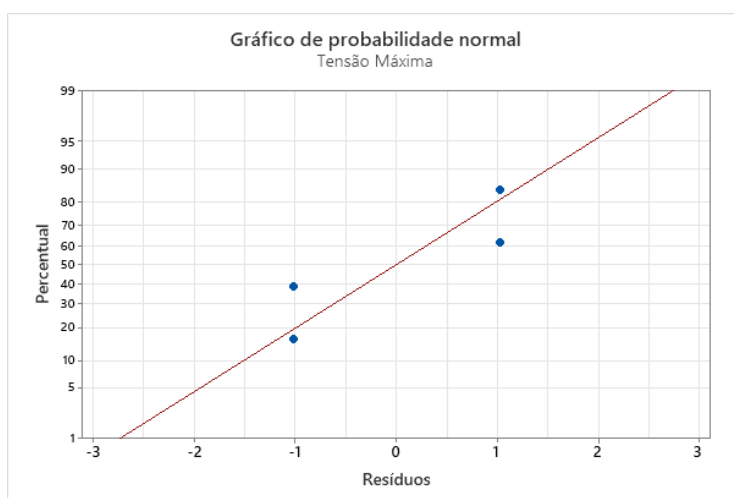


Figura A 112 - Linha de tendência dos resultados da tensão máxima do PETG Carbon

Na Tabela A 65, pode-se constatar que o parâmetro com menor valor-p é a orientação de construção, sendo de 0,165. Apesar deste valor-p ser bastante superior a 0,05, é de notar que em relação ao valor-p do parâmetro espessura de camada, este é bastante inferior. Posto isto, considerou-se que o parâmetro com maior influência na tensão máxima foi a orientação de construção.

Tabela A 65 - Resultados estatísticos dos valores obtidos da tensão máxima

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,643   | 93,57%         |
| Orientação de Construção | 0,165   |                |

No gráfico presente na Figura A 113, está representada a linha de tendência do alongamento, com um R<sup>2</sup> de 61,76%.

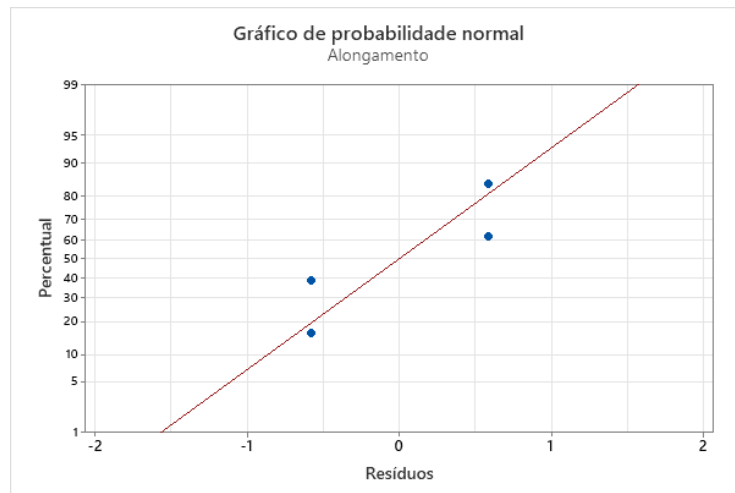


Figura A 113 -Linha de tendência dos resultados do alongamento do *PETG Carbon*

Na Tabela A 66, estão indicados os resultados da análise da variância, sendo que estes não apresentam grande significância devido aos valores obtidos serem bastante superiores a 0,05. Porém, o valor-p mais baixo obtido foi de 0,503, referente à espessura de camada. Posto isto, considerou-se que este parâmetro apresenta um impacto ligeiramente maior no alongamento.

Tabela A 66 - Resultados estatísticos dos valores obtidos do alongamento

| Parâmetro                | Valor-p | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------|----------------|
| Espessura de Camada      | 0,503   | 61,76%         |
| Orientação de Construção | 0,572   |                |

Por último, na Tabela A 67, pode-se observar os parâmetros com maior influência no módulo de elasticidade, tensão máxima e alongamento, pela análise da variância.

Tabela A 67 - Parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas, pela análise da variância

| Propriedade Mecânica   | Parâmetro de Maior Influência |
|------------------------|-------------------------------|
| Módulo de Elasticidade | Orientação de construção      |
| Tensão Máxima          | Orientação de construção      |
| Alongamento            | Espessura de camada           |

