

# Estudo e Caracterização da Impressão Tridimensional

Liane Gonçalves Domingues - 31076

Dissertação realizada sob a orientação de  
**Prof<sup>ª</sup>. Ana Isabel Pereira**

Mestrado em Engenharia Industrial

2018 - 2019



# Estudo e Caracterização da Impressão Tridimensional

Dissertação do  
Mestrado em Engenharia Industrial  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Liane Gonçalves Domingues - 31076

2018 - 2019

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.



# Agradecimentos

À orientadora e amiga professora doutora Ana Isabel Pereira por todo o apoio oferecido durante este ano, por todas as horas investidas neste projeto, pela liberdade e confiança concedida durante a realização deste projeto e por todo o ensinamento dado neste meu percurso académico.

Aos meus pais, os meus modelos e maiores apoiantes por todos os sacrifícios que tiveram de fazer de modo a eu poder percorrer este caminho e atingir todos os meus objetivos sem que nunca me faltasse nada, por todas as palavras amigas e incentivos nas horas mais negras e por todos os ensinamentos que me deram, pois sem eles não seria a pessoa que sou.

Ao meu irmão por me ensinar que nunca se deve desistir de nada mesmo que pareça um caminho sem fim, por toda a ajuda dada mesmo não estando presente e pela amizade de irmão.

A todos os meus amigos o apoio dado desde o início do percurso até ao fim, por todas as palavras, risos e incentivos e principalmente por se manterem firmes comigo até ao momento de dizer adeus à vida académica.

À comunidade IPB por me ter recebido tão bem durante este percurso.

# Resumo

O constante desenvolvimento industrial em todas as partes do mundo necessitou de tecnologias que acompanhassem a sua evolução, tecnologias das quais faz parte a impressão 3D. A impressão tridimensional tem vindo a ser desenvolvida constantemente nos últimos anos devido à sua forte utilização em diversos setores e às múltiplas vantagens que advêm da sua aplicação. Com este trabalho pretende-se efetuar um estudo acerca do impacto da utilização de diversos *softwares* usados para impressão 3D em seis objetos distintos utilizando-se diversos ângulos de impressão, com o objetivo de encontrar o melhor tempo de impressão e o menor consumo de filamento para a construção dos objetos. Para se realizar tal estudo foram utilizados os *softwares Simplify 3D, Repetier Host e Cura*. Em cada um dos *softwares* foram estudadas as seis figuras utilizando em cada uma das simulações executadas diferentes ângulos possíveis para realizar a impressão, tendo em consideração que os ângulos foram estudados previamente em um trabalho conjunto entre a Universidade do Minho com a Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Com a finalização das simulações foi verificado que não existe um ângulo em comum que possa ser utilizado em todas as peças para obter resultados satisfatórios, mas sim que para cada um dos objetos estudados deve ser utilizado um ângulo específico, existindo apenas comumente e maioritariamente entre todos os objetos o *software* que melhores resultados gerou em relação ao tempo de impressão, o Simplify 3D, enquanto que para o valor de filamento utilizado para impressão o *software* que melhores resultados gerou foi o *Cura*.

**Palavras-chave:** : Impressão 3D, Prototipagem Rápida, Ângulos, *Softwares*

# Abstract

Constant industrial development in all parts of the world has required technologies that keep pace with its evolution, technologies of which 3D printing is a part. Three-dimensional printing has been constantly developed in recent years due to its strong use in various sectors and the multiple advantages that come from its application. This work intends to study the impact of using various softwares used for 3D printing on six different objects using different printing angles, in order to find the best printing time and the shortest filament consumption for the construction of objects. To carry out such a study, we used the Simplify 3D software, Repetier Host and Cura software. In each of the software the six figures were studied using in each of the simulations performed different possible angles to make the impression, considering that the angles were previously studied in joint work between the University of Minho and the Superior School of Technology and Management. With the completion of the simulations, it was found that there is no common angle that can be used in all parts to obtain satisfactory results, but that for each of the objects studied a specific angle should be used, existing only commonly and mostly among all the software results that generated the best results in relation to the printing time, Simplify 3D, while for the filament value used for printing, the software results that generated the best results was the Cura software.

**Keywords:** 3D Printing, Rapid Prototyping, Angles, Softwares



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Introdução . . . . .	1
1.2	Objetivo . . . . .	2
1.3	Estrutura do Relatório . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fabrico Aditivo</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Técnicas de Fabrico Aditivo . . . . .	8
2.2.1	Estereolitografia . . . . .	8
2.2.2	Sinterização Seletiva por Laser . . . . .	9
2.2.3	Modelação por Extrusão de Plástico . . . . .	10
2.2.4	Tecnologia da <i>ZPrinter</i> . . . . .	11
2.2.5	Tecnologia da <i>Polyjet</i> . . . . .	12
2.2.6	Sinterização Direta de Metais por Laser . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Impressão 3D</b>	<b>15</b>
3.1	Introdução . . . . .	15
3.2	Tipos de Impressoras Utilizadas . . . . .	18
3.2.1	Ultimaker 3D . . . . .	19
3.2.2	Big Builder Dual . . . . .	20
3.2.3	Fusion3 F400-S . . . . .	21
3.3	Materiais Utilizados na Impressão 3D . . . . .	23

3.3.1	Plástico . . . . .	23
3.3.2	Metais . . . . .	27
3.3.3	Cerâmicas . . . . .	29
3.3.4	Madeira . . . . .	30
3.4	<i>Softwares</i> Utilizados . . . . .	30
3.4.1	<i>Repetier Host</i> . . . . .	30
3.4.2	<i>Cura</i> . . . . .	33
3.4.3	<i>Simplify 3D</i> . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Peças em Estudo</b>	<b>37</b>
4.1	<i>Dryer</i> . . . . .	37
4.2	<i>Fin</i> . . . . .	39
4.3	Lego Curvo . . . . .	40
4.4	<i>Excavator</i> . . . . .	41
4.5	<i>Keychain Case</i> . . . . .	43
4.6	<i>Rod</i> . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Resultados Numéricos e Discussão</b>	<b>47</b>
5.1	<i>Dryer</i> . . . . .	47
5.2	<i>Fin</i> . . . . .	55
5.3	Lego Curvo . . . . .	59
5.4	<i>Excavator</i> . . . . .	64
5.5	<i>Keychain Case</i> . . . . .	70
5.6	<i>Rod</i> . . . . .	75
5.7	Discussão dos resultados . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>83</b>
6.1	Conclusões . . . . .	83
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	84

# Lista de Tabelas

5.1	Resultados obtidos com a peça <i>Dryer</i> . . . . .	48
5.2	Resultados obtidos da normalização relativa para o tempo de impressão . .	53
5.3	Resultados obtidos da normalização relativa para o filamento utilizado . . .	54
5.4	Resultados obtidos com a peça <i>Fin</i> . . . . .	55
5.5	Resultados obtidos da normalização relativa do tempo de elaboração para o objeto <i>fin</i> . . . . .	58
5.6	Resultados obtidos da normalização relativa do filamento utilizado para a elaboração do objeto <i>fin</i> . . . . .	59
5.7	Resultados obtidos com a peça Lego Curvo . . . . .	60
5.8	Resultados da normalização Relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao tempo para o objeto Lego Curvo. . . . .	63
5.9	Normalização relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao filamento.	64
5.10	Resultados obtidos com a peça <i>Excavator</i> . . . . .	65
5.11	Resultados da normalização relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao tempo. . . . .	69
5.12	Resultados da normalização relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao filamento. . . . .	69
5.13	Resultados obtidos com a peça <i>Keychain Case</i> . . . . .	70
5.14	Resultados obtidos do cálculo da normalização relativa e da percentagem relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao tempo. . . . .	74
5.15	Resultados dos cálculos da normalização relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao filamento. . . . .	75

5.16	Resultados obtidos com a peça <i>Rod</i> . . . . .	76
5.17	Resultados da normalização relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao tempo de impressão. . . . .	79
5.18	Normalização Relativa entre a utilização dos <i>softwares</i> em relação ao fila- mento utilizado. . . . .	79
5.19	Resultados obtidos para a média e desvio padrão dos tempos de impressão de todos os <i>softwares</i> . . . . .	81
5.20	Resultados obtidos para a média e desvio padrão da quantidade de fila- mento utilizado na impressão para todos os <i>softwares</i> . . . . .	82

# Lista de Figuras

2.1	Representação tridimensional de um pistão acoplado a uma biela em formato tridimensional [5] . . . . .	6
2.2	Representação tridimensional do Focus ST 2015 [7]. . . . .	7
2.3	Esquematização do processo de Estereolitografia (SLA) [1] . . . . .	8
2.4	Esquematização do processo de SLS [1] . . . . .	9
2.5	Esquematização do processo de Modelação por extrusão de Plástico (FDM) [8] . . . . .	10
2.6	Esquematização da Tecnologia da <i>ZPrinter</i> [8]. . . . .	11
2.7	Esquematização da Tecnologia da <i>Polyjet</i> [8]. . . . .	12
2.8	Esquematização do processo de Sinterização Direta de Metais por Laser [8].	13
3.1	Formato dos dados possíveis a utilizar na criação do Código G (Adaptado de [11]) . . . . .	16
3.2	Exemplo de um programa escrito em Código G (Adaptado de [11]) . . . . .	17
3.3	Impressora Modelo <i>Replicator Makerbot</i> que utiliza um material semi-líquido no cabeçote (Adaptado de [13]) . . . . .	18
3.4	Impressora Ultimaker 3D [14]. . . . .	20
3.5	Impressora Big Builder Dual 3D [16]. . . . .	21
3.6	Impressora Fusion3 Modelo F400-S [18]. . . . .	22
3.7	Formas de objetos criadas a partir do filamento de Nylon-CF15 [20]. . . . .	23
3.8	Bobine com filamento de ABS de cor branca e espessura de 3 mm à esquerda e exemplos de peças impressas em ABS à direita [20]. . . . .	24

3.9	Modelo impresso em PLA de cor azul [12]. . . . .	25
3.10	Modelo de PLA Extrafill Orange à esquerda e bobine de PLA <i>Premium</i> à direita [12]. . . . .	26
3.11	Modelo de um jato impresso em Polipropileno à esquerda e bobine de filamento de Polipropileno à direita [12]. . . . .	27
3.12	Modelo de anéis fabricados a partir da impressão 3D [21]. . . . .	28
3.13	Modelo de um indivíduo impresso em cerâmica [12]. . . . .	29
3.14	Ambiente de trabalho do <i>software Repetier Host</i> na versão 2.1.3 . . . . .	31
3.15	Janela para alteração de opções no ambiente de trabalho do <i>software Repetier Host</i> na versão 2.1.3 . . . . .	31
3.16	Opção girar objeto no <i>software Repetier Host</i> na versão 2.1.3 . . . . .	32
3.17	Janela de trabalho do <i>software Cura</i> na versão 4.0.0 . . . . .	34
3.18	Janela de trabalho do <i>software Cura</i> na versão 4.0.0 . . . . .	34
3.19	Objeto para impressão no <i>Simplify 3D</i> com uma orientação diferente da original e com material de suporte adicionado . . . . .	35
3.20	Objeto para impressão no <i>Simplify 3D</i> . . . . .	36
4.1	Objeto de estudo Dryer . . . . .	37
4.2	Ponteira cromada desportiva de saída dupla [25]. . . . .	38
4.3	Conector em forma de "y" para uso hospitalar [26]. . . . .	39
4.4	Objeto de estudo <i>Fin</i> . . . . .	40
4.5	Antena de rádio e GPS em forma de barbatana encontrada em veículos [27].	40
4.6	Objeto de estudo Lego Curvo . . . . .	41
4.7	Objeto de estudo Lego Curvo em formato real [28]. . . . .	42
4.8	Objeto de estudo <i>Excavator</i> . . . . .	42
4.9	Dumper com pá carregadora [30]. . . . .	43
4.10	Objeto de estudo <i>Keychain Case</i> . . . . .	44
4.11	Objeto de estudo <i>Keychain Case</i> em outra forma de visualização . . . . .	44
4.12	Escorrega com formato parecido ao <i>Keychain Case</i> [31]. . . . .	45

4.13	Objeto de estudo <i>Rod</i> . . . . .	46
4.14	Amolador de facas tradicional [32]. . . . .	46
5.1	Representação do ângulo com os melhores tempos de impressão para os <i>softwares</i> a) <i>Repetier Host</i> e b) <i>Cura</i> . . . . .	49
5.2	Representação do ângulo com o menor gasto de filamento para os <i>softwares</i> a) <i>Repetier Host</i> e b) <i>Cura</i> . . . . .	49
5.3	Compilação de todos os valores do tempo em minutos (à esquerda) e do filamento em milímetros (à direita). . . . .	50
5.4	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados, a) <i>Simplify-B</i> (SB), b) <i>Repetier Host</i> (RH), c) <i>Cura</i> (C), d) <i>Simplify-3D</i> (S). . . . .	51
5.5	Representação dos ângulos de impressão para o <i>software</i> RH onde a) representa o ângulo com melhor tempo e b) o ângulo com o segundo menor gasto de filamento . . . . .	56
5.6	Compilação de todos os valores do tempo necessário em minutos (à esquerda) e do filamento em milímetros (à direita). . . . .	56
5.7	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados . . . . .	57
5.8	Representação do Lego Curvo no ângulo (0°, 90°) . . . . .	61
5.9	Compilação de todos os valores do tempo preciso em minutos e do filamento utilizado em milímetros. . . . .	61
5.10	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados . . . . .	62
5.11	Representação da peça nos ângulos de impressão para o <i>software Cura</i> onde o tempo de elaboração e material gasto são iguais. . . . .	65
5.12	Representação da peça nos ângulos de impressão para o <i>software Cura</i> onde o tempo de elaboração e material gasto são iguais. . . . .	66
5.13	Compilação à esquerda de todos os valores do tempo em minutos e à direita dos valores do filamento em milímetros . . . . .	67
5.14	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados . . . . .	68

5.15	Representação da peça no ângulo de impressão onde foram obtidos os melhores resultados para o <i>software Repetier Host</i> . . . . .	71
5.16	Representação da peça no ângulo de impressão onde foram obtidos os melhores resultados para o <i>software Simplify-3D</i> . . . . .	71
5.17	Compilação de todos os valores à esquerda do tempo em minutos e à direita do filamento em milímetros necessários para a elaboração da peça. . . . .	72
5.18	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados . . .	73
5.19	Representação do <i>Rod</i> nos ângulos de impressão onde foram obtidos valores de tempo e filamento necessários iguais. . . . .	76
5.20	Compilação de todos os valores do tempo em minutos, à esquerda, e do filamento em milímetros à direita . . . . .	77
5.21	Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos <i>softwares</i> utilizados . . .	78

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Introdução

A evolução tecnológica tem vindo a aumentar exponencialmente em todos os setores da indústria e para acompanhar este desenvolvimento são criadas todos os dias novas tecnologias inovadoras que permitem ao ser humano o progresso.

Aquando do desenvolvimento da impressão convencional, mais conhecida por impressão 2D em papel, a possibilidade de fazer a impressão a cores veio revolucionar a indústria, uma vez que foi concebível imprimir numa enorme variedade de cores em simultâneo a partir da mistura das cores base nas cabeças de impressão [1].

A partir desta revolução apenas se tornou ainda mais necessário progredir tendo sido desenvolvida a impressão tridimensional. A possibilidade de criar objetos virtuais a três dimensões usando a impressão 3D e posteriormente utilizá-los como modelo tornou-se num avanço notório para a indústria.

O processo de impressão 3D, também conhecido como fabrico aditivo, é um método inovador de criação de protótipos ou partes funcionais de objetos, sendo estes processos utilizados frequentemente para prototipagem rápida, uma vez que possibilitam a criação de objetos sem a necessidade de construir formas especiais dedicadas ou a utilização de ferramentas avançadas [2]. Existem, no entanto, diversas indústrias que beneficiam

bastante com esta técnica, de entre as quais a indústria aeroespacial e automóvel, a arquitetura, entre outras [3]. Para garantir que a impressão de objetos tenha um custo reduzido, o protótipo pode ser produzido de forma iterativa, podendo desta forma acelerar os primeiros estágios do processo de desenvolvimento do produto e consequentemente economizar no custo.

Um dos principais obstáculos atualmente à impressão 3D é o elevado consumo de tempo para realizar a impressão bem como a elevada quantidade de material gasto, procurando neste trabalho reduzir ao máximo os inconvenientes gerados por estas duas condições.

## 1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho visou a realização de diversas simulações de seis objetos diferentes em três *softwares* de impressão 3D distintos, utilizando-se em cada um dos *softwares* ângulos para a impressão de modelos, obtidos numericamente, como sendo os mais indicados para cada um dos objetos de modo a otimizar alguns dos parâmetros em estudo, sendo estes o tempo de impressão e a quantidade de material gasto tanto na construção como em material de suporte caso seja ou não necessário nas estruturas.

## 1.3 Estrutura do Relatório

O presente relatório encontra-se estruturado em seis .0.0capítulos.

No primeiro capítulo é realizada uma contextualização do tema, expressa a motivação para a realização da dissertação e apresentados os objetivos da mesma.

No segundo capítulo é apresentada uma contextualização acerca do que se trata o Fabrico Aditivo, incluindo as tecnologias mais utilizadas da prototipagem rápida.

No terceiro capítulo é apresentada uma introdução acerca da impressão 3D, uma breve apresentação a título de exemplo de três impressoras tridimensionais distintas e dos *softwares* que as controlam respetivamente. São ainda também abordados os materiais mais

utilizados nesta tecnologia.

No quarto capítulo são apresentadas as peças utilizadas nas simulações bem como alguns exemplos práticos de onde estas podem ser utilizadas no dia a dia.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos das simulações efetuadas nas peças bem como uma discussão desses resultados de forma a avaliar as simulações em que foram obtidos os resultados mais satisfatórios cumprindo dessa forma o principal objetivo.

Por fim no sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões e uma perspectiva para trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Fabrico Aditivo

Neste capítulo é apresentada a definição de Fabrico Aditivo (FA) e o seu modo de funcionamento desde a criação do protótipo até ao modelo final. São também apresentadas algumas das suas vantagens e aplicações na indústria. Serão também descritas, de forma resumida, algumas técnicas de fabrico aditivo bem como o seu modo de funcionamento.

### 2.1 Introdução

A tecnologia de fabrico aditivo (FA), consiste num conjunto de tecnologias destinadas ao fabrico de objetos tridimensionais por sobreposição de material camada a camada. Os objetos podem ter qualquer formato, ou geometria, e são produzidos a partir de um modelo digital ([2]).

Com a evolução do setor, a tecnologia de impressão 3D permite atualmente obter peças muito próximas do produto final, em vez de meros protótipos. Perante este avanço, a associação da impressão 3D apenas a um processo de prototipagem rápida tornou-se ultrapassada. Este facto levou a que no seio da comunidade científica a denominada prototipagem rápida passasse a ser formalmente designada como fabrico aditivo (FA) [4].

O processo de fabrico aditivo começa, necessariamente, com um modelo tridimensional de desenho assistido por computador. Este modelo pode ser desenhado num software comercial disponível para o efeito, ou obtido através de scanners tridimensionais.

Existem neste momento bibliotecas de produtos onde utilizadores podem descarregar

modelos geométricos preparados para a impressão, um exemplo dessas bibliotecas é a biblioteca online do *GRABCAD* [5], que dispõe de uma enorme variedade de modelos de objetos compatíveis com diferentes *softwares* de CAD 3D. Este tipo de *Softwares* têm por base o CAD, do inglês "*Computer Aided Design*" ou desenho assistido por computador, que é o nome genérico de sistemas computacionais utilizados pelas diversas indústrias para a criação de desenhos técnicos, que posteriormente evoluiu e possibilitou a criação de objetos 3D, dos quais fazem parte *softwares* como o *SolidWorks*, *AutoCAD*, *CATIA* entre outros.

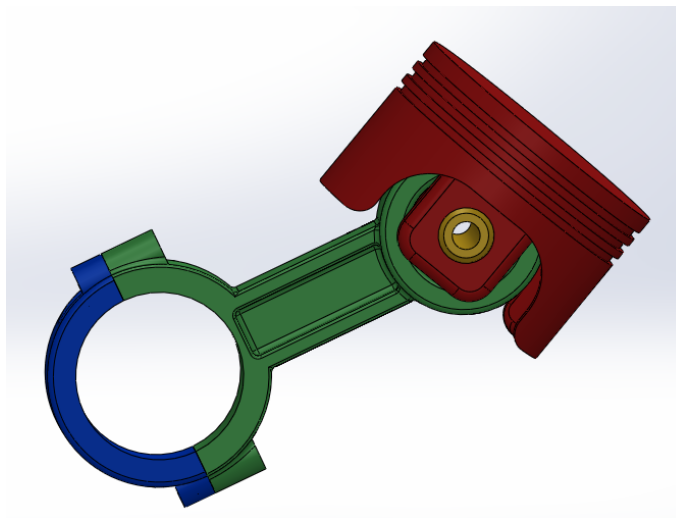


Figura 2.1: Representação tridimensional de um pistão acoplado a uma biela em formato tridimensional [5]

A Figura 2.1 representa o conteúdo de um ficheiro obtido a partir da biblioteca online *GRABCAD*, desenhado a partir do *software SolidWorks* e que podia ser utilizado para a impressão 3D.

Em seguida, o modelo de CAD 3D é laminado digitalmente em secções bidimensionais com uma determinada espessura. A espessura destas camadas determinará a resolução do produto final, visto que, quanto mais fina a camada, maior será a precisão. O produto final é então impresso, camada a camada, de acordo com a informação fornecida pelo modelo digital [4].

Outro dos avanços verificados na tecnologia de impressão 3D consiste no alargamento do leque de materiais com que é possível fabricar produtos. Inicialmente a impressão 3D foi desenvolvida para polímeros, ceras e laminados à base de papel, mas esta tecnologia já permite também o fabrico de peças a partir de materiais metálicos, cerâmicos e até compósitos com fibra de vidro ou fibra de carbono [4]. A seleção do material a ser utilizado na impressão está diretamente associada ao tipo de processo de fabrico aditivo escolhido, existindo atualmente diversos tipos deste processo [4].

A tecnologia FA apresenta inúmeras vantagens, destacando-se a enorme liberdade geométrica, com a possibilidade única de desenvolver componentes otimizados com formas impossíveis de obter com qualquer outro processo convencional.

Uma das aplicações onde a impressão 3D se destaca é na indústria automóvel para a identificação de problemas de design a fim de os corrigir [6].



Figura 2.2: Representação tridimensional do Focus ST 2015 [7].

Nos últimos anos a Ford, já imprimiu mais de 500,000 peças e economizou enormes quantidades de dinheiro e horas de trabalho, graças à utilização da impressão 3D [6]. Um modelo dessas peças impressas pode ser visualizado na Figura 2.2.

## 2.2 Técnicas de Fabrico Aditivo

### 2.2.1 Estereolitografia

O processo de estereolitografia é apresentado na Figura 2.3, designado por SLA e patenteado por *Charles Hull* é o processo de prototipagem rápida mais antigo e utilizado, tendo sido iniciada a sua produção industrial em 1987 [8]. É um processo de fabrico de objetos por camadas, que recorre ao uso de um laser, emitido no domínio ultravioleta, de modo a solidificar o polímero líquido fotossensível contido no tanque [8].

Este processo aditivo constrói o modelo a partir do direcionamento do feixe laser sobre a superfície do tanque onde está contida a resina. Desta forma, o modelo vai solidificando cada camada transversal do modelo. Uma vez solidificada uma camada, a plataforma de construção baixa para o valor correspondente ao da espessura da camada seguinte, e procede à solidificação desta. Este processo repete-se até à última camada do objeto. Para finalizar o modelo, este é limpo com um solvente próprio e posteriormente levado a uma câmara de raios ultravioleta, onde é concluída a cura da resina, de forma a conferir ao objeto final a máxima resistência mecânica [9].

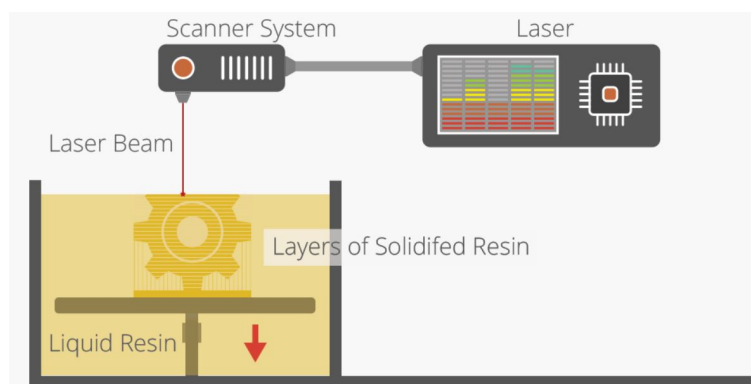


Figura 2.3: Esquematização do processo de Estereolitografia (SLA) [1]

## 2.2.2 Sinterização Seletiva por Laser

O processo de sinterização seletiva por laser, denominado por SLS (*Selective Laser Sintering*), e patenteado por *Carl Deckard*, é igualmente um processo de fabrico aditivo de objetos por camadas, comercializado desde 1992 [8]. Este processo recorre ao uso de um feixe de laser para realizar a sinterização de pós metálicos ou não metálicos de forma a produzir modelos sólidos [8]. O processo de SLS é ilustrado na Figura 2.4.

O processo de fabrico inicia-se com o preenchimento da câmara de construção da impressora com uma camada de pó correspondente à espessura de cada camada de construção. De seguida, a impressora nivela o material e um laser de alta potência é projetado no pó fazendo o material entrar em fusão. Após a formação de uma camada, a plataforma central desce e um rolo aquecido passa sobre a superfície de impressão, cobrindo a camada recém-criada com mais pó. O processo vai se repetir até que o objeto esteja completamente pronto [1].

No final do processo é necessário remover o excesso de pó do objeto que foi impresso, através de um jato de ar comprimido ou de escovas próprias. O pó que não é sintetizado, ou seja, utilizado para formação do objeto, serve ao longo do processo de suporte ao modelo, podendo ser reutilizado no final do processo, portanto o desperdício é mínimo [8].

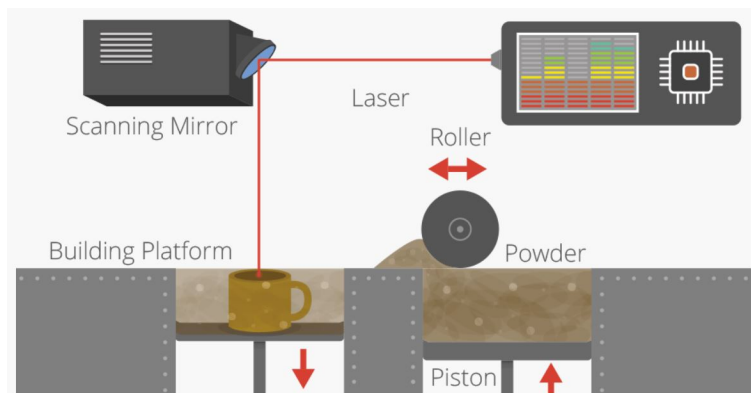


Figura 2.4: Esquemática do processo de SLS [1]

### 2.2.3 Modelação por Extrusão de Plástico

O processo de Modelação por Extrusão de Plástico ou FDM, consiste no fabrico de protótipos por adição de material em camadas, formadas pela extrusão de um material termoplástico através de uma microfileira [8].

O material termoplástico utilizado, vem sob a forma de fio, e é alimentado através de uma bobine, sendo que de seguida a cabeça extrude e deposita o material em camadas muito finas, unindo-se a camada depositada à camada anterior durante a solidificação, repetindo-se todo este processo até estar terminado o protótipo [8].

O movimento nos eixos  $xx$  e  $yy$  na impressora é controlado por um sistema eletromagnético, permitindo este a eliminação da utilização de cabos ou outras partes móveis. Há ainda a possibilidade de utilização de duas cabeças extrusoras, sendo que a primeira cabeça constrói o modelo, enquanto a segunda, se necessário, deposita o material de suporte [8].

A existência de uma bolsa de ar entre a cabeça extrusora e a placa impede o contacto direto entre ambas, reduzindo desta forma o atrito a praticamente zero, possibilitando desta forma elevadas velocidades de execução [8].

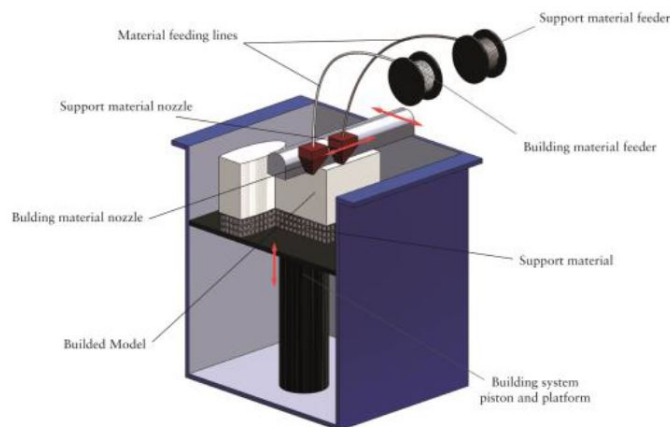


Figura 2.5: Esquemática do processo de Modelação por extrusão de Plástico (FDM) [8]

## 2.2.4 Tecnologia da *ZPrinter*

A tecnologia da *ZPrinter*, ilustrada na Figura 2.6, é detida pela 3D *Systems*, sendo este o mais reconhecido processo de *Three-dimensional Printing*, ou TDP. Esta tecnologia caracteriza-se por utilizar um pó cerâmico e um ligante depositado através das cabeças das impressoras para construir o modelo tridimensional [1].

Numa primeira fase dá-se a distribuição de uma camada uniforme de pó sobre a superfície de trabalho. O ligante líquido é depositado nessa camada, por intermédio de finos jatos, sobre os pontos que correspondem ao corte local da peça. Para esse efeito utilizam-se cabeças de impressão idênticas às peças utilizadas pelas impressoras do tipo jato de tinta [8].

O processo é repetido as vezes necessárias até construir, camada por camada, a peça completa. Por fim, a peça é retirada da máquina de TDP, ficando o pó não aglutinado pelo ligante solto. Após a construção do objeto, o material em excesso é retirado aplicando um jato de ar comprimido [8].

Numa segunda fase, o componente sofre um tratamento térmico do tipo sinterização, com o objetivo de fortalecer a ligação entre as partículas, aumentando assim a resistência do modelo [8].

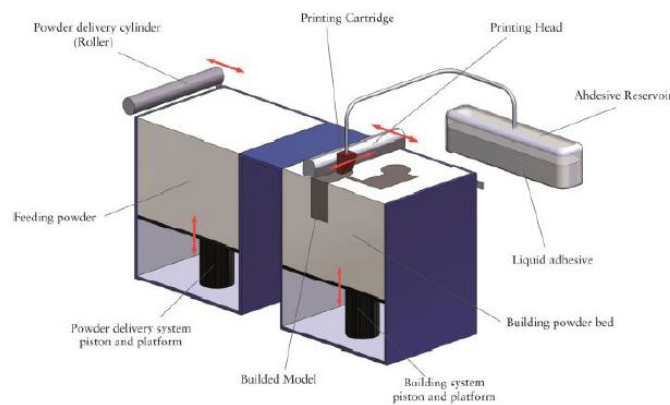


Figura 2.6: Esquematização da Tecnologia da *ZPrinter* [8].

## 2.2.5 Tecnologia da *Polyjet*

A tecnologia da *Polyjet*, surgiu no ano 2000 [8], pela empresa israelita *Objet Geometries* com o nome *Polyjet*, tecnologia esta que atualmente pertence à *Stratasys*.

Esta tecnologia funciona com um sistema idêntico às impressoras de jato de tinta habitualmente utilizadas a uso doméstico, sendo a única diferença o facto de que em vez de depositar gotas de tinta sobre o papel são depositadas por jato camadas de um polímero fotossensível sobre a bandeja de construção [8].

O polímero utilizado é posteriormente curado através de uma fonte UV, camada por camada, não havendo necessidade de uma pós-cura adicional. Simultaneamente com a deposição do material estrutural da peça, a impressora 3D deposita de modo igual o material de suporte, especialmente concebido para apoiar e suportar saliências e geometrias complexas [1].

Esta tecnologia de impressão tridimensional tem algumas vantagens, nomeadamente a elevada qualidade do protótipo, as elevadas velocidades e a alta precisão dimensional. Na Figura 2.7 pode-se visualizar um esquemático do processo [8].

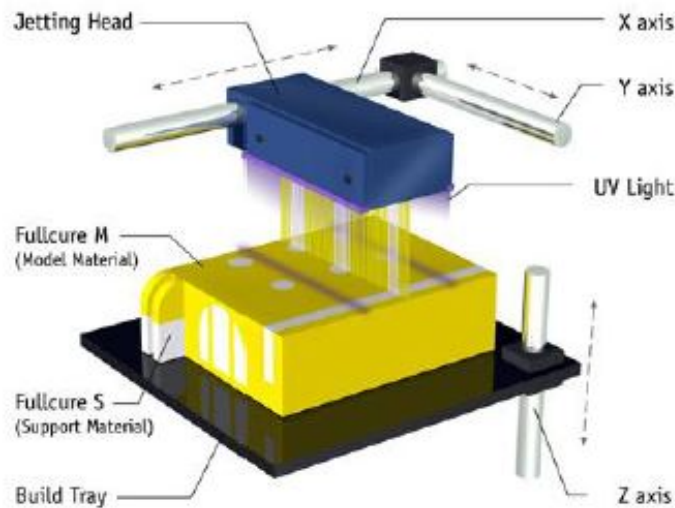


Figura 2.7: Esquemática da Tecnologia da *Polyjet* [8].

## 2.2.6 Sinterização Direta de Metais por Laser

O processo de sinterização direta de metais por laser (DMLS) permite obter de forma direta peças e ferramentas metálicas funcionais.

O protótipo é construído pelo método camada a camada, ficando este envolta em pó solto (pós metálicos). É utilizado um laser de elevada potência (entre 200 W a 400 W) para fornecer a energia necessária para se estabelecerem as ligações metálicas entre os pós, eliminando desta forma a necessidade de utilização destes pós revestidos com um polímero [8].

O pó metálico utilizado é alimentado por um cilindro e distribuído pela mesa por um raspador, após isto o laser ilumina a secção que vai ser sinterizada dando forma à peça metálica.

A qualidade e precisão superficial dos protótipos vai depender do tamanho do grão, ou seja, quanto menor for este vai fina irá ser a camada produzida, reduzindo desta forma o efeito de escada.

A fim de melhorar a resistência à compressão e ou o seu acabamento, as peças metálicas obtidas podem ainda ser infiltradas com resinas [8].

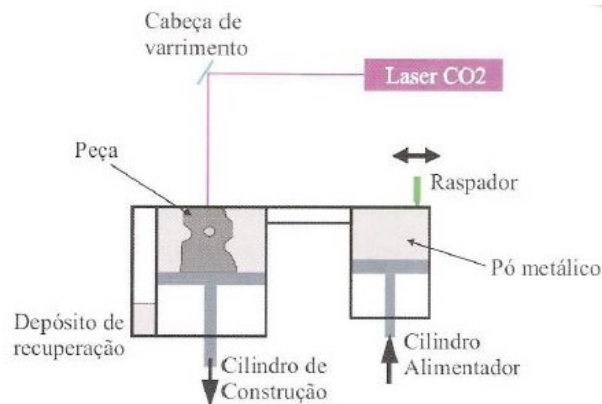


Figura 2.8: Esquemática do processo de Sinterização Direta de Metais por Laser [8].

A Figura 2.8 demonstra um esquema de como se dá o processo de Sinterização Direta de Metais por laser.



# Capítulo 3

## Impressão 3D

Neste capítulo é apresentada uma pequena descrição acerca da impressão 3D e o seu modo de funcionamento desde a criação do protótipo até ao modelo final. É também apresentada uma descrição acerca de alguns dos materiais mais utilizados e disponíveis para este tipo de tecnologia bem como os efeitos globais provocados pela sua utilização no fabrico de objetos. São descritas de forma sucinta os tipos impressoras utilizadas para as simulações, feitas posteriormente bem como alguns dos seus aspetos mais relevantes.

### 3.1 Introdução

A tecnologia de impressão 3D surgiu nos anos 1980 como um processo de prototipagem rápida [4]. Este processo, como o nome indica, consiste na criação rápida de um protótipo físico do produto final, a partir de um modelo digital, através de um processo aditivo. A impressão permite acelerar os processos de desenvolvimento de novos produtos, reduzindo os custos associados a erros de conceção e investimentos em moldes [3].

Esta técnica de impressão é considerada distinta de outras formas tradicionais de criação de objetos, como por exemplo a usinagem, pois diferem no método utilizado para a construção do objeto. Enquanto que a impressão 3D adiciona o material, o método da usinagem remove o material de modo a criar o objeto [10].

A impressão 3D começa com a criação de um modelo digital. A criação deste modelo utilizando um *software* designado ou um scanner permite a criação de um arquivo 3D, que

contém informações relevantes sobre o objeto, tais como as suas dimensões. Este arquivo é conhecido geralmente por STL, uma abreviatura da palavra Estereolitografia. O arquivo é lido pelo *software* que controla a impressora, dividindo o modelo 3D em camadas finas e horizontais, gerando de seguida um arquivo de comandos do tipo *G-Code* (Código G). Este *software* interno envia as instruções para a impressora, a qual imediatamente começa a criar o objeto desejado da base até o topo [10].

O código G, do Inglês *G-Code* é uma série de códigos utilizados pelo *software* da impressora para fazer a elaboração da peça. Este tipo de código contém informações importantes acerca de funções preparatórias, temperaturas, deslocamentos nos eixos, velocidades de avanço ou rotação/corte, e outras definições das ferramentas ou funções auxiliares necessárias para a sua execução. Na Figura 3.1 é possível visualizar as letras que são utilizadas para definir as funções que são possíveis utilizar para gerar um Código G [11].

Dados possíveis num bloco	
- Funções preparatórias	⇒ G
- Deslocamentos/Eixos	⇒ X, Y, Z, U, V, W, I, J, K, A, B, C
- Velocidade de avanço	⇒ F
- Velocidade de rotação/corte	⇒ S
- Definição da ferramenta	⇒ D, H, T
- Definição dos ciclos fixos/subprogramas	⇒ P, Q, R, L
- Funções auxiliares	⇒ M
- Caracter "fim de bloco"	⇒ ; ou LF

Figura 3.1: Formato dos dados possíveis a utilizar na criação do Código G (Adaptado de [11])

A linguagem da programação é composta por um conjunto de códigos formados por letras e algarismos, existindo no entanto alguns comandos já pré-definidos que correspondem a certas funções no código que não podem ser alteradas, como é exemplo o comando G00, que corresponde ao posicionamento em rápido da posição atual da ferramenta para a definida ou o M02 que corresponde ao fim do programa [11].

A Figura 3.2 apresenta um exemplo de um programa escrito em Código G.

```

%
: 23
N 10 S1800
N 20 G90 G17
N 30 G00 Z 10.
N 40 X -9. Y-15.
N 50 G91
N 60 G01 Z-15. F600 M03
N 70 X 9. Y 15.
N 80 X 30.
N 90 X 60. Y 10.
N 100 Y 30.
N 110 G02 X-30. Y 30. I 0. J 30.
N 120 G01 X-35.
N 130 G03 X-25. Y-25. I 0. J-25.
N 140 G01 Y-45.
N 150 X -9. Y-15.
N 160 G00 Z 15. M05
N 170 G90 M30
%
```

Figura 3.2: Exemplo de um programa escrito em Código G (Adaptado de [11])

A funcionalidade de uma impressora 3D é complexa, visto existirem diversas tecnologias dedicadas à impressão 3D atualmente no mercado. Entretanto, apesar das diferenças, todas essas tecnologias funcionam de acordo com o mesmo princípio, a criação de objetos camada por camada, utilizando o material fornecido, e de acordo com as instruções fornecidas pelo *software* que controla a impressora. A principal característica diferenciadora destas tecnologias está na forma como o material é disposto em camadas, com a existência de três classificações principais de impressoras 3D [12].

A primeira classificação de impressoras consiste nas impressoras mais utilizadas a nível pessoal, que utilizam no cabeçote de impressão um material de depósito derretido ou em estado semi-líquido, da qual é um exemplo a impressora mencionada na Figura 3.3. A segunda e terceira classificação de impressoras são as utilizadas a nível industrial, só que umas criam objetos utilizando fotopolímeros originalmente em estado líquido, que vão solidificando quando expostos a luz ou raios laser, e as restantes moldam materiais em pó, através da utilização de um adesivo líquido ou por exposição aos raios laser respetivamente. As impressoras pertencentes a esta última classificação oferecem uma série de vantagens,

incluindo a capacidade de utilização de uma ampla variedade de materiais na criação de objetos, tais como nylon, cerâmica, cera, bronze, aço inoxidável e titânio.



Figura 3.3: Impressora Modelo *Replicator Makerbot* que utiliza um material semi-líquido no cabeçote (Adaptado de [13])

Uma vez concluído o processo de impressão, os objetos que foram produzidos podem conter pequenas manchas ou riscos. Para objetos de cerâmica produzidos através deste processo, é possível eliminar essas manchas com verniz. Se os objetos forem feitos de resina, plástico ou metal, o acabamento final pode ser feito através de pintura ou polimento.

## 3.2 Tipos de Impressoras Utilizadas

A impressão 3D está atualmente a ganhar maior relevância e destaque na sociedade tanto a nível industrial como doméstico. Dependendo do objeto que se pretende criar, o utilizador deverá ter em conta qual a impressora que possui mais benefícios, tanto em termos monetários, velocidade, precisão e acabamento com que vai ficar o objeto final. A título de exemplo, são descritas de seguida três impressoras com modos de funcionamento diferentes mas que igualmente proporcionam uma experiência de utilização ótima.

### 3.2.1 Ultimaker 3D

A Ultimaker 3 proporciona uma experiência de impressão 3D altamente fiável [14]. Esta impressora apresenta um sistema de extrusão dupla que permite combinar materiais de construção com suporte solúvel em água para obter peças mecânicas complexas e com superfícies complexas, ou então para imprimir com duas cores. Possui também um sistema de elevação automático dos bicos, permitindo desta forma um acabamento suave e profissional dando liberdade total de design [15].

Outra das suas características é um sistema de nivelamento automático da mesa de impressão. Antes de cada impressão, o sensor que se encontra na cabeça de impressão examina a placa de arrefecimento removível em vários pontos, a fim de encontrar variações microscópicas na sua topologia. Caso existam algumas variações o ângulo de inclinação é compensado pelo ajuste de altura no eixo  $ZZ$  durante as primeiras camadas de impressão, resultando em um nivelamento mais preciso e em uma melhoria da aderência a mesa de construção [14].

A Ultimaker é equipada com o reconhecimento de rolo NFC e núcleos de impressão *hot-swap*, que facilitam a impressão 3D de geometrias complexas com alta disponibilidade e repetibilidade. Mudanças mais rápidas no núcleo da impressão significam maior tempo de atividade e uma troca de material mais fácil, a Ultimaker 3 vem com dois núcleos de impressão AA de 0,4 mm para materiais de construção, e um núcleo de impressão BB de 0,4 mm para PVA solúvel em água [14]. Estes são automaticamente reconhecidos pela impressora e apresentam luzes LED para alertar claramente se é necessária alguma interação. Existem também outros núcleos de impressão AA, o núcleo de 0,25 mm para impressões detalhadas e o de 0,8 mm para impressões mais rápidas [14].

As suas características mais gerais é o seu volume de construção com extrusão dupla, uma resolução de camada que varia de até 20 microns, uma temperatura do bico de até 280° C e um sistema de filamento aberto que permite imprimir com qualquer material de 2,85 mm de espessura [15].



Figura 3.4: Impressora Ultimaker 3D [14].

### 3.2.2 Big Builder Dual

A impressora *Big Builder Dual* 3D, é uma impressora 3D fabricada na Holanda, pela empresa *Builder* [16]. Esta permite aos utilizadores imprimir objetos em duas cores e em dois materiais, tornando possível desta forma entregar objetos com suporte solucionável. Uma característica muito importante é o facto de ter um enorme volume de construção, com uma capacidade muito elevada em relação ao eixo  $ZZ$ , no entanto, a capacidade de imprimir com os diferentes materiais permanece opcional [16].

Esta impressora 3D usa a tecnologia FDM (Modelação por Extrusão de Plástico) e consequentemente os materiais disponíveis para utilizar são o PLA, PVA e ABS (opcional). Foi também projetada para ser de fácil utilização, não necessitando que se efetue

nenhuma calibração. As suas características mais gerais são a elevada velocidade de impressão sem necessitar de alternar entre os bicos, a sua capacidade de misturar cores, ser energeticamente suficiente e produzir camadas com uma espessura que varia de 0,05 a 0,35 mm [16].



Figura 3.5: Impressora Big Builder Dual 3D [16].

### 3.2.3 Fusion3 F400-S

A impressora *Fusion3* modelo F400-S é uma impressora projetada e comercializada pela empresa *Fusion3* situada na Carolina do Norte [17], que projetou este modelo para ser fácil de utilizar e para necessitar do menor trabalho manual possível. Esta possui um sistema de nivelamento de mesa automático graças aos sensores de infravermelhos que medem a altura e ajustam o eixo  $ZZ$  em tempo real. Esta impressora dispõe também de uma utilidade muito vantajosa, visto ser possível trabalhar com ela remotamente, como por exemplo monitorizar o progresso da impressão, fazer upload de arquivos e até mesmo parar a impressão.

A F400-S imprime qualquer filamento que tenha um ponto de fusão abaixo dos 300° C, significando isso que pode imprimir PLA, ABS, PET, PC (Policarbonato), Nylon, TPU (flexível), Poliéster, PMMA (Acrílico) e PVA [17]. O bocal desta é feito de aço endurecido de alta resistência, logo pode também lidar com filamentos abrasivos tais como metal, cerâmica e fibra de carbono.

Uma característica muito importante é o facto de utilizar o *software Simplify3D*, que possui um dos melhores fatiadores o que permite a capacidade de criar suportes construídos com elevada precisão e permitir a sua visualização de modo a garantir que estes estejam na posição ideal [17].

As suas características mais gerais são o facto de ter um grande suporte de filamento que pode acomodar bobines de até 4 kg de tamanho, uma excelente qualidade de impressão mesmo para elevadas velocidades de impressão, a resolução no eixo  $XX$  e  $YY$  é de 21 microns, e a do  $ZZ$  de 50 a 300 microns e possui também uma altura mínima da camada de 0,02 mm.



Figura 3.6: Impressora Fusion3 Modelo F400-S [18].

### 3.3 Materiais Utilizados na Impressão 3D

Os materiais disponíveis para a impressão 3D já mudaram muito desde os primeiros dias desta tecnologia. Existe agora uma grande variedade de diferentes tipos de materiais, que são fornecidos em diferentes estados, tais como pó, filamentos, pellets, grânulos, resina entre outros [19].

Materiais mais específicos são agora desenvolvidos para sectores mais específicos como por exemplo para o sector odontológico, visto este necessitar de utilizar materiais cujas propriedades se adequem mais precisamente à sua aplicação.

#### 3.3.1 Plástico

O nylon, ou poliamida, é um material plástico resistente, flexível e com elevada durabilidade que se mostrou confiável para impressão 3D [19]. É naturalmente de cor branca, mas pode ser colorido tanto em pré como pós impressão. Este material também pode ser combinado (em formato de pó) com alumínio em pó para produzir outro material comum na impressão 3D usado na sinterização - Alumide [20].



Figura 3.7: Formas de objetos criadas a partir do filamento de Nylon-CF15 [20].

O ABS é outro material plástico bastante comum usado para impressão 3D, e é amplamente utilizado nas impressoras FDM 3D, com entrada de material sob a forma de

filamento. Trata-se de um plástico particularmente resistente e disponível numa enorme variedade de cores. O ABS é um material bastante popular visto poder ser comprado em forma de filamento a partir de uma série de fontes não-proprietárias. Este tipo de material é usado em alguns objetos do quotidiano, como a maioria das caixas de plástico, brinquedos e estruturas exteriores de muitos dispositivos eletrónicos [20].

O ABS pode ser dividido ainda em duas categorias diferentes, ABS *Smartfil* e ABS *Premium* [20]. O ABS *Smartfil* é um plástico cujas principais características são a tenacidade, dureza, rigidez (resistência mecânica), com resistência química à abrasão. Além disso este tipo de ABS é aditivado para reduzir o efeito de *warping* (deformação) e de *cracking* (rachadura). O primeiro efeito aparece devido à contração do plástico ao arrefecer afetando a que a primeira camada da peça se desloque da mesa, e o segundo similar ao primeiro afeta as camadas intermédias provocando laminações na peça. A sua temperatura ótima de extrusão está em torno dos 240° C [20].

O ABS *Premium* é fabricado mediante um estrito controlo ao longo de todo o processo de fabrico. Este filamento garante uma alta precisão de dimensões, uma excelente circularidade e não tem nenhum tipo de impurezas que possam contribuir para uma má viscosidade do filamento. Tem uma temperatura ótima de extrusão em torno dos 230° C e é um material que pode ser lixado, furando, pintado e colado com extrema facilidade [20].

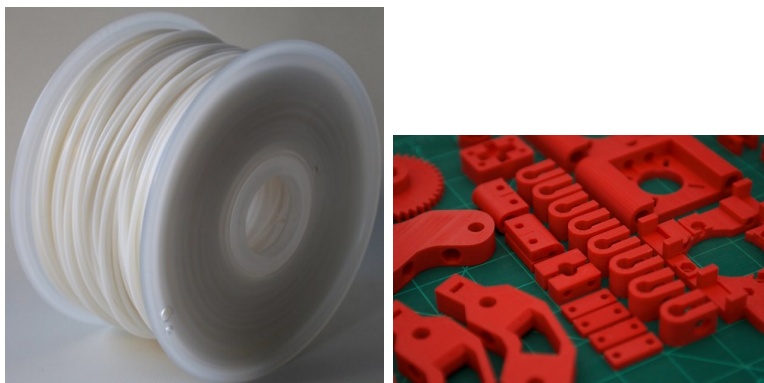


Figura 3.8: Bobine com filamento de ABS de cor branca e espessura de 3 mm à esquerda e exemplos de peças impressas em ABS à direita [20].

Outro material comumente utilizado é o PLA (Poliácido Láctico), isto por se tratar de um material plástico biodegradável que se obtém a partir de recursos naturais, em concreto a partir do amido extraído do milho, da beterraba e do trigo. Foi o primeiro material a utilizar-se em impressão 3D a nível doméstico porque não emite nenhum cheiro nem gás nocivo, o que lhe deu uma grande importância na indústria da impressão 3D. Este pode ser utilizado em formato de resina para processos DLP/SL, bem como em forma de filamento para o processo FDM. É um material oferecido em uma grande variedade de cores, incluindo transparente, que provou ser uma opção útil para algumas aplicações de impressão 3D [20].



Figura 3.9: Modelo impresso em PLA de cor azul [12].

O PLA pode ser dividido ainda em duas categorias diferentes, PLA *Smartfil* e PLA *Premium* [20]. O filamento PLA *Smartfil* é o material mais fácil de imprimir nas impressoras 3D de Tecnologia FDM/FFF. Com este filamento obtém-se objetos mais brilhantes e suaves que usando o filamento ABS e ao mesmo tempo os objetos vão ser mais rígidos e resistentes. Este tipo de filamento está fabricado com PLA de elevada qualidade, sem material reciclado e completamente estabilizado com uma variabilidade em diâmetro de 0,03 mm que não produz *warping* e com o qual se consegue uma excelente resolução na impressão. Pode-se também imprimir a uma maior velocidade de impressão que com outros filamentos de PLA básicos obtendo um melhor acabado superficial. A temperatura de extrusão para imprimir com este plástico PLA *Smartfil* tem que estar entre 200° e 220°

C. Não se pode perfurar, pintar ou lixar como o ABS, mas é um plástico mais estável e mais fácil de imprimir que este [20].

O filamento PLA *Premium* Preto (1,75mm ou 2,85m) é um filamento de muito alta qualidade fabricado na Europa para impressão 3D. Este filamento PLA trata-se de um filamento *Premium* devido aos altos standards de qualidade nos que é fabricado. É fabricado pela empresa europeia *Fillamentum*, que destaca pela grande experiência no setor da extrusão de plásticos para indústria automotriz, química e destaca-se pela forte aposta em a investigação e desenvolvimento de novos produtos, sendo este o caso dos filamentos para impressão 3D *Premium Fillamentum* [20]. Ao estabelecer uns altos standards de qualidade garante-se que em momento algum existirão variações de cor pelo que nunca se terá problemas de qualidade nas peças impressas em séries longas ou numa impressora doméstica. O filamento PLA trata-se polímero estável, permanente e inodoro.



Figura 3.10: Modelo de PLA Extrafill Orange à esquerda e bobine de PLA *Premium* à direita [12].

Outro material plástico que pode ser utilizado na impressão 3D é o Polipropileno. O Polipropileno (PP) é um termoplástico obtido pela polimerização do propileno, sendo este um material muito versátil, semitransparente, reciclável e com boas propriedades organolépticas [20]. Os filamentos comuns de PP apresentam um elevado efeito de *warping* que o transformam em um plástico praticamente impossível de imprimir em uma impressora 3D. Devido a esta problemática a empresa espanhola *Smart Materials 3D* tem estado a desenvolver o novo filamento de Polipropileno Natural *Smartfil* que é um filamento de PP

especialmente aditivado com fim de melhorar a sua aderência à superfície de impressão e assim reduzir o efeito *warping*. As peças impressas com o filamento de Polipropileno Natural PP *Smartfil* oferecem flexibilidade, uma distinta resistência mecânica e química, bem como uma excelente resistência à flexão que o fazem ser ideal para enorme porção de aplicações industriais [20]. Por outro lado, as peças realizadas com o filamento de Polipropileno destacam-se pela sua resistência à abrasão e pela capacidade de absorver choques (resistência ao impacto), pela resistência à fadiga e além disso conta com alguma rigidez e flexibilidade [20].



Figura 3.11: Modelo de um jato impresso em Polipropileno à esquerda e bobine de filamento de Polipropileno à direita [12].

### 3.3.2 Metais

Um número crescente de metais e compósitos metálicos têm vindo a ser utilizados na impressão 3D a uma escala industrial. Alguns dos metais mais comuns a ser usados são os derivados de alumínio e cobalto [19].

O alumínio, e em particular a sua liga AlSi10Mg (uma liga de fluxo típico), é usado em objetos geometricamente complexos, com linhas finas. É bastante durável, muitíssimo resistente e possui propriedades adequadas que fazem dele uma escolha popular no fabrico de objetos sujeitos a elevadas pressões, já as ligas de cobalto-cromo são amplamente usadas na indústria médica, para a criação de próteses e coroas odontológicas, por causa da sua

precisão e aparência requintada. As ligas de cobalto-cromo também são resistentes ao calor e ao desgaste, o que as torna ideais para uso em projetos de engenharias que são submetidos a elevadas temperaturas e no fabrico de turbinas [12].

Outro metal muito utilizado é o aço inoxidável visto possuir propriedades mecânicas adequadas e também é resistente à corrosão. Este é usado principalmente na indústria aeroespacial para prototipagem rápida de objetos de metal de alta resistência [12].

Nos últimos anos têm sido adicionados outros materiais metálicos preciosos, tais como o ouro e a prata. A impressão em 3D de metais preciosos não envolve a impressão direta destes materiais utilizando uma impressora 3D. Esta é concretizada utilizando um molde de resina, criado pelo processo de impressão em 3D, que é então posteriormente preenchido com o metal precioso. Em seguida, o objeto é concluído manualmente e polido. A prática de criar objetos usando este método é difundida nas indústrias de jóias e artigos de luxo [12].

O titânio e as suas ligas são um material de impressão em 3D que é altamente resistente, leve e também resistente à corrosão. Como se trata de um material biocompatível este metal é usado principalmente no campo da medicina em implantes, pode ser utilizado também nas indústrias aeroespacial, automobilística e química, assim como em indústrias pesadas e em aplicações de engenharia de alto desempenho [12].



Figura 3.12: Modelo de anéis fabricados a partir da impressão 3D [21].

Na Figura 3.12 é possível visualizar à direita os modelos de anéis fabricados em resina a partir da impressão 3D e à esquerda a sua forma final após o acabamento.

### 3.3.3 Cerâmicas

As cerâmicas são um grupo relativamente novo de materiais que podem ser utilizados na impressão 3D já com vários níveis de sucesso. O processo de impressão 3D em cerâmica geralmente envolve duas fases. Na primeira fase é realizada a impressão do objeto através do método de sinterização a laser (SLS) e utilizando o material em forma de pó (pó de cerâmica é geralmente utilizado), já na segunda fase dá-se o envernizamento do objeto impresso anteriormente utilizando cerâmica a temperaturas superiores a 1000° Celsius [12].

Alguns exemplos de materiais criados a partir da impressão 3D em cerâmica podem ser louças, pratos entre outros. É de notar também que estes objetos são à prova de água e resistentes a elevadas temperaturas [12].



Figura 3.13: Modelo de um indivíduo impresso em cerâmica [12].

### 3.3.4 Madeira

A impressão 3D em madeira é um procedimento relativamente recente. Estas impressoras são destinadas para uso geral, e tem como base de uso a tecnologia FDM, com a utilização de filamentos feitos a partir de uma combinação de partículas e polímeros de madeira. Os objetos produzidos por estes dispositivos possuem muitas vantagens. A vantagem principal de impressão 3D em madeira reside no produto acabado, já que objetos produzidos por este sistema possuem texturas e cores impressionantes [12].

## 3.4 Softwares Utilizados

A fim de realizar a impressão de objetos, e qualquer que seja a impressora escolhida, esta deve estar interligada a um *software* que lhe permita realizar as modificações necessárias a fim de obter como produto final um protótipo funcional.

### 3.4.1 Repetier Host

O *software Repetier Host* é um *software* desenvolvido por Roland Littwin, chefe da área de desenvolvimento de *software* na empresa Alemã *Hot-World GmbH & Co. KG* [22].

Trata-se de um *software* muito completo pois dispõe de uma enorme variedade de opções que visam a melhorar a performance de impressão. É equipado com mais do que uma cabeça extrusora, permitindo desta forma a impressão com dois materiais diferentes, podendo eventualmente um deles funcionar como material de suporte ou então materiais com cores diferentes [22].

Este *software* apresenta uma janela de trabalho bastante simples, como é visível na Figura 3.14 sendo possível alterar nesta janela opções como a altura das camadas, a densidade de preenchimento dos objetos, a necessidade ou não de utilizar suporte para a construção dos modelos e permite ainda alterar a velocidade de impressão, tanto a velocidade do perímetro exterior como do enchimento, podendo tudo isto ser verificado na Figura 3.15 [22].

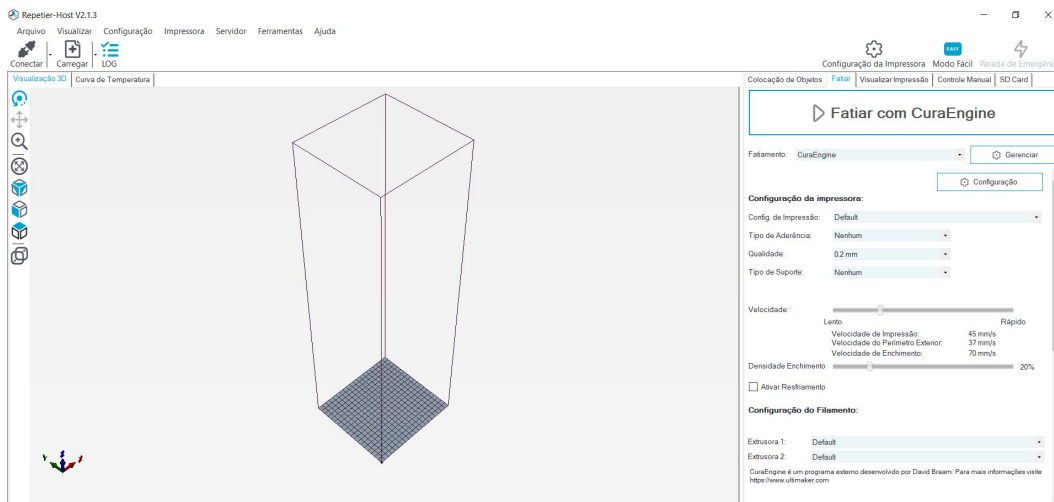


Figura 3.14: Ambiente de trabalho do *software Repetier Host* na versão 2.1.3

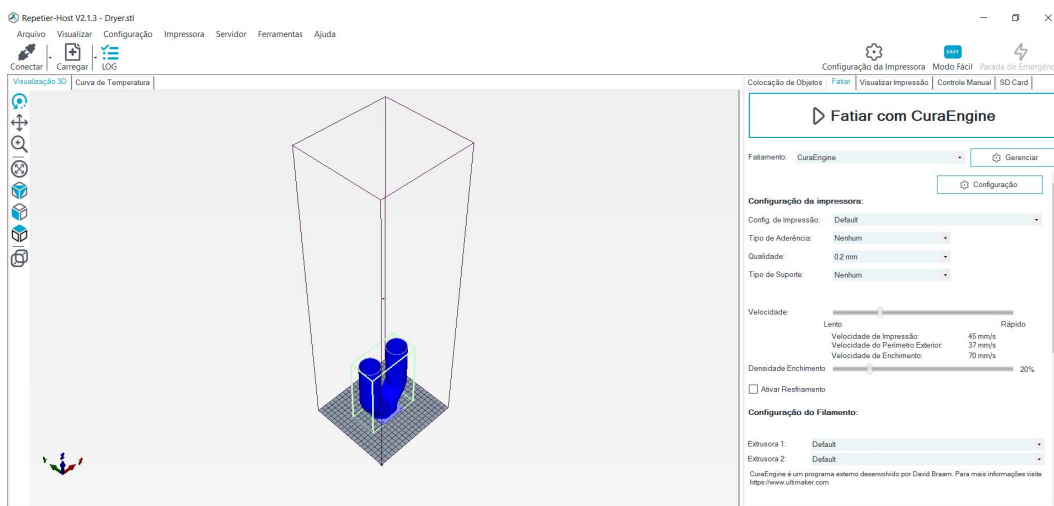


Figura 3.15: Janela para alteração de opções no ambiente de trabalho do *software Repetier Host* na versão 2.1.3

Alterar opções como a altura da camada refere-se à espessura na qual cada camada horizontal é fatiada, geralmente uma fração de milímetro. Uma altura de camada mais espessa produzirá impressões mais rápidas, mas com resolução reduzida, enquanto que uma altura de camada mais fina produzirá uma resolução mais alta, mas afetará a duração da impressão, podendo esta variar de minutos até horas [15].

A densidade do preenchimento imprimirá estruturas internas dentro da peça para lhe

dar resistência adicional, e também poderá atuar como suporte para peças com superfícies planas. Uma percentagem de zero de preenchimento imprimirá um modelo completamente oco, que imprimirá mais rápido que um modelo sólido, mas terá resistência reduzida e resistência ao impacto, enquanto que uma percentagem de cem de preenchimento imprimirá um modelo completamente sólido, com maior robustez e resistência, mas levará mais tempo para ser impresso [15].

Ainda que o calor da placa de construção aquecida contribuir para uma boa aderência do material à placa, em alguns casos será necessário um adesivo para permitir uma melhor aderência da primeira camada e assim evitar deformações [15].

As alterações que podem ser realizadas nos objetos incluem também a orientação dos mesmos, podendo variar os valores em qualquer um dos eixos no valor desejado [22].

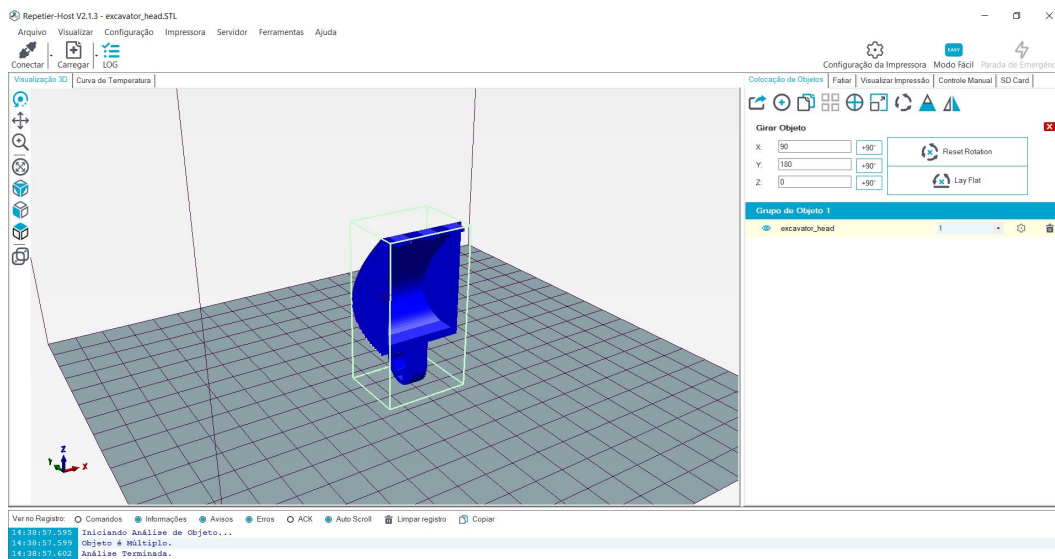


Figura 3.16: Opção girar objeto no *software Repetier Host* na versão 2.1.3

A orientação da peça na placa de construção, vai influenciar a forma como partes do modelo se vão projetar, podendo reduzir a necessidade de material de suporte, também pode influenciar amplamente as propriedades da parte final, bem como a duração da impressão. A título de exemplo a Figura 3.16 mostra uma figura onde foi alterada a sua orientação. É possível também mover os objetos nos três eixos, colocando estes no lugar

mais conveniente para a impressão. Incluiu também funções como duplicar, espelhar e organizar automaticamente várias peças na placa de impressão para uma eficiente impressão em lote [15].

Mais informações acerca deste *software* podem ser consultadas através do *site online* da empresa *Repetier Host* [22].

### 3.4.2 *Cura*

O *software* Cura foi desenvolvido pela Ultimaker, sendo este o *software* mais utilizados pelos utilizadores de impressoras 3D [15].

Trata-se de um *software* que permite a impressão de dois materiais simultaneamente, podendo um deles ser utilizado como suporte ou então imprimir em cores diferentes. Outra característica deste *software* é a permissão de impressão de extrusão simples [14].

Durante a preparação do modelo, deve-se certificar sempre de que a configuração do material e do núcleo de impressão corresponde à configuração que está na impressora. No caso de utilizar a rede, o *Cura* pode transferir automaticamente a configuração da impressora diretamente para o próprio *software* [15].

O Cura apresenta uma janela de trabalho relativamente fácil de utilizar, onde é possível alterar várias opções tais como a altura das camadas, a densidade de preenchimento dos objetos, a necessidade ou não de utilizar suporte para a construção dos modelos e permite ainda alterar a velocidade de impressão. Este *software* é ainda composto também por uma opção denominada modo fácil, onde neste estão disponíveis somente algumas opções para manipular o objeto. Na Figura 3.17 é possível visualizar essa janela bem como as principais opções desta [15].

Uma das alterações que podem ser realizadas nos objetos é a orientação dos mesmos na placa, podendo variar os valores em qualquer um dos eixos no valor desejado, apesar de não ser possível alterar os valores às casas decimais. Na Figura 3.18 encontra-se um objeto ao qual foi alterada a sua orientação original, tendo sido esta modificada no eixo  $x$  (eixo a cor vermelha) e no eixo do  $y$  (eixo a cor verde) [15].

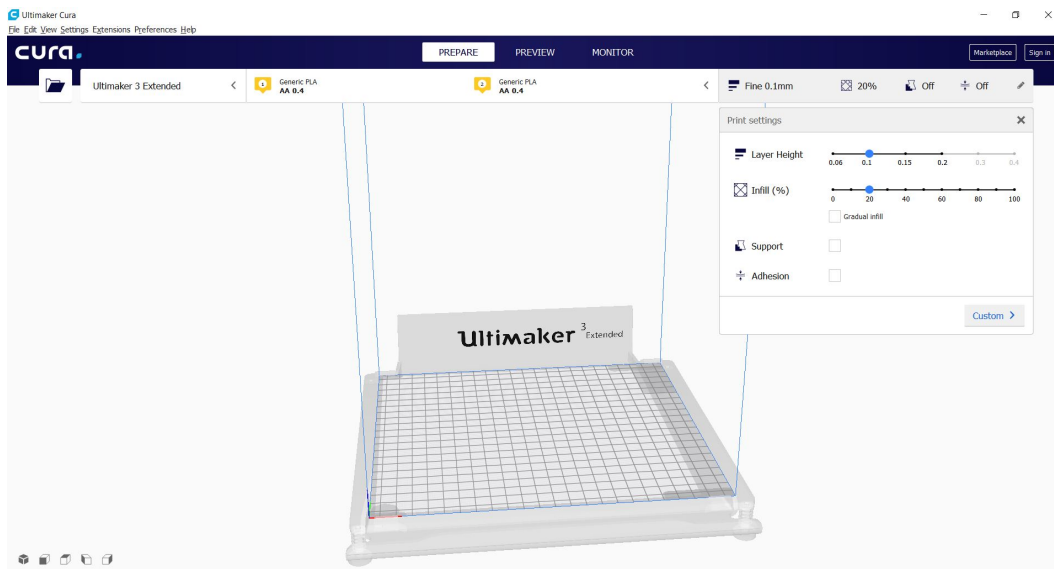


Figura 3.17: Janela de trabalho do *software Cura* na versão 4.0.0

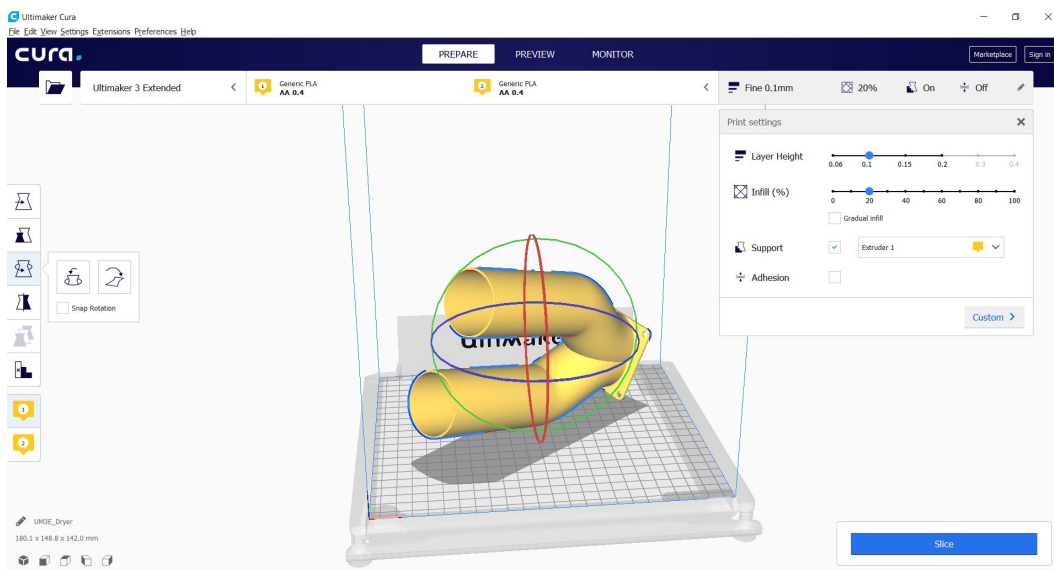


Figura 3.18: Janela de trabalho do *software Cura* na versão 4.0.0

O funcionamento base deste *software* é de forma geral muito parecido ao referenciado anteriormente, o *Repetier Host*, existindo em ambos as mesmas opções de manusear os objetos.

### 3.4.3 *Simplify 3D*

O *software Simplify 3D* utiliza um sistema de perfis e processos que permitem fazer configurações específicas para diferentes impressoras, filamentos e até mesmo modelos armazenando-os de forma rápida e fácil para uso posterior. Esses perfis também podem ser exportados e importados de outras pessoas, permitindo que toda a comunidade compartilhe práticas recomendadas entre si de uma maneira que não é possível com outros *softwares* [23].

Os processos utilizados pelo *Simplify 3D* são bastante úteis para imprimir modelos complexos, visto ser possível ajustar configurações tais como a temperatura de impressão, a percentagem de preenchimento dos objetos e a altura da camada de modo a maximizar a qualidade de impressão e reduzir o tempo de impressão. Este *software* permite também alterar ainda opções como a orientação dos objetos e o uso ou não de material de suporte para realizar a impressão, como o que pode ser visto na Figura 3.19 [23].

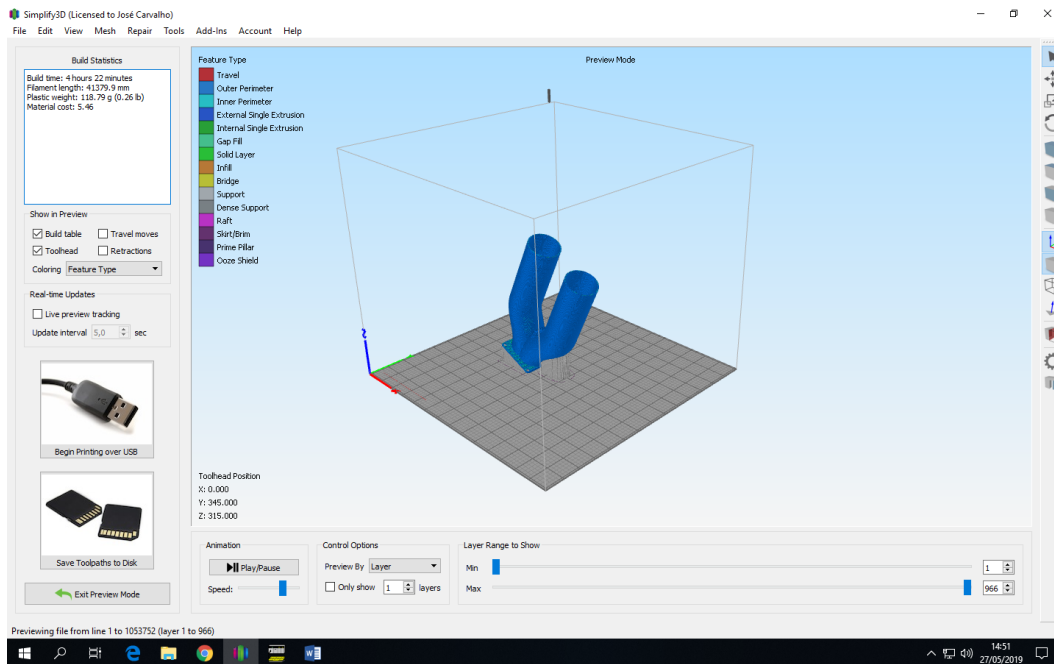


Figura 3.19: Objeto para impressão no *Simplify 3D* com uma orientação diferente da original e com material de suporte adicionado

O *Simplify 3D* cria automaticamente estruturas de suporte para o modelo, tornando

ainda possível adicionar objetos de suporte adicionais ou remover os existentes. Em impressoras de extrusão dupla, é ainda possível a impressão de estruturas de suporte num material diferente, como por exemplo um filamento dissolúvel para facilitar a remoção do suporte [24].

A figura 3.20 representa um objeto denominado *Dryer*, que vai ser utilizado posteriormente como objeto de simulações. Neste objeto foi alterada a sua orientação de modo a ficar a pretendida pelo usuário, tendo sido também alterada a opção da utilização de material de suporte para a construção. Outras opções também poderiam ter sido modificadas tal como a cor e a espessura [24].

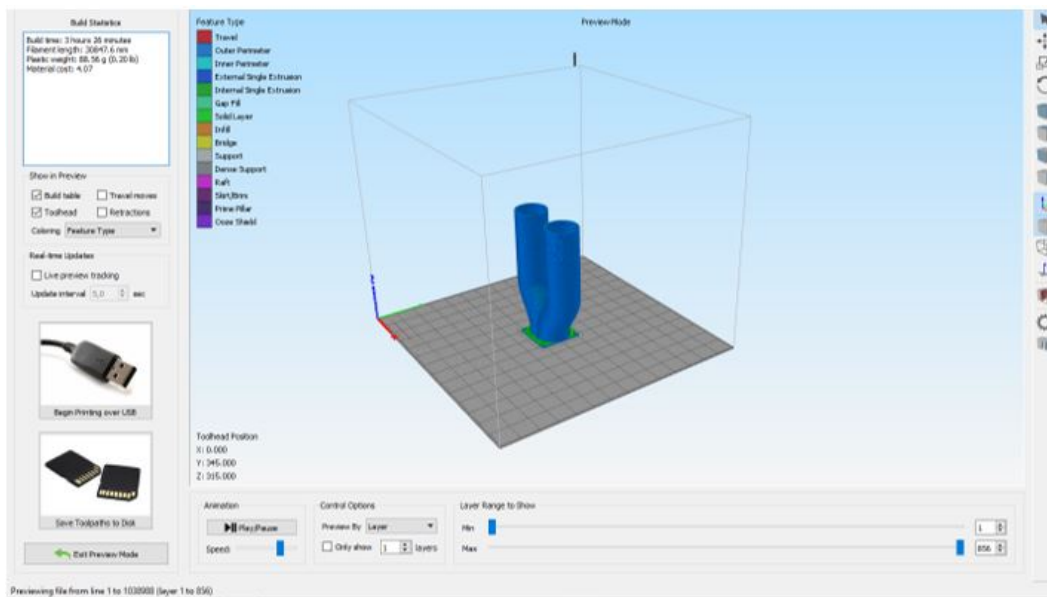


Figura 3.20: Objeto para impressão no *Simplify 3D*

Após uma análise aos *softwares* descritos ao longo desta secção pode-se verificar que todos os *softwares* fornecem as mesmas ferramentas necessárias às alterações das peças a fim de obter objetos funcionais, contudo nenhum dos *softwares* indica qual a melhor orientação para efetuar a impressão, posicionando sempre os objetos no ângulo  $(0^\circ, 0^\circ)$ .

# Capítulo 4

## Peças em Estudo

Neste capítulo são apresentadas as peças que foram objeto das simulações bem como alguns exemplos funcionais de onde estas poderiam ser utilizadas.

### 4.1 *Dryer*

O primeiro objeto de estudo é o Dryer, objeto este que pode ser considerado com sendo um conector de tubo em forma de "y", bem como um modelo de uma ponteira de escape de saída dupla ou então como sendo um mecanismo utilizado em equipamentos de anestesia ou ventilação mecânica.

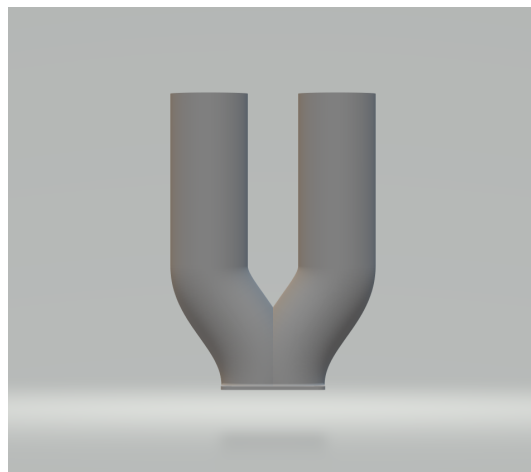


Figura 4.1: Objeto de estudo Dryer

Considerando este modelo como um conector de tubo, a primeira associação que lhe é feita é como sendo um distribuidor na canalização para a água, ou então uma união para tubos. Estes são encontrados nas habitações ou em qualquer lugar onde se faça existir uma distribuição de tubagem.

No entanto este objeto funcionalmente pode ter outros usos, podendo ser uma ponteira de escape de saída dupla. Este tipo de ponteira tem apenas utilização num automóvel a nível estético, não interferindo com o rendimento deste.



Figura 4.2: Ponteira cromada desportiva de saída dupla [25].

A nível de utilização hospitalar, este tipo de mecanismo é utilizado em equipamentos de anestesia ou ventilação mecânica. Estes conectores auxiliam na distribuição dos gases medicinais aquando de um paciente ser submetido a um tratamento em que lhe é prescrito algum tipo de gás qualquer, e o uso destes conectores facilita pois apresentam formatos que permitem a mudança de direção dos gases [26].



Figura 4.3: Conector em forma de "y" para uso hospitalar [26].

## 4.2 *Fin*

Como segundo objeto de estudo foi utilizado a peça *Fin* ou barbatana como o visualizado na Figura 4.4. Este objeto remonta a uma barbatana de tubarão, sendo que a nível funcional pode ser encontrada inúmeras vezes e no dia a dia nos veículos, nomeadamente nos automóveis, como antena de rádio e GPS.

Estas antenas em forma de barbatana como pode ser visualizada na Figura 4.5 são uma substituição às antenas tradicionais de teto dos veículos. As antenas tradicionais chegavam a ter tamanhos muito avultados tornando-as desta forma inconvenientes porque eram de fácil remoção e, muitas vezes, o sinal que captam não era o suficiente para a sua necessária utilização. Este formato de antena é mais pequeno, é mais seguro, uma vez que não é de tão fácil remoção e tem também como finalidade a melhoria do sinal proveniente para o rádio ou GPS. A sua instalação não requer furos e é fácil de fazer. Um outro propósito destas antenas é a nível de decoração, sendo que em alguns modelos de veículos é a única ação que executa.

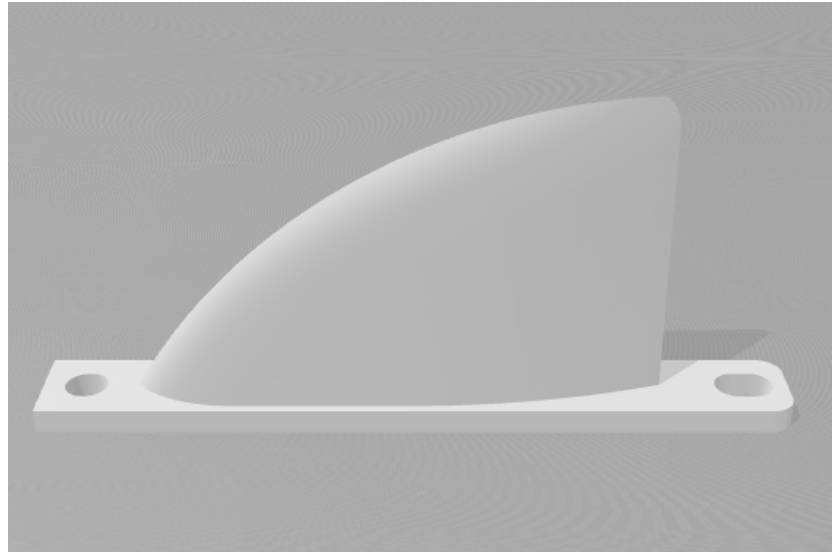


Figura 4.4: Objeto de estudo *Fin*



Figura 4.5: Antena de rádio e GPS em forma de barbatana encontrada em veículos [27].

### 4.3 Lego Curvo

Como terceiro objeto de estudo foi utilizado a forma de um lego curvo, podendo este objeto ter inúmeras utilizações nos dias de hoje.

Com base no formato deste objeto, e o facto de ele ser curvo numa das extremidades

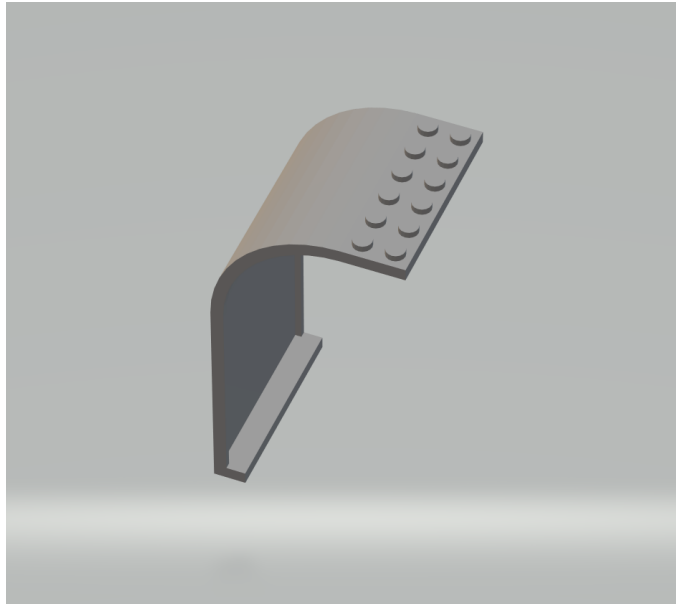


Figura 4.6: Objeto de estudo Lego Curvo

torna-o multiusos, visto este poder ser utilizado como sendo um suporte de porte pequeno para objetos de pequenas dimensões, tais como equipamentos eletrónicos, telemóveis entre outros. No entanto como o próprio nome indica este objeto pode ser considerado realmente como sendo um lego, objeto este utilizado na construção de objetos funcionais ou decorativos tanto por adultos como crianças em construção de lazer e entretenimento, como é apresentado na Figura 4.7

#### 4.4 *Excavator*

O quarto objeto de estudo é uma escavadora. Este objeto tem usos muito particulares nas máquinas onde pode ser encontrada.

O formato deste objeto é o de uma pá carregadora de uma retroescavadora encontrado na dianteira do veículo, mas devido aos seu tamanho reduzido é considerado mais facilmente como sendo uma mini pá carregadora de um *dumper* (tombador/basculador).

Em termos funcionais este objeto é muito utilizado na construção civil, tanto na área da construção rural como urbana na remoção de material para a abertura de valas, limpeza

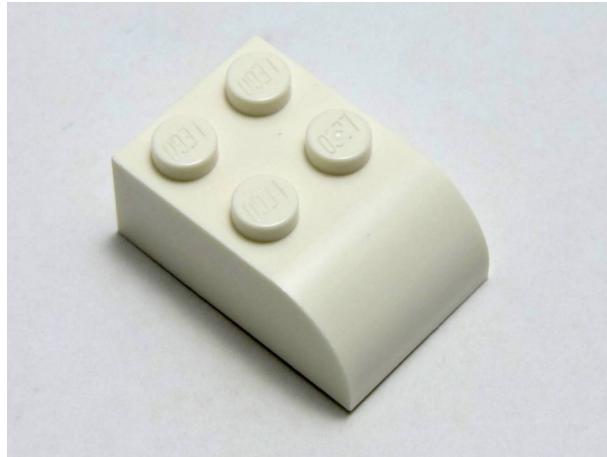


Figura 4.7: Objeto de estudo Lego Curvo em formato real [28].

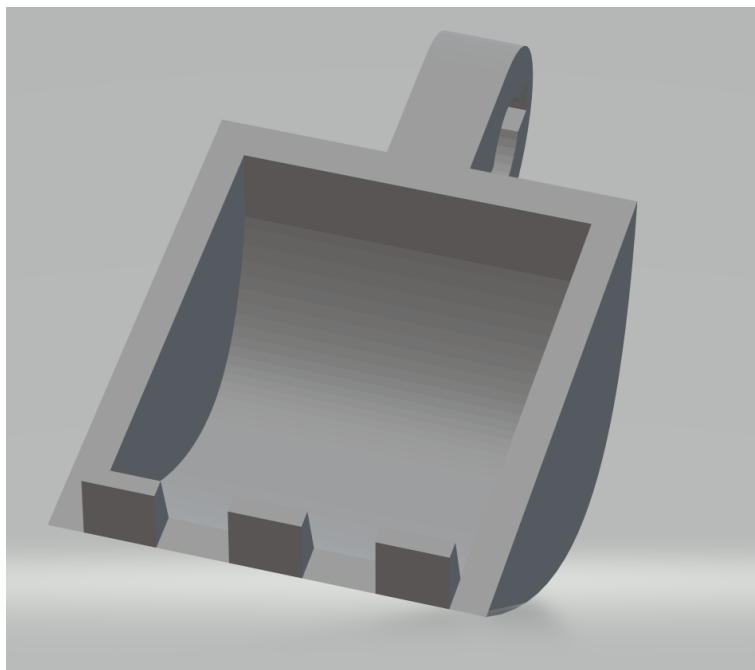


Figura 4.8: Objeto de estudo *Excavator*

urbana, carregamento de material entre outros. A pá é movimentada através de um sistema hidráulico, conforme os movimentos que o operador da máquina faz nas alavancas de controlo o óleo hidráulico vai movimentar os pistões dos cilindros e esses movimentos são transferidos para os braços onde se encontram as pás para realizar o trabalho [29].



Figura 4.9: Dumper com pá carregadora [30].

Na Figura 4.9 é possível visualizar uma pá escavadora em tamanho real na parte dianteira de um *dumper*.

## 4.5 *Keychain Case*

Como quinto objeto utilizado para se efetuar as simulações tem-se um *Keychain Case* conhecido como porta-chaves, como se pode verificar na Figura 4.10. Este objeto no dia a dia desempenha múltiplos papéis, pois não só se pode comportar como um porta-chaves normal mas como também um objeto de decoração.

O facto desta peça ser furada em ambas as extremidades e ser simétrica torna-a muito mais utilizável, visto também poder se tornar um suporte para um qualquer objeto. A partir do seu formato e com o auxílio de alguma maquinaria seria possível também transformar este porta-chaves num objeto totalmente diferente como por exemplo um escorrega, como o apresentado na Figura 4.11. Os escorregas apresentam linhas suaves de forma a dar segurança aos utilizadores mas também proporcionar diversão.

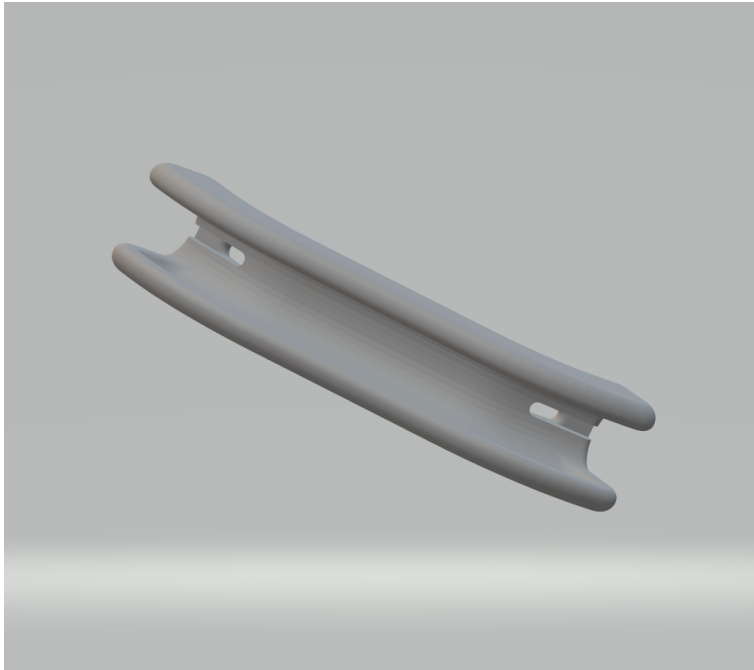


Figura 4.10: Objeto de estudo *Keychain Case*

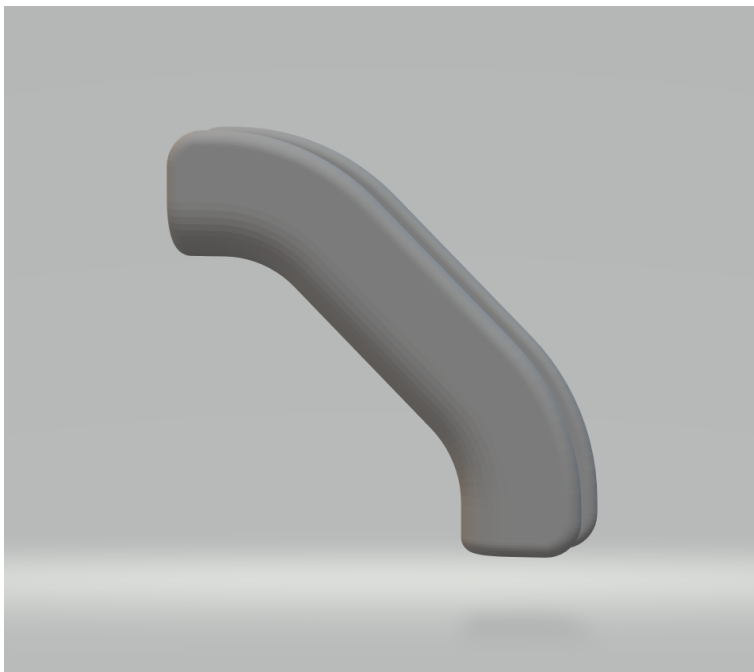


Figura 4.11: Objeto de estudo *Keychain Case* em outra forma de visualização

Para transformar o *Keychain Case* num escorrega, Figura 4.12 seria necessário prolongar a zona inferior de modo a tornar o ângulo de término menor. Um outro uso que seria possível dar, seria para fazer de suporte por exemplo numa cozinha para utensílios, ou até mesmo transformar num puxador de portas.



Figura 4.12: Escorrega com formato parecido ao *Keychain Case* [31].

## 4.6 *Rod*

Como sexto e último objeto utilizado para se efetuar as simulações utilizou-se uma *Rod* como a da Figura 4.13. Este objeto, no dia a dia pode ser utilizado em diversas situações, pois não só pode ser utilizado como a zona da pedaleira numa bicicleta, como também a composição de um equipamento de fazer exercício físico ou até mesmo se transformar num amolador de facas tradicional.

Este objeto para ser utilizado como qualquer um dos instrumentos atrás mencionados, necessitaria de maquinaria adicional de forma a transformá-lo no objeto final pretendido.

De forma a transformar a *Rod* na zona da pedaleira apenas seria necessário trabalhar a forma da roda e adicionar os pedais, enquanto que para transformar o objeto num

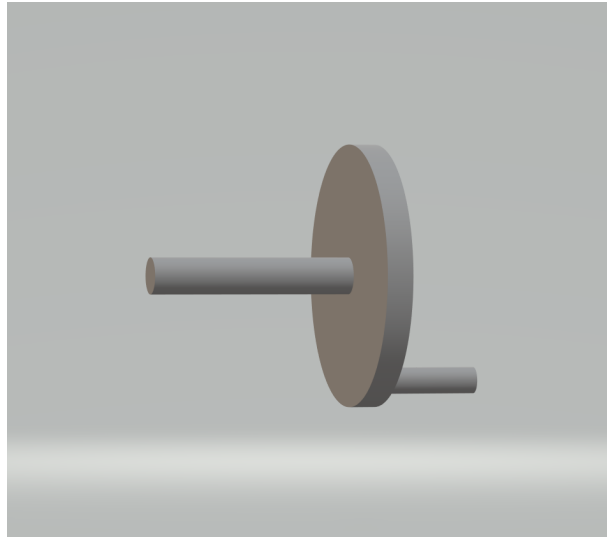


Figura 4.13: Objeto de estudo *Rod*

amolador de facas tradicional como o apresentado na Figura 4.14, requeria apenas retirar uma das alavancas e posteriormente utilizar ferramentas e outros materiais para dar a forma mais confortável de manuseamento e melhorar a parte estética.



Figura 4.14: Amolador de facas tradicional [32].

# Capítulo 5

## Resultados Numéricos e Discussão

No decorrer deste capítulo são apresentados os resultados provenientes das simulações realizadas através dos diferentes *softwares* mencionados no Capítulo 3, para os diferentes objectos em consideração neste estudo. Para cada um dos seis objectos em estudo foram realizadas quatro simulações, uma para cada um dos diferentes *softwares*, designadamente o *Simplify-B* (SB), o *Repetier Host* (RH), o *Cura* (C) e o *Simplify-3D* (S), ligados a diferentes impressoras, nomeadamente à *Ultimaker 3D*, *Big Builder Dual* e por fim à *Fusion3* modelo F400-S.

O principal objectivo deste estudo é analisar os parâmetros como o tempo (em minutos), e filamento (em milímetros) necessários para a impressora realizar a impressão de certos objetos com diferentes orientações.

Neste capítulo são também incluídos os resultados obtidos das simulações com o *software Simplify 3D* efectuados a partir de um estudo conjunto entre a Universidade do Minho e o Instituto Politécnico de Bragança [33], sendo este *software* representado por SB, e através do qual foram obtidos os ângulos utilizados nas simulações.

### 5.1 *Dryer*

Esta secção é relativa aos resultados obtidos após as simulações do objecto *Dryer* que é apresentado no Capítulo 4. A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos após a realização das simulações efectuadas a partir dos diferentes *softwares* e para cada um dos

ângulos definidos inicialmente como sendo os óptimos de acordo com certos parâmetros para este objecto. Visto terem sido efectuadas simulações com o mesmo *software* mas este estar relacionado a impressoras diferentes optou-se por legendar a tabela de modo a haver distinção entre ambos, sendo o *Simplify-B* relativo aos dados provenientes do grupo da Universidade do Minho [33], enquanto que o *Simplify 3D* diz respeito aos dados das simulações efectuadas na impressora localizada no Instituto Politécnico de Bragança. Relativamente aos ângulos é de notar que o primeiro valor corresponde ao valor do eixo das abcissas (eixo do  $x$ ) e o segundo valor aos do eixo das ordenadas (eixo do  $y$ ).

Tabela 5.1: Resultados obtidos com a peça *Dryer*

Id	Ângulos	Simplify-B (SB)		Repetier Host (RH)		Cura (C)		Simplify 3D (S)	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(0,0)	415	31442	346	30680	1656	11180	196	30848
2	(180,0)	706	60219	345	30634	1644	11180	324	55876
3	(140,165)	613	49472	389	31400	1678	11060	307	51023
4	(40,10)	597	47886	388	31390	1694	11090	302	49267
5	(0,25)	541	42554	375	30808	1725	11130	254	41627
6	(0,155)	907	79013	375	30816	1727	11130	436	76050
7	(90,180)	1222	115026	370	30468	1564	11170	604	109235

De acordo com a Tabela 5.1 verifica-se que existe uma consistência entre os *softwares* SB e S, para os quais o valor do tempo e filamento são os mínimos necessários para a elaboração deste objeto, verificando-se esta coerência no ângulo  $(0^\circ, 0^\circ)$ . É possível verificar de igual forma que para os restantes *softwares*, RH e C, o valor do tempo mais favorável de elaboração e o do material necessário não é igual para o mesmo ângulo, verificando-se estes em ângulos distintos, como estão representados na Figura 5.1.

A Figura 5.1 demonstra o objeto *Dryer* na posição/ ângulo a partir do qual se obteve o melhor resultado para o tempo de impressão, sendo este para o *software* a) o ângulo  $(180^\circ, 0^\circ)$  e para o b) o ângulo  $(90^\circ, 180^\circ)$ . Como mencionado os ângulos para tempo/material de confeção não são os mesmos para a obtenção do seu valor ótimo, e como tal a Figura 5.2 representa o ângulo onde foi obtido o melhor resultado para o filamento, sendo este para o *software* a) o ângulo  $(90^\circ, 180^\circ)$ .

A fim de melhorar a visualização dos dados e analisar o seu comportamento foram

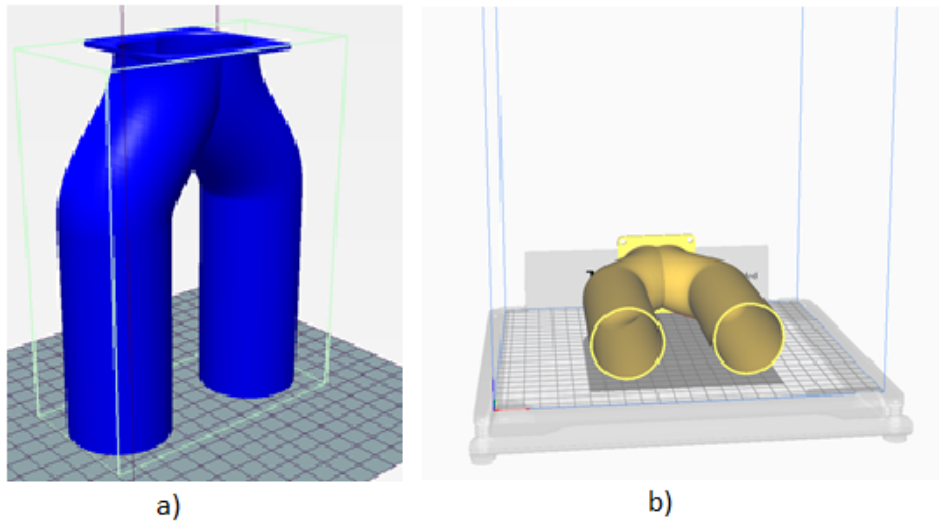


Figura 5.1: Representação do ângulo com os melhores tempos de impressão para os *softwares* a) *Repetier Host* e b) *Cura*

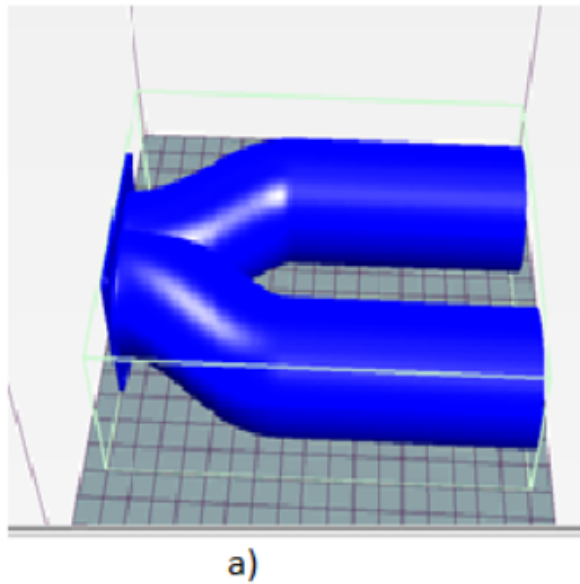


Figura 5.2: Representação do ângulo com o menor gasto de filamento para os *softwares* a) *Repetier Host* e b) *Cura*

elaborados os gráficos apresentados na Figura 5.3 onde são apresentados os valores do tempo de impressão e do filamento necessário para a produção da peça *Dryer*. Os valores

apresentados segundo o eixo  $x$  dizem respeito à identificação do ângulo utilizado e o valor apresentado no eixo do  $y$  indica no caso do gráfico do tempo os valores do tempo em minutos e no gráfico do filamento os valores do filamento utilizados em milímetros.

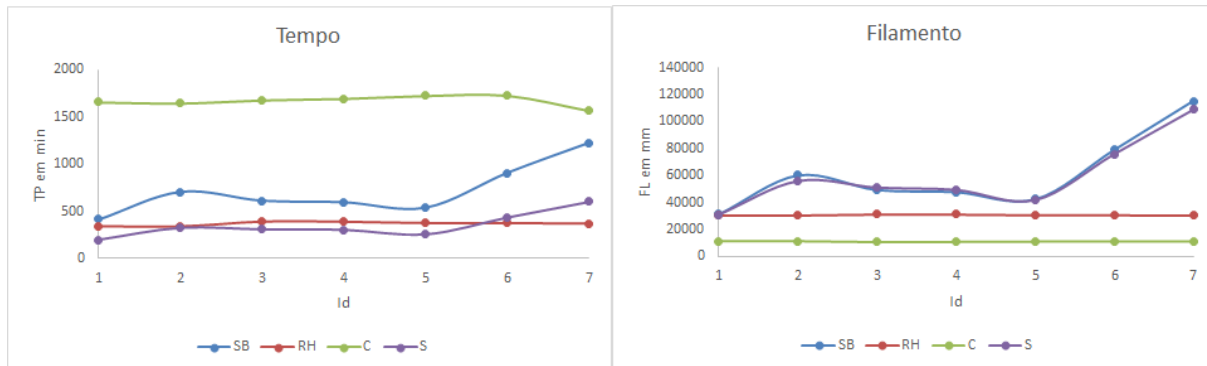


Figura 5.3: Compilação de todos os valores do tempo em minutos (à esquerda) e do filamento em milímetros (à direita).

Analisando a Figura 5.3, é possível verificar a existência de um comportamento semelhante entre o *software* SB e S no que diz respeito à quantidade de filamento necessário para a elaboração da peça, não acontecendo o mesmo na utilização de tempo visto ser notável que o SB demora mais tempo que o S. É também visível que existe uma elevada divergência nos gastos entre o RH e C, uma vez que o C demora muito mais tempo que o RH mas utiliza menos filamento que este para realizar a impressão.

Para fazer uma análise mais detalhada sobre o comportamento do tempo e filamento em cada um dos *softwares* foi elaborada a Figura 5.4. Esta figura apresenta todos os dados obtidos das simulações relativamente ao tempo e filamento a fim de verificar se existe uma proporcionalidade de utilização destes dois parâmetros. Os valores apresentados segundo o eixo  $x$  dizem respeito à identificação do ângulo utilizado e os valores apresentados no eixo do  $y$  correspondem ao valores normalizados do tempo/ filamento utilizados para a elaboração da peça.

Para proceder à utilização dos dados provenientes dos tempos de impressão e de material utilizado na conceção dos objetos foi definida a seguinte normalização.

$$N = \frac{TPi}{\max(TPi)} \quad (5.1)$$

onde  $TPi$  é o valor do tempo de impressão de cada peça no ângulo  $i$ , com  $i = 1, \dots$ . Para estes resultados obtidos se  $N \approx 0$  significa o melhor ângulo de impressão (ou melhor valor de filamento utilizado), se  $N \approx 1$ , significa que o ângulo dispense de mais tempo de impressão (ou filamento necessário).

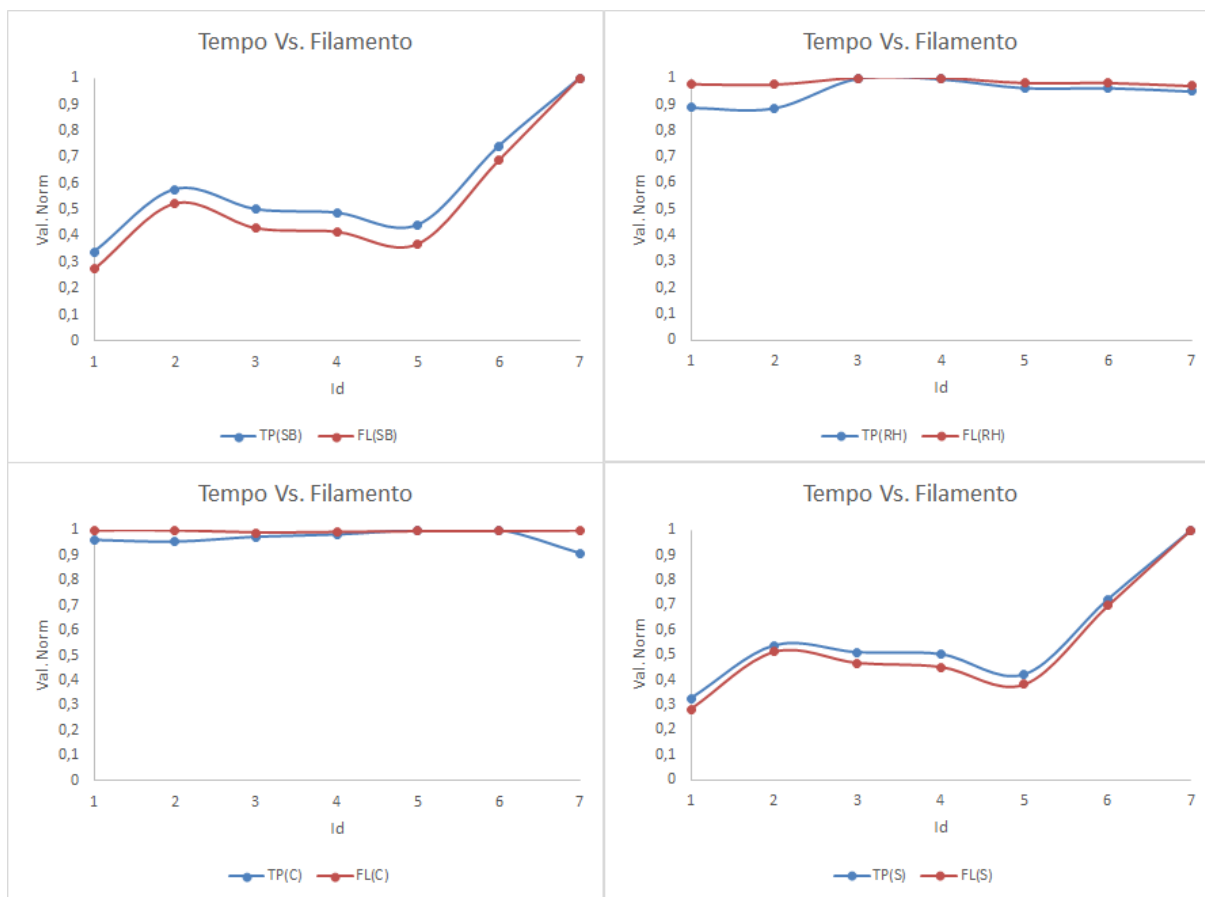


Figura 5.4: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados, a) *Simplify-B* (SB), b) *Repetier Host* (RH), c) *Cura* (C), d) *Simplify-3D* (S).

A Figura 5.4 evidencia com mais detalhe o comportamento do tempo e filamento em cada um dos *softwares* utilizados, sendo que na Figura 5.4 a) apresenta o comportamento do software *Simplify-B* (SB), a Figura b) o do *Repetier Host* (RH), a Figura c) do *Cura*

(C) e a d) do *Simplify 3D* (S).

Como é possível verificar existe uma discrepância entre o Tempo  $V_s$ . Filamento nos *softwares* RH e C, sendo notável que no RH existe um ângulo, (Id=3) onde o gasto dos dois parâmetros toma valores normalizados iguais o que significa que é o pior ângulo para efetuar a impressão, pois é o que despence de mais tempo e material. Os *softwares* SB e S exibem um comportamento semelhante, podendo-se verificar que à medida que o tempo de impressão aumenta, aumenta de igual forma o valor da quantidade de material consumido, o que não acontece nos restantes *softwares*, isto devido às configurações base utilizadas pelos próprios *softwares*, tais como a espessura das camadas, a quantidade de material utilizado no preenchimento das peças ou até mesmo a velocidade de impressão.

De forma a ter uma percepção acerca do comportamento que os *softwares* têm entre si acerca do tempo de elaboração e da quantidade de filamento utilizado para realizar a impressão, foram estudadas a normalização absoluta e a relativa entre estes bem como a percentagem de variação relativa. Como os resultados da normalização absoluta vão de encontro aos da relativa optou-se por apenas apresentar os da normalização relativa.

A normalização relativa,  $Nr$ , é dada pela expressão:

$$Nr = \frac{TPi^A - TPi^B}{TPi^B} \quad (5.2)$$

onde  $TPi^A$  é o valor quer seja de tempo ou filamento de um *software* e  $TPi^B$  o valor de outro *software*.

A percentagem da variação relativa,  $Vr$ , é dada pela expressão:

$$Vr = \frac{\max \{Nr_i^{AB}\} - \min \{Nr_i^{AB}\}}{|\max \{Nr_i^{AB}\}|} \quad (5.3)$$

onde os valores de  $Nr_i^{AB}$  são relativos aos resultados obtidos segundo a normalização relativa.

A Equação 5.2 traduz o aumento e diminuição da grandeza a ser estudada de modo a verificar que fator provocou essa variação, enquanto que o objetivo da realização do cálculo da percentagem da variação relativa é a de se estudar se existe um aumento ou diminuição

entre a variação dos valores obtidos entre a normalização relativa de dois *softwares*.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores da normalização relativa para os tempos de impressão bem como os valores da percentagem da variação relativa do mesmo parâmetro, tempo. É de salientar que os ângulos estão representados pela coluna Id, seguindo a mesma ordem da tabela 5.1.

Tabela 5.2: Resultados obtidos da normalização relativa para o tempo de impressão

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,199	-0,749	1,122	-0,791	0,769	7,466
2	1,046	-0,571	1,179	-0,790	0,065	4,074
3	0,576	-0,635	0,995	-0,768	0,266	4,462
4	0,539	-0,648	0,974	-0,771	0,283	4,602
5	0,443	-0,686	1,132	-0,783	0,478	5,797
6	1,419	-0,475	1,082	-0,783	-0,139	2,965
7	2,303	-0,219	1,025	-0,763	-0,387	1,591
% da Variação Relativa						
	91%	243%	17%	4%	150%	79%

A partir da visualização da tabela 5.2 pode-se verificar que existe uma elevada variação na comparação dos tempos finais de impressão entre alguns *softwares*, nomeadamente entre o *Simplify-B* (SB) e *Repetier Host* (RH), entre o *Simplify-B* e o *Cura* (C) e entre o *Repetier Host* e *Simplify-3D* (S).

No caso do *software* e SB e RH a variação dos valores não é de todo muito elevada uma vez que a diferença dos tempos também não é muito grande, o mesmo não se pode dizer na comparação do SB e C, visto que os resultados obtidos são negativos, isto porque o tempo de impressão do *software* SB é muito inferior ao do C. Na comparação dos *software* RH e S os valores variam começando por um valor mais elevada diminuindo até a um valor negativo demonstrando isto que nos dois últimos ângulos utilizados os valores dos tempos eram mais elevados no *software* S.

A percentagem da variação relativa vai de encontro aos valores das comparações mencionadas no parágrafo anterior, podendo-se concluir desta maneira que variação aumenta ou diminui consoante a existência de uma maior ou menor variação nos valores, sendo

esta maior na comparação do *software* SB e C que é onde se verifica a maior variação de valores.

De forma a compreender de igual maneira como se relacionam os *softwares* em termos de filamento foram igualmente efetuados os mesmos cálculos que para o tempo, realizando-se e tal maneira a comparação da quantidade de material gasto pelas peças. Estes valores estão representados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados obtidos da normalização relativa para o filamento utilizado

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,025	1,812	0,019	1,744	-0,005	-0,638
2	0,966	4,386	0,078	1,740	-0,452	-0,800
3	0,576	3,473	-0,030	1,839	-0,385	-0,783
4	0,526	3,318	-0,028	1,830	-0,363	-0,775
5	0,381	2,823	0,022	1,768	-0,260	-0,733
6	1,564	6,099	0,039	1,769	-0,595	-0,854
7	2,775	9,298	0,053	1,728	-0,721	-0,898
% da Variação Relativa						
	99%	81%	139%	6%	13172%	41%

A partir da visualização da Tabela 5.3 verifica-se que as mesmas conclusões retiradas em relação ao tempo também podem ser aplicadas também em relação ao filamento, uma vez que as variações mais elevadas são encontradas nas mesmas comparações feitas em relação ao tempo, à exceção da comparação do *software* SB e S, que neste caso é mais elevada que na comparação entre tempos, devendo-se isto à variação do gasto de filamento não ser muito semelhante entre os diferentes ângulos, fazendo-se variar por vezes com bastante diferença.

Tendo em conta todos os resultados visualizados conclui-se que para este objeto o *software* que seria mais indicado para realizar a impressão é o *Simplify-3D* no ângulo de impressão Id=1, visto existir uma proporcionalidade entre os dois objetos de estudo, tempo e filamento e ser também estes a apresentar os valores normalizados mais baixos da utilização dos mesmos.

## 5.2 *Fin*

Esta secção é relativa aos resultados obtidos após as simulações do objecto *Fin*. A Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos após a realização das simulações efectuadas a partir dos diferentes *softwares*.

Tabela 5.4: Resultados obtidos com a peça *Fin*

Id	Ângulos	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify 3D	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(0,0)	84	6921	57	5391	269	2410	44	6895
2	(180,0)	119	11559	55	5316	230	2390	68	12967
3	(0,60)	138	7221	69	5625	246	2400	56	7638
4	(90,0)	85	8447	54	5320	246	2470	54	7936
5	(120,180)	119	11527	63	5865	289	2590	62	9945
6	(55,0)	117	11271	63	5923	293	2590	53	7323
7	(90,90)	145	7064	67	5452	252	2460	88	19039

A partir da visualização da Tabela 5.2 verifica-se que os *softwares* SB e S possuem um ângulo comum (Id=1) para o qual, o dispêndio de tempo e filamento são os mínimos necessários, tratando-se também de ser este o ângulo onde se verifica o tempo de impressão mais baixo de entre todos os restantes *softwares*. Igualmente aos *softwares* mencionados também o *software* C possui um ângulo (Id=2) onde ambos os parâmetros utilizados obtiveram os seus melhores resultados, sendo de notar que o valor de material utilizado pelo *software* C, é o mais baixo de entre todos os *softwares*. O *software* RH identicamente ao objeto estudado anteriormente também exhibe ângulos diferentes onde se encontram os seus consumos mínimos, estando estes ângulos demonstrados na Figura 5.5.

A Figura 5.5 corresponde ao ângulo onde para o objeto *Fin*, no qual após o seu estudo se obteve o menor tempo de impressão, sendo este a) o ângulo  $(90^\circ, 0^\circ)$ , enquanto que b) é representado pelo ângulo  $(0^\circ, 0^\circ)$ .

A fim de melhorar a observação dos valores obtidos foi elaborada a Figura 5.6, apresentando na imagem todos os valores normalizados dos resultados obtidos para os tempos de impressão e para a utilização de material.

Visualizando a Figura 5.6, é possível identificar um comportamento semelhante entre os *softwares* RH e S, existindo um ângulos (Id=4) onde os seus valores relativamente

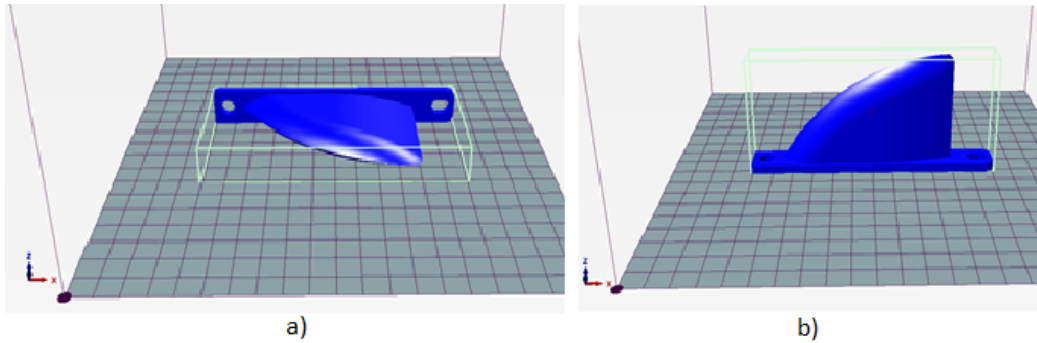


Figura 5.5: Representação dos ângulos de impressão para o *software* RH onde a) representa o ângulo com melhor tempo e b) o ângulo com o segundo menor gasto de filamento

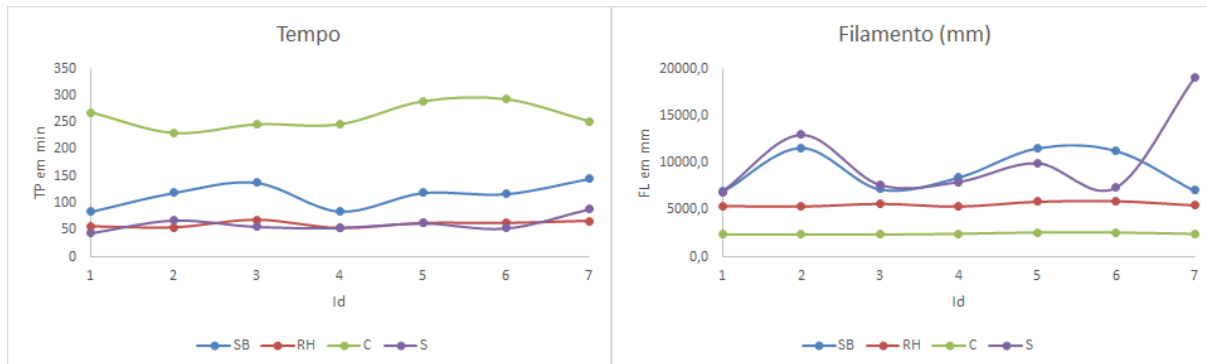


Figura 5.6: Compilação de todos os valores do tempo necessário em minutos (à esquerda) e do filamento em milímetros (à direita).

ao tempo de elaboração são iguais, existindo outro ângulo (Id=5) onde a diferença dos valores deste parâmetro é mínima. Contudo o mesmo não acontece com o filamento sendo a utilização deste último muito superior no *software* S. É também de notar que o *software* que demora mais tempo a fazer a impressão é o C mas é de igual forma de entre todos o que gasta menos material para efetuar a impressão.

De modo a a realizar uma análise mais detalhada sobre o comportamento do tempo e do filamento utilizados em cada um dos *software* foi elaborada a Figura 5.7. A Figura 5.7 apresenta os resultados obtidos normalizados de cada um dos parâmetros em estudo estando estes dispostos de igual forma aos apresentados na secção 5.1.

Observando a Figura 5.7 verifica-se a existência de uma semelhança no comportamento

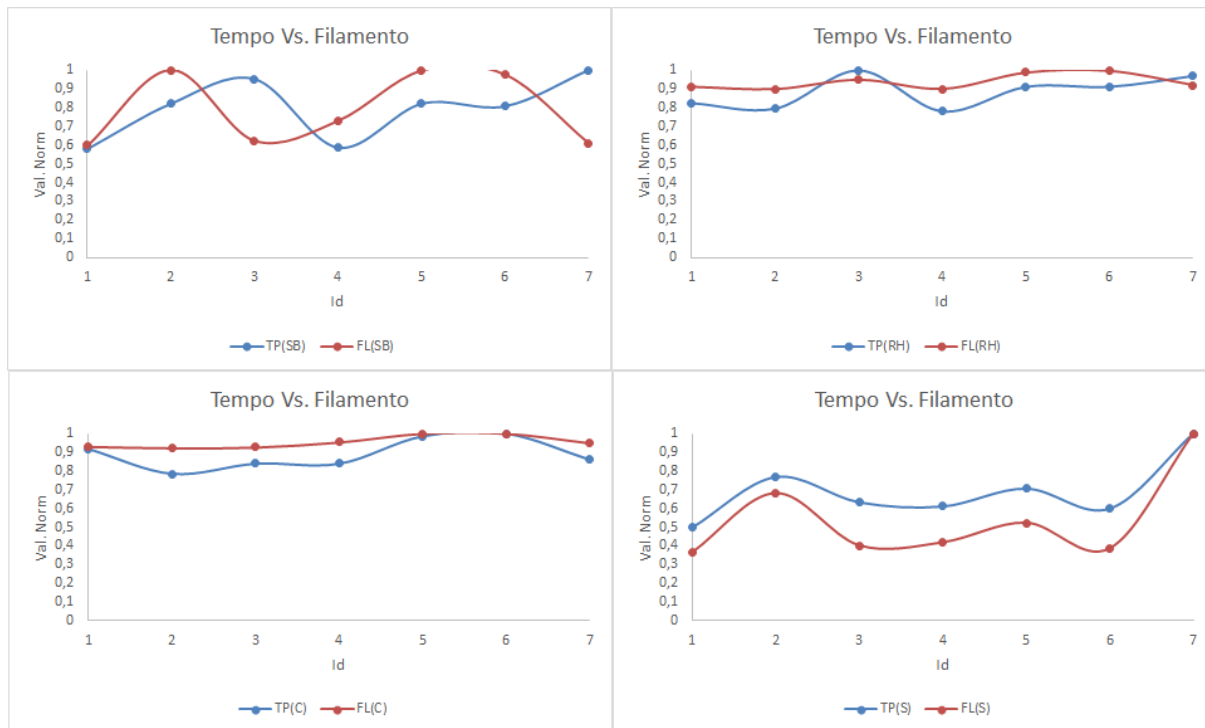


Figura 5.7: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados

dos dois parâmetros objetos de estudo no *software* S, sendo notável que quando o tempo de impressão aumenta ou diminui, o filamento exibe a mesma reação, não se verificando o mesmo para os restantes *softwares*. Este *software* apresenta num dos ângulos utilizados (Id=7), os valores normalizados do tempo de produção da peça e os valores da utilização de material iguais ( $N \approx 1$ ) o que implica este ser o ângulo onde os valores destes parâmetros serem os mais elevados e conseqüente ser o pior ângulo a ser utilizado para realizar a impressão. Tal como mencionado anteriormente o *software* S é o que realiza a impressão no menor espaço de tempo, mas o mesmo não se verifica com a utilização filamento ser a menor, sendo na realidade até um dos valores mais elevados.

Também para este objeto foram estudadas a normalização relativa e a percentagem da variação relativa para ambos os parâmetros, tempo e filamento. Os valores dos resultados obtidos para o tempo de impressão estão apresentados na Tabela 5.5

Tabela 5.5: Resultados obtidos da normalização relativa do tempo de elaboração para o objeto *fn*

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,474	-0,688	0,909	-0,788	0,295	5,114
2	1,164	-0,483	0,755	-0,761	-0,189	2,392
3	1,000	-0,439	1,464	-0,720	0,232	3,393
4	0,574	-0,654	0,574	-0,780	0,000	3,556
5	0,889	-0,588	0,907	-0,782	0,010	3,631
6	0,857	-0,601	1,208	-0,785	0,189	4,528
7	1,164	-0,425	0,644	-0,734	-0,240	1,857
% da Variação Relativa						
	59%	62%	61%	10%	181%	64%

A partir da visualização da Tabela 5.5 podemos verificar que existe uma elevada variação na relação entre os tempos finais de impressão entre alguns *softwares*, nomeadamente entre o *Simplify-B* e *Cura*, entre o *Repetier Host* e *Simplify-3D* e entre o *Cura* e *Simplify-3D*.

No caso do *Simplify-B* e *Cura* a variação dos valores não é das mais elevadas uma vez que a diferença dos tempos também não o é, o mesmo não se pode dizer da comparação do *Repetier Host* e *Simplify-3D*, visto ser possível visualizar uma grande variação dos valores à medida que o ângulo varia, tudo isto devido a que por vezes um *software* tem melhor *performance* que o outro e vice-versa. Na comparação do *Cura* e *Simplify-3D* a variação dos valores é elevada devido a que para todos os ângulos o *software Cura* necessita sempre de muito mais tempo para realizar a impressão dando assim origem a uma das maiores variações.

A percentagem da variação relativa acompanha igualmente os valores das comparações, tornando-se esta mais elevada quando a variação dos valores também o é, verificando-se isto na comparação do *Repetier Host* e *Simplify-3D*.

Igualmente aos valores normalizados calculados para o tempo de elaboração da peça, foram igualmente realizados os mesmos cálculos para o volume de material gasto, estando estes valores apresentados na Tabela 5.6.

Com base na tabela verifica-se que a percentagem da variação relativa é maior na

Tabela 5.6: Resultados obtidos da normalização relativa do filamento utilizado para a elaboração do objeto *fn*

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,284	1,872	0,004	1,237	-0,218	-0,650
2	1,174	3,836	-0,109	1,224	-0,590	-0,816
3	0,284	2,009	-0,055	1,344	-0,264	-0,686
4	0,588	2,420	0,064	1,154	-0,330	-0,689
5	0,965	3,450	0,159	1,264	-0,410	-0,740
6	0,903	3,352	0,539	1,287	-0,191	-0,646
7	0,296	1,872	-0,629	1,216	-0,714	-0,871
% da Variação Relativa						
	76%	51%	217%	14%	273%	35%

comparação do *software Simplify-B* e *Simplify-3D*, e na *Repetier Host* e *Simplify-3D*, variação esta que pode ser explicada pelo facto de que os seus valores são muito dispersos em relação à comparação feita entre outros *softwares* como o *Repetier Host* e *Cura*.

É também visível que para este parâmetro existem três comparações de *softwares* onde os seus resultados normalizados são negativos, isto devido aquando da realização do cálculo os valores de um *software* serem inferiores aos do outro.

Tendo em conta todos os resultados e a exibição de uma diferença entre os *softwares* relativamente aos parâmetros objeto de estudo, tudo indica que o melhor *software* para realizar a impressão seria o S, mas tendo em conta que este apenas apresenta bons resultados em um dos parâmetros então pode-se afirmar que se o objeto de estudo fosse apenas o tempo este era o melhor através do ângulo Id=1, mas se fosse o oposto e o objeto de estudo fosse a quantidade de material gasto, então a melhor opção de *software* seria o C no ângulo Id=2.

### 5.3 Lego Curvo

Esta secção é relativa aos resultados obtidos após as simulações do objecto Lego Curvo. A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos após a realização das simulações efectuadas a partir dos diferentes *softwares*, nomeadamente o *Simplify-B* (SB), o *Repetier Host* (RH),

o *Cura* (C) e o *Simplify-3D* (S).

Tabela 5.7: Resultados obtidos com a peça Lego Curvo

Id	Ângulos	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify 3D	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(90,90)	80	6341	52	4577	265	1740	41	6501
2	(0,90)	75	5766	49	4574	265	1740	138	27715
3	(10,45)	117	4838	63	4819	297	1740	121	22203
4	(135,180)	122	4639	60	4905	239	1590	128	24045
5	(135,0)	122	4676	62	4911	238	1600	69	12628
6	(65,180)	118	10412	61	4957	272	1720	42	5699
7	(65,0)	205	19295	61	4953	268	1720	57	9182
8	(50,160)	203	17858	64	4991	268	1630	78	15302
9	(50,20)	314	29689	64	4991	267	1640	63	10603

Observando a Tabela 5.3 visualiza-se a existência de três *softwares*, (SB, C e S), onde para o ângulo em que o tempo de impressão é o menor, o mesmo não é representado pelos valores da utilização de material, existindo apenas tal concordância para o *software* RH no ângulo Id=2. É de notar no *software* RH que existem dois ângulos onde o tempo de impressão é igual mas a quantidade material gasto não (Id=6 e 7), sendo a diferença de 0,4 cm, o que se pode considerar insignificante pois os valores fornecidos pelo *software* são apenas estimativas e não os valores reais. Para os ângulo Id=7 e 8, tanto o valor de confecção como a quantidade de material aplicado para a construção da peça têm valores iguais.

A Figura 5.8 representa o objeto lego curvo no ângulo, Id=2, que é através do qual se obtiveram os parâmetros de estudo, tempo e filamento, com os valores de utilização mais baixos para o *software* RH.

A fim de melhorar a observação dos valores obtidos e compilados na Tabela 5.3 foi construída a Figura 5.9, apresentando esta do lado esquerdo todos os valores dos resultados obtidos para os tempos e do lado direito da os valores do filamento.

A partir da visualização da Figura 5.9 verifica-se a não existência de uma semelhança em relação ao tempo entre nenhum dos *softwares* utilizados nas simulações. Constata-se no entanto que o *software* que demora mais tempo a realizar a impressão da peça é o *Cura* mas contrariamente é o que utiliza menos material para a sua elaboração.

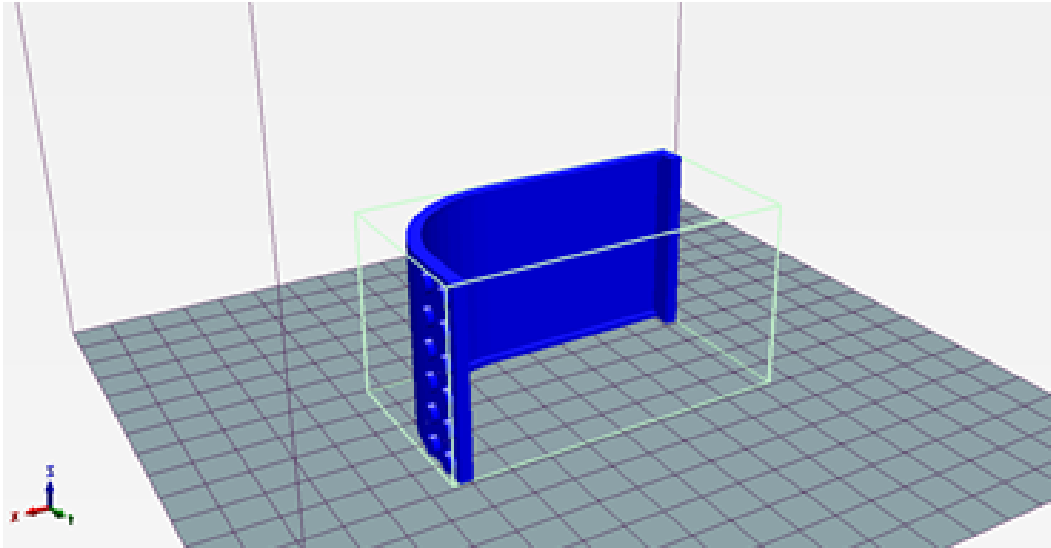


Figura 5.8: Representação do Lego Curvo no ângulo (0°, 90°)

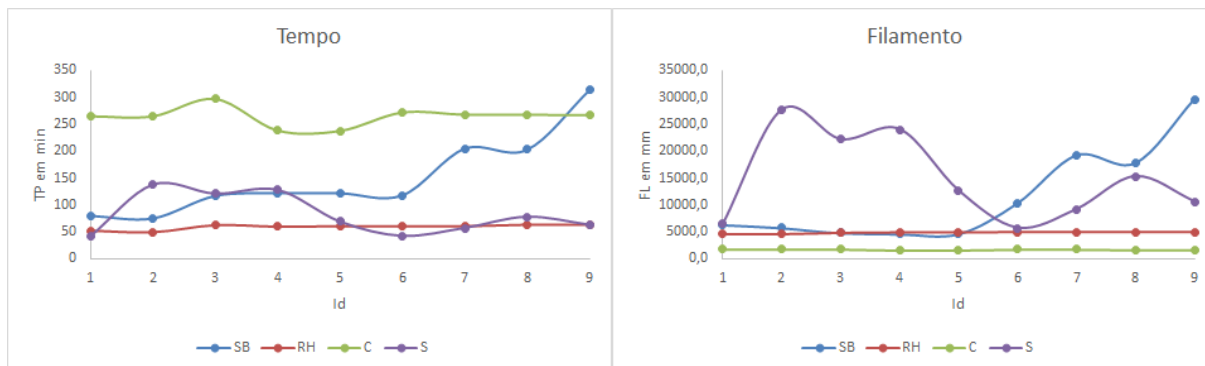


Figura 5.9: Compilação de todos os valores do tempo preciso em minutos e do filamento utilizado em milímetros.

É possível verificar ainda que o *software Simplify-B* (SB) aumenta a demora e a quantidade de material para elaborar a peça gradualmente, enquanto que o seu análogo o *Simplify-3D* (S), faz o oposto. Tendo em conta que o SB, é apenas utilizado como *software* modelo para efetuar estudos e o S, está interligado a uma impressora o valor real do resultado destes dois *softwares* deve ser feito através de uma estimativa a partir da comparação de ambos os resultados.

De modo a aprofundar o estudo da relação existente entre o gasto de tempo e filamento

entre *softwares* foi elaborada a Figura 5.10. A Figura apresenta o comportamento de cada *software* para o tempo de elaboração da peça e do material utilizado na manufatura da mesma, estando os *softwares* representados por a) *Simplify-B* (SB), b) *Repetier Host* (RH), c) *Cura* (C) e d) *Simplify-3D* (S).

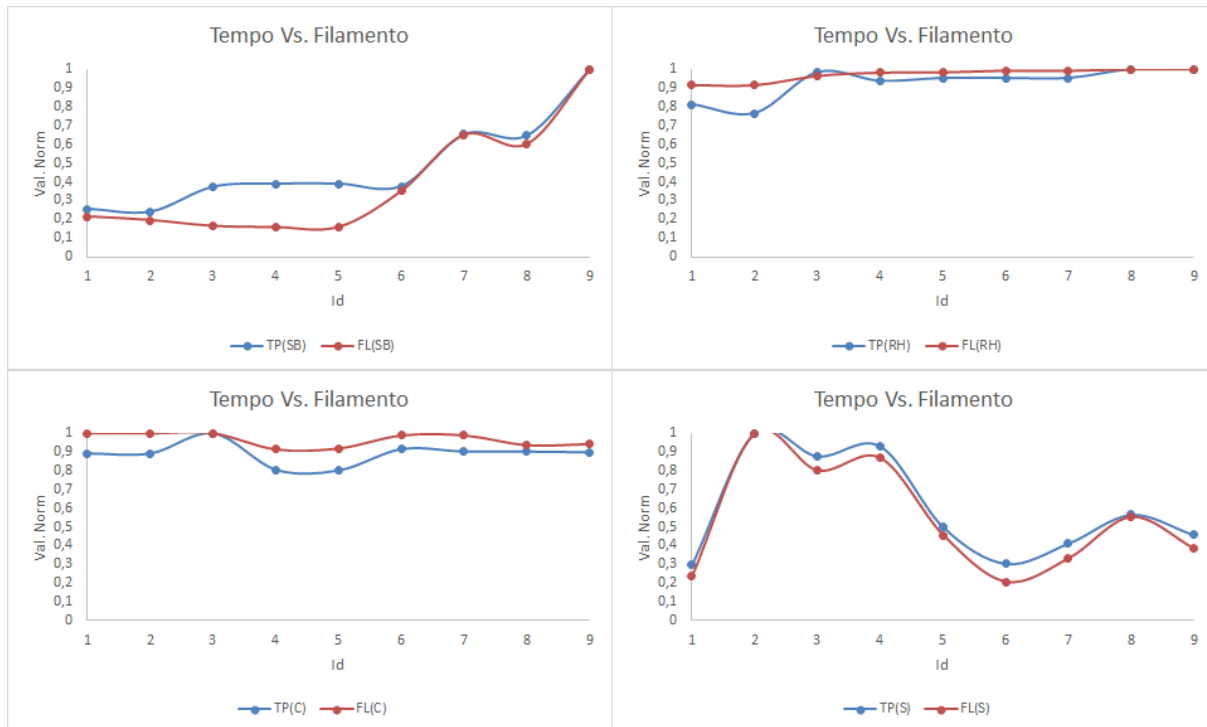


Figura 5.10: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados

É possível verificar na Figura 5.10 que a relação do tempo e filamento gastos na elaboração da peça é semelhante no *software* S (figura d)), aumentando e diminuindo ambos os parâmetros de acordo com os ângulos utilizados. É ainda visível neste *software* um ângulo, Id=2, onde os valores normalizados dos parâmetros tempo e filamento tomam valores iguais a um, o que demonstra ser este o ângulo menos favorável à impressão.

O *software* SB (figura a)), demonstra um comportamento similar na maioria dos ângulos utilizados, divergindo apenas nos ângulos Id=3, 4 e 5, devendo-se esta divergência ao facto de que o tempo de impressão aumenta e estabiliza mas a quantidade de material diminui e volta a aumentar nestes ângulos respetivamente de acordo com os valores

normalizados destes. É perceptível também que para o *software Cura* no ângulo Id=3 os valores de ambos os parâmetros toma valores iguais, sendo também neste ângulo onde se encontrou o resultado mais elevado de tempo de impressão e de quantidade de material gasto para a impressão, já no *Repetier Host* isto acontece para os dois últimos ângulos, o Id=6 e 7.

Foi ainda realizado o cálculo da normalização relativa no que diz respeito ao tempo e filamento, bem como à percentagem da variação relativa para o objeto Lego Curvo. Na tabela apresentada de seguida 5.8 estão os valores obtidos dos cálculos do erro relativo e da percentagem da variação relativa para o tempo de impressão.

Tabela 5.8: Resultados da normalização Relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao tempo para o objeto Lego Curvo.

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,538	-0,698	0,951	-0,804	0,268	5,463
2	0,531	-0,717	-0,457	-0,815	-0,645	0,920
3	0,857	-0,606	-0,035	-0,788	-0,480	1,450
4	1,033	-0,490	-0,050	-0,749	-0,533	0,861
5	1,000	-0,487	0,768	-0,744	-0,116	2,449
6	0,934	-0,566	1,810	-0,776	0,452	5,476
7	2,361	-0,235	2,596	-0,772	0,070	3,702
8	2,172	-0,243	1,603	-0,761	-0,179	2,436
9	3,906	0,176	3,984	-0,760	0,016	3,238
% da Variação Relativa						
	86%	507%	111%	10%	243%	84%

A partir da visualização da tabela 5.8 podemos verificar que existe uma elevada variação na comparação entre os tempos finais de impressão entre quase todos os *softwares*, exceto entre o *RH* e *C*.

A pequena variação dos valores demonstrados na tabela sugere que mesmo aquando das simulações no *software RH* e *C*, a diferença de valores entre a variação de ângulos não foi muito grande o que se traduz por uma baixa percentagem da variação relativa entre eles, enquanto que para os restantes é o inverso, tendo existido muita diferença de valores entre eles.

Os valores da comparação dos *software* RH e C são negativos o que é explicado pelo facto de os valores do *software* C serem bastante elevados em relação ao RH.

Tabela 5.9: Normalização relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao filamento.

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,385	2,644	-0,024	1,630	-0,296	-0,732
2	0,261	2,314	-0,792	1,629	-0,835	-0,937
3	0,004	1,780	-0,782	1,770	-0,783	-0,922
4	-0,054	1,917	-0,807	2,085	-0,796	-0,934
5	-0,048	1,923	-0,630	2,069	-0,611	-0,873
6	1,101	5,054	0,827	1,882	-0,130	-0,698
7	2,896	10,218	1,101	1,880	-0,461	-0,813
8	2,578	9,956	0,167	2,062	-0,674	-0,893
9	4,949	17,104	1,800	2,043	-0,529	-0,845
% da Variação Relativa						
	101%	90%	145%	22%	541%	34%

Conclusões semelhantes às retiradas em relação ao tempo podem ser igualmente retiradas para o valor da quantidade de filamento usado, valores estes que podem ser visualizados na tabela 5.9. Com base na tabela visualiza-se que também houve um aprimoramento na comparação do *software* C e S, o que indica que apesar de muito diferentes as quantidades de material que cada uma das impressoras associadas a estes *softwares* utiliza, não se verifica uma mudança muito drástica nos valores do filamento obtidos a partir das simulações nos *softwares*, resultando assim numa diminuta percentagem da variação relativa entre eles.

## 5.4 *Excavator*

Esta secção é relativa aos resultados obtidos após as simulações do objecto *Excavator*. A Tabela 5.10 apresenta os valores obtidos após a realização das simulações efectuadas a partir dos diferentes *softwares*.

Analisando a Tabela 5.10 verifica-se a existência de um ângulo (Id=6) para o qual se obtém em todos os *softwares* o menor tempo de impressão, não acontecendo igual para

Tabela 5.10: Resultados obtidos com a peça *Excavator*

Id	Ângulos	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify 3D	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(55,0)	70	3957	30	2248	133	9800	29	4463
2	(55,180)	77	5744	30	2241	133	9800	30	4325
3	(120,40)	59	4305	33	2383	132	9200	26	4228
4	(90,30)	72	3534	35	2421	131	9500	26	3890
5	(90,150)	72	3361	35	2422	132	9500	27	3606
6	(175,180)	40	3355	29	2271	129	9700	22	3533
7	(175,0)	49	4327	29	2269	129	9700	26	4407
8	(135,140)	53	3451	33	2400	133	9100	22	3432
9	(135,40)	55	4183	33	2400	133	9100	26	4388

com a quantidade de filamento utilizado. É de notar ainda que existem outros ângulos como é o caso do Id=7 que para os *softwares* RH e C também se obteve o tempo mínimo.

Para esta peça, o *software* C, obtém resultados para o tempo de elaboração muito homogêneos, sendo a diferença máxima de apenas quatro minutos, estando em tal conformidade também o volume de filamento empregue na construção. Também se pode verificar a existência de diversos ângulos onde os resultados para o tempo de impressão e de filamento são iguais, como por exemplo os ângulos Id=1 e 2 bem como o Id=8 e 9.

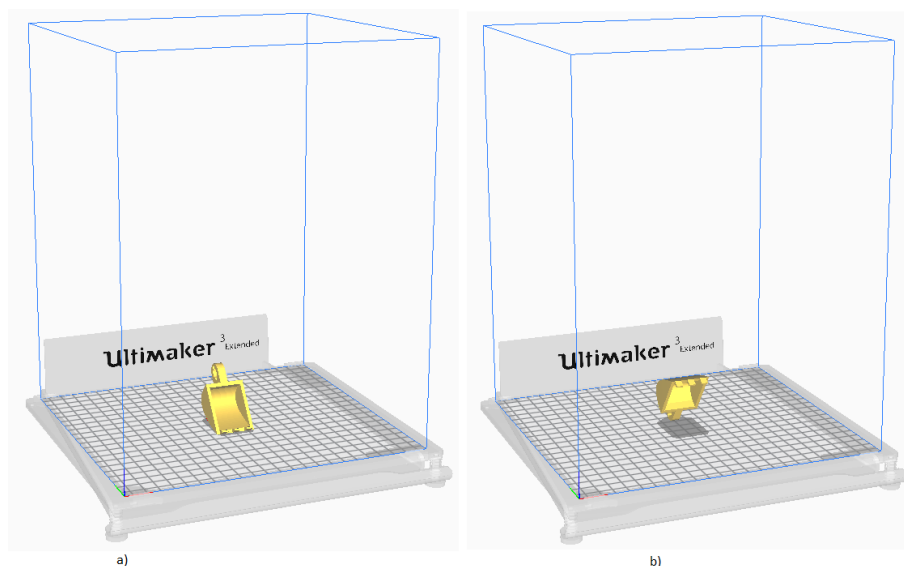


Figura 5.11: Representação da peça nos ângulos de impressão para o *software* Cura onde o tempo de elaboração e material gasto são iguais.

A Figura 5.11 representa a peça no ângulo a) ( $55^\circ, 0^\circ$ ) (Id=1) e o b) no ângulo ( $55^\circ, 180^\circ$ ) (Id=2) para o *software C*. Ambos estes ângulos apresentados originaram tempos de impressão e quantidades de material utilizados iguais, sendo ambos os resultados numéricos mais elevados, enquanto que a Figura 5.12 demonstra a mesma peça utilizando novamente o *software C* nos ângulos c) ( $135^\circ, 140^\circ$ ) (Id=8) e d) ( $135^\circ, 40^\circ$ ) (Id=9), a partir dos quais se obtiveram repetidamente tempos de elaboração e material usado iguais, sendo este último com o valor mais baixo de entre todos.

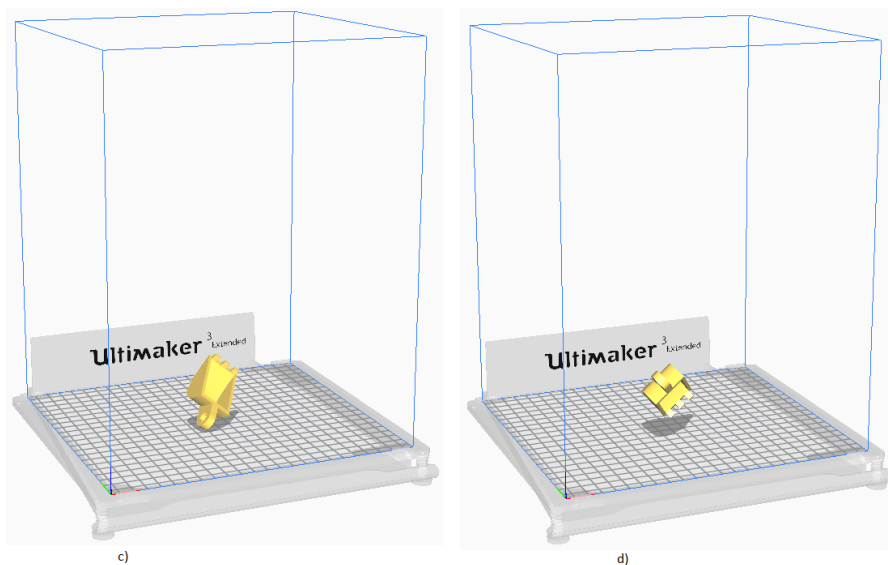


Figura 5.12: Representação da peça nos ângulos de impressão para o *software Cura* onde o tempo de elaboração e material gasto são iguais.

A fim de melhorar a visualização dos dados e analisar o seu comportamento foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 5.13 onde são apresentados os valores do tempo de impressão e o filamento utilizado na elaboração da peça *Excavator*.

De acordo com a Figura 5.13 observa-se que existe uma semelhança entre os resultados obtidos para o tempo de impressão entre os *softwares* RH e S. São estes dois *softwares* que apresentam os valores mais diminutos para o tempo de impressão, podendo-se mesmo afirmar que o que demora menos tempo a imprimir a peça *excavator* é o *Simplify-3D* no ângulo Id=6 ou Id=8.

Desta figura ainda se pode concluir que o *software* mais demorado é o *Cura*, bem como

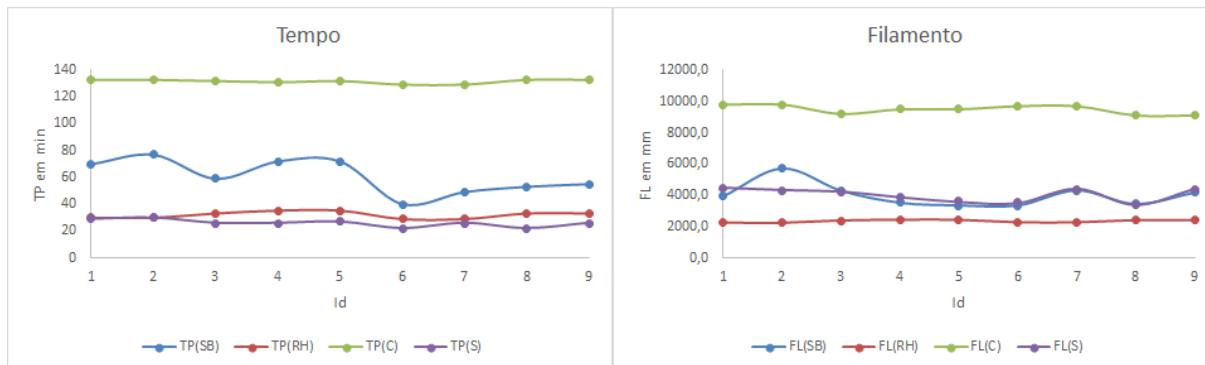


Figura 5.13: Compilação à esquerda de todos os valores do tempo em minutos e à direita dos valores do filamento em milímetros

é o que necessita de mais material para efetuar a impressão da peça, já o *software Repetier Host* é o que necessita de menos material.

É ainda visível na figura a existência de uma semelhança entre os *softwares* SB e S na utilização de material visualizando-se apenas a maior diferença no ângulo Id=2.

De forma a escolher o melhor ângulo e *software* para executar o trabalho é necessário um estudo mais cuidado dos resultados, e como tal foi construída a Figura 5.14. A Figura demonstra mais ao detalhe os valores normalizados dos resultados sobre comportamento do tempo e filamento utilizados em cada um dos *softwares*, estando estes dispostos pela mesma ordem do mencionada em secções anteriores. A normalização dos valores foi realizada de acordo com a equação 5.1 apresentada anteriormente.

A Figura 5.14 apresenta a existência de uma elevada diferença principalmente no que toca à relação do tempo com o filamento no *software Simplify-B* (figura a)) e *Simplify-3D* (figura d)), existindo no entanto também uma pequena diferença não tão acentuada no *software Cura* (figura c)).

A diferença existente nos *softwares Simplify-B* e *Simplify-3D* é devido ao facto que para ângulos diferentes o tempo de execução não é diretamente proporcional ao valor gasto de filamento, como se pode confirmar para os ângulos por exemplo Id=1, 4 e 5, existindo outros. É ainda visível no *software Simplify-B* um ângulo onde os valores normalizados do tempo e material gasto de filamento tomam valores iguais, demonstrando desta maneira

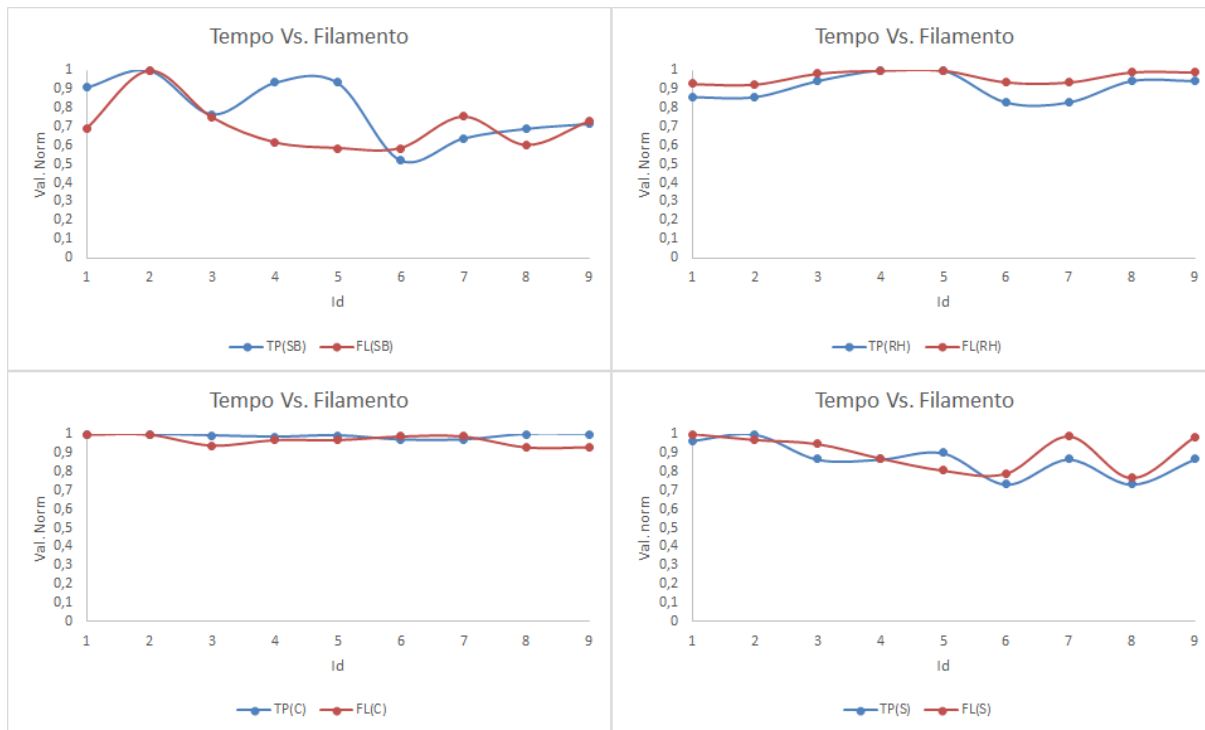


Figura 5.14: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados

este ser o pior ângulo a utilizar para a impressão.

Com o objetivo de efetuar uma comparação entre *softwares* foram efetuados os cálculos da normalização relativa no que diz respeito ao tempo de impressão e ao filamento utilizado, bem como o cálculo da percentagem da variação relativa para o objeto *Excavator*. Estes cálculos foram efetuados a partir da utilização das equações 5.2 e 5.3 descritas anteriormente na secção *Dryer*. Na Tabela 5.11 estão os valores obtidos dos cálculos da normalização relativa e da percentagem da variação relativa para o tempo de impressão.

A partir da visualização da tabela 5.11 podemos verificar que existe uma elevada variação na comparação entre os tempos finais de impressão entre praticamente todos os *softwares*, exceto entre o *Repetier Host* e *Cura*.

Os valores obtidos tomam parte negativa porque o estudo realizado é entre o *RH* e *C*, que visualizado anteriormente na tabela 5.10 os valores do tempo de impressão são muito mais baixos para o *RH* do que para o *C*, mas também é possível verificar que estes

Tabela 5.11: Resultados da normalização relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao tempo.

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	1,333	-0,474	1,414	-0,774	0,034	3,586
2	1,567	-0,421	1,567	-0,774	0,000	3,433
3	0,788	-0,553	1,269	-0,750	0,269	4,077
4	1,057	-0,450	1,769	-0,733	0,346	4,038
5	1,057	-0,455	1,667	-0,735	0,296	3,889
6	0,379	-0,690	0,818	-0,775	0,318	4,864
7	0,690	-0,620	0,885	-0,775	0,115	3,962
8	0,606	-0,602	1,409	-0,752	0,500	5,045
9	0,667	-0,586	1,115	-0,752	0,269	4,115
% da Variação Relativa						
	76%	64%	54%	6%	100%	29%

valores não variam praticamente e daí a obtenção de um valor tão baixo de percentagem da variação relativa, sendo o contrário para os restantes *softwares* em que esta é muito mais elevada tal como a variação dos valores da normalização relativa.

Tabela 5.12: Resultados da normalização relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao filamento.

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,760	-0,596	-0,113	-0,771	-0,496	1,196
2	1,563	-0,414	0,328	-0,771	-0,482	1,266
3	0,806	-0,532	0,018	-0,741	-0,436	1,176
4	0,460	-0,628	-0,091	-0,745	-0,378	1,442
5	0,387	-0,646	-0,068	-0,745	-0,328	1,634
6	0,477	-0,654	-0,050	-0,766	-0,357	1,745
7	0,907	-0,554	-0,018	-0,766	-0,485	1,201
8	0,438	-0,621	0,005	-0,736	-0,301	1,651
9	0,743	-0,540	-0,047	-0,736	-0,453	1,074
% da Variação Relativa						
	75%	58%	135%	4%	51%	33%

Os resultados obtidos dos valores de filamento demonstram resultados semelhantes aos do tempo, podendo estes ser visualizados na tabela 5.12. Com base nestes valores pode-se concluir que também é a comparação *Repetier Host* e *Cura* que traduz os resultados

mais similares, uma vez que é a que expressa a menor percentagem da variação relativa, devida à baixa oscilação dos valores do filamento resultantes das simulações em ambos os *softwares*, o que se traduziu com uma baixa variação dos valores aquando do cálculo da normalização relativa.

## 5.5 *Keychain Case*

Nesta secção serão tratados os resultados obtidos das simulações do objeto *Keychain Case*. A Tabela 5.5 apresenta os valores obtidos após a realização das simulações efectuadas a partir dos diferentes *softwares* e para cada um dos ângulos definidos primeiramente. Os *softwares* utilizados são o *Simplify-B* (SB), o *Repetier Host* (RH), o *Cura* (C) e o *Simplify-3D* (S), estando cada um deles interligados a diferentes impressoras, como a *Fusion3*, *Big Builder Dual* e *Ultimaker 3D* respetivamente.

Tabela 5.13: Resultados obtidos com a peça *Keychain Case*

Id	Ângulos	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify 3D	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(135,180)	138	6724	68	5681	319	2620	49	7211
2	(140,10)	141	7362	69	5660	323	2610	54	8568
3	(140,170)	140	7739	69	5659	323	2620	49	7363
4	(0,0)	126	10655	68	5647	299	2540	62	10924
5	(90,180)	119	8703	67	5648	299	2550	51	8476
6	(45,90)	121	11645	63	5370	295	2590	64	11260

A partir dos valores apresentados na Tabela 5.5 verifica-se que em termos de tempo se destacam dois *softwares*, o *Repetier Host* (RH) e o *Simplify-3D* (S) visto ser através destes que se obtiveram os menores tempos de impressão, enquanto que em termos de utilização de filamento o *software* que se destaca é o *Cura*, pois é o que utiliza menos material.

De entre os quatro *softwares* utilizados apenas o *Repetier Host* obteve os valores mais baixos de tempo e material no mesmo ângulo, Id=6, visualizando-se para os restantes o oposto. Ainda para este *software* pode-se verificar que não existe uma elevada diferença entre os tempos de impressão, obtendo em diversos ângulos, como por exemplo os ângulos Id=2 e 3 valores de tempo iguais, acontecendo igualmente a mesma situação no *software*

*Simplify-3D*, nos ângulos Id=1 e 3.

A Figura 5.15 corresponde ao objeto *keychain case* no ângulo de impressão, ( $45^\circ, 90^\circ$ ) (Id=6), que representa o valor dos parâmetros de estudo, tempo e filamento, com os valores de elaboração mais baixos para o *software* RH, enquanto que a Figura 5.16 demonstra o mesmo objeto mas no ângulo ( $135^\circ, 180^\circ$ ) para o *software* S, que corresponde aos parâmetros de estudo mais baixos.

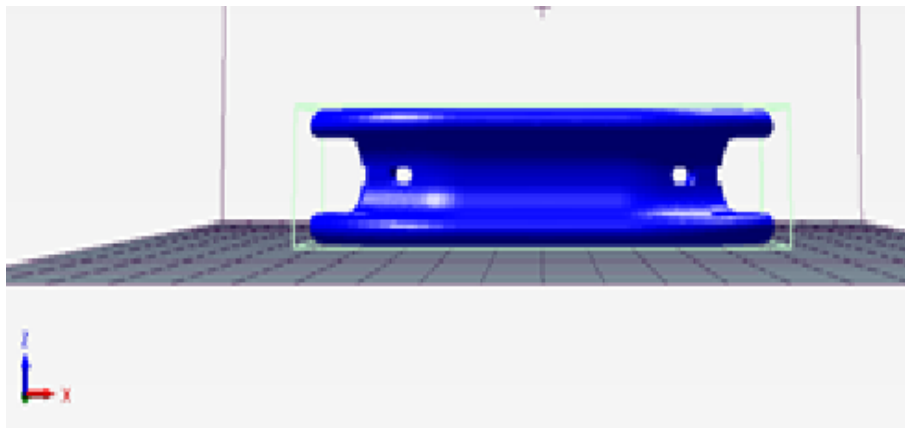


Figura 5.15: Representação da peça no ângulo de impressão onde foram obtidos os melhores resultados para o *software* *Repetier Host*

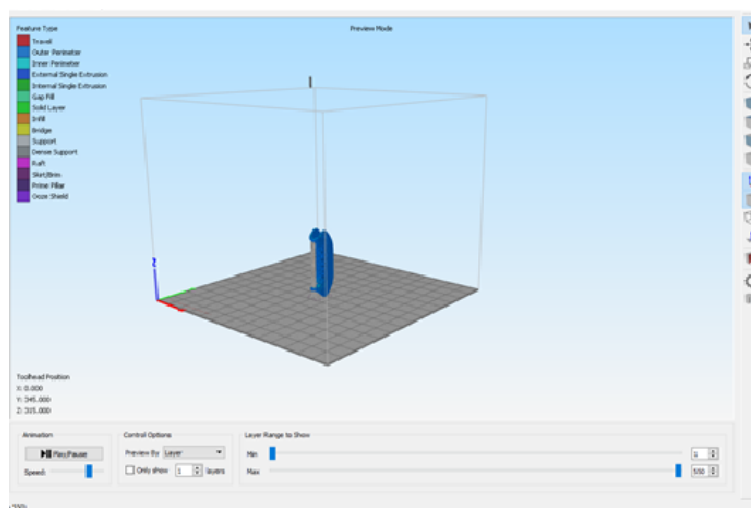


Figura 5.16: Representação da peça no ângulo de impressão onde foram obtidos os melhores resultados para o *software* *Simplify-3D*

A fim de melhorar a visualização dos dados e analisar o seu comportamento foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 5.17 onde são apresentados os valores do tempo de impressão e o filamento utilizado na elaboração da peça *Excavator*.

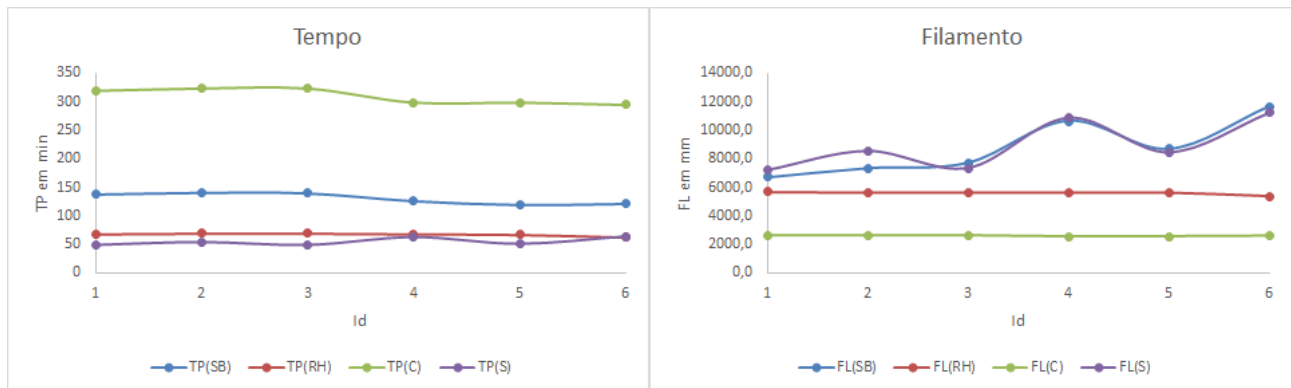


Figura 5.17: Compilação de todos os valores à esquerda do tempo em minutos e à direita do filamento em milímetros necessários para a elaboração da peça.

A partir da visualização da Figura 5.17 pode-se concluir que o *software* que de mais tempo depende para a elaboração da peça é o C, mas contrariamente é o que necessita de menos material para a construção da peça. É também visível uma similaridade entre tempos nos *softwares* RH e S, existindo um ângulo, Id=6, onde a diferença de tempo de elaboração é de apenas um minuto, o que pode ser considerado irrelevante pois os valores obtidos a partir dos *softwares* não são valores reais mas sim estimativas destes.

No que diz respeito aos resultados obtidos para o filamento necessário, verifica-se a existência de uma semelhança entre os *softwares* SB e o S, sendo também estes os que de mais material necessitam para realizar a impressão. É de notar que a quantidade de material utilizado por ambos os *softwares* toma valores muito próximos para o ângulo Id=6 sendo a diferença entre eles de cerca 23 centímetros.

Com a finalidade de estudar de forma mais explícita a relação existente entre os tempos de impressão e a quantidade de filamento utilizado foi então elaborada a Figura 5.18. A figura evidencia com mais pormenor o comportamento do tempo e filamento em cada um dos *softwares* utilizados, sendo que na Figura a) apresenta o comportamento do software *Simplify-B* (SB), a Figura b) o do *Repetier Host* (RH), a Figura c) do *Cura* (C) e a d)

do *Simplify 3D* (S). Para a elaboração da figura, foram utilizados os valores normalizados de ambos os parâmetros, tendo sido feita a normalização de acordo com a equação 5.1 descrita na secção *Dryer*.

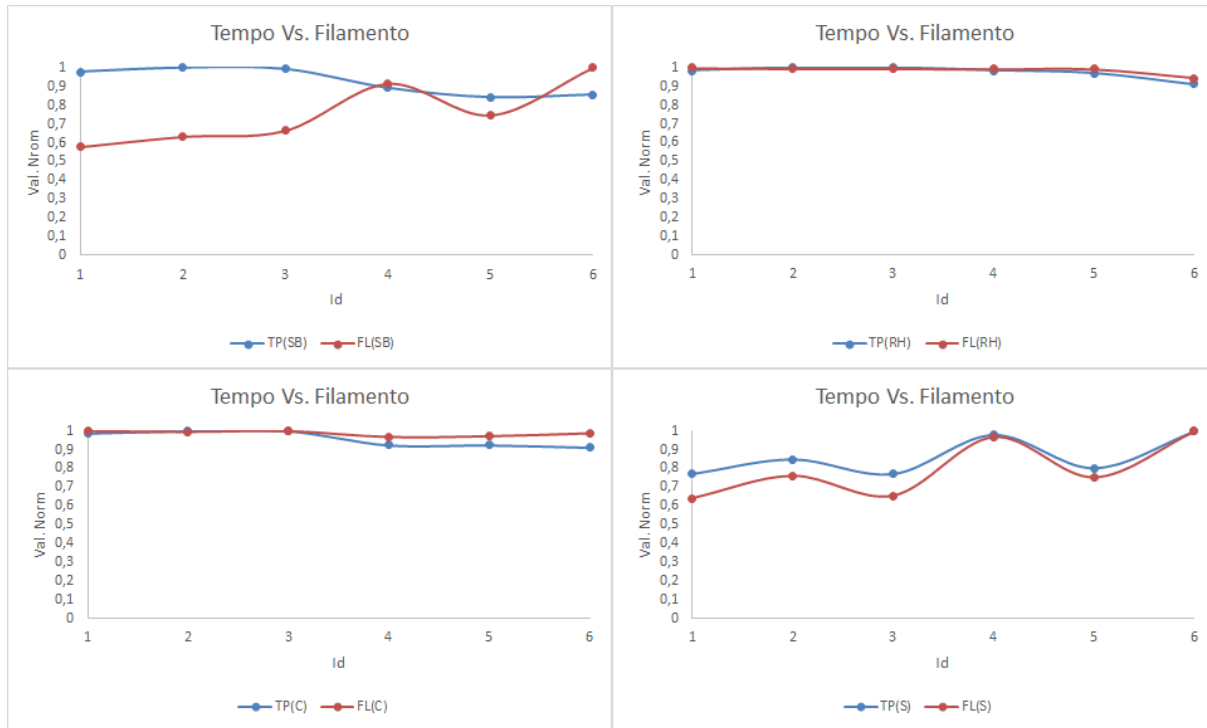


Figura 5.18: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados

Os resultados demonstrados pela Figura 5.18 indicam a existência de uma semelhança entre os valores normalizados provenientes das simulações principalmente nos *softwares* RH (figura b)) e S (figura d)).

A semelhança visível entre os parâmetros destes *softwares* é devida a que em relação ao *software* S, existir uma razão de proporcionalidade entre o tempo vs. filamento visto que à medida que o tempo de elaboração aumenta ou diminui o filamento demonstra um comportamento igual, existindo ainda no ângulo Id=6 valores normalizados de propriedades de tempo e material iguais a  $N \approx 1$ . Para o *software* RH a semelhança é devida à diminuição da quantidade material utilizado na impressão à medida que o tempo de impressão também minimiza.

Para o *software* C (c)), os valores mantêm um equilíbrio nos três primeiros ângulos, mas os que vêm de seguida exibem valores que demonstram que o tempo de elaboração vem a diminuir enquanto que se passa o oposto com os valores do material, vindo estes a aumentar gradualmente.

Foi também efetuado um estudo da comparação entre *softwares* para este objeto, tendo sido estudadas a normalização relativa relativa no que diz respeito ao tempo e filamento, bem como a percentagem da variação relativa. Na Tabela 5.14 estão apresentados os valores obtidos dos cálculos efetuados.

Tabela 5.14: Resultados obtidos do cálculo da normalização relativa e da percentagem relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao tempo.

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	1,029	-0,567	1,816	-0,787	0,388	5,510
2	1,043	-0,563	1,611	-0,786	0,278	4,981
3	1,029	-0,567	1,857	-0,786	0,408	5,592
4	0,853	-0,579	1,019	-0,773	0,090	3,792
5	0,776	-0,602	1,333	-0,776	0,314	4,863
6	0,921	-0,590	0,903	-0,786	-0,009	3,638
% da Variação Relativa						
	26%	7%	51%	2%	102%	35%

A partir da visualização da tabela 5.14 podemos verificar que existe uma elevada variação na comparação entre os tempos finais de impressão entre alguns *softwares*, nomeadamente entre o SB e S e entre o RH e S.

Ambas as situações são demonstradas pelas diferenças dos valores dos tempos existentes entre os *softwares*, visualizados anteriormente na tabela 5.5 e que são confirmados pela elevada percentagem da variação relativa, acontecendo o oposto nos restantes onde esta é menor.

É de notar também que para este objeto, existe um relação entre *softwares*, RH e C onde o valor da variação é o menor encontrado de entre todos os objetos utilizados, o que é explicado pela baixa variação dos valores normalizados do tempo de elaboração da peça, valores esses a partir dos quais foram realizados os cálculos da normalização relativa e da

percentagem relativa.

Tabela 5.15: Resultados dos cálculos da normalização relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao filamento.

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,184	1,566	-0,068	1,168	-0,212	-0,637
2	0,301	1,820	-0,141	1,169	-0,339	-0,695
3	0,368	1,954	0,051	1,160	-0,231	-0,644
4	0,887	3,195	-0,025	1,223	-0,483	-0,767
5	0,541	2,413	0,027	1,215	-0,334	-0,699
6	1,169	3,496	0,034	1,073	-0,523	-0,770
% da Variação Relativa						
	84%	55%	376%	12%	147%	21%

Com base na Tabela 5.15 é possível concluir que para a quantidade de material gasto não acontece o mesmo que para o outro parâmetro, tempo. Neste caso é notável uma grande variação na comparação do filamento utilizado entre os *softwares* SB e S bem como RH e S. Esta variação entre os valores normalizados é devido à variação existente dos valores da quantidade de filamento, sendo esta variação demonstrada pela elevada percentagem da variação.

## 5.6 Rod

Esta secção diz respeito aos resultados obtidos após a simulação efetuada ao objeto *Rod*. Na Tabela 5.6 estão representados os valores do tempo de elaboração da peça *Rod* e as quantidades de filamento utilizados por cada um dos *softwares* para executar a impressão.

Através da visualização da Tabela 5.6 pode-se concluir que existe uma semelhança entre os *softwares* para os quais o tempo despendido para a elaboração da peça e a quantidade de material utilizado têm um ângulo em comum na obtenção dos valores mais baixos, tratando-se este de ser o ângulo ( $0^\circ, 30^\circ$ ) (Id=5), contudo é de notar ainda que em todos os *softwares* existem tempos iguais em ângulos diferentes, bem como valores de filamento utilizado como é exemplo o *software Repetier Host* ou o *Cura*.

Tabela 5.16: Resultados obtidos com a peça *Rod*

Id	Ângulos	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify	
		TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)	TP(min)	FL(mm)
1	(0,0)	64	4187	28	2517	130	1150	73,2	15163
2	(130,170)	64	4214	29	2500	134	1090	27	4167
3	(30,30)	58	3592	35	2755	131	1090	25	3920
4	(45,150)	60	3714	34	2758	131	1100	23	3537
5	(0,30)	58	3419	36	2756	130	1080	24	3682
6	(90,150)	58	3470	34	2758	131	1080	25	3925
7	(180,150)	58	3421	36	2755	131	1330	26	4271
8	(30,50)	116	10735	41	2773	190	1160	30	5054

A Figura 5.19 exemplifica a peça *Rod* em dois ângulos diferentes, a) (45°, 150°) e b) (90°, 150°), onde foram obtidos valores para o tempo de construção e de filamento iguais utilizando o *software Repetier Host*.

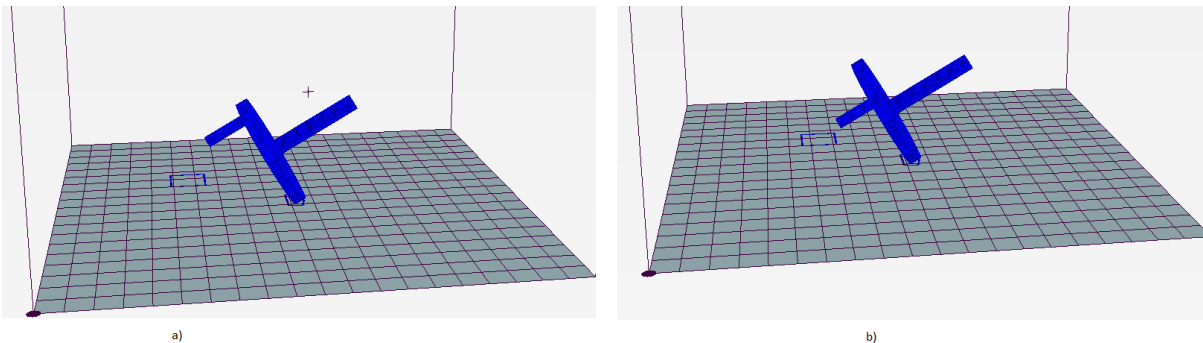


Figura 5.19: Representação do *Rod* nos ângulos de impressão onde foram obtidos valores de tempo e filamento necessários iguais.

A fim de melhorar a visualização dos dados apresentados na tabela e analisar o seu comportamento foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 5.17 onde são apresentados os valores do tempo de impressão e o filamento utilizado na elaboração da peça *Rod*.

Como é possível visualizar na Figura 5.20 existe uma razão de proximidade entre os *softwares Repetier Host* e *Simplify-3D* em relação ao tempo disposto para a elaboração da peça, existindo apenas uma pequena discordância no primeiro ângulo do *software S* sendo este muito mais elevado.

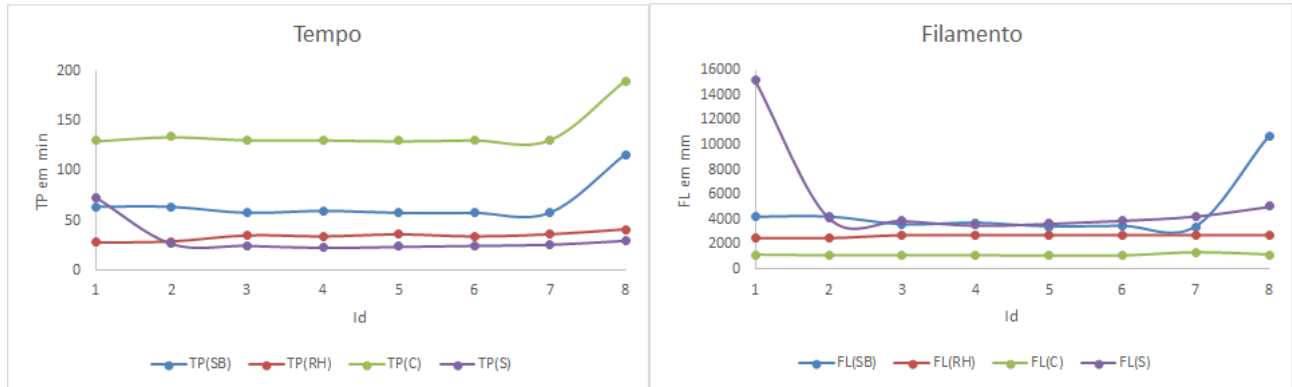


Figura 5.20: Compilação de todos os valores do tempo em minutos, à esquerda, e do filamento em milímetros à direita

O *software Cura* é uma vez mais o que necessita de mais tempo para realizar a impressão, contudo também é o que menor quantidade de material precisa. É ainda possível afirmar que todos os *softwares* demonstram valores similares dos parâmetros para os diferentes ângulos, uma vez que não são visualizadas mudanças muito abruptas, salvo algumas excessões como se trata por exemplo dos *softwares Simplify-B* e *Simplify-3D* no que diz respeito a ambos os gráficos.

De maneira a realizar um estudo mais detalhado da comparação existente entre o gasto de tempo e filamento entre *softwares* foi elaborada a Figura 5.21, que apresenta o comportamento de cada *software* para o tempo de elaboração da peça e do material utilizado na manufatura da mesma, estando os *softwares* representados por a) *Simplify-B* (SB), b) *Repetier Host* (RH), c) *Cura* (C) e d) *Simplify-3D* (S).

A Figura 5.21 demonstra a existência de uma conformidade entre os valores normalizados dos resultados obtidos para o tempo e para o filamento nos *softwares Simplify-B* e *Simplify-3D*. Ambos os *softwares* apresentam um ângulo no qual os valores normalizados dos parâmetros de estudo tomam valores iguais de  $N \approx 1$ , concluindo-se que esse é o ângulo mais inapropriado para realizar a impressão visto ser através deles que mais tempo e mais material têm de ser despendidos.

Da mesma forma que estes *softwares* apresentam semelhanças o mesmo não acontece com o *software Cura* sobretudo nos ângulos Id=1, 7 e 8. Para estes ângulos não existe

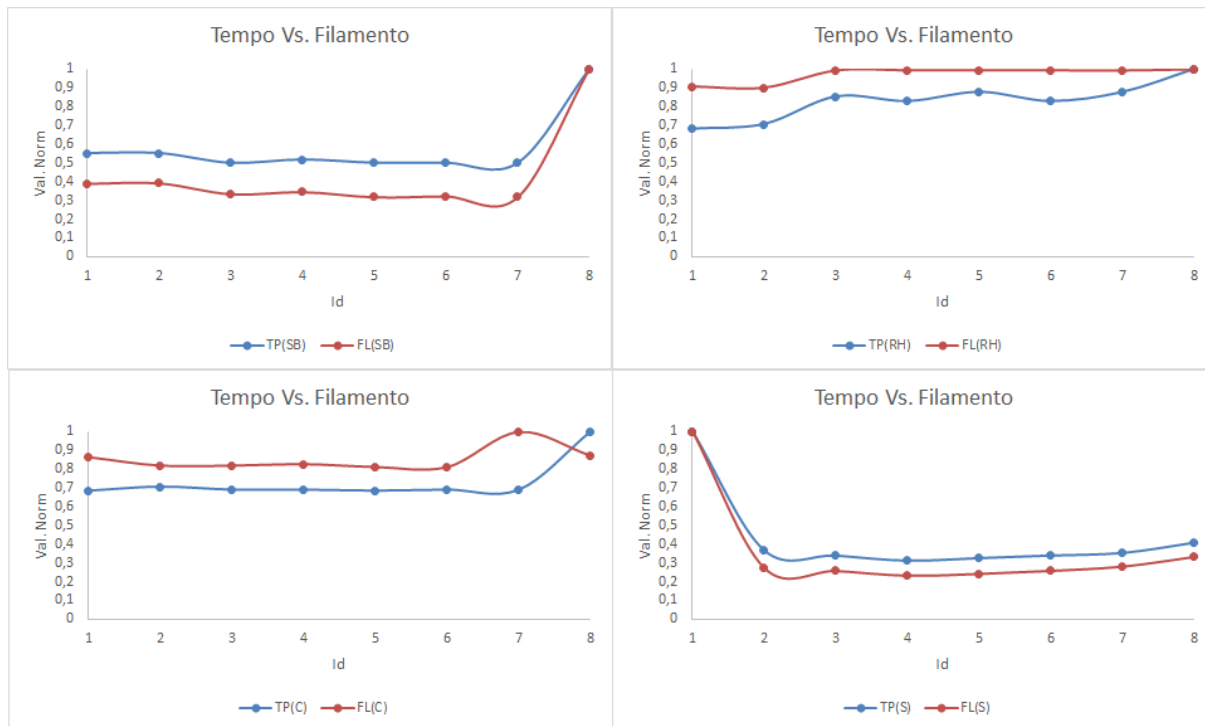


Figura 5.21: Valores do Tempo Vs. Filamento para cada um dos *softwares* utilizados

uma proporcionalidade entre os parâmetros tempo e filamento visto não aumentarem ou diminuïrem uniformemente, visualizando-se o oposto disso.

A fim de estudar o efeito que os *softwares* têm sobre as peças, foi realizado o cálculo da normalização relativa no que diz respeito ao tempo e filamento, bem como a percentagem da variação relativa, de acordo com as equações apresentadas anteriormente. Na tabela 5.17 estão apresentados os valores obtidos dos cálculos da normalização relativa e da percentagem da variação relativa para o tempo de impressão.

A partir da visualização da tabela 5.17 podemos verificar que existe uma elevada variação na comparação realizada entre os *software* para os tempos finais de impressão entre praticamente todos os *softwares*, exceto entre o *Repetier Host* e *Cura*.

Para este *softwares* a variação dos valores relativos é discreta, visto os tempos obtidos das simulações não apresentarem grandes oscilações, por consequência também o valor da percentagem relativa é discreto em relação aos outros. Para as restantes comparações

Tabela 5.17: Resultados da normalização relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao tempo de impressão.

Normalização Relativa - Tempo						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	1,286	-0,508	-0,126	-0,785	-0,617	0,776
2	1,207	-0,522	1,370	-0,784	0,074	3,963
3	0,657	-0,557	1,320	-0,733	0,400	4,240
4	0,765	-0,542	1,609	-0,740	0,478	4,696
5	0,611	-0,554	1,417	-0,723	0,500	4,417
6	0,706	-0,557	1,320	-0,740	0,360	4,240
7	0,611	-0,557	1,231	-0,725	0,385	4,038
8	1,829	-0,398	2,867	-0,784	0,367	5,333
% da Variação Relativa						
	67%	43%	104%	9%	223%	85%

efetuadas entre os *softwares* os valores oscilaram mais, pois também o tempo de impressão variou notavelmente na mesma razão em que o ângulo também e portanto assim se obtiveram valores tão dispersos. Esta flutuação de valores fez aumentar a percentagem da variação relativa.

Após realizados os cálculos das comparações para o tempo de impressão, foram de seguida realizados os mesmos para o filamento utilizado. Os resultados destes cálculos são apresentados na Tabela 5.18

Tabela 5.18: Normalização Relativa entre a utilização dos *softwares* em relação ao filamento utilizado.

Normalização Relativa - Filamento						
Id	SB-RH	SB-C	SB-S	RH-C	RH-S	C-S
1	0,663	2,641	-0,724	1,189	-0,834	-0,924
2	0,686	2,866	0,011	1,294	-0,400	-0,738
3	0,304	2,295	-0,084	1,528	-0,297	-0,722
4	0,347	2,376	0,050	1,507	-0,220	-0,689
5	0,241	2,166	-0,071	1,552	-0,251	-0,707
6	0,258	2,213	-0,116	1,554	-0,297	-0,725
7	0,242	1,572	-0,199	1,071	-0,355	-0,689
8	2,871	8,255	1,124	1,391	-0,451	-0,770
% da Variação Relativa						
	92%	81%	164%	31%	279%	34%

Para este parâmetro de estudo pode-se afirmar que não existe uma concordância entre a comparação de *softwares*, pois existe uma elevada variação dos valores do material entre todos os *softwares*, sendo a variação mais baixa encontrada nos *Repetier Host* e *Cura*.

A variação dos valores relativos normalizados é devida à variação dos valores resultantes das simulações para este parâmetro, podendo-se afirmar que apenas o *Repetier Host* e *Cura* mantiveram ao longo dos ângulos valores de material homogêneos, mas como a diferença entre a utilização de filamento também é mais elevada no *Repetier Host* do que no seu comparativo o ainda assim se obteve uma percentagem relativa muito superior à da mesma comparação efetuada para o tempo no mesmo objeto.

## 5.7 Discussão dos resultados

Após um estudo dos resultados obtidos para as diferentes peças, verificou-se que não existe uma relação direta entre os resultados dos *softwares* e dos diferentes ângulos para todos os objetos sujeitos às simulações. No entanto em todas as simulações o *software* que originou os melhores resultados foi para todos os objetos o *software Simplify 3D*, quer seja o utilizado apenas como modelo para efetuar simulações ou o conectado à impressora *Fusion3*. A definição deste *software* como sendo o mais indicado para efetuar a impressão é devido ao facto de que para todas as peças foi para este *software* onde se verificaram os valores normalizados mais baixos tanto para os valores de tempo de impressão como para valores de filamento utilizado.

Outra conclusão que se tornou evidente é o facto de existir um ângulo ótimo diferente para cada objeto, demonstrando que o ângulo ótimo de impressão depende do objeto que vai ser impresso e também da impressora que o vai imprimir.

De entre os *softwares* utilizados e interligados às impressoras, pode-se concluir que a *Ultimaker 3D* é a impressora mais lenta, contudo é também a impressora que menos quantidade de material gasta, sendo a única exceção para o objeto *excavator*, onde esta impressora também é a que utiliza mais material.

De modo a estudar a tendência do comportamento do tempo e filamento utilizados

para realizar a impressão, de acordo com os *softwares* foram efetuados os cálculos da média aritmética e do desvio padrão. A média aritmética pode ser considerada uma medida de tendência visto focalizar o valor entre os valores maiores e menores, enquanto que o desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. É de notar que para realizar estes cálculos foram utilizados os valores resultantes das simulações e não os valores normalizados.

A Tabela 5.19 apresenta os valores da média e do desvio padrão relativos aos resultados obtidos das simulações para o tempo de impressão.

Tabela 5.19: Resultados obtidos para a média e desvio padrão dos tempos de impressão de todos os *softwares*.

	Resultados da Média e Desvio Padrão - Tempo							
	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify-3D	
	Média	DesvPad	Média	DesvPad	Média	DesvPad	Média	DesvPad
Dryer	714	250	370	17	1670	52	346	125
Fin	115	22	61	5	261	22	61	13
Lego	151	72	59	5	264	17	82	35
Excavator	61	12	32	2	132	2	26	3
Keychain	131	9	67	2	310	12	55	6
Rod	67	19	34	4	139	20	32	16

A partir da visualização da Tabela 5.19 pode-se concluir que o valor da média dos tempos de impressão dos objetos é mais baixo no *software simplify-3D*, à exceção do objeto Lego Curvo, onde se verifica ser mais baixo no *software Repetier Host*.

É de notar igualmente que para o objeto *Fin* existem dois *softwares* que providenciam o mesmo valor da média dos tempos de impressão, sendo estes o *software Repetier Host* e *simplify-3D*. Para ambos o valor da média obtida é o mais baixo.

Relativamente aos resultados do cálculo do desvio padrão pode-se concluir que este obtém os seus melhores valores através da utilização do *software Repetier Host*, dado que quanto mais próximo for o valor de zero menor é a dispersão dos valores dos tempos de impressão. Existe também para este cálculo dois *softwares* onde foram obtidos os melhores resultados para o objeto *excavator*, sendo eles o *software Repetier Host* e *cura*.

Da mesma forma que foram calculados a média e o desvio padrão para o parâmetro

tempo de impressão, foram igualmente efetuados esses cálculos para a quantidade de filamento utilizado para realizar a impressão. A Tabela 5.20 apresenta os valores resultantes desses cálculos.

Tabela 5.20: Resultados obtidos para a média e desvio padrão da quantidade de filamento utilizado na impressão para todos os *softwares*.

	Resultados da Média e Desvio Padrão - Filamento							
	Simplify-B		Repetier Host		Cura		Simplify-3D	
	Média	DesvPad	Média	DesvPad	Média	DesvPad	Média	DesvPad
Dryer	60802	26084	30885	340	11134	43	59132	24133
Fin	9144	2052	5556	235	2473	79	10249	4083
Lego	11502	8372	4853	156	1680	60	14875	7549
Excavator	4024	716	2339	75	9489	273	4030	393
Keychain	8805	1782	5611	108	2588	32	8967	1589
Rod	4594	2341	2697	109	1135	79	5465	3691

Através da visualização da Tabela 5.20 pode-se concluir que o valor médio do filamento para a impressão é mais baixo no *software cura*, à exceção do objeto *excavator*, onde se verifica ser mais baixo no *software Repetier Host*.

Relativamente aos resultados do cálculo do desvio padrão pode-se concluir que este obtém os seus melhores valores através da utilização do *software Cura*, dado que é através desse *software* que os valores resultantes estão mais próximos de zero, à exceção do objeto *excavator*, que obtém o seu melhor resultado através da utilização do *software Repetier Host*.

Tendo em consideração todos os resultados dos cálculos efetuados, pode-se concluir que o *software* mais rápido para efetuar a impressão é o *Simplify-3D*, visto ser através deste que em média se obtiveram os tempos mais baixos de impressão para os objetos, salvo o objeto *excavator*. Este *software* apesar de ser o mais rápido a realizar a impressão, é também o que necessita de mais filamento para elaborar os objetos, à exceção do objeto *excavator* que necessita de mais filamento através da impressão do *software Cura*.

# Capítulo 6

## Conclusão e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Do trabalho aqui apresentado pode-se concluir que a tecnologia de impressão 3D é de grande importância e utilidade do ponto de vista da sua utilização tanto ao nível profissional como ao não profissional. Igualmente foi também possível identificar vários fabricantes de equipamentos de impressão tridimensional que oferecem soluções para os diferentes tipos de necessidade da utilização dos equipamentos, bem como uma breve introdução acerca dos *softwares* que operam esses equipamentos e que foram alvo de estudo nesta dissertação.

Foi também possível identificar e conhecer as diversas peças utilizadas nas simulações numéricas efetuadas bem como conhecer algumas das suas aplicações no dia a dia.

Esta dissertação diz respeito a um estudo comparativo entre *softwares* para dois parâmetros, tempo de impressão e quantidade de filamento utilizado, a fim de avaliar qual o melhor *software* para efetuar a impressão de seis objetos diferentes em ângulos de impressão também diferentes. Para cada um dos objetos foram realizadas quatro simulações, uma para cada um dos diferentes *softwares*, nomeadamente o *Simplify 3D*, o *Repetier Host* e o *Cura*. Foram também incluídos neste estudo comparativo dados provenientes de um estudo conjunto entre o Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade do Minho

que visaram simulações também efetuadas com o *software Simplify 3D* e disponibilizaram igualmente os ângulos a partir dos quais se efetuaram as simulações.

Com este estudo comparativo pode-se concluir que não existe um ângulo em específico o qual possa ser utilizado em todos os objetos para obter resultados aceitáveis, mas sim que para cada um dos objetos estudados deve ser utilizado um ângulo específico para realizar a impressão de modo a utilizar a menor quantidade de material no menor espaço de tempo possível.

Comunmente entre todos os objetos está o *software* que melhores resultados gerou em relação ao tempo de impressão, o *Simplify 3D*. Relativamente ao valor de filamento utilizado para efetuar a impressão o *software* que melhores resultados gerou foi o *Cura*.

## 6.2 Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos verificou-se que existem limitações nas impressoras utilizadas na medida em que não foi obtido um tempo de impressão aceitável utilizando a menor quantidade de material para elaborar uma peça. Assim, propõe-se continuar o estudo com mais objetos com formatos invulgares.

Como trabalho futuro, poderiam ser escolhidos diferentes ângulos para analisar qual a melhor orientação para a impressão de uma determinada peça, bem como estudar de igual forma o impacto que esses ângulos iriam ter na resistência da peça bem como a precisão com que seria impressa.

Pretende-se ainda o desenvolvimento de um *software*, independente da impressora, onde seja possível a identificação automática dos objetos, bem como as suas dimensões, e que proponha diferentes ângulos de impressão de acordo com certos parâmetros escolhidos pelo utilizador, sendo alguns parâmetros a velocidade de impressão, a necessidade de utilização de material de suporte para a elaboração do objeto, a densidade de preenchimento da peça, entre outros.

# Bibliografia

- [1] J. F. Reis, “Desenvolvimento e projeto de impressora DMF para impressão multi-color”, tese de mestrado, Aveiro, 2016.
- [2] P. Lechowicz, L. Koszalka e A. Pozniak-Koszalla I.and Kasprazak, “Path Optimization in 3D Printer: Algorithms and Experimentation System”, *2016 4th International Symposium on Computational and Business Intelligence*, 2016, ISSN: 978-1-5090-3488-8.
- [3] R. Neto, J. L. Alves, T. Duarte e F. Gomes, “Utilização da impressão 3D na produção de peças metálicas”, *INEGI*, 2011.
- [4] P. Pombinha e M. Leite, *O Fabrico aditivo e a Impressão 3D*, [http://www.cenfim.pt/default\\_v2\\_04.asp](http://www.cenfim.pt/default_v2_04.asp).
- [5] *GRABCAD Library*, <https://grabcad.com/library>, Accessed: 2019-08-30.
- [6] *Ford Go Further*, <https://corporate.ford.com/articles/winning-portfolio/building-in-the-automotive-sandbox.html>, Accessed: 2019-04-22.
- [7] *The Ford 3D Store*, <http://3d.ford.com/3d-printables.html>, Accessed: 2019-04-22.
- [8] L. M. C. Queijo, *Apontamentos Teóricos sobre Fabrico Aditivo*. Bragança, 2016.
- [9] C. W. Hull, “Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography”, n.º 4,575,330, 1986.
- [10] F. M. Azevedo, “Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D”, tese de mestrado, Universidade de São Paulo, 2013.

- [11] J. Ribeiro, *Apontamentos Teóricos sobre Processos de Fabrico*. Bragança, 2017.
- [12] B. Lavergne, *3Dilla*, <http://www.3dilla.com/>, Accessed: 2019-03-20.
- [13] Web2Market, *Daemon 3D Printer*, <https://www.daemon3dprint.com>, Accessed: 2019-08-24, Cambridge.
- [14] D. Braam, *Ultimaker*, <https://ultimaker.com>, Accessed: 2019-05-20.
- [15] Ultimaker, “Manual de Instalação e de Utilizador”, rel. téc., 2016.
- [16] S. Sergeevich, *3D Today*, <https://3dtoday.com/3d-printers/code-p/big-builder-dual-feed/>, Accessed: 2019-08-24.
- [17] D. Miller, *io3DPrint*, <https://io3dprint.com/review-fusion3-f400-s-3d-printer/>, Accessed: 2019-08-24.
- [18] M. Stevenson, *3D Printing*, <https://www.fabbaloo.com/blog/2016/4/12/fusion3s-surprise-the-f400-3d-printer-a-designers-dream-machine>, Accessed: 2019-08-24.
- [19] M. Petch, *3D Printing Industry*, <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#05-materials>, Accessed: 2019-03-20.
- [20] L. M. Fernández, *Filament2Print*, <https://filament2print.com/pt/>, Accessed: 2019-03-20.
- [21] G. Lorenti, *3D Criar*, <https://3dcriar.com.br/v2/joalheria/>, Accessed: 2019-08-30.
- [22] M. Littwin, *Repetier*, <https://www.repetier.com>, Accessed: 2019-08-24.
- [23] C. Goss, *Simplify3D*, <https://www.simplify3d.com/software/features/>, Accessed: 2019-08-30.
- [24] ———, “Clint’s Simplify3D Settings Manual”, rel. téc., 2019.
- [25] L. de Vendas Online, *Casas Bahia*, <https://www.casasbahia.com.br/automotivo/escapamentos/ponteira-cromada-esportiva-dupla-carro-escapamento-acoinox-12630448.html>, Accessed: 2019-08-24.

- [26] L. O. de Vendas, *Catálogo Hospitalar*, <https://catalogohospitalar.com.br/conector-y-p-circuito-respiratorio-adulto-s-furo-autoclavavel-4.html>, Accessed: 2019-08-24.
- [27] L. Online, *MiniInTheBox*, [https://www.miniinthebox.com/pt/p/shark-fin-plastico-adesivo-projeto-telhado-de-base-decorativo-de-antena\\_p4766779.html?currency=EUR&litb\\_from=paid\\_adwords\\_shopping&sku=1\\_45&country\\_code=pt&utm\\_source=google\\_shopping&utm\\_medium=cpc&adword\\_mt=&adword\\_ct=347678043060&adword\\_kw=&adword\\_pos=1o5&adword\\_pl=&adword\\_net=g&adword\\_tar=&adw\\_src\\_id=14244118781\\_1672807111\\_69102893214\\_pla-375553633418&gclid=CjwKCAjwzdLrBRBiEiwAEHrAYqPRsZ7SS7ASaWgqv7IrrGy3G4NQtN03dKBgjVWbLIhunMdkSDXhBoChR0QAvD\\_BwE](https://www.miniinthebox.com/pt/p/shark-fin-plastico-adesivo-projeto-telhado-de-base-decorativo-de-antena_p4766779.html?currency=EUR&litb_from=paid_adwords_shopping&sku=1_45&country_code=pt&utm_source=google_shopping&utm_medium=cpc&adword_mt=&adword_ct=347678043060&adword_kw=&adword_pos=1o5&adword_pl=&adword_net=g&adword_tar=&adw_src_id=14244118781_1672807111_69102893214_pla-375553633418&gclid=CjwKCAjwzdLrBRBiEiwAEHrAYqPRsZ7SS7ASaWgqv7IrrGy3G4NQtN03dKBgjVWbLIhunMdkSDXhBoChR0QAvD_BwE), Accessed: 2019-08-24.
- [28] J. D. e. F. L. Pinheiro, *Tijolos Especiais*, <https://www.techbricks.com.br/tijolos-especiais>, Accessed: 2019-08-30.
- [29] C. Industryal, *New Holland Agriculture*, <https://agriculture.newholland.com/eu/pt-pt>, Accessed: 2019-08-24.
- [30] L. Focus Technology Co., *Made-in-China*, [https://pt.made-in-china.com/co\\_qzjieli/image\\_Mini-Dumper-4X4-Cormidi-Mini-Dumper-with-Small-Wheels-and-Tires\\_eiyhshgoy\\_IyETbeflaHgn.html](https://pt.made-in-china.com/co_qzjieli/image_Mini-Dumper-4X4-Cormidi-Mini-Dumper-with-Small-Wheels-and-Tires_eiyhshgoy_IyETbeflaHgn.html), Accessed: 2019-08-24.
- [31] H. Ferreira e D. Costa, *Kidu Play*, <https://www.kiduplay.com/escorregas.html>, Accessed: 2019-09-07.
- [32] E. do Grupo Mercado Livre, *Mercado livre*, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-719120306-afiador-de-facas-antigo-rebolo-only-wood-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-719120306-afiador-de-facas-antigo-rebolo-only-wood-_JM), Accessed: 2019-09-08.
- [33] A. M. A. C. Rocha, A. I. Pereira e A. I. Vaz, “Build Orientation Optimization Problem in Additive Manufacturing”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10961 LNCS, pp. 669–682, 2018.