Impressão Tridimensional de Baixo Custo Aplicada à Pasta de Açúcar

Isaac Alves Ferreira

Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Professor Fernando Jorge Lino Alves



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro de 2015

RESUMO

A impressão tridimensional está presente desde os anos 80, não sendo uma coisa nova, o porquê do crescimento súbito da utilização destes equipamentos é explicado pelo aparecimento de equipamentos de baixo custo disponíveis à maior parte dos consumidores.

Com a massificação da impressão tridimensional foi estudado o nível de dificuldade presente no uso deste tipo de equipamento por um utilizador comum. O crescimento exponencial (*booming*) deste mercado levou ao aparecimento de novas variantes, sendo uma delas a impressão de alimentos. Os dois conceitos conjugam-se a partir do momento em que são perceptíveis as vantagens que o fabrico aditivo pode trazer à alimentação. Num futuro próximo será possível imprimir qualquer alimento com a composição nutritiva desejada, dando origem a uma alimentação mais saudável e controlada. Neste momento, todos os alimentos que possam estar disponíveis em pasta poderão ser impressos na forma desejada. Esta evolução terá interesse se estiver ao alcance de todos, desta forma o estudo realizado foi divido em duas partes.

A primeira parte tem em vista o reconhecimento das maiores dificuldades que este tópico apresenta, de forma a expor os maiores problemas e encontrar uma forma de os resolver. Foi então elaborado um trabalho sobre a montagem, configuração e uso de uma impressora 3DReprap Prusa i3. Este tipo de equipamento é o que mais se enquadra no tópico deste estudo, pela sua simplicidade, possibilidade de introdução de modificações e o seu baixo preço.

A segunda parte foi dedicada ao desenvolvimento de um equipamento extrusor para vários tipos de materiais em forma de pasta, estando focado na aplicação do mesmo para a indústria pasteleira que utiliza a pasta de açúcar. Este módulo deverá permitir a extrusão de materiais que antes não poderiam ser utilizados pela sua consistência mais sólida a temperaturas mais baixas. O equipamento foi montado e configurado de forma a funcionar com filamento polimérico, no entanto, a aplicação do extrusor de pasta implicaria a remoção do original e a criação de novas configurações em diversos *software* e *firmwares*, de modo a ser possível a utilização de vários tipos de materiais. Nesta segunda fase foi desenhado e criado um protótipo do novo extrusor com controlo de temperatura e refrigeração, permitindo a utilização de novos materiais que antes seriam dificilmente extrudidos. De forma a produzir um extrusor de baixo custo, a parte estrutural foi produzida num equipamento RepRap similar ao utilizado para este estudo. Com um extrusor que permita controlo de temperaturas, novos tipos de materiais podem ser usados, abrindo novas portas na impressão tridimensional alimentar. Diversos problemas foram surgindo ao longo da construção, aplicação e configuração do equipamento, levando a um conhecimento mais profundo da programação da máquina. Na última fase deste estudo foram efetuados testes com dois tipos de pastas, em primeiro lugar utilizou-se *nutella*, sem controlo de temperatura e depois pasta de açúcar comercial, de forma a ter uma configuração final e operacional para uso. Estes testes foram bem-sucedidos, demonstrando que a funcionalidade do equipamento estaria de acordo com o previsto, apesar de ser ainda necessário proceder a mais desenvolvimentos para melhorar o acabamento das peças produzidas.

Com o estudo e desenvolvimento deste tipo de aplicação é possível ultrapassar barreiras existentes na indústria alimentar para aplicação da impressão 3D, permitindo reduzir custos, aumentar a criatividade e introduzir esta tecnologia no *cake design*.

ABSTRACT

3D printing is available since the 80's, therefore it is not a new thing, the reason why its growing more than in the last 30 years is explained by the appearance of a new range of low cost equipment available to the most part of consumers.

Following the massification of tridimentional printing it was decided to study the level of difficulty that a common user might face using this kind of equipment. The exponential growth of this new market leads to the appearance of variations, being one of those the three-dimensional food printing. Both concepts are connected since it could be perceived advantages that additive manufacturing could offer to the food industry. In a close future, it will be possible to print any kind of food trough a nozzle with the nutritive quantity desired, originating richer, healthier and more controlled meals. Currently, every kind of food that can be processed in form of a paste can be printed in a desired shape. This evolution matters if it can be available to everyone, accordingly, this is why this study was made and divided in two parts.

The first part of this study intends to recognize the biggest challenges that this topic offers, exposing the major problems and finding a way of solving them. Accordingly, it was elaborated an intensive study about the assembly, configuration and usage of a RepRap Prusa I3 3D printer. This kind of equipment was the ideal for this task since it is simpler than the others, with the biggest possibility of modification and, of course, low cost.

The second part of this project was dedicated to developing an extrusion equipment capable of using a large range of materials in paste form, focused in the cake industry with sugar pastes. This extruder should allow the deposition of new materials that could not be used, since they have a more solid consistency at low temperatures. RepRap Prusa uses a polymer filament extruder, which is assembled and configured in a completely different way, however this new application implies the removal of the original extruder and the creation of new configurations in several software and firmwares so it can be used with a large range of materials. This new extruder was designed and prototyped with two separated temperature controls and a refrigeration unit, allowing these new materials to be tested, which before could not be used in this kind of conditions. Besides, this construction had to be low cost, so the structure was created with a similar RepRap equipment. Several problems occurred during the extruder's construction, application and configuration leading to a more profound knowledge about the programing behind the machine.

The study's last phase was the testing with the new extruder and two different types of pastes. Firstly, Nutella chocolate paste was used, which was simpler to use, and didn't need any kind of temperature control leading to the first bundle of configurations. Then the sugar paste was tested in a way of getting the right configurations and putting it operational for usage. These tests were a success, demonstrating that the equipment's functionality were accordingly to foreseen data.

Lastly, this study and the development of this kind of application provides us a new way of surpassing barriers imposed by nature, unlocking with this concept a strict way controlling temperatures, originating in the usage of a new range of materials in the food industry.

The sugar paste prototypes already produced opened different opportunities to improve the surface quality, use pastes with different colours, more than one extruder and others, that ultimately will open the possibility to create a small business in the cake design área.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Jorge Lino Alves, orientador, pela disponibilidade e entrega que teve ao longo do período de trabalho. Um enorme obrigado pela paciência demonstrada e pela iniciativa de contacto com empresas e pessoas relacionadas com este tema, o que me proporcionou estabelecer contactos com vista ao ingresso no mercado de trabalho.

Ao meu amigo André Costa que se disponibilizou a fazer sociedade comigo na compra do equipamento necessário para a elaboração deste projeto e por todo o apoio ao longo do processo.

Ao meu amigo Doutor Pedro Paixão Pereira por se ter disponibilizado para reler este projeto e por todo o aconselhamento dado ao longo desta etapa.

Ao Sr. Emanuel Ferreira da Hello3dprintingworld, pela prontidão na ajuda e disponibilidade na resolução de problemas do equipamento.

Ao Sr. Maurício Martins da Leds & Chips pela paciência, disponibilidade e dedicação que demonstrou quando me deparei com problemas de funcionamento do equipamento.

À Inês Santos Martins De Pinho, nutricionista, pelo aconselhamento sobre a parte alimentar mais complexa.

À minha namorada, Inês Lima, por toda a paciência, ajuda e dedicação demonstrada ao longo da elaboração de todo este projeto.

Aos meus amigos João Santos, Daniel Caetano, André Silva e Sérgio Freitas por todo o apoio e motivação ao longo destes meses.

Em especial, agradeço aos meus Pais, pois sem eles nada disto seria possível. Obrigado pela paciência e apoio incondicional ao longo de todos estes anos de estudo e em especial ao longo deste projeto que me retirou muito tempo e disponibilidade para estar com eles, mas que se mantiveram sempre ao meu lado neste longo caminho.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

CAPÍTULO 1 - Introdução 1

1.1 - Enquadramento da dissertação 1

1.2 - Objetivos 1

1.3 - Organização dos temas abordados 2

CAPÍTULO 2 - Fabrico Aditivo 3

2.1 - Fundamentos básicos 3

2.2 - Processo de criação. 4

2.2.1 - Desenho CAD ou digitalização 4

2.2.2 - Manipulação do ficheiro 4

2.2.3 - Configuração da máquina 5

2.2.4 - Construção 5

2.2.5 - Remoção e processamento 5

2.3 - Equipamentos de alto custo 7

CAPÍTULO 3 - Impressão 3D de baixo custo 8

3.1 - Crescimento da impressão 3D 8

3.1.1 - Qual a sua importância? 9

3.1.2 - Fases evolutivas 10

3.2 - Tipos de equipamentos de baixo custo 11

3.2.1 - *Open VS Closed source* 12

3.2.2 - Marcas 17

3.2.3 - Comparações 36

3.3 - *Software* 40

3.3.1 - Modelação CAD 40

3.3.2 - Slicing/CAM 42

3.3.3 - Controladores de impressão 44

3.4 - Materiais utilizados 46

3.4.1 - Impressão por fusão de filamento 46

3.4.2 - Propriedades dos materiais 49

3.5 - Impressão de pasta 51

3.5.1 - Extrusores utilizados 52

3.5.2 - Pasta de açúcar 57

CAPÍTULO 4 - Futuro da Impressão 3D 58

4.1 - Impressão Alimentar 59

4.1.1 - Prototipos de impressão alimentar 59

4.1.2 - No que se poderá tornar 63

4.1.3 - Conceito Cornucópia 64

4.1.4 - Gel de Hidrocolóides 66

4.2 - Possibilidades na saúde 69

4.2.1 - Alimentação e saúde 69

4.2.2 - Ossos 70

4.2.3 - Proteses dentárias 71

4.2.4 - Impressão celular e Tecido vivo 72

4.3 - Possibilidades na Engenharia 74

4.3.1 - Circuitos eletrónicos 74

4.3.2 - Microbaterias 75

4.3.3 - Nanocompósitos 76

4.3.4 - Construção civil 77

4.4 - Design 78

4.5 - Educação 80

4.6 - Princípios morais e segurança 82

4.6.1 - Moral e patentes 82

4.6.2 - Segurança do utilizador 82

4.7 - Dificuldades 84

CAPÍTULO 5 - Procedimento experimental 85

5.1 - Construção Reprap *prusa i3* 85

5.1.1 - Caraterísticas 86

5.1.2 - Montagem 87
5.1.3 - Montagem de *Hardware* 91
5.1.4 - Programação Arduino+RAMPS 94
5.1.5 - Funcionamento de *software* 97
5.2 - Desenho e construção de extrusor de pasta de açúcar 103
5.2.1 - Princípios de funcionamento 103
5.2.2 - Desenho e construção 104
5.2.3 - Aplicação ao *hardware* 106
5.2.4 - Fio Crómio Níquel 107
5.2.5 - Produção do extrusor 108
5.3 - Configuração de funcionamento do extrusor 112
5.3.1 - Testes de funcionalidade 114
5.3.2 - Configuração slicer para extrusão de pasta sem temperaturas 117
5.3.3 - Configuração slicer para extrusão de pasta de açúcar 120
5.3.4 - Resultados 127
5.3.5 - Problemas de funcionamento persistentes e possiveis resoluções 129
CAPÍTULO 6 - Conclusões e trabalhos futuros 130
6.1 - Conclusões 130
6.2 - Trabalhos futuros 132
Bibliografia 133
ANEXOS 136
ANEXO A - Lista de componentes Prusa i3 136
Componentes impressos (Estruturais) 136
Componentes impressos (Extrusor) 138
Componentes Impressos (Periféricos) 138
Componentes Mecânicos 139
Componentes Estruturais 140
Veios, varões roscados e parafusos 140
Componentes Eletrónicos 141

Anexo B - Lista de componentes do extrusor 142

Componentes impressos 142

Outros componentes 143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da cadeia do Fabrico Aditivo 6
Figura 2 - Crescimento mundial da venda de impressoras 3D [5] 9
Figura 3 - Reprap Darwin 1.0 [11] 14
Figura 4 - Evolução e ramificações da Reprap Darwin [12] 15
Figura 5 - Conceito Fab@home 1.0 [13] 16
Figura 6 - Makerbot Replicator Mini [15] 18
Figura 7 - Makerbot Replicator 2 [15] 19
Figura 8 - Makerbot Replicator [15] 19
Figura 9 - Ultimaker Original [19] 21
Figura 10 - Ultimaker 2 [19] 22
Figura 11 - Afinia H-480 [20] 23
Figura 12 - UP Mini [21] 24
Figura 13 - UP Plus 2 [21] 25
Figura 14 - Type A Series 1(2013) [22] 26
Figura 15 - Type A Series 1 (2014) [22] 27
Figura 16 - Cubify Cube 2 [23] 28
Figura 17 - Cubify Cube 3 [23] 29
Figura 18 - Cubify Cube X [23] 29
Figura 19 - Felix 2.0 [24] 31
Figura 20 - Felix 3.0 [24] 32
Figura 21 - Printbot Simple [25] 33
Figura 22 - FabTotum[26] 34
Figura 23 - Interface do software Slic3r 43
Figura 24 - Interface do Controlador Repetier-Host [28] 45
Figura 25 - Extrusor REPRAPBCN [33] 52
Figura 26 - Makerbot frostruder [16] 53
Figura 27 - Richrap universal extruder [34] 54
Figura 28 - FAB@HOME MK1 [13] 55
Figura 29 - Extrusão de vieiras [4] 59
Figura 30 - Caramelo impresso com Candyfab [4] 60
Figura 31 - Chocolatier[4] 61
Figura 32 - Objetos comestíveis fabricados através de insectos[40] 61
Figura 33 - Impressão em açúcar com ChefJet[42] 62
Figura 34 - Formas em açúcar impressas pela Chefjet da 3D Systems [42] 62
Figura 35 - Virtuoso mixer [43] 65
Figura 36 - Digital Fabricator [43] 65
Figura 37 - Envisiontech (Esquerda) e Sciperio Comercial Printers (Direita) [49] 73
Figura 38 - Impressão de microbateria [51] 75
Figura 39 - Estrutura da Microbateria impressa [51] 76
Figura 40 - Padrão interno duma parede impressa tridimensionalmente 77
Figura 41 - Interface Grasshoper3D para Rhinoceros [52] 78
Figura 42 - Sapato impresso em 3d por ross barber london college of fashion (Esquerda cima), Mesa de café em forma de árvore (Direita cima) [4], Base de dados grasshopper3d (Baixo) [53] 79
Figura 43 - Reprap prusa I3 86
Figura 44 - Montagem eixo x 87
Figura 45 - Montagem eixo y 88
Figura 46 - Montagem Eixo z 88
Figura 47 - Montagem após acoplamento dos eixos 89
Figura 48 - Montagem da Heated Bed 89
Figura 49 - montagem Extrusor Wade 90
Figura 50 - Aplicação de suportes e sensores de fim de eixo 90

Figura 51 - Montagem final *91*
Figura 52 - Ramps 1.4 e arduino mega 2560 ..... *91*
Figura 53 - Acoplamento Ramps+arduino+drivers *92*
Figura 54 - Conexões de elementos ao controlador *93*
Figura 55 - Interface de configuração Slic3r *97*
Figura 56 - Interface do controlo manual do Repetier-Host *100*
Figura 57 - Coágulos na impressão *102*
Figura 58 - Defeito em baixos perímetros *102*
Figura 59 - Primeira versão do extrusor *104*
Figura 60 - Esquema da montagem do extrusor *105*
Figura 61 - Esquema de ligações para o novo extrusor *106*
Figura 62 - Calculador fio de níquel-crómio[57] *108*
Figura 63 - Partes impressas *109*
Figura 64 - Filamento de crómio-níquel fixado no copo *110*
Figura 65 - Vista em perspetiva (esquerda) e lateral (direita) *111*
Figura 66 - Controlo de temperaturas dos termístores *115*
Figura 67 - Teste de temperaturas da ponta aquecida *115*
Figura 68 - Teste de aquecimento do copo *116*
Figura 69 - Seringa com enchimento de Nutella (esquerda); montagem no extrusor (direita) *117*
Figura 70 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido (direita) *118*
Figura 71 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido(direita) *119*
Figura 72 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido (direita) *120*
Figura 73 - Novo êmbolo (esquerda); extrusor com filamento aquecido (direita) *121*
Figura 74 - Impressão pasta de açúcar - Teste 1 ..... *121*
Figura 75 - Impressão pasta de açúcar - Teste 2 ..... *122*
Figura 76 - Impressão pasta de açúcar - Teste 3 com repetier (em baixo) *123*
Figura 77 - Impressão pasta de açúcar - Teste 4 ..... *124*
Figura 78 - Impressão pasta de açúcar - Teste 5 ..... *124*
Figura 79 - Impressão pasta de açúcar - Teste 6 ..... *125*
Figura 80 - Impressão pasta de açúcar - Teste 7 altura *125*
Figura 81 - Impressão pasta de açúcar - Teste 8 Ângulos *126*
Figura 82 - Impressões finais 1 ..... *127*
Figura 83 - Impressões finais 2 ..... *128*
Figura 84 - Componentes impressos (Estruturais) *137*
Figura 85 - Componentes impressos (extrusor) *138*
Figura 86 - Componentes impressos (Periféricos) *138*
Figura 87 - Componentes mecânicos *139*
Figura 88 - Componentes estruturais *140*
Figura 89 - Componentes eletrónicos Reprap Prusa i3 ..... *141*
Figura 90 - Componentes impressos para extrusor de pasta *142*
Figura 91 - Componentes estruturais e elétricos do Extrusor *143*

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de características de impressoras de alta gama 36
Tabela 2 - Ratings toptenreviews.com para gama alta [27] 37
Tabela 3 - Comparação de características de impressoras de gama média 38
Tabela 4 - Ratings toptenreviews.com para gama média [27] 38
Tabela 5 - Comparação de características de impressoras de gama baixa 39
Tabela 6 - Taxas de adoção [7] 43
Tabela 7 - Taxa de adoção de controladores de impressão 45
Tabela 8 - Tensão média de cedência, Alongamento na cedência e modulo de elasticidade para componentes impressos com Reprap [32] 49
Tabela 9 - Comparação PLA, extrudido e tabelado 50
Tabela 10 - Comparação abs extrudido e tabelado 50
Tabela 11 - Tabela de comparação de alimentos[44] 67
Tabela 12 - Consistências conseguidas [44] 67
Tabela 13 - Siglas do controlador RAMPS 93
Tabela 14 - Testes de funcionalidade do extrusor 112
Tabela 15 - Testes de pasta 113

ABREVIATURAS

3D - Três dimensões

3DP - Impressão tridimensional

ABS - *Acrilonitrilo butadieno estireno*

CAD - Desenho assistido por computador

CAM - Fabrico assistido por computador

CNC - Controlo numérico computadorizado

FA - Fabrico aditivo

FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto

FDM - Deposição de material fundido

HDPE - Polietileno de alta densidade

LOM - Fabricação de objetos por camadas

MDF - Fibra de média densidade

MIT - *Michigan Institute of Technology*

PC - Policarbonato

PLA - Ácido polilático

PVA - Ácido polivinílico

PTFE - Politetrafluoretileno

RepRap - *Replicating Rapid Prototyper*

RAMPS - *Reprap Arduino Mega Pololu Shield*

SL - Estereolitografia

SLS - Sinterização seletiva por laser

STL - *Standart Tessellation language*

TAC - Tomografia axial computadorizada

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO

O tema proposto para a dissertação vem no seguimento de trabalhos na FEUP de estudantes do Mestrado em Design Industrial e de Produto, que têm vindo ao longo do tempo a desenvolver e explicar a impressão 3D, as suas capacidades e oportunidades futuras. Com o aparecimento da impressão tridimensional de baixo custo é necessário estudar o impacto que esta pode causar no dia-a-dia dos consumidores.

Com a evolução e rápido crescimento das vendas das impressoras tridimensionais de baixo custo, um estudo académico sobre as vantagens deste tipo de tecnologia é de maior interesse.

A parte alimentar da impressão tridimensional é a atual proposta, mais específica em estudo. Sendo um tópico ainda pouco explorado revela-se de maior interesse pois poderá a vir alterar os hábitos diários de todos os consumidores.

1.2 - OBJETIVOS

A dissertação sobre a impressão tridimensional foi realizada com o intuito de entender e explicar o seu conceito. Com o crescimento deste mercado é importante saber o que pode ou não ser feito através desta tecnologia. Há a intenção de explicar o seu funcionamento bem como todo o tipo de configurações de um equipamento padrão. Esta explicação permitirá, a quem ler esta dissertação, adquirir o conhecimento para conseguir funcionar com um equipamento similar, ou pelo menos ter uma noção mais simplificada do seu funcionamento.

Será então feito um enquadramento do que é e poderá vir a ser a impressão tridimensional e que vantagens desta tecnologia poderão vir a ser utilizadas num curto prazo de tempo.

Será também aprofundada a impressão tridimensional de elementos comestíveis. Sendo este um dos tópicos de discussão mais fortes dos equipamentos de baixo custo, será estudada uma forma de como o aplicar de uma maneira vantajosa e produtiva.

Esta dissertação tem como objetivo a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DOS TEMAS ABORDADOS

Este estudo está divido em duas partes, sendo a primeira uma pesquisa e estudo bibliográfico do conceito de impressão tridimensional, enquanto a segunda é referida como a parte experimental, onde se irá proceder ao estudo e desenvolvimento de um equipamento.

A parte bibliográfica foi estruturada de forma a dar a conhecer a sequência de processos envolvidos na impressão tridimensional, os equipamentos e *software* disponíveis que se adequam a cada utilizador. Será também discutido o tipo de materiais atualmente existentes no mercado e as suas utilizações, criando um guia de utilização para o consumidor.

Dentro desta parte bibliográfica será também estudado o futuro da impressão 3D, tanto para modelos de baixo custo como para equipamentos mais rigorosos. Dentro deste capítulo será dada especial atenção à componente alimentar, pois existirá um envolvimento desta com a componente prática. Contudo, serão estudados os avanços que poderão ser alcançados em áreas como a saúde, a engenharia, o design e a educação.

Através da componente experimental, será criado como que um guia dos *software*, explicando o seu funcionamento, utilizações e formas corretas de manuseamento ao longo do processo de impressão de um modelo físico.

Será explicada a montagem e programação de um equipamento de impressão 3D de baixo custo. Este capítulo será importante no ponto de vista do utilizador, descobrindo as maiores falhas e dificuldades existentes, no caso da utilização de um equipamento desta categoria. Por fim, será estudada a impressão alimentar e criado um dispositivo funcional com a impressora. Este equipamento irá permitir a utilização de vários componentes alimentares desbloqueando uma nova barreira na impressão tridimensional.

CAPÍTULO 2 - FABRICO ADITIVO

2.1 - FUNDAMENTOS BÁSICOS

O Fabrico Aditivo, como o seu nome indica, é a criação de objetos através da adição de material por camadas comandado por um modelo 3D. Denomina-se impressão 3D quando existe a deposição de um material através de um bico de extrusão. Apesar de diferentes, os dois conceitos podem ser usados com a mesma finalidade, sendo a designação mais comum a de "impressão 3D" ou "3DP" que, contrariamente a outros métodos de fabrico que consistem na remoção de material, aplica material por adição sucessiva de camadas.

O processo utilizado para a criação de uma peça neste tipo de fabrico, independentemente do método de Fabrico Aditivo (FA) utilizado, consiste no desenho 3D e conversão de um modelo CAD num modelo físico [1].

Tudo o que pode ser desenhado em CAD poderá ser reproduzido num modelo físico. Utilizando o método aditivo é possível a realização de formas complexas, ligadas entre si, sem a necessidade de alterações funcionais da máquina. Podem ser impressas peças diferentes e, em alguns casos, de vários materiais sem necessidade de montagem dos diferentes componentes. São assim ultrapassadas as dificuldades do processo produtivo tradicional. Relativamente aos custos deste processo de fabrico, verifica-se que o custo de produzir uma peça de elevada complexidade é equivalente ao custo de produzir uma peça de baixa complexidade, dependendo este custo apenas da dimensão da peça.

Trata-se de um processo iterativo, ou seja, caso se detete um erro no modelo físico, este é facilmente corrigível a um custo mínimo, aumentando, assim, a flexibilidade de todo o processo.

A prototipagem é um processo essencial no desenvolvimento de um produto e estes itens criam uma nova perspetiva sobre toda esta atividade. Frequentemente, para a conceção de uma peça é necessário um modelo físico, tanto para definir a ergonomia como a própria funcionalidade da peça pelo que, sem o fabrico aditivo a obtenção deste modelo físico é muito mais demorada e custosa. Com a utilização do Fabrico Aditivo, um erro detetado no modelo físico é facilmente corrigível antes do fabricante incorrer num investimento maior para a produção em larga escala [2].

No FA é possível, a um menor custo, ter uma maior garantia de que o protótipo não terá luz verde para produção com defeitos. Este capítulo irá dedicar-se à explicação do método de fabrico e processamento de objetos por FA tendo em conta equipamentos de alto e baixo custo. Sendo que os equipamentos de alto custo serão os que necessitam de um tipo de tratamentos pós impressão mais elevados. Uma vez que o tema desta dissertação não reside na impressão de alto custo, os tipos de equipamentos existentes só serão mencionados brevemente.

2.2 - PROCESSO DE CRIAÇÃO.

O Processo de criação por Fabrico Aditivo consiste numa cadeia de etapas. Esta cadeia inicia-se no desenho CAD e termina quando se obtém o objeto físico. Existem várias etapas, sendo variáveis de peça para peça e de máquina para máquina.

Apesar do conceito de FA ser igual para todos os processos, o *hardware* a ser utilizado tem, sempre, uma maior importância relativamente às especificações a serem definidas.

No FA esta cadeia é essencial para o desenvolvimento do produto. Numa primeira fase a peça a desenhar poderá ser menos detalhada do que a peça final, porem, quando ocorre este desenvolvimento torna-se vantajoso o processo iterativo, pois quando a peça é processada poderá ser ou não precisa uma fase de acabamento.

Para um melhor entendimento, demonstra-se, de seguida, quais as etapas envolvidas no processo de criação de um objeto por Fabrico Aditivo [2].

2.2.1 - DESENHO CAD OU DIGITALIZAÇÃO

Nesta etapa é criado o desenho ou faz-se a manipulação do mesmo. Consiste na aplicação do *software* CAD 3D criando, através de formas geométricas simples, o objeto em causa. O modelo final irá corresponder ao produto a obter.

A forma desejada também poderá ser obtida por digitalização de um objeto existente, o *software* CAD 3D terá de ser utilizado para manipular essa imagem de forma a ficarmos com um modelo mais correto.

O ficheiro de saída será sempre no formato STL, independentemente do *software* em utilização, pois este formato será o único a ser lido no passo seguinte [1].

2.2.2 - MANIPULAÇÃO DO FICHEIRO

O ficheiro é recebido pelo *software* de manipulação, onde será alterado e corrigido para ser obtida uma melhor qualidade de impressão. Se necessário, é melhorado o posicionamento da peça na zona de impressão e poderá haver a colocação em simultâneo de outras peças e alteração de orientações das mesmas [1].

2.2.3 - CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA

Esta fase pode acontecer em conjunto com a anterior, tudo depende do *software* em utilização. É nesta etapa que serão definidos os parâmetros de impressão que vão limitar a velocidade de impressão, a espessura das camadas, as temperaturas de impressão, temperatura do extrusor e da placa, entre outros.

Neste passo podem ser englobados um ou mais *software*. Um deles definirá o Código G da peça, enquanto o outro dará a ordem à máquina para refinamento de outros parâmetros. O código G consiste no caminho que o extrusor terá de percorrer dando origem ao modelo físico [1].

2.2.4 - CONSTRUÇÃO

Aqui o modelo virtual torna-se físico num processo automatizado pelo passo anterior. A máquina irá executar todos os comandos que lhe foram indicados, não sendo obrigatória a supervisão humana, no entanto será sempre aconselhável a presença de um responsável visto ser nesta fase do processo que ocorrem a maioria dos erros. Estes erros podem variar, desde a falta de material, calibração da máquina, deformações indesejadas do material, entre outros [1].

2.2.5 - REMOÇÃO E PROCESSAMENTO

Após a impressão da peça estar completa ocorre a extração desta da máquina, este processo dependerá do tipo de *hardware* em causa, assim como do nível de complexidade e delicadeza do modelo impresso. A peça será agora processada, ou seja, haverá a remoção de materiais de suporte e possíveis excessos de material depositado. Além disso, será sujeita a um tratamento das superfícies que poderão não ser as ideais para apresentação do protótipo [1].

Na figura 1 é representada a cadeia de tarefas para produzir um objeto por FA.

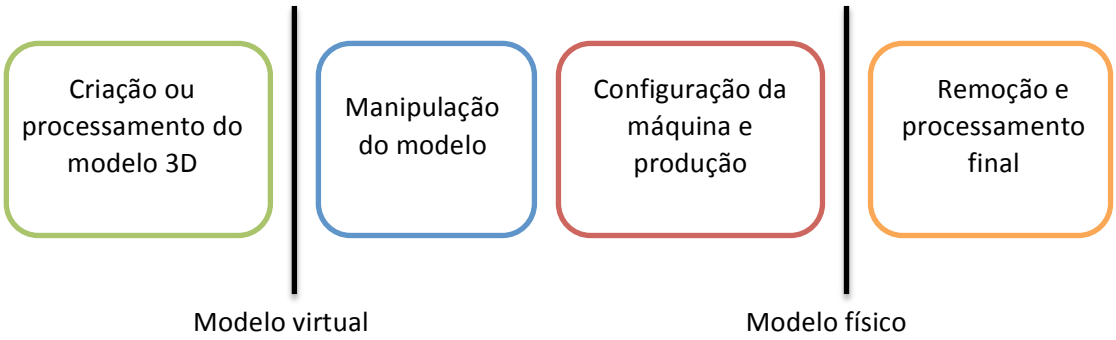


Figura 1 - Representação da cadeia do Fabrico Aditivo

Esta cadeia produtiva pode ser dividida em várias fases, na primeira situa-se a criação ou digitalização e edição de um objeto. Neste momento existe um ficheiro CAD que será transformado em STL. Na segunda fase há a manipulação do modelo de acordo com o método e a zona de impressão. Poderão ser posicionadas uma ou mais peças para impressão, sendo criado o código G (*G-Code*). O código G consiste num tipo de programação, tendo sido importado do fabrico por CNC, este indica os movimentos que a ferramenta deverá percorrer, assim como outros parâmetros de funcionamento essenciais.

A segunda parte desta etapa é a configuração da máquina em relação ao Código recebido, daí serão definidas as temperaturas e as velocidades de trabalho, dando-se o início da produção.

A última etapa consiste na remoção e processamento final, que poderá incluir a remoção de suportes, acabamento de superfícies ou pintura.

O processo de criação é similar para a maior parte dos tipos de *hardware* aditivo, havendo sempre diferenças de *software*, isto porque, algumas têm os seus próprios meios de processamento do modelo ainda virtual ou STL, e outras não. Estas diferenças situam-se nas etapas de manipulação e configuração.

Apesar de ser um processo automatizado, requer muita atenção do utilizador, não tanto durante o processamento, mas no início e no final. A preparação e manutenção das máquinas é essencial, visto que estas apresentam um elevado grau de detalhe e contêm componentes de grande precisão, tais como, lasers e extrusores (que sem uma revisão cuidada provocarão defeitos de impressão, entre outros).

Outro parâmetro a ter em conta é que a matéria-prima para este tipo de operações varia de processo para processo, certos fabricantes só permitem o uso dos seus próprios materiais. Será preciso também ter em conta que alguma da matéria-prima tem vida finita e poderá ser contaminada por contacto com outros materiais.

Apesar de uma grande parte da matéria-prima do Fabrico Aditivo ser reciclável, material de má qualidade poderá ficar mais dispendioso a longo prazo [2].

2.3 - EQUIPAMENTOS DE ALTO CUSTO

Como previamente referido, esta dissertação não é dedicada ao estudo da impressão através de equipamentos de alto custo. No entanto fica uma breve noção sobre os tipos de equipamentos existentes.

Estereolitografia (SL) – Fotopolimerização de partículas através de um feixe laser de raios ultravioleta;

Sinterização seletiva por laser (SLS) – Incidência de feixe laser em pó polimérico sintetizando um pó polimérico;

Sinterização por laser de Metal (SLM) – Variação do processo anterior, desenvolvido para processamento de metais;

Electron Beam Melting (EBM) – Processo similar ao de SLM com a utilização de um feixe de eletrões ao contrario do feixe laser;

Modelação por extrusão de plástico (FDM) – Deposição de materiais por camadas numa plataforma aquecida através de um bico de extrusão. Processo do qual derivou a impressão de baixo custo.

Impressão tridimensional – Powder-Binder Bonding, baseia-se na ligação entre partículas através da injeção de um ligante líquido em partículas de origem polimérica.

Prometal – Processo derivado do anterior onde existe projeção de um ligante polimérico num pó metálico.

Fabricação de objetos por camadas (LOM) – Sobreposição de folhas de papel cortadas a laser de modo a criar uma forma [2].

Para obtenção de mais informação sobre estes processos deverão ser consultados os livros *Understanding Additive Manufacturing* [2] e *Additive Manufacturing Technologies* [1] onde estão disponíveis todos os detalhes sobre funcionamento e tecnologias destes métodos mais utilizados.

CAPÍTULO 3 - IMPRESSÃO 3D DE BAIXO CUSTO

3.1 - CRESCIMENTO DA IMPRESSÃO 3D

Antes de falar sobre as impressoras *low cost*, é necessário explicar a causa do crescimento exponencial do fabrico com este tipo de equipamento.

No ano de 2013 foi registado um aumento nas vendas de 34.9%, o maior valor registado até à data neste mercado, valor que corresponde a 2.42 biliões de euros a nível mundial. Durante a última década o crescimento médio foi de 27%, sendo que nos últimos 3 anos foi de 32.3%, de acordo com o *Wohlers Report* de 2014 [3].

Foi estimado também por Terry Wohlers que em 2011 a impressão tridimensional gerou um movimento de 1.33 biliões de euros globalmente. Cerca de 40% das empresas de impressão 3D estão sediadas nos Estados Unidos, a Alemanha e o Japão representam 10% cada e a China aproximadamente 8.5%, sendo difícil avaliar corretamente este valor. A restante percentagem está espalhada pelo resto do mundo [4].

Este crescimento foi potenciado pelo aparecimento de equipamentos de valor inferior a 4000 euros. As impressoras 3D de escritório estão na raiz de um avanço tecnológico que não era visto há mais de 20 anos.

A razão para este crescimento súbito relaciona-se com o aparecimento de novas técnicas de baixo custo, especialmente com a facilidade de utilização para novos consumidores. Na área da prototipagem, o acesso a técnicas de fabrico aditivo com um investimento relativamente baixo, pode ser um fator decisivo para o futuro das empresas. [3].

Na figura 2 é possível verificar que a venda de impressoras 3D até ao ano 2000 não chegava às 2000 unidades, tanto a nível empresarial como a consumidores particulares. A partir de 2007 já eram vendidas mais de 5000 unidades anuais, sendo que pela primeira vez, foram vendidas mais ao consumidor final que às empresas. Desde 2010 a diferença cresceu drasticamente.

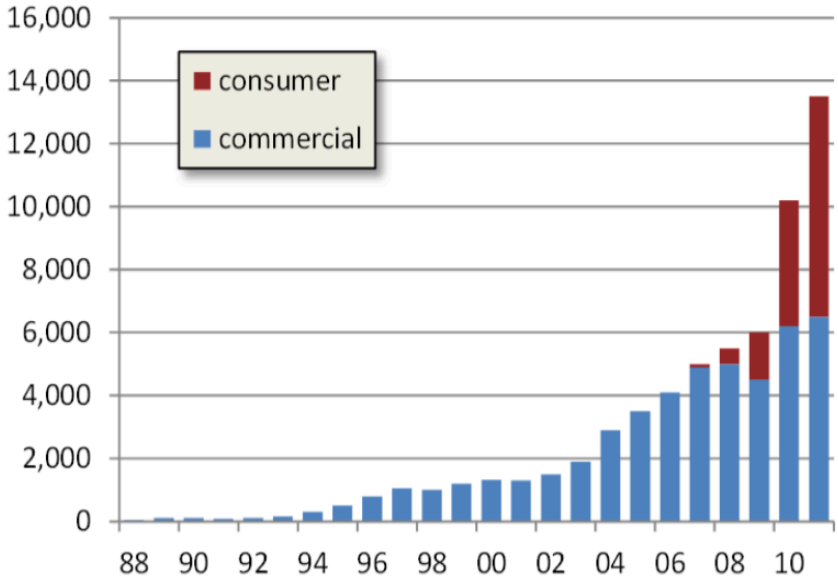


Figura 2 - Crescimento mundial da venda de impressoras 3D [5]

3.1.1 - QUAL A SUA IMPORTÂNCIA?

De que maneira uma impressora 3D pode ser rentável na indústria?

O princípio fundamental neste sector é o fabricar barato e em muita quantidade para obter lucro. Como poderá ser rentável imprimir um modelo enquanto no mesmo intervalo de tempo uma máquina de injeção consegue produzir 2 ou 3?. A impressão 3D oferece às empresas uma maneira de venderem os produtos de uma maneira diferente, o conceito de personalização entra em cena. Os produtores em grande escala conseguem agora oferecer pequenas séries sem terem investimentos desnecessários [6].

Por exemplo, uma empresa de brinquedos decide fabricar um novo modelo de carro. Para a sua produção serão necessários vários moldes de injeção, sendo que cada um deles custará, aproximadamente 100000 euros. Como o principal objetivo é obter lucro, a empresa terá que produzir na ordem dos milhões para conseguir ficar com saldo positivo. E se receber uma ordem de produção de 3000 unidades de uma edição especial desse modelo, que é ligeiramente diferente do modelo original? Existem variadas hipóteses de resolução para este cenário: compra um molde novo e tem prejuízo, compra um molde novo e aumenta o preço do brinquedo, ou imprime em 3D [6].

O fabrico aditivo permite que um modelo x seja diferente de um modelo y, exatamente com o mesmo custo de produção. O que irá diferenciar o modelo x do modelo y será apenas o desenho no ficheiro CAD, enquanto com outras técnicas de produção os

componentes têm que ser produzidos em separado. Com a impressão 3D o modelo pode ser feito só de uma vez e com vários materiais diferentes.

A produção em massa requer linhas de montagens onde normalmente cada uma das partes tem uma origem geográfica diferente. Isto gera inventário, que por sua vez, gera desperdício de capital. Para o fabrico por impressão 3D a única coisa que estará em stock será a matéria-prima da impressão. Logo, não existirá uma gama de bens processados não vendidos.[6]

Enquanto o fabrico de peças por maquinagem pode gerar um desperdício de material até 96%, por fabrico aditivo consegue-se reduzir esse gasto em 40% e deste valor apenas 5%, no máximo, não poderá ser reciclado e usado de novo.

Em suma, pode-se dizer que para uma empresa o fabrico aditivo é economicamente viável para séries pequenas, face a outros métodos de fabrico. É eficaz financeiramente porque não necessita de moldes ou ferramentas, não produz desgaste elevado, trata-se de um processo completamente automatizado sendo, somente, necessário um operador. Acresce que não existe necessidade de inventário porque há sempre matéria-prima disponível.

O Fabrico Aditivo pode ser utilizado para a produção de protótipos e dos próprios moldes para injeção, a máquina utilizada consegue produzir as suas próprias partes de substituição e pode ser aplicada em várias áreas.

Por contraposição, para produzir séries elevadas será mais dispendioso em relação à injeção, sendo o tipo acabamentos inversamente proporcional à velocidade do dispositivo, estando limitados às capacidades do dispositivo [6].

3.1.2 - FASES EVOLUTIVAS

O processo evolutivo da impressão 3D pode ser dividido em várias fases, cada uma delas consequência da anterior.

Numa primeira fase, a impressão 3D foi mais explorada na prototipagem, para a experimentação de novos conceitos antes da produção. Nesta área de desenvolvimento, um modelo físico é importante para a identificação de erros numa peça complexa, que poderá ser alterada de uma maneira simples e num curto prazo de tempo. Os conceitos de ergonomia, design e funcionalidade podem ser revistos sem qualquer tipo de problema [6].

O próximo passo é a criação do produto final, sendo o produto desenhado, impresso e vendido. Esta etapa é importante de diversas formas, como por exemplo, no caso de uma empresa que quer produzir 3 modelos de capas para *smartphones*, e sabe que o método mais eficaz, em grande escala, é a injeção. Como os moldes de injeção são bastante dispendiosos, seria arriscado produzir 3 moldes sem saber até que ponto poderiam ser rentabilizados. A escolha correta será então testar os modelos no mercado, produzindo, por exemplo, 500 unidades de cada um dos modelos, através do fabrico aditivo, condicionando esta produção à aceitação de mercado de cada um dos modelos, seguindo-se a produção do molde de injeção para o mesmo.

Isto leva-nos a um novo mercado onde o fabrico aditivo não tem concorrência, a venda de produtos torna-se "*on demand*". Uma empresa pode ter uma impressora a produzir objetos o dia todo, todos diferentes e ser rentável. O consumidor pede o produto X, e este é desenhado à medida e é impresso. Ao mesmo tempo outro artigo já estará na fase de desenho.

O grande trunfo da impressão 3D é a venda de produtos personalizados a um preço competitivo no mercado.

O terceiro passo é consequência do anterior. O próprio consumidor é dono duma impressora 3D e produz os seus próprios objetos. Aqui aparece a importância das versões "*low cost*" de fabrico aditivo. À medida que estas vão aparecendo e evoluindo, os preços tornam-se mais apelativos ao consumidor final [6].

A última barreira ao utilizador é o desenho do objeto a imprimir visto que, nem toda a gente tem conhecimento para a modelação e manipulação dos ficheiros em CAD 3D. Nestas condições uma impressora 3D é inútil? Não propriamente. Cada vez mais existe o intuito de fazer chegar ao consumidor final um produto de fácil manuseamento, estando empresas como a *Autodesk*, a desenvolver *software* acessível ao consumidor geral. A iniciativa 123D é um exemplo disso, onde qualquer pessoa pode modelar em 3D em qualquer plataforma, até no telefone.

Talvez mais importante que este desenvolvimento de *software*, são as bases de dados online, onde em sítios como o *Shapeways* e *Thingiverse,* qualquer pessoa pode deixar o seu modelo 3D, descarregar um outro e imprimi-lo.

Este é um dos motivos pelo qual o mercado das impressoras 3D de baixo custo está a crescer, é uma barreira quebrada entre o mundo virtual e o objeto físico [6].

É fácil ver como estes três passos podem funcionar em paralelo e cada um deles é uma evolução do anterior.

3.2 - TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO

Com o aparecimento e desenvolvimento do fabrico aditivo é natural que cada vez mais esta tecnologia esteja disponível para o utilizador comum.

A impressão de baixo custo baseia-se numa simplificação do processo de FDM, o seu principio básico é a deposição de um filamento fundido por um extrusor. O conceito parece simples, comparativamente ao processo industrial [1].

Existem muitas empresas a produzir impressoras de baixo custo nos dias de hoje, devendo-se tal facto à simplificação do processo complexo de FDM industrial. Atualmente a impressão de baixo custo pode ser dividida em dois ramos, *Open Source* e *Closed Source.*

Tendo uma impressora *Open Source*, não há qualquer tipo de obrigatoriedade de *software*. Como contraponto, no *Closed Source* a escolha é limitada ao que a marca ou fabricante define. O sistema fechado é maioritariamente reservado a empresas que

produzem as suas próprias máquinas, enquanto o sistema aberto disponibiliza os projetos ao publico em geral.

Apesar de usarem conceitos diferentes, as máquinas funcionam da mesma maneira, utilizando, atualmente, dois tipos de polímeros, o ABS que deriva dos combustíveis fosseis, e o PLA, que é proveniente da farinha do milho, sendo biodegradável e amigo do ambiente. As temperaturas de fusão variam consoante o material em causa e em função do fornecedor do material: o PLA é trabalhado entre os 190° e os 210°C, enquanto o ABS funciona entre os 220° e os 250°C.

Estes materiais são normalmente vendidos ao quilograma, e tanto para um como para outro, o seu valor começa nos 25euros [7].

A maior limitação das impressoras *low cost* é o volume de impressão, sendo que a plataforma de deposição tem no máximo uma área de 250x250 mm^2 e verticalmente, a máquina poderá deslocar o injetor até 200 mm.

O equipamento pode ser adquirido tanto na forma de kit de peças, como em versão final. Consoante o fabricante e a gama, uma impressora 3D deste tipo pode custar desde 300€ até 4000€ e pode ser adquirida pela internet [7].

Correntemente, quem compra um sistema destes, usa-o para investigação, com fins educativos, ou para impressões caseiras. Abre-se assim um novo tipo de possibilidades [8].

3.2.1 - *OPEN VS CLOSED SOURCE*

Havendo duas mentes a pensar no mesmo problema, sempre existirão dois critérios de resolução diferente. A história da impressão 3D de baixo custo assenta, em parte, nessa dicotomia. Os dois conceitos de resolução a que nos referimos, são conceptualizados como *Open* e *Closed Source*.

Em que variam? Um equipamento de tipo *Open Source* não tem qualquer tipo de limitações de *firmware*, de *software*, ou qualquer condicionante à sua evolução. Um equipamento de tipo *Closed Source* funciona de maneira diferente, uma marca vende o equipamento e o comprador fica limitado ao seu *software*, e poucas são as alterações possíveis na máquina.

Quais as vantagens? Depende do tipo de consumidor. Quem compra uma impressora *Closed Source* à partida, quer ter algo pronto a funcionar a qualquer momento, quer ter assistência e não tem interesse em alterar os seus componentes. Em contrapartida, o intuito do *Open Source* é a permanente evolução da máquina, e a maior parte das marcas de impressoras que agora disponibiliza o tipo *Closed Source*, anteriormente vendia equipamentos *Open Source*.

O termo *Open Source* tem origem no termo usado na internet, que representa a ideia de plataforma livre, a que todos têm acesso. Inicialmente proveniente do código de programação de *software*, agora é aplicado a variadas áreas, sendo o objetivo que todos

ajudem, tendo em vista a partilha de ideias para que enriqueçam os equipamentos e os materiais.

Para uma impressora poder ser classificada como *Open Source*, terá de o ser ao nível, do *software (Open Source software)* e ao nível do *hardware* (*Open Source Hardware*).

Open Source software

Consiste no código de computação que está sobre um *Copyright* aberto a todos. O utilizador pode usar, alterar, melhorar e distribuir como quiser e é normalmente desenvolvido numa comunidade aberta. No mesmo sentido anteriormente mencionado, grande parte dos *software Closed Source* deriva de códigos que anteriormente foram *Open Source* [9].

Open hardware

Funciona da mesma maneira que o anterior, e refere-se à parte física do mecanismo. Inicialmente tinha como propósito a disponibilização dos planos de *hardware*, da lista de materiais e dos esquemas de construção. Consequentemente, surgiram licenças com o objetivo de corrigir erros e edição dos planos disponíveis [6].

Licenças

As licenças *Open Source* apenas regem as condições em que um utilizador deverá utilizar, modificar ou redistribuir o *hardware* e o *software*.

CC ou Licença *Creative Commons* é definida pelo conceito do autor que quer partilhar o seu trabalho de uma maneira livre, permitindo assim a partilha e a edição por outrem. Ao mesmo tempo define o nível de liberdade do utilizador (por exemplo, poderá ser editada, mas não partilhada com fins lucrativos). Existem bastantes tipos de combinações de restrições que o autor poderá impor.

Licença Publica Gnu, é uma das licenças mais importantes para quem utiliza o tipo *Open Source*. A parte da licença pública baseia-se no princípio de que qualquer um pode usar o programa com qualquer intuito. Acresce que, qualquer individuo pode ler, estudar o seu funcionamento e alterá-lo à sua medida. Essa pessoa é, também, livre de redistribuir o programa a qualquer um, ressalva-se que se existir intenção de redistribuir o programa ou o novo modelo aperfeiçoado, terá obrigatoriamente de ser dado acesso ao novo código [10].

3.2.1.1 - Impressão 3D livre

Em 2004, pelas mãos de Adrian Bowyer e dos seus estudantes da Universidade de Bath, surgiu a primeira impressora 3D do tipo *Open Source* através do projeto RepRap. Este termo é o diminutivo para *Replicating Rapid Prototyper*, a primeira máquina a conseguir replicar-se a si mesma. Segundo *Adrian Bowyer "As patentes travam o desenvolvimento e este é um desses casos"* [4].

Quando iniciou este projeto *Adrian* tinha como objetivo uma máquina que pudesse produzir as suas próprias peças, ou seja, o utilizador que tivesse comprado uma RepRap, nunca mais teria que comprar outra. Incluía componentes de substituição e, mais importante, evoluções. Estes desenvolvimentos poderiam ser partilhados na comunidade, para que todos os pudessem usufruir (Figura 3). Tal desenvolvimento, assenta na filosofia *Open Source*. Como consequência, os planos da máquina foram imediatamente partilhados [4].

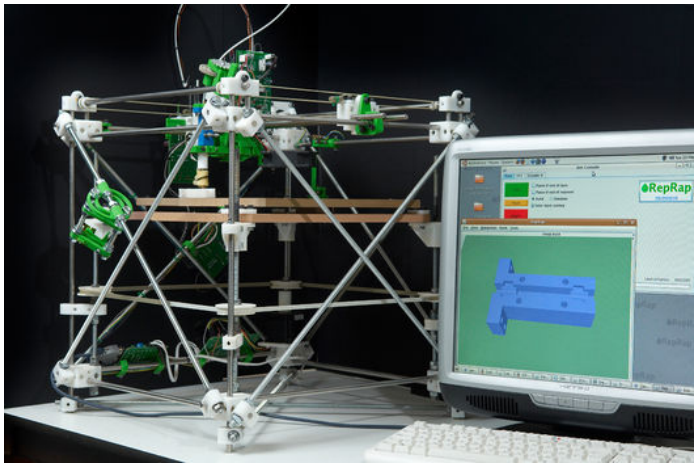


Figura 3 - Reprap Darwin 1.0 [11]

O aparecimento da Reprap causou uma revolução num mercado em que uma impressora 3D custaria no mínimo 10.000€. O nascimento de uma máquina que estaria disponível a todos, com um custo de aproximadamente 300€, deu origem a um crescimento exponencial do número de unidades no mercado.

Este equipamento funciona através da extrusão de um filamento fundido numa placa aquecida. Inspirado no conceito de FDM, *Bowyer* e os seus alunos simplificaram-no, utilizando apenas 4 motores.

Desde então os modelos de Reprap mantiveram-se em constante evolução. Atualmente existem dezenas de modelos que utilizam a arquitetura e conceito da Reprap.

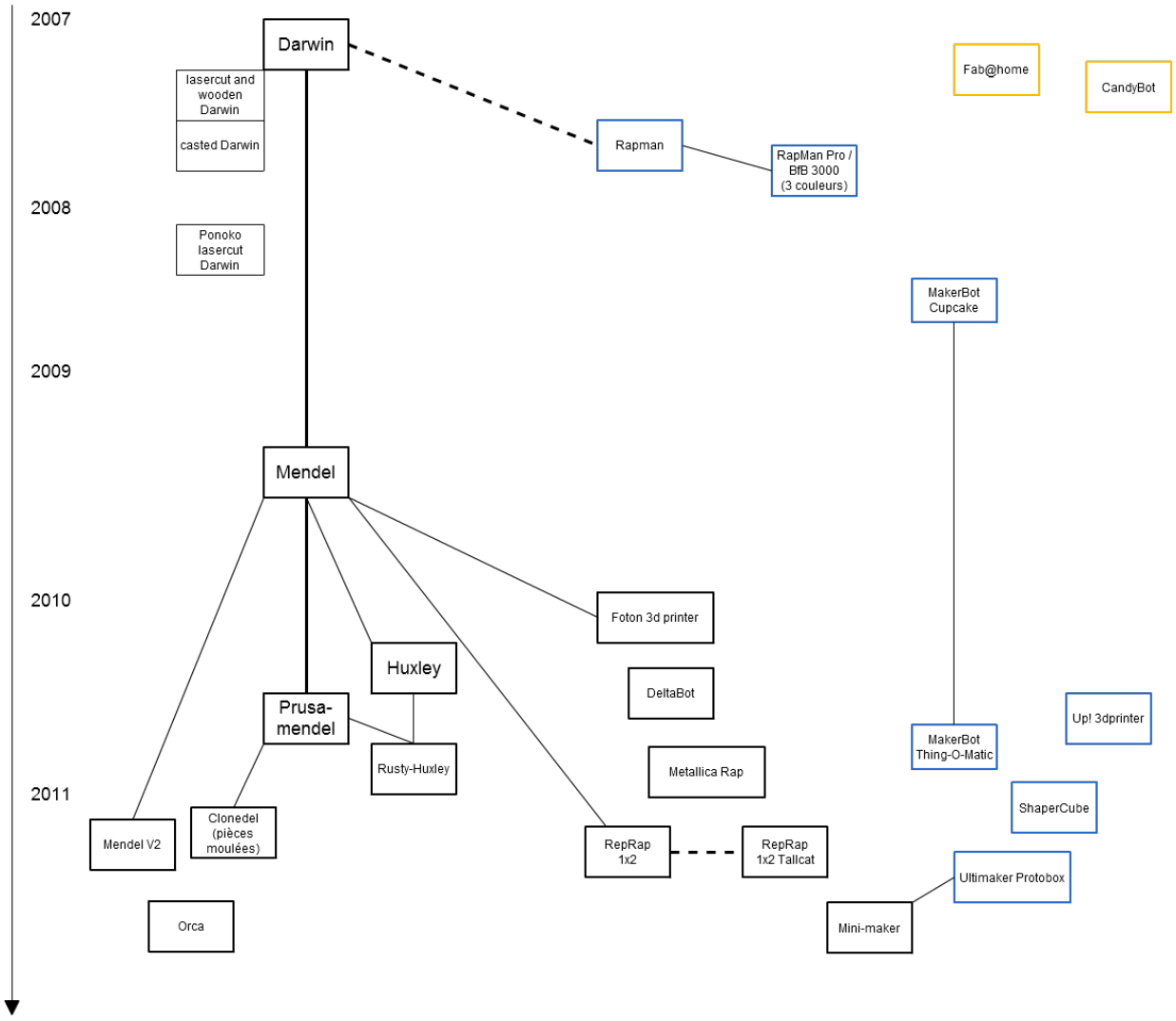


Figura 4 - Evolução e ramificações da Reprap Darwin [12]

Na figura 4 aparece a preto a evolução dos modelos descendentes da Reprap Darwin, enquanto que a azul representa-se os *spin-offs* comerciais derivados do conceito inicial. A amarelo, indicam-se outros conceitos independentes que foram aparecendo em simultâneo.

Um dos maiores desenvolvimentos contemporâneos à Reprap foi a FAB@HOME. Iniciado em 2005, na Universidade de Cornel, EUA, por *Evan Malone* e *Hod Lipson*, o aparecimento desta máquina partilha da mesma filosofia *Open Source*. Inspirada na ideologia de *Bowyer*, este conceito cresceu da mesma maneira, importando alguns dos princípios da Reprap (figura 5).

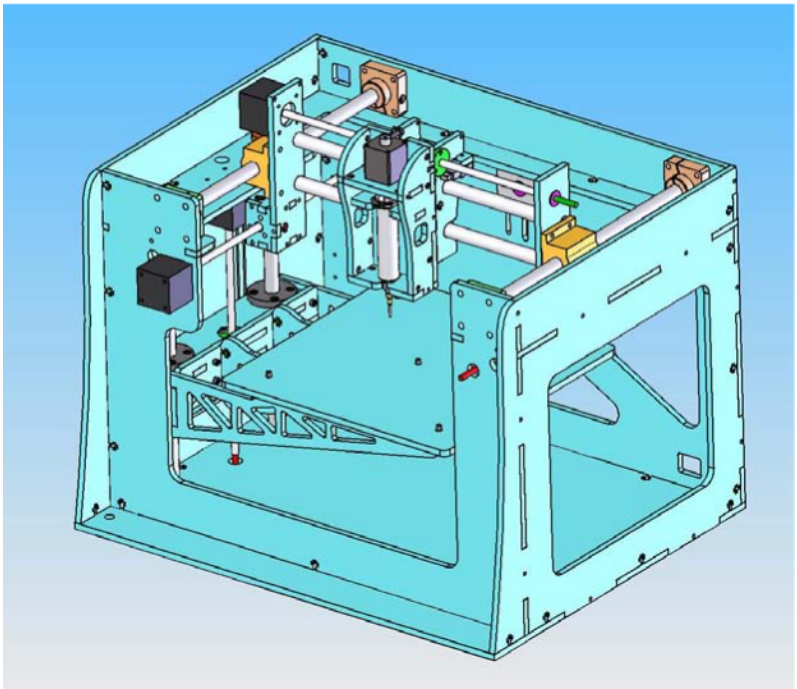


Figura 5 - Conceito Fab@home 1.0 [13]

A sua aparência difere da Reprap. Ao contrário desta, a *Fab@home* tinha uma estrutura tipo caixa, feita através de acrílico cortado, montada esquematicamente. Enquanto a estrutura do modelo de *Bowyer* foi desenhada com varão roscado M8 e porcas que permitiam uma maior rigidez e uma grande possibilidade de ajuste e alteração, este novo conceito tinha uma estrutura mais fixa. Esta foi uma das grandes preocupações da equipa de *Evan Malone* e *Hod Lipson*, tendo já em conta que o projeto iria estar livremente disponível para todos os utilizadores. Em especial, a qualidade dos materiais estruturais, revelou-se um problema.

Outra diferença deste projeto relativamente ao anterior, é que usava extrusão através de seringa. As limitações de um extrusor de seringa são maiores que o uso de filamento, pois é necessário um material em estado líquido e podem surgir complicações na solidificação após deposição [13].

Em 2009, o segundo modelo foi introduzido com melhorias a todos os níveis. Para além de alterações estruturais e mecânicas (revisão e substituição de motorizações), foram modificados os componentes electrónicos. O objetivo destas alterações, para além dos melhoramentos, foi baixar o custo médio do kit de construção. Este tinha sido dos maiores entraves ao desenvolvimento da *Fab@home*. O primeiro modelo custava perto dos 2000€, por contraposição a este novo modelo cujo preço era de 1200€ [14].

Sendo que a *Darwin* de *Bowyer*, se espalhou por todo o mundo, sendo vendida diretamente ao utilizador (devido à sua facilidade de montagem e baixo custo), o projeto *Fab@home* teve uma menor adesão. No entanto, a nível académico a aceitação deste modelo foi bastante elevada.

Desta forma, foi considerado um sucesso até à data de encerramento do projeto em 2012, quando os valores de venda de impressoras foram ultrapassados pelas vendas de *kits DIY* [4].

Apesar destes dois conceitos pioneiros não estarem isolados no mercado, todos derivaram em alguma parte da ideia de *Adrian Bowyer* e da sua filosofia de trabalho. No entanto, apesar de grande parte ter começado com base no tipo *Open Source*, nem todas se mantiveram a trabalhar desta forma. A *Rapman* e *Makerbot* foram duas das mais importantes empresas a surgirem neste campo. Enquanto a *Makerbot* se tornou posteriormente do tipo *Closed Source* e expandiu a sua gama, a *Rapman* foi adquirida por uma divisão da *3Dsystems*, a *Cube*.

3.2.2 - MARCAS

Como já referido previamente, desde o marco histórico implantado com o aparecimento do projeto Reprap, as variações surgiram, e também como já referido, o mercado da impressão 3D cresceu exponencialmente, coincidentemente com esse aparecimento.

Uma consequência do tipo *Open Source* foi o aparecimento de muitas empresas e muitas marcas derivadas do conceito inicial. Desde então, muitas se mantiveram no ativo com diferentes planos de negócio. Para uma empresa se manter rentável neste mercado, teria que ter uma das seguintes aproximações:

- Manter-se no tipo *Open Source* e vender o kit ou impressora, bem como serviços. É lógico que com este modelo de negócio a empresa não poderia ter um produto próprio, mas antes uma possibilidade de evolução tecnológica maior do produto base.
- Tornar-se do tipo *Closed Source* e vender a impressora e serviços. A vantagem seria a segurança das patentes, mas todo o desenvolvimento seria interno.

Se a empresa se conseguir destacar entre a concorrência, ou expande, ou eventualmente é comprada. A aquisição por parte de uma empresa maior ocorre nos dois tipos de plano de negócio.

3.2.2.1 - Makerbot

A *Makerbot* é a mais famosa marca de impressoras 3D. Criada em Brooklyn, Nova Yorque, pelas mãos de *Bre Pettis, Adam Mayer,* e *Zach Smith*, começou com os modelos *Cupcake CNC* e *Thing-O-Matic*, inspirada no modelo Darwin [15]. A diferença deste conceito para o original, era um novo visual muito mais apelativo que parafusos e correias visíveis.

Este é um exemplo duma empresa que começou tipo *Open Source*, e em 2012 adotou o tipo *Closed Source*, tendo sido feito um comunicado, "*Lets try that again*", no seu blog com o anuncio. Como consequência, um dos membros fundadores, Zach Smith abandonou a empresa devido a divergências ideológicas [16].

Em 2013 foi adquirida pela *Stratasys*. A gigante Americana produz impressoras 3D profissionais, com mercados muito diferentes da *Makerbot*. A sua aquisição tinha intuito de explorar este "novo" mercado *Low Cost* de Fabrico Aditivo [17].

Esta aquisição deu um novo impulso à marca que agora tem vários modelos para vários valores que completam a gama da *Stratasys*.

MAKERBOT REPLICATOR MINI



Figura 6 - Makerbot Replicator Mini [15]

Preço: 1100€

Características:

Volume de construção: 100x100x125 [mm]

Resolução: 200 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA

Software: Makerbot desktop

Ficheiros suportados: STL, OBJ, THING, Makerbot

Precisão: 11 Mícron x e y; 2,5 Mícron z.

MAKERBOT REPLICATOR 2

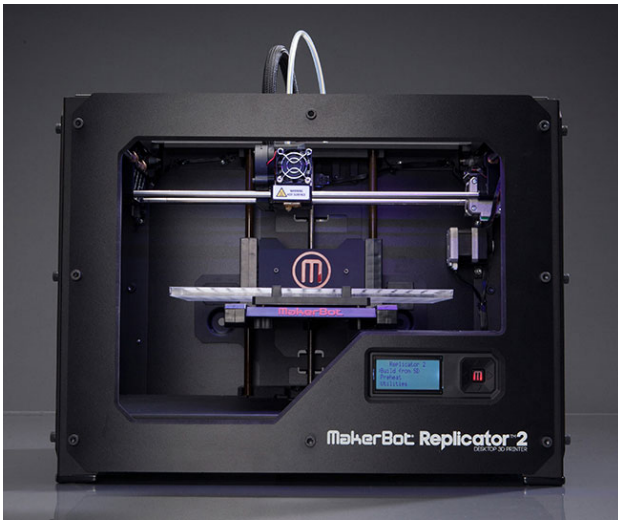


Figura 7 - Makerbot Replicator 2 [15]

Preço: 1700€

Características:

Volume de construção: 285x153x155 [mm]

Resolução: 100 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA, ABS.

Software: Makerbot desktop

Ficheiros suportados: STL, OBJ, THING, MAKERBOT

Precisão: 11 Mícron x e y, 34 Mícron z

Componentes extra: Entrada para cartão de memória.

MAKERBOT REPLICATOR (FIFTH GENERATION)

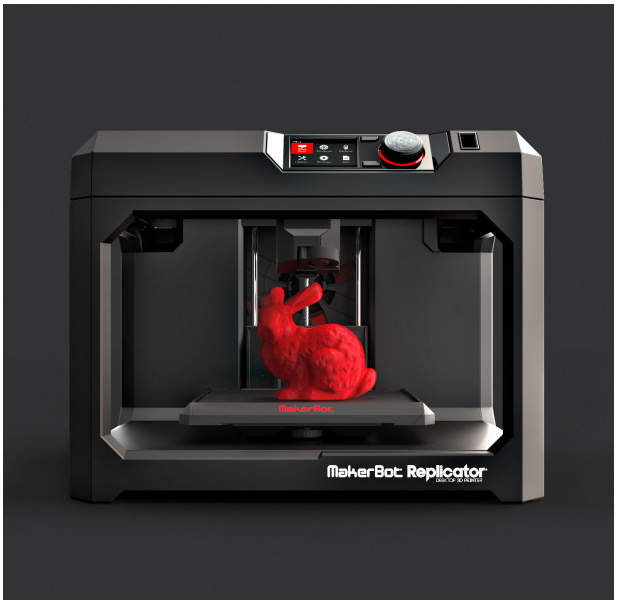


Figura 8 - Makerbot Replicator [15]

Preço: 2300€

Características:

Volume de construção: 252x199x150 [mm]

Resolução: 100 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA

Software: Makerbot desktop

Precisão: 11 Mícron x e y; 2,5 Mícron z

Componentes extra: Ligação por Wi-fi, câmara interna e conectividade com *smartphone*.

Com estes três modelos, a *Makerbot* consegue preencher todas as gamas da impressão *Low Cost*. Para os valores mais baixos (que, apesar de tudo se mantêm altos) existe a *Replicator Mini* (figura 6). Apesar de ser a mais acessível, tendo em conta as suas especificações e características, seria necessário para uma impressora com valores próximos dos 1000€ um volume de impressão superior. Sem prejuízo, a qualidade de construção compensará.

Para valores intermédios, a *Replicator 2* (figura 7), considera-se que será o melhor investimento. Permite uma resolução muito fina e alta qualidade de impressão, além de possuir refrigeração controlada automaticamente. Evoluiu comparativamente ao primeiro modelo, ao nível de ruídos e de qualidade de construção. A *Replicator 2* tem sido desde há dois anos, uma das escolhas da *Make Magazine*. O modelo *Replicator 2X* tem a vantagem de ter dois extrusores, podendo-se usar PLA e ABS em simultâneo [18].

Em comparação com a *Replicator 2*, a *Replicator 5TH Gen* (figura 8) tem um volume de impressão um pouco menor, mas contem câmara interna e conectividade *Wi-Fi,* o que dependendo do utilizador, pode tornar-se um fator decisivo. A estrutura externa também é de melhor qualidade e reflete a diferença de valores.

Em suma, os valores apresentados pela *Makerbot* são um pouco elevados perante as características oferecidas pelas máquinas.

3.2.2.2 - Ultimaker

A *Ultimaker* é uma das maiores produtoras europeias, a empresa foi fundada na Holanda, em 2011, por *Martijn Elserman, Erik Bruijn* e *Siert Wijnia*.

Outra derivação do projeto Reprap que deu origem a uma empresa, e apesar de se manter do tipo *Open Source*, a sua filosofia é muito diferente da de *Adrian Bowyer*. O principal objetivo da *Ultimaker* não é a reprodução da máquina, mas sim a criação de impressões da melhor qualidade possível.

A *Ultimaker* é detentora da patente do *software Cura* que é também do tipo *Open Source* e utilizável em modelos livres [19].

ULTIMAKER ORIGINAL

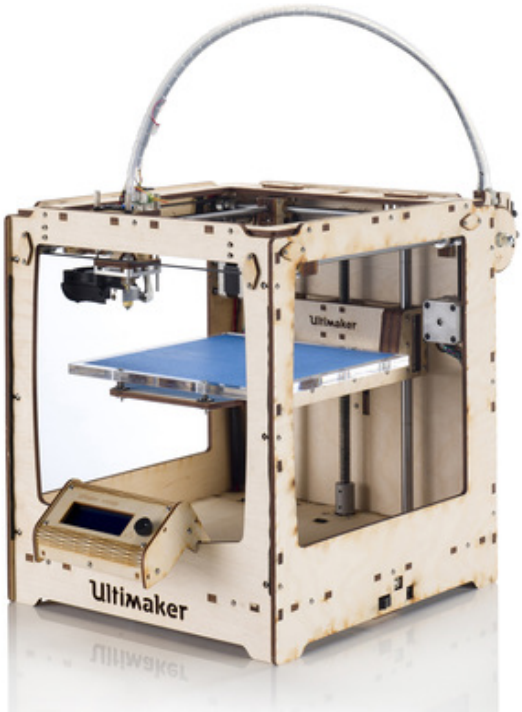


Figura 9 - Ultimaker Original [19]

Preço: 995€

Características:

Volume de construção: 210x210x205[mm]

Velocidade de Impressão: 30 a 300mm/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°

Resolução: 20 Mícron

Diâmetro de filamento: 2,85 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Software: Cura

Componentes extra: Leitor de cartão de memória.

ULTIMAKER 2

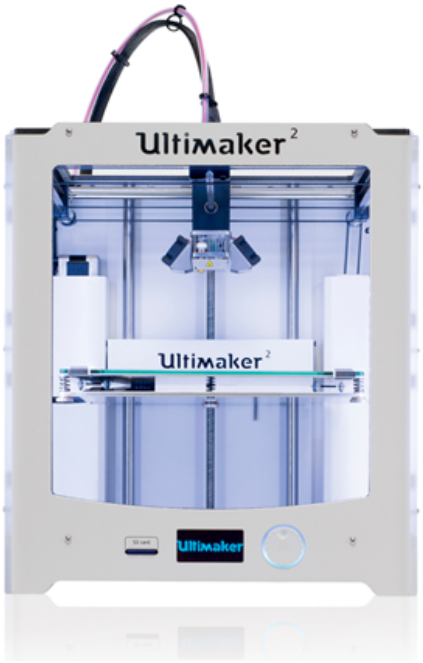


Figura 10 - Ultimaker 2 [19]

Preço: 1895€

Características:

Volume de construção: 230x225x205[mm]

Resolução: 20 Mícron

Velocidade de Impressão: 30 a 300mm/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°C

Temperaturas da cama: 50° a 100°C

Diâmetro de filamento: 2,85 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Software: Cura

Componentes extra: Leitor de cartão de memória e impressão Wi-Fi.

Em 2013 a *Ultimaker Original* (figura 9) foi premiada como a impressora mais rápida e precisa na sua classe, apesar de já ir no seu terceiro ano de existência [18].

Este modelo é vendido em kit para posterior montagem do utilizador. O objetivo da empresa era a velocidade de impressão, tendo sido atingido, pela capacidade de alcançar velocidades de impressão de 300 mm/s, o que é considerado um valor muito elevado para uma impressora *Low Cost*. O volume de construção é dos melhores da gama e aliado aos outros pontos fortes, torna-se uma impressora que justifica o preço.

O segundo modelo da *Ultimaker* (figura 10) vem com bastantes mudanças de *hardware*, *upgrades* estruturais e um novo volume de impressão. Entre as mudanças mais importantes estão, a nova cama aquecida em vidro temperado que permite uma impressão direta sem a aplicação de fitas protetoras. O extrusor foi completamente redesenhado e contem agora dois elementos arrefecedores, o que permite obter, maior velocidade, e tempos inferiores de impressão. Foi adicionado também um ecrã de OLED maior que o da impressora original e um controlador que permite um melhor domínio da impressão sem ligação a computador.

Em 2014 foi considerada pela *Make Magazine* a impressora com melhor arquitetura e, obteve igualmente, o segundo lugar na categoria de “melhor para o consumidor” [7].

3.2.2.3 - Afinia

Afinia surgiu em 2009, e é filha da *Mircoboards Technology*, empresa que produz desde 1989 todo o tipo de *hardware* de impressão e digitalização. Com a criação da Afinia a empresa levou a impressão a outro patamar. Segundo o Vice Presidente *John Westrum*, o objetivo desta divisão foi simplificar a utilização das impressoras 3D, desta forma conseguindo o seu espaço no mercado [20].

AFINIA H-SERIES

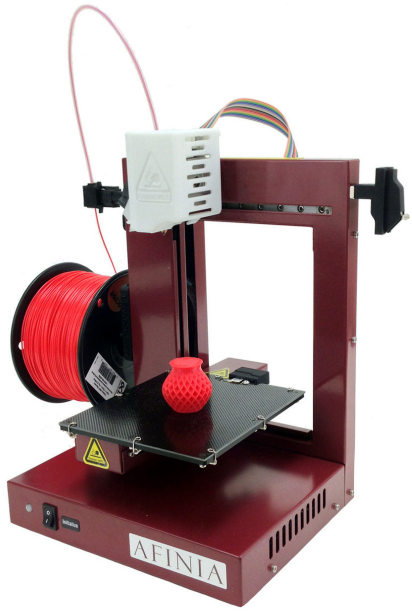


Figura 11 - Afinia H-480 [20]

Preço: 1000€

Características:

Volume de construção: 140x140x135 [mm]

Velocidade de Impressão: 3 a 30mm³/s

Resolução: 200 Mícron

Diâmetro de filamento: 2,85 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Este é um dos casos em que as aparências iludem, a *Afinia H-480* (figura 11) apesar de deixar muito a desejar no que toca à sua estética, relativamente ao funcionamento já tem outra qualidade. A *H-480* foi considerada pela *Make Magazine* em 2013, a impressora mais fácil de configurar, de usar e a que proporciona a melhor experiência no geral. O maior problema desta máquina está na velocidade de impressão e no volume de impressão que também não é muito elevado. No entanto, em comparação com a *Replicator Mini,* consegue obter melhores resultados, apesar do mesmo preço [18].

3.2.2.4 - PP3DP

Um dos grandes fabricantes chineses de impressoras 3D, a *Delta Micro Factory* tem, neste momento, dois modelos no mercado. Estes dois modelos preenchem as gamas, baixa (abaixo dos 1000€) e média (entre 1000 e 2000€). [21]

UP MINI



Figura 12 - UP Mini [21]

Preço: 700€

Características:

Volume de construção: 119x119x119 [mm]

Velocidade de impressão: 9mins por cm^3

Resolução: 200 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,73 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Software: UP software

UP PLUS 2



Figura 13 - UP Plus 2 [21]

Preço: 1300€

Características:

Volume de construção: 140x140x135 [mm]

Velocidade de impressão: 9mins por cm^3

Resolução 150 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,73 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Nivelamento da cama: Automático

Software: UP software

Ao entrar com estes dois modelos, a *PP3DP* conseguiu cobrir duas gamas de impressoras 3D. Quem compra este tipo de impressora (com volumes de impressão reduzido) por norma ou está a iniciar a sua carreira na impressão 3D ou não a usa profissionalmente. Logo a grande vantagem destes dois modelos é mesmo a facilidade de configuração. Ambas obtiveram o premio de "mais fácil configuração" pela revista *Make* de 2014 [7].

A *Mini* (figura 12) tem um design inovador, que é totalmente fechado, o que permite uma melhor impressão em ABS. O ABS necessita de temperaturas mais elevadas tanto no extrusor como na cama de deposição para evitar deformações indesejadas das peças.

Em suma, a *Mini* é de fácil utilização e barata para a qualidade de impressão que permite.

O modelo *Up Plus* (figura 13) pode ser considerado como que o "irmão mais velho" da *Mini*. Contem um volume de impressão maior e calibração automática. Estas são características que a tornam uma concorrente de peso para modelos como a *Afinia H-series* e *Cube 2*. Seguindo o conceito de fácil calibração e de fácil impressão, em geral, esta é uma boa compra.

3.2.2.5 - Type A Machines

Empresa fundada em São Francisco por *Andrew Rutter* em 2012, a *Type A Machines* tem como objetivo dar ao cliente a melhor experiencia possível. A *Type A Series 1* até este ano estava localizada na gama média, mas com o aparecimento do modelo de 2014 fez com que subisse para a gama alta [22].

TYPE A SERIES 1 (2013)

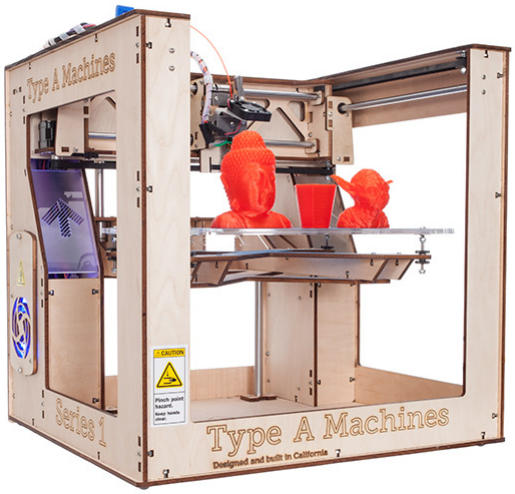


Figura 14 - Type A Series 1(2013) [22]

Preço: 1015€

Características:

Volume de construção: 228x228x228[mm]

Velocidade de Impressão: 150 mm/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°C

Resolução: 50 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Diâmetro do bico de injeção: 0,4 mm

Material de impressão: PLA ,ABS e PVA

Software: Open source

TYPE A SERIES 1 (2014)

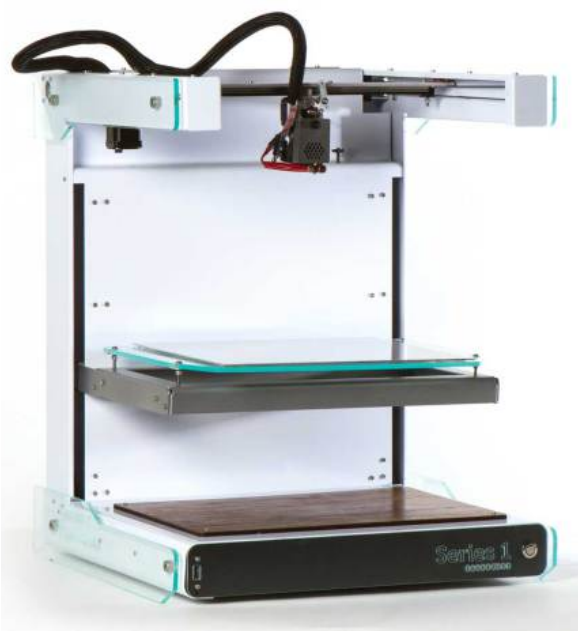


Figura 15 - Type A Series 1 (2014) [22]

Preço: 2170€

Características:

Volume de construção: 300x300x 300[mm]

Velocidade de Impressão: 50 a 150 mm/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°C

Resolução: 50 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Diâmetro do bico de extrusão: 0,4 mm

Material de impressão: PLA ,ABS, Nylon e PVA

Software: Cura para *Type A Machines*

Conectividade: *Wi-Fi*

Apesar de o modelo produzido até 2013 ter uma área bastante grande para uma impressora *Low Cost*, o modelo introduzido em 2014, aumentou-a ainda mais.

O primeiro modelo (figura 14), já com 2 anos, era uma impressora com alta qualidade de impressão em grandes volumes. Esta grande área permitia a impressão de enumeras peças em simultâneo. Em 2013 foi considerado pela *Maker Magazine* a melhor da sua classe. Está destinada a pequenas empresas ou *Makers* com alto nível produtivo. Para o valor em causa o desempenho desta máquina não tem concorrência direta, e se a formos comparar ao nível de preço, não existe nenhuma que equipare o rácio de volume de impressão/qualidade [18].

Em 2014 o primeiro modelo deixou de ser comercializado. A nova versão (figura 15) permitiu um aumento de volume de 24% e, tendo em conta que já era dos maiores do mercado, este é um fator decisivo no momento da compra. O design estrutural também foi todo revisto, deixando a madeira de lado. O novo modelo inclui conectividade por *Wi-Fi* e pontas extrusoras descartáveis. Apesar de todas estas mudanças, a *Series 1* continua parcialmente do tipo *Open Source*, deixando em aberto evoluções possíveis.

O custo da nova *Type A Series 1* quase que duplicou mas ainda continua ser uma boa compra para o custo que representa.

3.2.2.6 - Cubify

Uma das mais antigas empresas de fabrico aditivo, a *3D Systems*, existe desde 1986, e tendo criado a *Cubify* que representa uma divisão da marca, conseguiu integrar a lacuna no mercado. A *3D Systems* estava desde o início focada na impressão 3D para o uso profissional com as gamas de alto custo. Com a criação da *Cubify*, a *3D Systems,* assim como a *Stratays,* com a aquisição da *Makerbot*, entrou num novo mercado das impressoras acessíveis ao consumidor particular [23].

A *Cubify* tem vários modelos de impressoras disponíveis para venda, assim como *scaner*, componentes desgastáveis e *software*.

CUBE 2

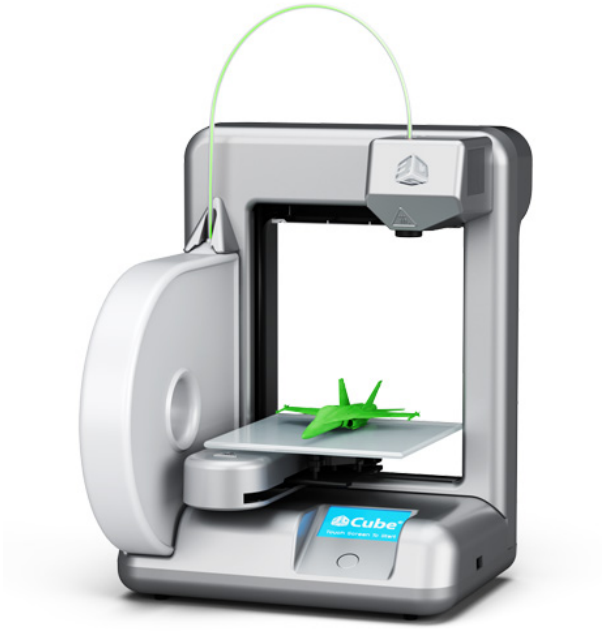


Figura 16 - Cubify Cube 2 [23]

Preço: 1025€

Características:

Volume de construção: 140x140x140[mm]

Velocidade de Impressão: 15mm³/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°C

Resolução: 200 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Diâmetro do bico de extrusão: 0,4 mm

Material de impressão: PLA e ABS

Software: Cubify

Conectividade: *Wi-Fi* e *USB*

CUBE 3D

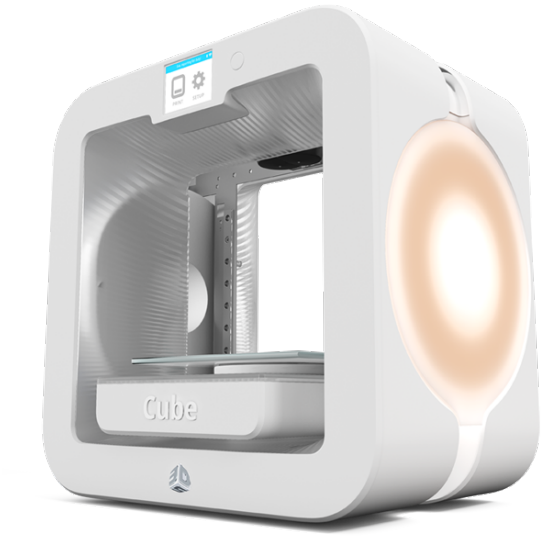


Figura 17 - Cubify Cube 3 [23]

Preço: 989€

Características:

Volume de construção: 153x153x153 [mm]

Velocidade de Impressão: 15mm³/s

Temperaturas suportadas: 180° – 260°

Resolução: 70 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Duplo extrusor: 0,4 mm

Material de impressão: PLA, ABS e PLA solúvel.

Software: Cubify

Conectividade: *Wi-Fi* e *USB*

CUBE X

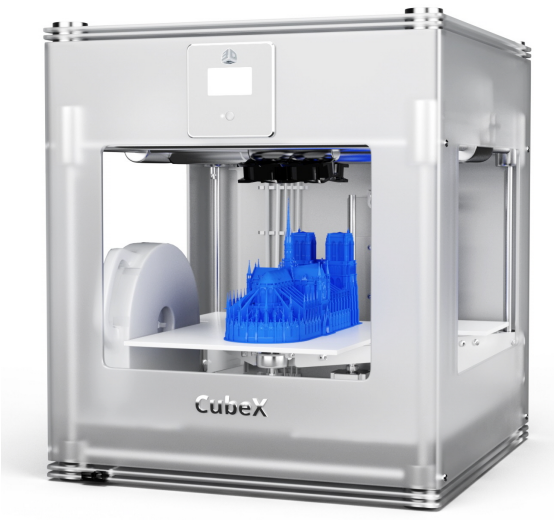


Figura 18 - Cubify Cube X [23]

Preço: 1911€

Características:

Volume de construção: 275x265x240 [mm]

Velocidade de Impressão: 15mm³/s

Temperaturas suportadas: 180° – 280°C

Resolução: 100 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Triplo Extrusor: 0,4 mm

Material de impressão: PLA ,ABS e PLA solúvel.

Software: Cubify

Conectividade: *Wi-Fi* e *USB*

Com estes três modelos, a *Cubify* consegue cobrir todas as gamas da impressão 3D *Low Cost*. A *Cube* ganha pela simplicidade dos modelos, pelas configurações, interface de *hardware* e facilidade de utilização. Tanto a *Cube 2* (figura 16) como a *3*, têm em vista o mercado de iniciantes da impressão 3D. Estes dois modelos deverão ser considerados como modelos de entrada da marca. A primeira foi retocada desde o primeiro modelo (*Cube 1*), eliminando alguns dos principais problemas, como o excesso de ruído, aumento da velocidade de impressão e segurança do utilizador.

Apesar destas resoluções, a qualidade de impressão manteve-se média/baixa. A facilidade de configuração faz destas duas impressoras a imagem da marca, visando assim um mercado menos experiente nestes campos [18].

A *Cube 3* (figura 17) é um modelo recentemente introduzido no mercado. Para além do seu design inovador, a aplicação de dois extrusores é um fator decisivo na compra deste modelo. Esta configuração garante uma melhor qualidade de impressão, por assegurar uma maior facilidade de remoção de suportes, sendo que um dos extrusores poderá trabalhar com o material base, enquanto o outro poderá trabalhar com o PLA solúvel para os suportes, evitando marcas.

O Modelo *X* (figura 18) da *Cube* tem concorrência pesada, *Ultimaker 2, Type A Machines Series 1,* entre outros. Nenhum destes modelos apresenta o triplo extrusor que a *X* apresenta, apesar dos volumes de construção serem relativamente os mesmos. A *Cube X* perde por ser do tipo *Closed Source*, e sendo uma impressora da gama mais alta do *Low Cost*, é destinada a utilizadores já com bastante experiencia e conhecimento da impressão 3D.

Os utilizadores deste tipo de impressoras, normalmente, também desenvolvem o seu equipamento, e com essa hipótese fechada, a *X* perde uma grande parte do mercado. No entanto a sua construção é sólida e com boas perspetivas de futuro pela evolução do extrusor triplo [23].

3.2.2.7 - FelixPrinters

A *FelixPrinters* é uma empresa holandesa criada por *Guillaume Feliksdal*. Produzida pela *FelixRobotics*, a *Felix* nasceu como muitas outras, da evolução do projeto Reprap. *Guillaume* sentiu que era capaz de desenvolver algo mais evoluído que o que estava a trabalhar [24].

FELIX 2.0

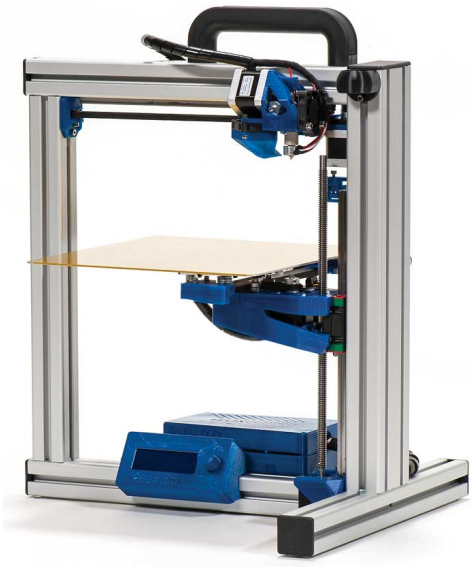


Figura 19 - Felix 2.0 [24]

Preço: 1200€

Características:

Volume de construção: 255x205x235 [mm]

Velocidade de Impressão: 200mm/s

Resolução: 50 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Diâmetro do extrusor: 0,35 mm

Material de impressão: PLA ,ABS e Nylon.

Software: Repetier/Open source

Conetividade: *USB*

FELIX 3.0



Figura 20 - Felix 3.0 [24]

Preço: 1650€

Características:

Volume de construção: 255x205x235 [mm]

Velocidade de Impressão: 200mm/s

Temperaturas suportadas: 160° – 275°C

Temperatura da cama: até 95°C

Resolução: 50 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Extrusor Duplo: 0,35 mm

Material de impressão: PLA ,ABS e Nylon.

Software: Repetier/Open source

Conectividade: Cartão de memoria com LCD e USB

Desde o primeiro modelo (*Felix 1.0*) que a marca tem vindo a impressionar pela estabilidade mecânica da máquina. Em 2013 a *Make Magazine*, classificou o pior desta impressora como sendo a Interface de Hardware. Mas desde este primeiro modelo a marca veio a evoluir bastante, corrigindo os piores aspetos de versão em versão [18].

O segundo modelo (figura 19), esteticamente não mudou muito, mas foi melhorado a nível de componentes. A sua construção em perfil de alumínio permite um trabalho com volumes mais elevados sem que se ponha em causa a qualidade de impressão. Outro dos pontos fortes desta impressora é o facto de ser capaz de fazer grandes impressões sem grandes configurações. Em 2014 foi considerada pela *Make*, a melhor impressora, "*right out of the box"*. Está indicada para utilizadores intermédios no mundo da impressão tridimensional, pois a sua construção permite alterações e upgrades assim que disponíveis pela marca. O facto de usar software *Open Source* ajuda bastante neste último ponto [7].

A *Felix 3.0* (figura 20) recentemente lançada no mercado vem com algumas alterações, ou upgrades. As partes plásticas são agora fabricadas através de injeção o que confere uma maior segurança e estabilidade. Foi aumentada a rigidez de algumas peças, permitindo maiores acelerações evitando vibrações e deformações indesejadas, garantindo melhores impressões a altas velocidades.

Pelo preço referido acima, a máquina está equipada com dois extrusores permitindo o uso de material de suporte, garantindo uma melhor qualidade na impressão. Todos os utilizadores de modelos anteriores à 3.0 poderão adquirir um kit e fazer um upgrade à máquina [24].

3.2.2.8 - Printbot

PRINTBOT SIMPLE

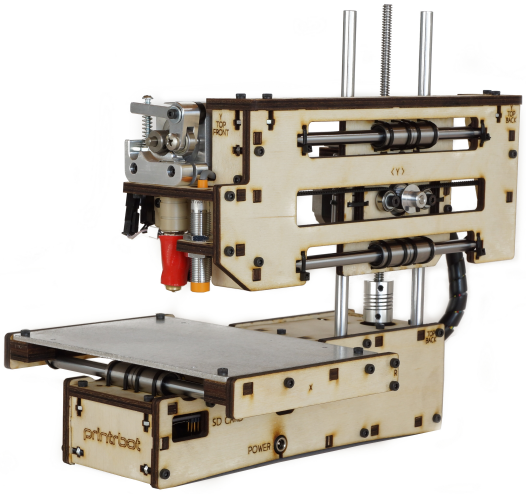


Figura 21 - Printbot Simple [25]

Preço: 300€

Características:

Volume de construção: 100x100x100 [mm]

Velocidade de impressão: 100mm/s

Temperatura da cama: sem aquecimento

Resolução: 100 Mícron

Diâmetro de filamento: 1,75 mm

Diâmetro do extrusor: 0,4 mm

Material de impressão: PLA

A *Printbot Simple* (figura 21) é um modelo de entrada da marca, que para um utilizador que se está a iniciar na impressão 3D, será um dos modelos a ter em conta. Para a sua dimensão e valor implicado, confere uma boa qualidade de impressão. Outra das suas grandes vantagens é ser tão compacta e facilmente transportável [18].

3.2.2.9 - FabTotum



Figura 22 - FabTotum[26]

Preço: 999€

Características

Impressão 3D

Volume de construção:

214x236x242 [mm]

Velocidade de impressão: 300mm/s

Temperaturas do extrusor: 230°C

Temperaturas da cama: 100°C

Diâmetro de filamento:

1,75 mm

Diâmetro do bico de extrusão: 0,35 mm

Fresagem

Volume de subtração:

214x236xAltura [mm]

Motor de fresagem:200W com correção automática de RPM

Plano de trabalho: Alumínio com fixações

Numero de eixos: 4

Digitalização

Modos: Rotação de laser, digitalizador.

Volume de digitalização:

Igual ao de adição

Câmara: 5Mp, 2592x1944 Raspberry Camera

A *FabTotum* é uma empresa *StartUp* do Instituto Politécnico de Milão iniciada pelas mãos de quatro ex-alunos. O objectivo desta *StartUp* seria levar a prototipagem e o fabrico ao nível pessoal.

Em teoria, este conceito de ter a impressão 3D, o fabrico subtrativo e o *scanning* no mesmo equipamento seria o exponencial máximo no que diz respeito à fabricação pessoal. Na prática não será bem assim, para uma máquina conter estas três características, alguma delas terá que sair sacrificada.

Como o equipamento é recente e ainda não está disponível ao consumidor, ainda não existem *reviews*, nem descrição do comportamento do equipamento.

Mais uma vez, e olhando só para a parte da impressão 3D, este equipamento seria dos melhores da sua classe tendo em conta o preço. As velocidades de impressão são das mais altas em trabalho, sendo apenas a *Ultimaker 2* a que se aproxima a estes valores. Com este volume de impressão, e adicionando a digitalização e a capacidade de CNC, e se tudo corresponder ao especificado, será algo a ter em conta, sendo um equipamento para fazer mexer o mercado [26].

3.2.3 - COMPARAÇÕES

Foi feita então uma comparação para os modelos mais relevantes nas várias categorias, tendo como objetivo principal a diferenciação de qualidades e defeitos no ponto de vista do consumidor.

3.2.3.1 - Gama Alta

Tabela 1 - Comparação de características de impressoras de alta gama

	Replicator 2	Ultimaker 2	Type A Series 1	Cube X	Felix 3.0
Preço [€]	1700	1895	2170	1911	1650
Volume de impressão[cm^3]	6758.8	10608	27000	17490	12284
Velocidade de impressão[mm/s]	-	300	150	-	200
Materiais	PLA, ABS	PLA, ABS	PLA, ABS, Nylon, PVA	PLA, ABS, PLA Solúvel	PLA, ABS, Nylon
Resolução [µm]	100	20	50	100	50
Conectividade	Wi-Fi, USB	Wi-Fi, USB, Cartão	Wi-Fi , USB	Wi-Fi, USB	Wi-Fi, USB, Cartão
Open source	Não	Sim	Hacker Friendly	Não	Sim

Através da Tabela 1 conseguimos comparar os dados fornecidos anteriormente, lado a lado. Como cada consumidor tem o seu tipo de necessidade, assim é possível escolher o que melhor se apropria ao tipo de utilização.

Por exemplo, se a necessidade fosse a impressão em alta quantidade, a melhor compra seria um equipamento que permitisse elevadas velocidades e volumes. Ao invés, se o objetivo fosse a qualidade e não a quantidade, seria necessário ter em conta a resolução do equipamento.

Tabela 2 - Ratings toptenreviews.com para gama alta [27]

	Replicator 2	Ultimaker 2	Type A Series 1	Cube X
Geral	8.07	9.07	8.15	8.77
Impressão	8.13	8.75	10	8.13
Filamento	6.88	10	6.88	9.38
Design	9.38	9.38	5	9.38
Ajuda e suporte	8.13	7.5	10	8.75
Conectividade	8.13	8.75	10	7.5
Acessórios	8.13	10	8.75	8.75

A pontuação na Tabela 2 foi dada de 0 a 10 com base no site *toptenreviews.com*, que classificou em primeiro lugar a *Ultimaker 2* em segundo a *Cube X* , na terceira posição a *Type A Series 1* e finalmente a *Replicator 2*. Para a *Felix 3.0* não foram obtidos dados por estar muito recentemente no mercado.

Esta classificação tem como base o somatório das pontuações, mas cada consumidor tem a sua necessidade, ou seja, cada consumidor deve ter em conta a característica que mais relevância terá no seu uso pessoal.

3.2.3.2 - Gama Média

Tabela 3 - Comparação de características de impressoras de gama média

	Cube 2	Afinia H-SERIES	Up Plus 2
Preço [€]	1025	1000	700
Volume de impressão[cm^3]	2744	2646	2646
Velocidade de impressão	15 mm^3/s	30 mm^3/s	9 $mins/cm^3$
Materiais	PLA, ABS	PLA, ABS	PLA, ABS
Resolução [µm]	200	200	150
Conectividade	Wi-Fi, USB	USB	USB
Open source	Não	Não	Não

Tabela 4 - Ratings toptenreviews.com para gama média [27]

	Cube 2	Afinia H-SERIES	Up Plus 2
Geral	8.50	8.13	7.95
Impressão	8.13	7.5	7.5
Filamento	8.13	9.38	8.13
Design	8.75	7.50	8.13
Ajuda e suporte	8.75	8.75	8.75
Conectividade	10	6.25	6.25
Acessórios	9.38	8.13	8.13

Através da Tabela 4 consegue-se ver que para a gama média a *Cube 2* ficou em primeiro lugar, com segundo para a *Afinia H-series* e a *Up Plus 2* em último. Como descrito anteriormente, a escolha de cada utilizador recai para a sua maior necessidade.

3.2.3.2 - Gama Baixa

Tabela 5 - Comparação de características de impressoras de gama baixa

	Printbot Simple	Cube 3D	Up Mini	Replicator mini
Preço [€]	300	989	700	1100
Volume de impressão[cm^3]	1000	3581	1685	1250
Velocidade de impressão	100mm/s	15mm^3/s	9mins/cm^3	-
Materiais	PLA	PLA, ABS	PLA, ABS	PLA
Resolução [µm]	100	200	200	200
Conectividade	USB	Wi-Fi, USB, Cartão	Wi-Fi , USB	Wi-Fi, USB
Open source	Sim	Não	Não	Não

Para as impressoras de baixa gama, tal como para as outras, os critérios mais importantes e decisivos inicialmente serão, o volume de impressão e o preço. Normalmente se o preço for baixo, o volume também é. Com a tabela 5 conseguimos concluir que a impressora que conjuga melhor estes dois parâmetros é a *Cube 3D*.

3.3 - *SOFTWARE*

Para a impressão ser feita é necessário o processamento por vários tipos de *software* distintos. Existem três etapas essenciais para a obtenção de um modelo físico. Na primeira parte, a modelação, depois o corte da peça e por fim o controlo da impressora. Cada um destes passos requer um tipo específico de *software.*

3.3.1 - MODELAÇÃO CAD

A modelação em CAD é o primeiro passo, é o desenho da peça, mesmo que já exista um modelo físico a ser digitalizado, o uso de um *software* deste tipo será essencial para o seu ajuste.

Como já foi referido anteriormente, o output de qualquer *software* CAD 3D para a impressão tridimensional será o ficheiro STL. Apesar da maior parte destes *software* exportarem em STL, nem todos os ficheiros podem ser lidos e usados na impressão 3D. É obrigatório que o modelo a ser exportado seja uma superfície fechada, que separe o seu interior do seu exterior. Programas mais avançados de modelação por superfície nem sempre cumprem este critério, o que torna a impressão 3D impossível.

Se estamos a falar de impressão 3D *Low Cost*, não faz sentido estar a falar em software comerciais, como *Solidworks*, *Autocad*, *SolidEdge*, *CATIA,* entre outros. Fará mais sentido falar em alternativas de baixo custo que conseguem cumprir a função:

BLENDER

- Criador: *Blender Foundation*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Bastante conhecido, *Open Source* bastante poderoso, capaz de modelação de superfícies [7].

SKETCHUP

- Criador: *Trimble*;
- Preço: Grátis ou 400€, no caso da Versão Pro;
- Detalhes: Sem grandes erros que dificultam o trabalho, capacidade de partilha dos modelos online [7].

FREECAD

- Criador: *Juergen Riegel, Werner Mayer*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Bastante potente, dedicado à engenharia, desenho paramétrico *open-source* [7].

OPENSCAD

- Criador: *Clifford Wolf, Marius Kintel*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: A modelação a partir deste *software* é feita através de *scripting* em vez da visualização modelar [7].

SCULPTRIS

- Criador: *Tomas Pettersson, Pixologic*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Usa um conceito de modelação tipo barro, as superfícies são alteradas por arrasto [7].

123D

- Criador: *Autodesk*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: A gama *123D* inclui vários programas com vários intuitos diferentes. O *123D Design*, o mais parecido com a modelação normal, o *123D Sculpt* que usa o conceito *touchscreen* para a modelação e o *123D Creature*, para a criação de personagens através de base de dados [7].

3.3.2 - SLICING/CAM

O segundo passo, e o mais importante para a obtenção de uma boa impressão é o *Slicing* do STL obtido. O *software* de corte considerado CAM, pega no modelo 3D e converte-o em linhas de texto com instruções de movimento para a impressora. Estes *software* conseguem definir, desde a altura da camada extrudida, à velocidade de extrusão, às temperaturas de trabalho de toda a máquina, assim como a própria refrigeração da mesma.

A saída de um slicer dá um ficheiro *G-code*, que se for lido em texto, tem um aspeto de um *script* de programação.

SKEINFORGE

- Criador: Enrique Perez;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Com bastantes configurações, dá bons resultados de impressão, contudo não tem a melhor interface [7].

SLIC3R

- Criador: *Alessandro Ranellucci*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Tem vindo a evoluir de versão em versão, com boa interface e muito completo [7].

CURA

- Criador: *David Braam / Ultimaker*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Produzido pela *Ultimaker*, é funcional na maior parte dos modelos Reprap, muito boa interface e bastante completo [7].

KISSLICER

- Criador: *Jonathan Dummer*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: A versão pro tem capacidade de configuração para dois extrusores [7].

MAKERWARE

- Criador: *Makerbot;*
- Preço: Grátis
- Detalhes: Com CAM integrado, só funciona em modelos *Makerbot* [7].

3.3.2.1 - Taxa de adoção

Tabela 6 - Taxas de adoção [7]

	Slic3r	Skeinforge	Kisslicer	Modificados Públicos	Modificados Privados
2013	53.3%	20%	3.3%	6.7%	16.7%
2014	55%	10%	10%	5%	20%

Com base na Tabela 6 pode-se verificar que software de *Slicing* mais utilizado é o *Slic3r* (Figura 23) com uma taxa de adoção de mais de 50% comparativamente a todos os outros software. Ao longo dos anos tem vindo a crescer esta percentagem. O software tem recebido bastantes *updates*, aumentando cada vez mais o nível de detalhe e consecutivamente a qualidade das impressões. O *Cura* também é uma opção viável por ser de tão simples configuração e interface, porem não é tão detalhado como o *Slic3r*.

O funcionamento deste software irá ser explicado no capítulo 5.

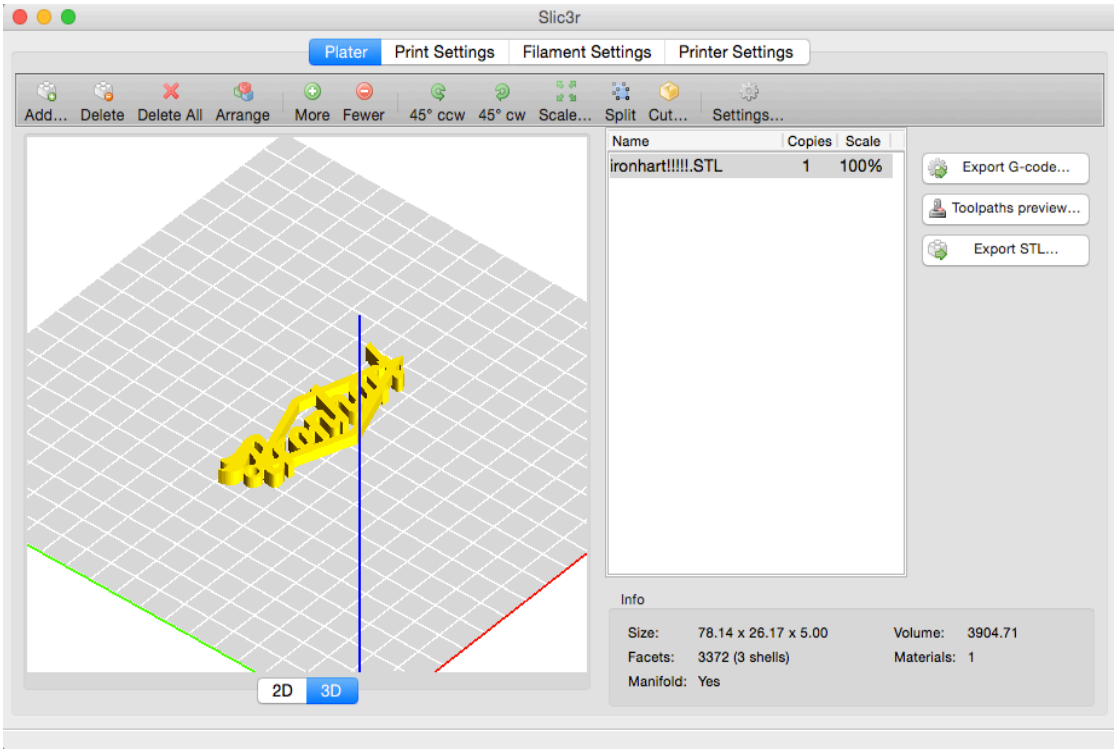


Figura 23 - Interface do software Slic3r

3.3.3 - CONTROLADORES DE IMPRESSÃO

O controlador de impressora, ou cliente CAM é a ultima fronteira entre o código e a impressão. Este funciona como interface virtual do equipamento, com informação de temperaturas e de funções que a impressora está a desempenhar. É através desta interface que podemos controlar a impressora manualmente, ou através das ordens fornecidas pelo ficheiro *G-code* vindas do *Slicer*.

REPLICATORG

- Criador: *Makerbot;*
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Cliente da *Makerbot* inicialmente, com desenvolvimento *Open Source* está disponível para a maior parte das impressoras de *hardware* livre [7].

PRONTERFACE

- Criador: *Kliment Yanev*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Tem uma instalação bastante complicada, requer *Python* e está incluído no *Printrun* [7].

REPETIER-HOST

- Criador: *Hot World Media GmbH*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Controlador muito completo, interface gráfica e configuração de impressora bastante simples [7].

OCTOPRINT

- Criador: *Gina Häußge*;
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Simples de trabalhar e configurar, visualização do *G-Code* em qualquer parte da impressão [7].

AFINIA 3D

- Criador: *Afinia;*
- Preço: Grátis;
- Detalhes: Disponível apenas para *Afinia* e *UpPrinters* [7].

3.3.3.1 - Taxa de adoção

Tabela 7 - Taxa de adoção de controladores de impressão

	Repetier-Host	PrintRun	ReplicatorG	Modificados Publicos	Modificados Privados
2013	18.3%	45.0%	1.7%	6.7%	28.3%
2014	32.5%	17.5%	5%	10%	35%

Com base na Tabela 7 podemos verificar que o *Repetier-Host* (Figura 24) de momento é o controlador que oferece as melhores condições principalmente para quem trabalha com *hardware Open Source* como o caso da Reprap. Concilia uma simplicidade de instalação e configuração da impressora com um nível de detalhe de controlos que permite correr qualquer impressão sem grandes problemas.

Perde pela lentidão de *updates*, aliado a alguns *bugs*. A versão para as plataformas que não *Windows* está muito atrasada comparativamente à mesma.

O funcionamento deste software será explicado mais em detalhe no capítulo 5.

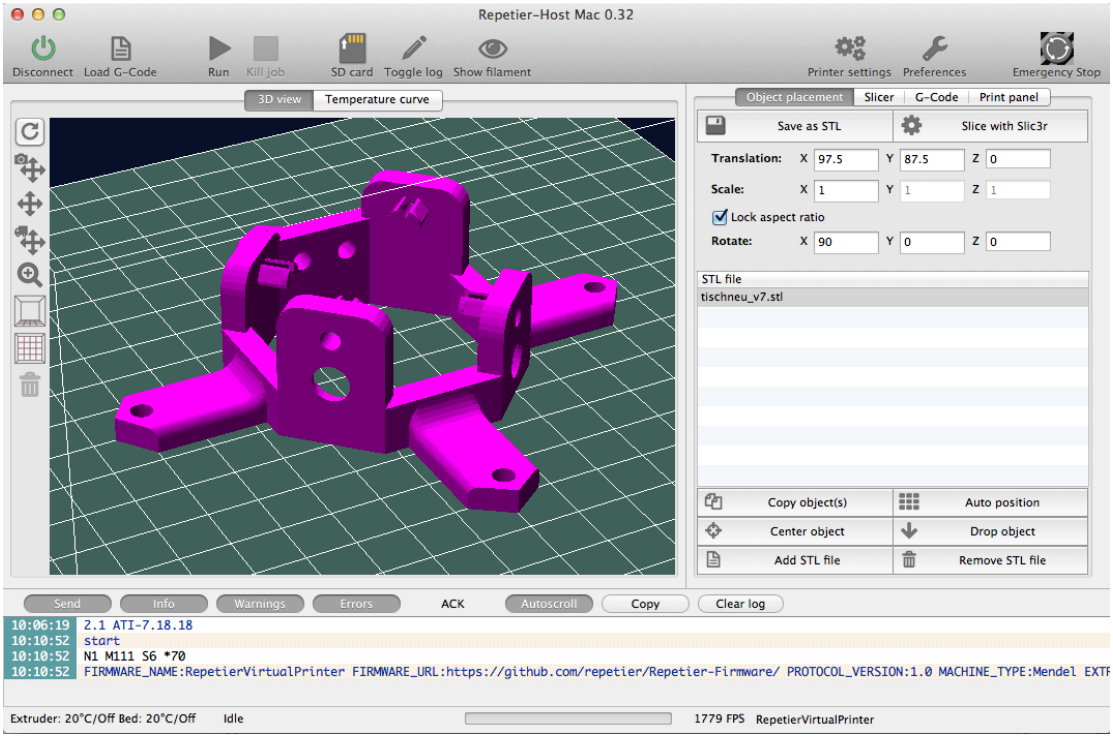


Figura 24 - Interface do Controlador Repetier-Host [28]

3.4 - MATERIAIS UTILIZADOS

3.4.1 - IMPRESSÃO POR FUSÃO DE FILAMENTO

ABS - ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO

O ABS é um material termoplástico muito resistente e com elevada durabilidade. É um dos materiais mais utilizados na impressão 3D, pela facilidade de extrusão a altas temperaturas, combinado com as boas propriedades mecânicas que confere, tornando-se ideal para a prototipagem.

- Temperaturas de extrusão: 215° a 250°C;
- Temperaturas da cama: 90° a 103°C;
- Superfície de impressão: Vidro com laca e fita *Kapton*;
- Pegada ecológica: Bastante grande pois não é biodegradável, não é normalmente misturado com outros na reciclagem;
- Usos comuns: Material utilizado no processo de injeção, daí ter uma gama de utilizações muito expandida. Usos como, tubagens, interiores de automóveis, material de cozinha entre muitos outros [18].

PLA - ÁCIDO POLILÁTICO

A cada dia o PLA recebe mais atenção por parte da industria, as suas características mecânicas são similares às do ABS, porém este material tem propriedades biodegradáveis por derivar do amido do milho, raízes de tapioca entre outros . Esta alternativa aos derivados do petróleo torna-se cada vez mais forte pela necessidade das empresas em produzirem materiais cada vez mais "verdes". Os fatores, biodegradável, bio compatível e recurso inesgotável são decisivos para a evolução deste material [29]. Contudo o PLA tem uma baixa resistência térmica, e começa a distorcer a sua superfície em contacto com temperaturas mais elevadas [30].

- Temperaturas de extrusão: 160° a 220°C;
- Temperaturas da cama: Ambiente a 60°C;
- Superfície de impressão: Vidro com laca e fita "*painters*" azul;
- Pegada ecológica: Biodegradável e Reciclável;
- Usos comuns: Tal como o ABS, pode ser injetado e extrudido, o que leva a uma generalidade de aplicações como, copos, sacos de plástico, contentores de comida entre outros [18].

PLA MACIO (*SOFTPLA*)

Esta variação do PLA, tem um nível de flexibilidade mais elevado, no entanto aparece num número menor de cores. Este tipo de material permite uma maior flexibilidade nas peças impressas e pode também ser utilizado como material de suporte por ser mais facilmente removível sem danificar ou marcar o material de base.

- Temperaturas de extrusão: 200° a 220°C;
- Temperaturas da cama: Ambiente;
- Superfície de impressão: Vidro com laca;
- Pegada ecológica: Biodegradável e Reciclável [18].

PVA - ÁCIDO POLIVINÍLICO

O PVA, na impressão 3D, tem uma única tarefa. É utilizado como material de suporte. A solubilidade deste material em água torna-o perfeito para este tipo de impressões, não deixando marcas como acontece com os outros materiais com características similares ao material de base de impressão [31].

- Temperaturas de extrusão: 180° a 200°C;
- Temperaturas da cama: Ambiente a 50°C;
- Superfície de impressão: Vidro com laca e fita "*painters*" azul;
- Pegada ecológica: Biodegradável e solúvel em água [18].

PC - POLICARBONATO

O Policarbonato é usado na impressão 3D em baixa percentagem devido à sua difícil extrusão, por requerer altas temperaturas. Correntemente existem poucos modelos que conseguem lidar com as propriedades deste material. Uma mistura ente PC e ABS está em fase de testes. Esta mistura permitirá uma extrusão mais fácil, assim como o aproveitamento de algumas das propriedades do PC. Trata-se de um termoplástico com boas propriedades mecânicas e bastante resistente ao impacto e a altas temperaturas.

- Temperaturas de extrusão: 280° a 305°C;
- Temperaturas da cama: 85° a 95°C;
- Superfície de impressão: Vidro com laca e fita *Kapton*;
- Pegada ecológica: Não é Biodegradável, reciclável;
- Usos comuns: É utilizado no fabrico de vidro à prova de bala e pode ser deformado a frio [18].

HDPE - POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

O Polietileno de alta densidade na impressão 3D é pouco utilizado porque após a extrusão tem tendência a contrair, dando origem a problemas de deformação durante o arrefecimento. Seria uma opção bastante barata se não fossem estes problema de deformação.

- Temperaturas de extrusão: 225° a 230°C;
- Temperaturas da cama: Ambiente;
- Superfície de impressão: Placa de Polipropileno;
- Pegada ecológica: Não é Biodegradável, resiste a quase todos os solventes e colas;
- Usos comuns: É utilizado em garrafas de água, reservatórios de combustíveis, tubagens entre outros [18].

3.4.2 - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A impressão 3D de baixo custo funciona pelo princípio da fusão de um filamento polimérico depositado sob a forma desejada numa superfície. Comparando as propriedades mecânicas do mesmo material injetado e impresso detetar-se-ão muitas diferenças.

Inicialmente há dois fatores que serão decisivos na resistência mecânica da peça, fatores estes que serão logo definidos na configuração utilizada no Slicer.

A percentagem de enchimento da peça é o primeiro fator a ter em conta. Se este numero for baixo, a peça é frágil, com pouca resistência mecânica, que poderá ser notória pela transparência do objeto. O enchimento de uma peça a 100% indica que esta será maciça. O outro fator essencial é o padrão de enchimento da mesma, sendo que cada slicer tem os seus padrões, sendo necessário ter em conta o padrão de enchimento com a utilização da peça.

Por fim, um terceiro fator a ter em conta é a espessura da peça [32].

Um estudo realizado por *B.M.Tymrack, M.Kreiger* e *J.M.Pearce* [32], baseou-se nestes fatores com o objetivo de diferenciar as propriedades do material impresso por impressoras de baixo custo e impressoras comercializadas de valores mais elevados.

Foram criados dez provetes ASTM:638 com diferentes configurações de enchimento e espessura de camada. Apesar da percentagem de enchimento ser sempre 100%, as alturas de camada variaram entre 0,2 e 0,4 mm, com a orientação do padrão de 0 a 90°. As impressões foram feitas por quarto impressoras diferentes, *MOST* Reprap, *Lulzbot Prusa Mendel, Prusa Mendel* e *Mendel* original, com variantes de ABS e PLA [32].

Tabela 8 - Tensão de rotura, Extensão após rotura e módulo de elasticidade para componentes impressos com Reprap [32]

	Specimens tested	Specimens considered	Average tensile strength (MPa)	Average strain at tensile strength (mm/mm)	Average elastic modulus (MPa)
ABS					
0.4 mm Layer height	30	24	28.2	0.0197	1875
0.3 mm Layer height	40	39	27.6	0.0231	1736
0.2 mm Layer height	40	35	29.7	0.0201	1839
0/90 Orientation	60	52	27.7	0.0192	1867
+45/−45 Orientation	50	46	29.5	0.0233	1739
Total	110	98	28.5	0.0212	1807
PLA					
0.4 mm Layer height	30	17	54.9	0.0194	3286
0.3 mm Layer height	40	31	48.5	0.0171	3340
0.2 mm Layer height	20	18	60.4	0.0196	3480
0/90 Orientation	50	27	54.9	0.0188	3336
+45/−45 Orientation	40	39	52.3	0.0181	3384
Total	90	66	56.6	0.0193	3368

Foram realizados ensaios de tração de provetes de ABS e PLA, tendo-se obtido os valores médios de tensão de rotura, extensão após rotura e módulo de elasticidade apresentados na Tabela 8. O ABS apresenta uma resistência à tração de 28.5 MPa enquanto o PLA teve 56.5 MPa e um módulo de elasticidade de 1807 MPa e 3368 MPa, respetivamente. Estes resultados indicam que as peças impressas em Reprap têm valores de resistência à tração e módulo de elasticidade muito similares às das peças impressas em impressoras comercializadas de valores muito mais elevados. Apesar destes resultados, há

que tecer considerações, como a qualidade e a idade do filamento no uso destas peças com solicitações mecânicas elevadas [32].

Através da análise das fichas técnicas fornecidas pelo CES EDUPACK 2014 destes materiais consegue-se fazer uma comparação entre estes e os valores obtidos experimentalmente. Como existem enumeras variações de ambos os materiais, considerou-se o PLA de uso comum e o ABS de Injeção.

Tabela 9 - Comparação PLA, extrudido e tabelado

	Tensão de rotura[MPa]	Modulo de elasticidade[MPa]	Alongamento[%]
PLA Extrudido	56	3368	1.86
PLA Uso comum	55 a 72	3300 a 3600	2.5 a 6

Tabela 10 - Comparação abs extrudido e tabelado

	Tensão de rotura[MPa]	Modulo de elasticidade[MPa]
ABS Extrudido	28.5	1807
ABS De injeção	42 a 46	2210 a 2620

Nas Tabelas 9 e 10 estão visíveis as diferenças entre os valores dos materiais injetados e extrudidos. Enquanto no PLA é menos notória a diferença do material extrudido com o material de uso comum, no ABS essa diferença já é mais visível. O PLA extrudido consegue manter as suas propriedades dentro dos limites tabelados exceto no seu alongamento na cedência. A diferença aqui já é bastante notória, tendo o valor médio nos 1,86% enquanto o valor tabelado está situado entre os 2,5 e os 6,0%, isto diz-nos que PLA extrudido tem menos elasticidade que o de uso comum.

Para o ABS os valores de extrusão são aproximadamente um terço mais baixos que os tabelados. É visível a perda de qualidade do material extrudido, tanto na tensão de cedência como no modulo de elasticidade.

3.5 - IMPRESSÃO DE PASTA

A impressão de pastas é outra vertente importante da impressão tridimensional. Este conceito permite a impressão de materiais que abrem as portas a uma nova gama de protótipos, bem como de aplicações caseiras.

O conceito de impressão de pasta, funciona com o princípio de deposição similar ao de filamento, em que o material será extrudido por um bico e depositado por camadas. Porem este material não poderá estar em estado sólido antes de chegar ao extrusor, e não terá uma ponta aquecida para o fundir.

Com este princípio, e como já referido, novos tipos de materiais podem ser aplicados. Pastas solidificáveis, são encontradas em todas as áreas, mas uma área de interesse em particular é a alimentar. Com esta porta aberta, é possível a impressão de materiais como chocolate, massas de bolos, pastas de açúcar e gelatinas.

A impressão tridimensional na área alimentar está a crescer com este mercado, apesar de estar ainda na sua fase inicial, já podemos encontrar vários modelos de impressoras culinárias. Atualmente, o conceito de impressão alimentar resume-se à deposição por camadas de um material solidificável. O princípio é similar ao método FDM, só que duma maneira mais grosseira. Enquanto um bico de extrusão para filamento tem um diâmetro de 0.3 a 0.5mm, um extrusor alimentar necessita de calibres maiores (1 a 3mm, dependendo do material), para que o material flua. A razão desta diferença será porque o material a ser impresso tem uma viscosidade bastante elevada e após solidificado, as suas propriedades mecânicas são muito baixas.

É esperada uma grande evolução na área alimentar (descrita no capitulo 4) que permitirá a impressão a nível molecular, este tipo de desenvolvimento vai possibilitar (idealmente) um controlo de nutrientes em cada alimento produzido. Presentemente, a impressão 3D de alimentos só nos consegue garantir a liberdade geométrica.

Para a extrusão de qualquer tipo de pasta é necessário um estudo da viscosidade do material em causa a várias temperaturas, assim como estudo de pressões e forças requeridas para que o depósito desta funcione.

3.5.1 - EXTRUSORES UTILIZADOS

Como o critério essencial deste tipo de impressão 3D é o baixo custo, o extrusor terá que corresponder a este princípio. Existem já vários modelos de extrusores de pasta aplicáveis nos modelos do tipo open source, que funcionam com tecnologia similar aos extrusores de filamento presentes no modelo base Reprap. Considera-se que estes conceitos evoluíram daí.

REPRAP BCN

A empresa espanhola tem disponível desde o dia 30 de Outubro um extrusor de pasta (Figura 25). Para a REPRAPBCN é *plug & play*, mas também é aplicável a qualquer impressora com estrutura Reprap.

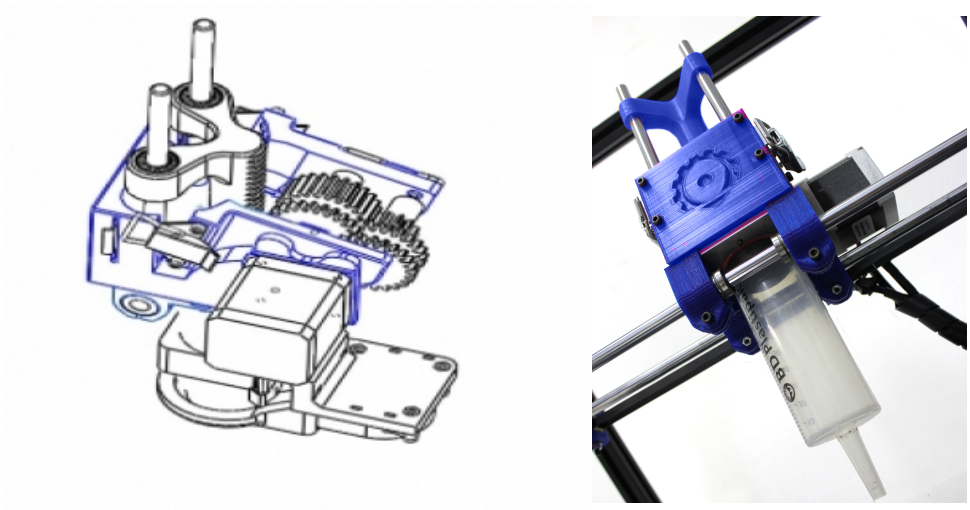


Figura 25 - Extrusor REPRAPBCN [33]

FUNCIONAMENTO

Possui um Motor Nema17, desmultiplicado com engrenagens ligadas diretamente ao êmbolo da seringa que é estriado. O motor irá forçar o deslocamento do êmbolo. Requer configurações de *software(slic3r)* fornecidas pelo fabricante.

CARACTERÍSTICAS

- Sem aquecimento;
- Sem ajuste de diâmetro de extrusão;
- Preço 130€;
- Único disponível no mercado para venda [33].

Makerbot Frostruder

Conceito desenvolvido pela marca Makerbot, ainda é do tipo open source. Apesar de ser pouco utilizado, alguns *developers* ainda se mantêm no desenvolvimento desta aplicação. A grande vantagem deste tipo de extrusor é não ter engrenagens e motores acoplados, mas necessita de um controlador especifico e de bombas para efetuar a extrusão (ver Figura 26).



Figura 26 - Makerbot frostruder [16]

FUNCIONAMENTO

A pasta é alimentada no reservatório (corpo de seringa), sendo posteriormente pressionada por uma bomba pneumática e extrudida por uma agulha fina. Aplicável a qualquer Makerbot, bem como Reprap.

CARACTERÍSTICAS

- Sem aquecimento;
- Com ajuste de diâmetro de extrusão por agulha;
- Não disponível para venda [16].

Richrap universal extuder

Este modelo foi desenvolvido por *Richrap*, usuário do portal thingiverse.com. Por estar disponível livremente é aplicável a todos os modelos Reprap. A produção deste extrusor é bastante simples, pois baseia-se no corpo de um extrusor de filamento e por consequência será facilmente impresso por um dispositivo caseiro. (ver figura 27).

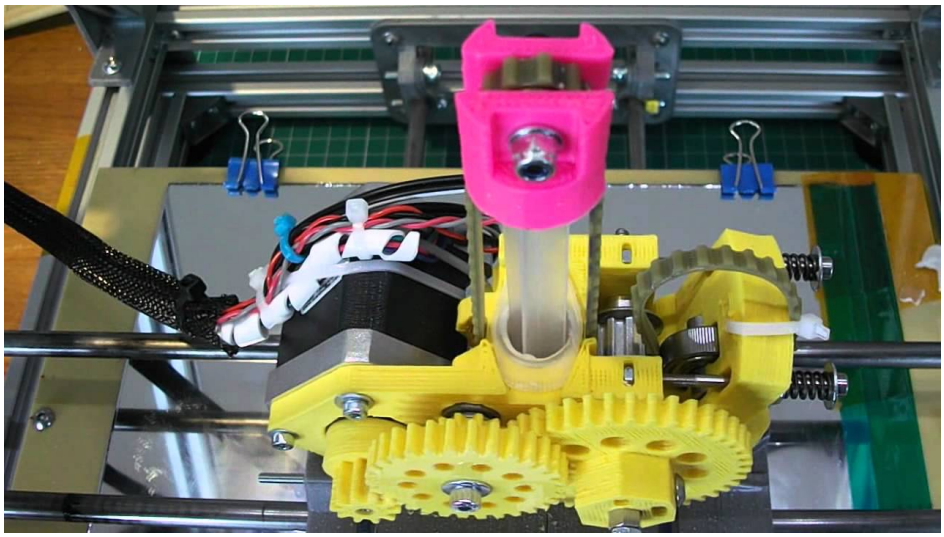


Figura 27 - Richrap universal extruder [34]

FUNCIONAMENTO

Através do corpo do extrusor de filamento *Wade's*, este foi desenvolvido para a colocação de seringa. Existe um motor de passo que aciona as engrenagens, que por sua vez esticam a correia pressionando o embolo da seringa. Lateralmente existem uns parafusos que tensionam a correia.

CARACTERÍSTICAS

- Sem aquecimento;
- Sem ajuste de diâmetro de extrusão;
- Tipo *open source*, disponível em thingiverse.com;
- Sem capacidade de retrocedimento do êmbolo [35].

FAB@HOME

Como já referido anteriormente o conceito *Fab@home* (figura 28) difere dos outros por não possuir extrusor de filamento, mas sim extrusor de pasta. Foi desenvolvido com o primeiro modelo da *Fab@home* e era na altura a única alternativa de extrusão disponível com esta impressora.

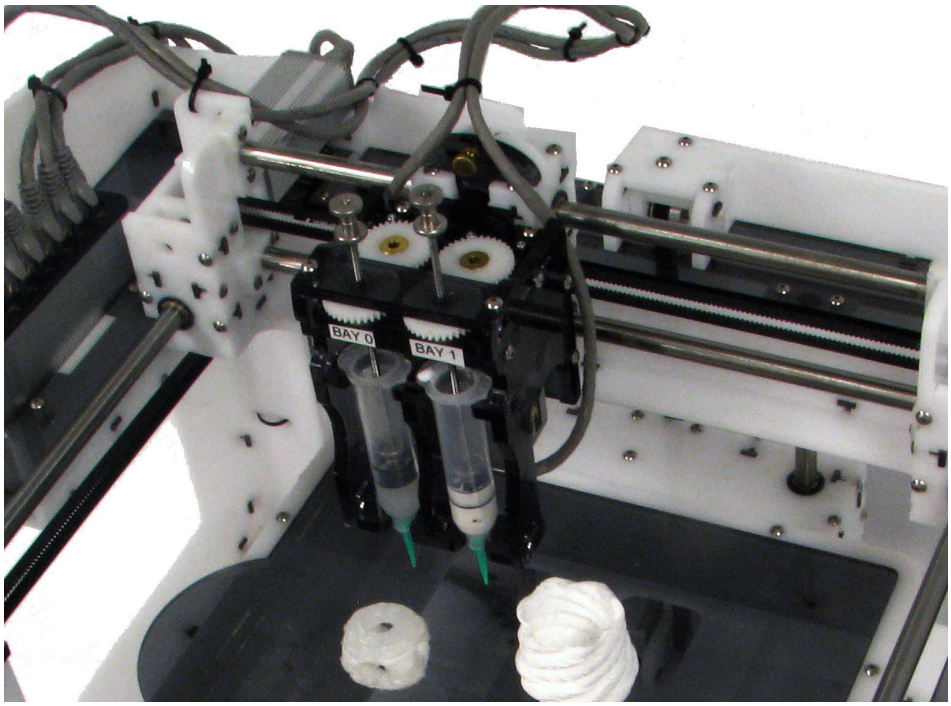


Figura 28 - FAB@HOME MK1 [13]

FUNCIONAMENTO

Existe um fuso vertical que é rodado através de duas engrenagens e um motor de passo. Normalmente utilizado para impressões com silicone e de pastas rapidamente solidificáveis. Este tipo de funcionamento é o mais fiável devido à simplicidade de construção.

Permite o retorno do êmbolo, sendo facilmente desmontável, o que possibilita um enchimento fácil do recipiente.

CARACTERÍSTICAS

- Sem aquecimento;
- Com ajuste de diâmetro de extrusão por agulha;
- Não disponível para venda [13].

Apesar de todos estes conceitos serem perfeitamente funcionais, nenhum deles oferece características que permitam uma utilização sem falhas, consideradas essenciais para uma expansão do seu uso. Estes aspetos restringem um uso em maior escala, garantindo a integridade estrutural dos materiais depositados, bem como o nível de detalhe e controlo de impressão.

A maior restrição de qualquer um destes extrusores é definida pela sua rudimentaridade de conceito. O facto de não se ter um caudal limitado é um dos maiores problemas. Existem muitas limitações que causam este problema, primeiramente, a maior parte dos extrusores disponíveis utilizam copo de seringa. Os que não o utilizam são muito dispendiosos e de baixa fiabilidade.

A outra grande limitação deste processo é o facto de não existir qualquer controlo de temperatura em nenhum dos conceitos. Isto torna-se uma limitação porque a maior parte das pastas de extrusão necessita manter a temperatura a valores acima da ambiente. A partir do momento da colocação de uma pasta aquecida no copo da seringa, até à sua extrusão, a temperatura irá descer. O próprio contacto com as paredes do recipiente causará um decréscimo da mesma. Nestes extrusores, o controlo de temperatura nunca é exato, e a sua diminuição brusca pode causar dificuldades, defeitos de extrusão e até falhas no mecanismo.

Apesar de ser necessário regular a temperatura, o seu controlo não será necessário durante a extrusão, mas sim após a sua deposição. Isto irá depender dos materiais a serem extrudidos. Enquanto uns solidificam com o contacto do ar (silicones e géis), outros solidificam com o aquecimento da superfície onde estão a ser depositados (massa de bolacha). Quanto mais elevada for a temperatura de superfície, mais rápido será essa solidificação. Sem estas características, poderá existir uma acumulação de camadas que não estão completamente solidificadas, isto leva a que se perca exatidão e detalhe na impressão.

Todos estes fatores contribuem para que o uso de extrusão por pasta não seja muito utilizado. Um melhoramento das características do processo, aplicando controlos de temperatura em várias etapas da extrusão poderia levar a uma evolução para volumes maiores de impressão, e até para que se pudesse eliminar o reservatório do corpo da seringa e passar para uma alimentação mista com bomba.

3.5.2 - PASTA DE AÇÚCAR

Uma vez que a componente prática deste trabalho irá estar debruçada no desenvolvimento de um extrusor que possa fazer uma aplicação mais correta e detalhada de um elemento solidificável, a pasta de açúcar será um elemento de teste bastante interessante pelo tipo de características físicas que possui.

A pasta de açúcar é composta por açúcar, amido de milho, glicose, gordura vegetal, gomas vegetais, estabilizador E420, conservantes E202, corante E131, bem como aromatizantes. Esta tem uma consistência sólida e com o aumento de temperatura torna-se cada vez mais maleável, até atingir um ponto em que se torna possível a sua extrusão. Através da dissertação "Impressão Tridimensional e Oportunidades no Design industrial", da estudante do Mestrado em Design Industrial e de Produto, Marta Barros, foi possível a obtenção de alguns dados importantes para uma primeira fase da impressão de pasta de açúcar [36].

Marta Barros [36], efetuou testes de maleabilidade e extrusão manual através de seringa a 42°C, 47°C, 52°C e 62°C. Abaixo de 42°C a extrusão da pasta pelo bico da seringa revelou-se problemática, pois a sua consistência seria demasiado espessa. De acordo com o estudo, acima de 65°C, a pasta ficava demasiado liquida para a extrusão e consequentemente, havia o risco de caramelização do material.

O processo de aquecimento da pasta foi feito da seguinte forma: colocação da seringa contendo já a pasta no seu interior em banho-maria, e a medição de temperatura foi realizada através de termómetro junto à seringa [36].

Este processo de medição de temperatura poderá não ser o mais exato por vários motivos, primeiramente porque o corpo da seringa está diretamente em contacto com o banho, logo haverá sempre uma diferença de valores entre a parede do instrumento e o centro do seu corpo (contendo a pasta), o ponto mais distante à parede. Para além desse problema a medição terá sido feita no banho e não na parede da seringa ou no seu interior. Finalmente o problema mais grave seria a diferença de temperaturas desde do início da extrusão, até ao fim da mesma, pois o aquecimento seria só inicial.

Do estudo foi retirado que a gama de temperaturas ideal para a extrusão da pasta será entre os 55°C e 65°C, este intervalo de valores será inicialmente considerado para a extrusão com o mecanismo desenvolvido, consoante o funcionamento do aquecimento do mesmo às temperaturas requeridas, assim como sistemas de refrigeração.

Sendo que o elemento aquecedor dum extrusor de filamento consegue fazer um aquecimento até 270°C, as temperaturas sugeridas inicialmente não serão problemas para o funcionamento.

Para além do estudo de temperaturas ideais de funcionamento, foram feitos testes de sustentabilidade para esses valores. Os testes de sustentabilidade para diferentes espessuras de camada não serão importantes visto que o funcionamento do extrusor será automatizado através dos padrões inseridos. A espessura da camada será definida pela rotação do motor que irá deslocar o veio acoplado ao êmbolo, e pela velocidade de deslocamento da ponta de extrusão ao longo do processo.

CAPÍTULO 4 - FUTURO DA IMPRESSÃO 3D

Quando se fala sobre o futuro da impressão 3D é de extrema importância definir categorias. A Evolução da impressão tridimensional industrial está num dos lados, com este tipo de avanço poderão ser fabricados novos materiais de novas maneiras. Exemplificando, cada vez recorre mais à impressão 3D na área aeronáutica com o objetivo de criar peças com elevada resistência e com geometrias bastante complexas. Com a evolução destes processos, novas aplicações vão surgindo e o uso de novos materiais abre caminho a novos mercados.

Relativamente à impressão de baixo custo, até que ponto será benéfico uma massificação da utilização deste tipo de mecanismo? Atualmente a impressão de baixo custo consiste em grande parte dos casos, na extrusão de um filamento polimérico em determinadas formas. Sendo um método simples é correntemente utilizado essencialmente como hobby, a impressão de baixo custo permite boas propriedades mecânicas, mas o tipo de acabamento que confere não é o melhor. Qual será o passo seguinte? Uma das hipóteses é que cada um de nós possua uma impressora 3D em casa e sempre que necessite de um produto, ou o desenhe ou compre o modelo digital e imprima em casa. Outra das hipóteses é a existência de pontos de impressão, ou seja, sempre que seja necessário um produto se faça a compra do modelo online e este seja impresso numa empresa na área, disponível para entrega num curto espaço de tempo.

Exemplificando os conceitos acima referidos, imagine que se necessita de uma garrafa não descartável para ir correr. Segundo a primeira aproximação, o primeiro passo seria ir procurar um modelo que agradasse ao consumidor, depois a compra desse mesmo ficheiro e a posterior impressão na própria impressora.

Tomando a segunda aproximação, os primeiros passos seriam iguais, mas depois a ordem de compra seria enviada para um ponto de impressão o mais perto da localização do consumidor possível.

Este tipo de conceito pode ser aplicado num futuro próximo, enquanto a longo prazo a evolução deste mesmo será a nível microscópico, podendo o utilizador combinar vários tipos de tecnologias em todos os tipos de materiais.

O conteúdo deste capítulo irá referir-se aos avanços hipotéticos da impressão tridimensional, em todas as áreas que poderão vir a ser relevantes.

4.1 - IMPRESSÃO ALIMENTAR

Como já foi descrito anteriormente, o método de fabrico aditivo cujo qual a impressão de baixo custo está inserida, é a deposição de material extrudido por camadas. Mais uma vez o processo vai desde a modelação tridimensional à forma física. No meio destes dois marcos existe o *software* e o *hardware*. O *software* irá fatiar o modelo tridimensional enquanto o *hardware* através deste corte em fatias irá criar uma camada após outra. Através desta breve explicação consegue-se ter uma ideia geral de onde estará atualmente a impressão tridimensional de comida. As vantagens obtidas através da aplicação deste método na área alimentar são similares às vantagens da fabricação de um objeto por fabrico aditivo *vs* fabrico tradicional. Continuando na atualidade, o real proveito da impressão de alimentos é a liberdade de geometrias que se consegue, que com a utilização do fabrico tradicional não era possível obter, ou nalguns casos exigiria moldes de custo elevado.

A área da impressão alimentar está agora no início por vários motivos. O aparecimento das impressoras de baixo custo e a libertação dos planos via open source, veio potenciar um crescimento da quantidade de estudos em curso. Enquanto no início da década passada um equipamento poderia custar na ordem dos 100.000€, desde 2006, com o aparecimento do projeto Reprap e *Fab@home*, os equipamentos necessários para este tipo de estudos estão avaliados em 1,000€.

4.1.1 - PROTOTIPOS DE IMPRESSÃO ALIMENTAR

Fab@home

Produto: Extrusão de pasta;

Tipo: Extrusão dupla;

Materiais: Pasta de hidrocolóides, pasta de proteína;

Tipo de desenvolvimento: *Kit Open source*;

Grupo de investigação: "*Fab@home", Cornell Cumput. Synth* [14].



Figura 29 - Extrusão de vieiras [4]

CandyFab 3D Sugar Printer

Produto: Formas em caramelo;

Tipo: Consolidação por aquecimento de partículas;

Materiais: Grãos de açúcar;

Tipo de desenvolvimento: Protótipo funcional;

Grupo de investigação: *Evil Mad Scientist* [37].

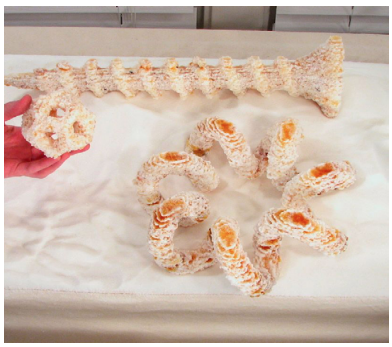


Figura 30 - Caramelo impresso com Candyfab [4]

3D Food Printer

Produto: Bolos;

Tipo: Extrusão de pasta;

Materiais: Pasta de bolos;

Tipo de desenvolvimento: Aplicação patenteada;

Grupo de investigação: *Nanotek Instruments, In* [38].

Chocalm

Produto: Chocolate;

Tipo: Extrusão de pasta;

Materiais: Pasta de chocolate;

Tipo de desenvolvimento: Protótipo;

Grupo de investigação: *Adv. Technol. Res*. [38].

Chocolatier

Produto: Chocolate;

Tipo: Extrusão de pasta de chocolate a quente;

Materiais: Pasta de chocolate;

Tipo de desenvolvimento: Protótipo;

Grupo de investigação: *3D Systems*.



Figura 31 - Chocolatier[4]

Laser-fused food powders

Produto: Objetos em 3D através de pós;

Tipo: Sinterização por laser;

Materiais: Açúcares, Nesquik;

Tipo de desenvolvimento: Aplicação em equipamento já existente;

Grupo de investigação: *Food Process. Group* [39].

Insects au gratin

Produto: Objetos comestíveis através de insetos;

Tipo: Extrusão;

Materiais: Pó da moagem de insetos com ligantes;

Tipo de desenvolvimento: Protótipo;

Grupo de investigação: Departamento de Engenharia, USB [40].



Figura 32 - Objetos comestíveis fabricados através de insectos[40]

ChefJet

Produto: Formas em açúcar;

Tipo: Consolidação por aquecimento de partículas;

Materiais: Grãos de açúcar, chocolate em pó

Tipo de desenvolvimento: Protótipo funcional;

Grupo de investigação: *3D Systems* [41].



Figura 33 - Impressão em açúcar com ChefJet[42]

O conceito da *3D Systems* é o que mais se aproxima ao caso de estudo, estará no mercado a partir da segunda metade do ano de 2015, no entanto este equipamento custará nunca menos de 5000$, valor nunca enquadrado no *low cost*. Este equipamento permite a criação de formas geométricas bastante complexas com um grande nível de detalhe (Figura 34). Ao não ser extrudido o material em causa, não necessitará de suportes nem de elementos de fixação, pois reside numa cuba de pó, conceito similar ao de Impressão tridimensional por *Powder-Binder Bonding* podendo também ser impregnado com elementos de cor. Desta forma o mercado fica preenchido com impressão de açúcar, mas não em pasta e de uma maneira bastante dispendiosa [42].



Figura 34 - Formas em açúcar impressas pela Chefjet da 3D Systems [42]

Apesar da maior parte dos métodos utilizados para a impressão tridimensional de comida se basearem no principio de extrusão, vão aparecendo alguns novos conceitos, como é o caso da *CandyFab e ChefJet*, que utiliza o baixo ponto de fusão do açúcar para o consolidar/caramelizar. Este principio dá uma liberdade geométrica bem maior do que a obtida na extrusão.

4.1.2 - NO QUE SE PODERÁ TORNAR

Os exemplos do capítulo anterior, são alguns dos projetos atuais que existem em constante desenvolvimento. Apesar de serem tecnologicamente inovadores, não trazem vantagens ao utilizador comum. A vantagem geométrica que proporcionam não é o bastante para que exista um investimento sério nesta área.

A Impressão alimentar iniciou-se acidentalmente, quando um grupo de alunos associados ao projeto *Fab@home* decidiram imprimir pasta de bolo. Concluíram que a pasta alimentar seria um bom objeto de teste para configuração de parâmetros no desenvolvimento do equipamento. Como pode ser modificada para varias consistências, é barata, existe em muita quantidade e o seu uso não é tóxico [4].

Num cenário futurista ideal, uma impressora 3D alimentar, usaria uma base de dados de receitas, com valores nutricionais e modos de preparação. Iria conter recipientes com vários tipos de materiais base e nutrientes essenciais, e de acordo com a receita obtida, haveria uma mistura com posterior extrusão dando origem ao alimento desejado. O procedimento aproxima-se do funcionamento de uma impressora convencional de tinteiros onde as cores primárias dão origem a todo o espetro de cor. Haveria um computador que iria dar a indicação à impressora de que ingredientes usar, como os misturar, os preparar e depositar da maneira correta.

Contemporaneamente, o problema não é como depositar a pasta alimentar, porque o tipo de tecnologia que existe disponível é capaz de o fazer. A dificuldade será criar os elementos naturais. Pode-se olhar para o caso do hambúrguer para se entender melhor o problema. Imprimir o pão, não seria dificuldade, pois a sua massa é um elemento facilmente extrudível, com a carne também não haveria problema, o *ketchup* seria o mais simples, pois não seria necessário qualquer tipo de processamento final. A impressão alimentar torna-se um problema quando queremos imprimir a alface e o tomate. Dar-lhes uma aparência e consistência real, seria com este tipo de tecnologia quase impossível. A criação de uma folha de alface em 3D que não só aparente ser uma folha de alface, mas que saiba e tenha a consistência da mesma é tão difícil como a impressão de um órgão humano [4].

Os equipamentos de baixo custo não são capazes de realizar este tipo de tarefas, pois trabalham à décima de milímetro, enquanto para a produção deste tipo de alimentos, deveriam de funcionar à escala do átomo. Para além deste tipo de limitação, existe outra ainda maior, não existe um *software* capaz de controlar a impressão neste nível. Não existe um *software* que para além de modelar a aparência física do objeto, dê a indicação dos componentes que darão origem à sua consistência, ao sabor e aspeto, que seja capaz de entender a junção de determinados elementos que são necessários para imprimir o alimento X e que seja capaz de calcular, tanto a força e temperaturas de extrusão, como as temperaturas necessárias para o seu processamento.

4.1.3 - CONCEITO CORNUCÓPIA

O projeto Cornucópia é um conceito de uma equipa de desenvolvimento do MIT. O seu único modelo funcional é a *Digital Chocolatier* já referida anteriormente. Este modelo consiste numa impressora 3D com um extrusor de pasta acoplado e vários recipientes com cereais, amêndoas e nozes que irão depois ser depositados automaticamente, após a extrusão do chocolate [43].

Este modelo é o primeiro modelo funcional da equipa, porém existem outros conceitos que entram noutro campo da impressão gastronómica.

O futuro da manipulação alimentar está ao nível molecular, nos processos que ocorrem enquanto o alimento é cozinhado, processos estes que darão origem aos sabores e à aparência da comida. Explorar este campo para ter a perceção correta de qual a reação dos alimentos ao tratamento que sofrem poderá ser o caminho certo para a incorporação de sistemas de tratamento de alimentos na automação e inclusão num equipamento de fabrico aditivo [43].

Os conceitos Cornucópia, não se fundamentam apenas nas novas maneiras de processamento de comida, mas sim na aplicação dos processos já usados no fabrico aditivo. Apesar de na cozinha, a preparação de uma refeição incluir vários processos tanto aditivos como subtrativos, existem também dezenas de tipos de tratamentos que podemos dar aos alimentos. Por exemplo, o equipamento teria de ser capaz de refrigerar e aquecer diversos tipos de ingredientes. E com estas combinações irão existir alterações químicas que modificarão drasticamente o alimento para o próximo processo. A cornucópia baseia-se em três princípios: a capacidade de misturar ingredientes em quantidades e tipos definidos, na maneira como estes são modelados em formas exatas, e na sua alteração química devida à mistura de vários ingredientes.

Os três conceitos apresentados pela Cornucópia têm aproximações ao processamento dos alimentos muito distintas [43].

VIRTUOSO MIXER

O primeiro conceito (Figura 35), *Virtuoso Mixer* contem três camadas, na primeira camada, estão os ingredientes em recipientes, cada um dos recipientes contem balança, sensores de humidade e controladores de qualidade. Existem oito contentores por camada e estes, rodam podendo criar diversas combinações com a camada do meio. Na camada do meio, estão também oito recipientes, que contêm vários tipos de misturadores e tipos de injetores. Na camada inferior existem os extrusores que estão equipados com elementos aquecedores e de refrigeração capazes de atingir as várias temperaturas desejadas. Por baixo encontra-se o prato de deposição que também poderá refrigerar e aquecer [43].

À medida que os ingredientes descem, irão sendo combinados nas quantidades desejadas, misturados, e tratados termicamente da maneira correta. Este tipo de sequência irá disponibilizar um grande tipo de combinações de ingredientes e de receitas, sendo possível o teste de várias impressões em simultâneo. [43].



Figura 35 - Virtuoso mixer [43]

DIGITAL FABRICATOR

A segunda concepção da Cornucópia é a que se aproxima mais a uma impressora tridimensional. É uma impressora de comida, que para além de conservar o conteúdo alimentar, efetua uma dosagem e mistura correta. A máquina está equipada com recipientes contendo ingredientes, fazendo a sua refrigeração. Estes ingredientes são canalizados para o extrusor onde será feita a combinação. A tubagem de extrusão poderá ser refrigerada ou aquecida consoante o tipo de alimento. Ver Figura 36.

Por fim, a deposição é feita numa câmara fechada que irá processar o alimento, esta será a verdadeira inovação perante os outros conceitos da cornucópia e protótipos existentes. A extrusão é feita em quantidades precisas, permitindo um controlo fino de nutrientes e da qualidade destes [43].



Figura 36 - Digital Fabricator [43]

THE ROBOTIC CHEF

Este princípio baseia-se nas transformações moleculares a que os alimentos estão sujeitos quando são processados. É um método de transformar um alimento cru, num alimento cozinhado, não pelo processo em si, mas pelas transformações moleculares que este sofre. E em vez do alimento só poder ser processado uma vez, como na cozinha tradicional, com este equipamento haveria a capacidade de o transformar vezes sem conta, até ter a aparência e gosto desejado [43].

É um conceito interessante pois, evita o desperdício de um alimento mal cozinhado e apesar de não ser qualificado como fabrico aditivo é uma noção a ter em conta.

Por fim estes modelos não passam apenas de noções aplicáveis à impressão tridimensional. Antes de terem um modelo físico funcional, necessitam de muito

investimento na área da investigação. Seria completamente impossível lançar estes conceitos no mercado, apesar de funcionais, sem uma base de dados de receitas, com informação nutricional, de quantidades e métodos de funcionamento [43].

Outra barreira, não só deste conceito, mas da impressão alimentar em geral é a barreira da aceitação social e moral. Haverá sempre o preconceito de que um bife extrudido por um canal não será algo benéfico ao consumidor. Para além disso existirá sempre o perigo da "Pirataria" alimentar, cujas receitas poderão ser alteradas de maneira prejudicial ao utilizador em conjugação com o uso de materiais de base de má qualidade.

Ainda existe um caminho muito longo pela frente até se obter uma refeição que seja feita através de conceitos similares a estes, sendo assim percetível em que etapa de desenvolvimento se está rumo à impressão alimentar.

4.1.4 - GEL DE HIDROCOLÓIDES

Enquanto vários tipos de alimentos podem ser processados de maneira a permitirem uma impressão, a maior parte não permite esse tipo de aproximação. Um dos grandes entraves da impressão alimentar reside na sua estruturação desses alimentos, ou na criação de substitutos que os consigam simular. A isto chama-se gastronomia molecular, e é uma maneira de completar a impressão 3D de comida. Este princípio aplicado à 3DP, dedica-se ao estudo de como se poderão comportar os nutrientes de forma a serem impressos. O futuro será conhecer uma maneira de como uma combinação de nutrientes terá a forma desejada, será embebida no gel portador e aparentará após processada por fabrico aditivo.

Os géis de hidrocolóides são uma dessas plataformas que podem ser usadas como portadores de nutrientes. Através da exploração de um conceito deste tipo, as portas estariam abertas para a utilização de uma gama infindável de alimentos.

O tipo de gel em causa consiste numa mistura de gelatina e goma de xantana que com a adição de agentes de sabor, conseguem simular uma elevada gama de texturas e sabores, através da afinação dos componentes de uma forma independente. Sendo um gel, é possível uma fácil impressão tridimensional de novos alimentos, desta forma alterando a maneira como se experiencia a comida. Ainda que de uma forma muito rudimentar, este conceito poderá tornar-se numa barreira quebrada na impressão alimentar [44].

De acordo com o artigo "*Hydrocolloid Printing: A Novel Platform for Customized Food Production*"[44], foram feitos ensaios com os componentes de hidrocolóides de maneira a simular alimentos consumidos no dia-a-dia. Foi escolhida uma vasta gama de alimentos, desde o mais sólido ao mais liquido e do mais homogéneo ao mais granular. Este tipo de texturas foi conseguido através da mistura de dois hidrocolóides, a goma de xantana e a gelatina. Variaram-se as percentagens em relação ao peso, desde 0.5% a 4% para a gelatina em água, e para a goma de xantana em água, desde 2% até 16%. Para além dos componentes estruturais, foram adicionados vários aditivos de sabor [44].

Tabela 11 - Tabela de comparação de alimentos[44]

Most Firm	Chocolate				Fried fish	Carrots	Biscotti
		Mushroom			Apple	Cooked chicken	Saltine
		Banana	Cooked spaghetti	Fresh mozzarella	Tomato		Hard-boiled egg yolk
	Creamy peanut butter	Marshmallow fluff	Meringue				Ground beef
	Jell-O						
	Gravy	Mashed potato	Cake icing			Refried beans	
	Self-supporting gel				White bread	Polenta	
	Non-self-supporting gel	Pudding	Cake batter	Raspberry coulis	Apple sauce	Risotto	
Weakest	Milk	Ice cream			Sorbet		Coffee grinds
	Smoothest						Most Granular

A deposição destes materiais foi feita através do equipamento *Fab@home* com duas seringas de 10ml cada e controle através de software do tipo *open source*. Foram impressos cubos com 30mm de forma a que as impressões pudessem ser avaliadas visualmente e de como seria a sua consistência na boca.

Tabela 12 - Consistências conseguidas [44]

Most Firm	4% gelatin ***CLOSE TO*** **CHOCOLATE/ MUSHROOM**						
			16% xanthan **COOKED SPAGHETTI**				
					1% gelatin 8% xanthan ***CLOSE TO*** **TOMATO**		
	2% gelatin **JELL-O**		2% gelatin 8% xanthan ***CLOSE TO*** **CAKE ICING/ MERINGUE**	0.5% gelatin 8% xanthan ***CLOSE TO*** **CAKE ICING/ MERINGUE**			
		4% xanthan **MASHED POTATO**					
	1% gelatin **SELF-SUPPORTING LOOSE GEL**						
	2% xanthan **NON-SELF-SUPPORTING LOOSE GEL**				0.5% gelatin 4% xanthan **APPLE SAUCE**	1% gelatin 4% xanthan **RISOTTO**	
Weakest	0.5% gelatin **MILK**						
	Smoothest						Most Granular

Da Tabela 11 consegue-se retirar o número de alimentos propostos e na Tabela 12 verifica-se que apenas algumas das consistência apresentadas inicialmente foram possíveis de criar. Foi possível simular todos os tipos de texturas como inicialmente seria de prever, desde o mais sólido ao mais líquido e do mais homogéneo ao granular. O uso dos dois hidrocolóides em separado confere uma consistência sólida e homogénea, no entanto com a mistura dos dois foi possível obter a granularidade. O grau maior de granularidade dá-se com a elevação do grau dos dois hidrocolóides.

Com apenas dois hidrocolóides foi possível a simulação de uma ampla gama de consistências, apesar disso é necessário mais estudo sobre este tipo de aproximação à impressão alimentar, pois nem todas as estruturas foram conseguidas. A impregnação destes géis com nutrientes ainda será algo a testar, pois poderão influenciar a textura e a maneira de como são depositados. Os hidrocolóides poderão ser o elemento estrutural ideal para o futuro da impressão alimentar. Mesmo que isso não aconteça, é percetível que o caminho seja numa direção semelhante a esta, com um elemento portador e estrutural que consiga ser impregnado com as substâncias necessárias para a alimentação [44].

4.1.4.1 - Impacto causado

Inicialmente, o desenvolvimento deste tipo de alimentação será mais explorado através dos profissionais de cozinha. Os que estudam a gastronomia molecular e técnicas culinárias inovadoras estarão na vanguarda destes processos, sendo até um passo bastante importante para o seu desenvolvimento. A aplicação de hidrocolóides na cozinha refinada já é há algum tempo objeto de estudo de *Chefs* como *Ferran Adrià*, que usa este tipo de géis, impregnados com sabores retirados da cozinha tradicional, dando origem a esferas gelatinosas, espumas comestíveis, carnes extrudíveis entre outros. Todo este tipo de desenvolvimento é de extrema importância para a aplicação aos mecanismos de impressão. A outra maneira em que os profissionais de cozinha poderão beneficiar da impressão tridimensional aplicada com este tipo de ciência é na produção em larga escala. O mercado da cozinha refinada incide na dificuldade e quantidade de processos por que cada ingrediente passa e na forma em que o alimento é apresentado. Uma customização destes parâmetros poderia permitir a produção de vários pratos automaticamente num curto intervalo de tempo [44].

Para o utilizador comum, a impressão alimentar implicará dois tipos de mudanças, um aumento de produtividade e um novo conhecimento sobre os alimentos. O aparecimento das tecnologias na cozinha desde sempre teve como objetivo o aumento de produtividade. A introdução do fabrico aditivo neste tipo de condições não será exceção e espera-se um melhoramento na confeção dos alimentos sintetizados. Como consequência da utilização deste equipamento, nas condições referidas, o utilizador vai sentir necessidade de adquirir conhecimento nutricional e noções de como combinar os diferentes valores nutritivos. Para além disso a aquisição deste conhecimento será constante permitindo uma evolução na maneira em como se preparam os pratos, do mais simples ao mais elaborado.

Como já referido anteriormente, a única maneira de um conceito como estes evoluir é através de uma base de dados online, disponível a todos os utilizadores. Nesta base de dados deveriam ser encontradas receitas das mais complexas, de *Chefs* conceituados, até às mais simples do utilizador casual [44].

4.2 - POSSIBILIDADES NA SAÚDE

4.2.1 - ALIMENTAÇÃO E SAÚDE

A alimentação do ser humano está diretamente relacionada com a saúde, já foi falado anteriormente do comer de uma maneira mais saudável, mas não de como a impressão tridimensional poderá estar incluída neste processo.

Cada vez mais o ser humano tem o controlo de dados, desde a quantidade de calorias ingeridas, ao peso, aos batimentos cardíacos, até ao número de passos dados por dia. O controlo deste tipo de dados é importante, conjugado com a impressão alimentar da seguinte maneira, uma vez mais supondo que a impressão alimentar está desenvolvida ao ponto de se conseguir produzir qualquer tipo de alimento com qualquer tipo de nutrientes, entre outros [4].

Imagine-se então uma impressora tridimensional de alimentos, em que cada um tem a sua conta, conta essa ligada ao seu smartphone e relógio, monitorizando a quantidade de calorias, gorduras e proteínas, entre outros, que foram ingeridas ao longo do dia. O exercício diário ativo e passivo (desgaste diário) também seria controlado, assim como o estado de saúde do utilizador em causa. Quando o utilizador se deslocasse à impressora para o seu almoço, esta iria correr um algoritmo e fornecer ao utilizador uma quantidade de alimentos possíveis para a sua alimentação de acordo com o seu estado físico, ou uma refeição qualquer enriquecida com as vitaminas e nutrientes necessárias. Isto seria bastante benéfico para utilizadores com doenças crónicas como diabetes onde o utilizador poderia fazer *upload* do nível de açúcar no sangue e receber um plano de alimentação de acordo com o permitido. Limitações ao nível alimentar, como alergias a alimentos poderiam também ser controladas mais facilmente [4].

Para utilizadores com planos de alimentação rigorosos, esta poderia ser uma forma de fazer esse controlo. Imaginando que o utilizador passa o dia no sofá, o plano alimentar desejado por ele só seria desbloqueado quando desgastasse um valor padrão de calorias, ou seria obrigado a cumprir outro plano mais saudável.

Poderia também tornar alimentos que não são propriamente apetecíveis pela sua consistência, sabor e aspeto mas que devido ao seu valor nutritivo são de alta prioridade, em algo mais agradável para quem os ingere.

Apesar de não estar diretamente relacionada, a impressão alimentar será sem duvida um fator a considerar, na saúde e bem-estar do ser humano.

4.2.2 - OSSOS

A maior parte dos implantes da parte óssea consistem em réplicas de base polimérica ou produzidas em titânio, através do processo de cera perdida ou outros. Por natureza das suas complexas geometrias, os ossos são de extrema dificuldade de replicar, independentemente do material a ser usado. As geometrias produzidas terão tolerâncias muito baixas, pois terão de ser acopladas noutra parte óssea. Por esta razão o seu arrefecimento, após vazamento (no caso do titânio) terá de ser feito em ambiente controlado, para garantir geometrias e propriedades mecânicas ou evitar imperfeições. Os implantes de titânio são há muito usados, enquanto os implantes poliméricos ainda não têm aprovação para uso, apesar abrirem as portas a um novo caminho na produção de implantes ósseos. O uso de implantes poliméricos ganha relevância por diversas razões, este tipo de materiais pode ser reforçado com outro tipo de materiais e mais importante, pode ser impregnado com agentes bioativos, que poderão atuar na regeneração óssea, bem como a presença de antibióticos ou anti-inflamatórios que permitam uma melhor adaptação do corpo humano ao corpo estranho [4].

Atualmente estão a ser feitos estudos relativamente à impressão tridimensional óssea onde o material compósito utilizado é o fosfato de cálcio e colagénio. Este tipo de material é uma das primeiras alternativas aos enxertos sintéticos de ossos, pois oferece propriedades mecânicas muito similares às da estrutura em causa, para além de ter osteocondutividade (parâmetro que define a regenerabilidade do osso) elevada [45].

Para este tipo de estudos foram adaptadas impressoras de aglutinação de pós de maneira que pudessem ser utilizados os materiais referidos anteriormente, de forma a criarem modelos de ossos de animais. Com este tipo de *hardware* é possível a obtenção de altas resoluções em qualquer tipo de geometria. Sendo uma superfície tão irregular como um osso é possível a existência de poros com 0.5 mm de diâmetro até à décima de mícron, requeridos para a passagem de fluidos e células, permitindo uma melhor regeneração.

Este tipo de método poderá ser utilizado em situações que haja uma secção óssea em falta, ou mesmo partes inteiras, permitindo uma regeneração e agrupamento à estrutura restante [45].

Têm sido feitos testes para os vários tipos de fabrico aditivo, de forma a encontrar o processo que confira as melhores características na impressão óssea.

- "*Direct Ink writing*" - Através deste processo, que consiste na deposição de uma pasta através de extrusão, sob uma pressão específica, as vantagens obtidas foram a inclusão de antibióticos e biomoléculas (proteínas e células vivas), no entanto esta inclusão de drogas está restrita pela temperatura do pós-processamento do material.
- "*Laser-assisted bioprinting*" – O material desejado é coberto por um disco de quartzo, depois existe uma deposição controlada por um laser. As vantagens deste processo são que este trabalha a temperatura ambiente, há a possibilidade de inclusão de material orgânico e inorgânico e existe um controlo quantitativo destes parâmetros, porém existe a necessidade do uso de discos de quartzo.

- "SLS" – Processo com cama de pó e posterior sinterização. Neste processo não se precisa de suportes, nem de cura. A resolução depende do diâmetro do laser.
- "SLA" – Existe um imersão da plataforma num liquido fotopolimerizável e existe uma exposição à luz, que solidificará na zona de foco. Conseguem-se obter estruturas internas complexas, em que existe um fator de crescimento com a inclusão de células e proteínas. Só funciona com fotopolímeros.
- "FDM" – Deposição de material polimérico ou cerâmico através de extrusor, não necessita de suportes, mas há a restrição de material devido à mudança de fase [46].

Este tipo de estudo demonstra que a impressão 3D de baixo custo a curto prazo, não será apresentada como uma alternativa para a impressão óssea. Este tipo de procedimento terá de ser feito em ambiente extremamente controlado, quer ambientalmente quer de dimensões. A impressão de baixo custo não consegue conferir, para já, as características necessárias para a impressão de algo tão complexo.

A primeira cirurgia onde se usou um elemento impresso em 3D foi em 2012, quando foi impresso em titânio um maxilar inferior e aplicado num paciente de 83 anos que sofria de cancro oral. O processo iniciou-se quando a equipa medica através de um TAC conseguiu obter a geometria do maxilar do paciente, convertendo-o para um modelo CAD 3D. O maxilar foi impresso em titânio, através do processo de SLM e posteriormente revestido por um cerâmico. O processo foi tratado por uma empresa belga, que faz impressões tridimensionais de material médico [4].

4.2.3 - PROTESES DENTÁRIAS

O futuro da impressão tridimensional na área dentária atualmente é já um processo em andamento. A empresa BEGO USA produz próteses dentárias desde 2011. Como todos os dentes são diferentes, não existe uma geometria padrão para cada dente sendo necessário um produto diferente para cada cliente . Até agora as próteses dentárias eram fabricadas através do processo de cera perdida. Este processo é constituído por diversas fases, desde a criação do modelo em cera, ao revestimento da mesma com uma carapaça, carapaça esta que terá de ser curada, só depois será removida a cera e adicionado o metal. É notória que a complexidade do processo é um entrave pela demora que poderá causar. Consegue-se assim entender como é que a impressão tridimensional é um avanço nesta área. A empresa explica que desta forma o período de espera do utente passa para 48 horas após receber o modelo STL do cliente.

A BEGO utiliza o equipamento da EOS DMLS (*Direct metal laser sintering*), que sinteriza vários tipos de pós metálicos. Independentemente do material em uso, este processo é eficaz monetariamente e a nível de tempo [35].

São esperadas evoluções na área da impressão dentária, através do mesmo principio utilizado pela impressão óssea.

4.2.4 - IMPRESSÃO CELULAR E TECIDO VIVO

Existe uma ligação indireta entre os plásticos e células estaminais, o plástico é a base de todos os utensílios usados diariamente, a maneira mais simples de moldar e fabricar um objeto. Como pode ser enriquecido com uma quantidade enorme de materiais, o plástico serve de base para a criação de outras combinações. As células estaminais funcionam da mesma maneira, são células em branco, como que a matéria-prima do corpo humano. Todas as células, tanto cerebrais como da pele do ser humano, derivam deste tipo. Estas têm o poder de se dividir em células filhas, que terão o poder de se tornar em novas células (renovação celular) ou de acordo com o meio em que estejam inseridas (são potenciadas) poderão tornar-se em células musculares, cerebrais, ósseas ou até sanguíneas, havendo aproximadamente 210 tipos diferentes [47].

É possível entender como este tipo de célula poderá vir a ser importante, conjugadas com a impressão tridimensional. Quando for possível a impressão celular, estaremos diante de um dos maiores avanços científicos dos últimos anos.

A bio impressão consiste em criar tecido vivo, e não inanimado. Consiste na aplicação de células no local correto, de maneira a ser obtido tecido vivo. A forma presentemente estudada de bio impressão utiliza um hidrogel contendo células vivas. Este gel serve de proteção e acondicionamento durante a extrusão. Após deposição, o hidrogel torna-se estrutura de suporte para o crescimento das células, que irão largar substâncias transformando este gel em tecido, cartilagem ou outro tipo de consistência. O tipo de material a fabricar depende da posição e da ordem em que as células serão colocadas. A impressão tridimensional é o método ideal para este tipo de procedimento, devido à sua capacidade de criar padrões e formas precisas que permitirão a criação destas diferenciações entre tecidos. Combinando este fator com o uso de vários extrusores, a produção de tecido vivo de uma forma artificial estaria mais facilitada [4].

4.2.4.1 - Impressão de órgãos

A impressão de órgãos é a fase seguinte à impressão do tecido vivo, a complexidade deste tipo de operação é muito mais elevada que a criação do tecido.

O uso de impressoras tridimensionais é um dos passos para o desenvolvimento deste tipo de operações, explicadas à frente. A utilização deste tipo de ajuda computacional automatizada, irá permitir como que uma “linha de montagem” de tecido vivo e órgãos, bem como flexibilidade de fabricação de estruturas especificas. A linha de montagem deverá ser constituída por seletores e diferenciadores de células, produtores de esferoides de tecido, a bio impressora tridimensional e um biorreator de perfusão. Um esferoide é uma das estruturas já impressas, como que um bloco de células que pode ser ligado a outro [48]. O biorreator de perfusão permite fornecer os nutrientes necessários às células.

A bio impressora irá funcionar através do princípio do fabrico aditivo e como todos os outros equipamentos, adicionará camada sobre camada até perfazer a dimensão desejada. Mais uma vez, o *boom* da evolução deste tipo de equipamento nos últimos quinze

anos permite, que este tipo de estudo seja feito, apesar de mais complexa, pela sua necessidade de maiores resoluções [49].

Estes dois equipamentos produzidos de raiz para a impressão celular (Figura 37), contêm um mecanismo com um conceito de funcionamento similar a uma impressora extrusora de baixo custo.

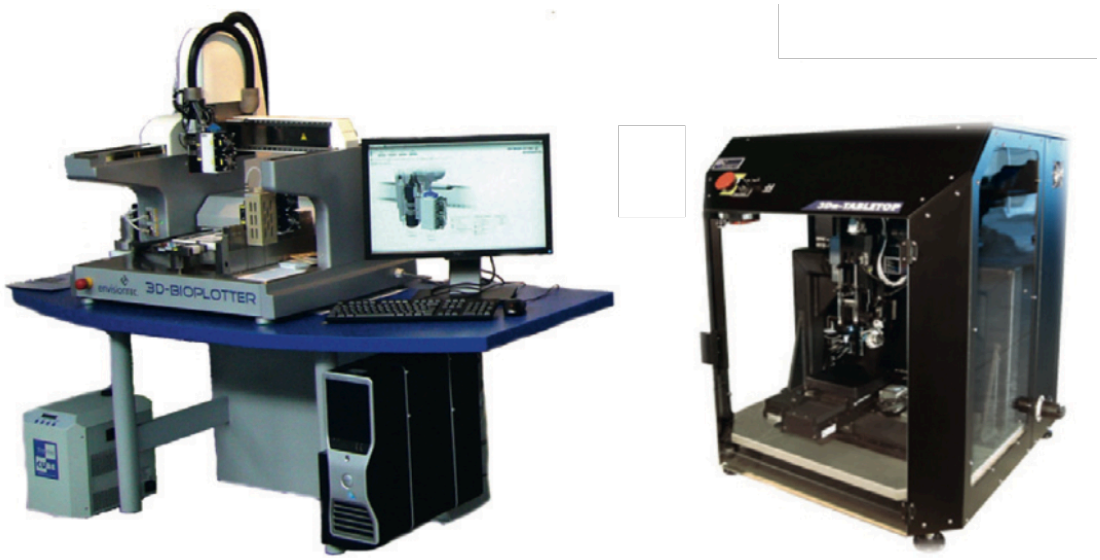


Figura 37 - Envisiontech (Esquerda) e Sciperio Comercial Printers (Direita) [49]

4.3 - POSSIBILIDADES NA ENGENHARIA

A evolução da impressão tridimensional é um produto da evolução da engenharia, por isso falar em possibilidades no que o 3DP pode trazer à engenharia é tão relativo como falar no que a engenharia pode trazer ao mundo da impressão tridimensional.

Os caminhos que esta área pode explorar são ilimitados, no entanto destacam-se alguns pela importância que têm. É tão importante que os mecanismos de impressão evoluam para escalas muito maiores como mais pequenas. A impressão à escala microscópica é um fator de elevada importância em varias áreas, e a impressão em volumes enormes também poderia permitir a abertura a novos mercados. No entanto a impressão tridimensional de baixo custo está a encaminhar-se para a fusão com outro tipo de equipamentos, podendo efetuar mais que um só tipo de operações.

Têm sidos desenvolvidos vários protótipos de máquinas, que tanto usam o fabrico aditivo, como subtrativo. Podendo ser aplicados em qualquer posição numa linha de montagem e a sua verdadeira vantagem é a versatilidade da sua construção em conjunto com as modificações possíveis no *software*. Isto permite um numero elevado de alterações, e esta característica é o que permitirá uma evolução significativa. Contudo, as possibilidades que evolução deste tipo pode trazer estão espalhadas por todos os campos.

4.3.1 - CIRCUITOS ELETRÓNICOS

A impressão de circuitos eletrónicos é uma barreira que está a dividir os sistemas ativos dos passivos. É possível imprimir tridimensionalmente circuitos elétricos em placas, mas a grande dificuldade é a impressão de ligações elétricas devidamente isoladas no interior de componentes. A grande dificuldade é não ter de trocar o processo à medida que existe a impressão num sistema isolado.

De uma forma mais concreta, o problema que existe na impressão de condutores em não condutores é a dificuldade dos dois materiais serem compatíveis no momento da impressão. Ao tentar imprimir metais e plásticos ao mesmo tempo, as temperaturas necessárias para o metal ser impresso, vão decompor a estrutura plástica em seu redor. Uma possibilidade seriam metais com baixo ponto de fusão, compatibilizando-se com o polímero, porém estes metais, são de impressão muito complicada e bastante raros, o que torna o sistema muito dispendioso e inviável. Outra hipótese seria usar condutores não metálicos (poliméricos neste caso), mas estes não são completamente condutores, e como a utilização deste tipo de materiais tornaria o projeto dispendioso, é completamente arredado.

Atualmente, a indústria em geral e de impressão tridimensional, estão focados na descoberta e utilização de materiais mais resistentes. A próxima etapa poderá ser a utilização ou impregnação de materiais condutores que não são prioridade de estudo neste momento.

A partir do momento que esta barreira seja levantada, existirá a possibilidade de fazer uma impressão integral de circuitos complexos, motores e sensores, entre outros, em conjunto com materiais de suporte. Assim seria possível a obtenção de robots de uma só impressão, sem necessidade de montagem.

4.3.2 - MICROBATERIAS

Uma equipa de investigadores do instituto de *Wyss,* em *Harvard*, foi capaz de imprimir tridimensionalmente microbaterias que poderão ser aplicadas em micro mecanismos em todas as áreas [50].

O processo utilizado para a criação destas microbaterias, foi a utilização de tintas, contendo ânodos de lítio e nano partículas de óxido de titânio e lítio, que foram posteriormente adicionadas através de uma mistura de água desionizada com Etilenoglicol. A extrusão desta tinta foi feita através de uma seringa com uma ponta de extrusão com um diâmetro de um mícron, de maneira a conferir as tolerâncias e dimensões corretas (Figura 38).

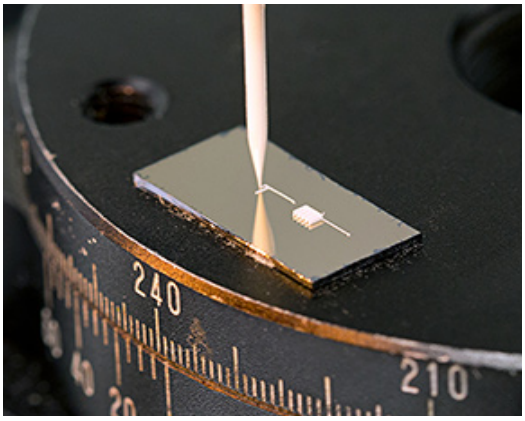


Figura 38 - Impressão de microbateria [51]

A criação deste tipo de bateria leva a dois avanços importantes. Em primeiro lugar, as tintas funcionais, estas podem solidificar em componentes eletrónicos, como as baterias, elétrodos, fios e antenas. O segundo ponto importante é o tipo de extrusor utilizado para este procedimento. *Nozzles* de diâmetro de mícron que conseguem extrudir este tipo de tinta a altas pressões, sendo aplicadas a impressoras tridimensionais de escala industrial.

O tipo de tinta utilizado quando não solicitado externamente, mantem uma estrutura quase sólida, a partir do momento que existe uma pressão aplicada estas tornam-se quase liquidas facilitando a sua extrusão. Depois de depositadas voltam à forma sólida [51].

A microbateria impressa (Figura 39) contem um ânodo e um cátodo em estrutura entrelaçada com uma camada de separação e tem um milímetro de comprimento. Uma bateria com um milímetro é algo pioneiro, mas o fator que a torna tão única é a facilidade do processo e a capacidade de impressão em várias formas, se necessário.

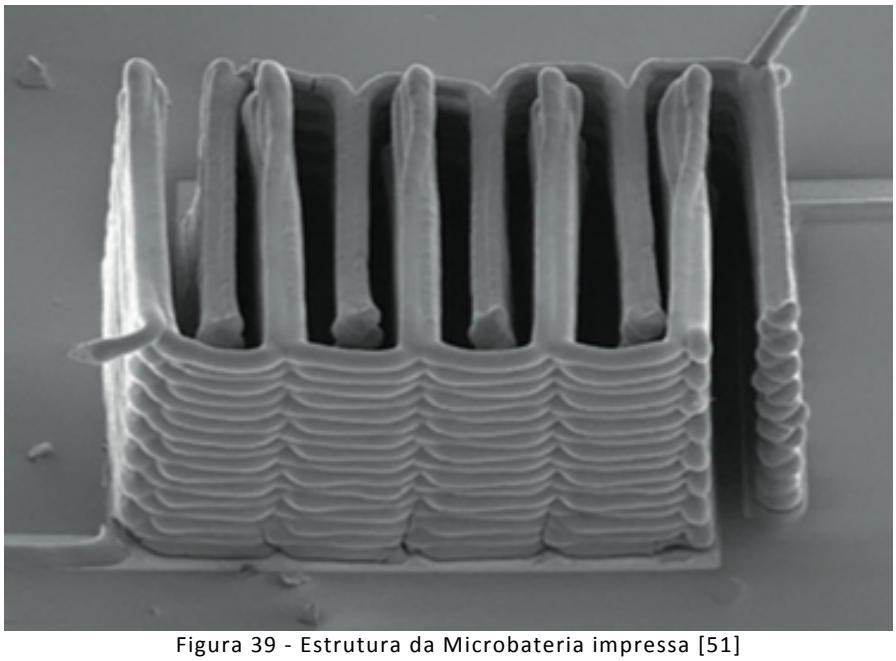


Figura 39 - Estrutura da Microbateria impressa [51]

4.3.3 - NANOCOMPÓSITOS

A impressão tridimensional de nanocompósitos tem grande potencial, e com a capacidade de imprimir este tipo de materiais existe uma possibilidade de expandir o mercado em novas frentes. Os nanocompósitos podem ser combinados de forma a permitirem um controlo de gradientes térmicos, condutividade elétrica, alta resistência e peso baixo. Um nanocompósito é uma mistura de componentes onde pelo menos um deles está à nanoescala e é misturado ou combinado com um material de base, chamado matriz.

Subsiste uma grande necessidade para este tipo de materiais, como descrito no capitulo 4.3.1, estando a limitar o desenvolvimento de outras áreas. As grandes dificuldades de trabalho com estes componentes são o custo, consistência de características em grandes quantidades, e instabilidade em algumas das propriedades conferidas.

Existem duas maneiras de trabalhar com nanocompósitos na impressão tridimensional, sendo uma delas a aplicação dos nanomateriais de forma manual ou automatizada após ter sido feita a impressão. A segunda forma consiste na mistura prévia do nanomaterial na matriz e só depois ser efetuada a impressão.

O controlo das propriedades de uma impressão de uma mistura de nanocompósitos é um dos pontos problemáticos devido à sua imprevisibilidade, não só na peça após impressão, mas também durante a impressão. Sendo aplicado a um extrusor, os problemas previstos seriam entupimento do extrusor por agregação das partículas, o tipo de superfície obtido seria dificilmente previsto e falta de homogeneidade na peça.

O estudo e desenvolvimento deste tipo de materiais em conjunto com a impressão tridimensional é necessário e poderá abrir muitas portas noutras áreas.

4.3.4 - CONSTRUÇÃO CIVIL

Estruturas impressas tridimensionalmente já existem, a impressão de paredes em cimento, já é um conceito real. Um conceito aproveitado da impressão tridimensional de baixo custo e expandido a nível de tamanho. O mecanismo para a construção deste tipo de estruturas funciona da mesma maneira sendo que as estruturas de suporte têm agora metros de comprimento, os controladores e motores de passo serão muito maiores, enquanto a extrusão do cimento se dá da mesma forma que num extrusor de diâmetro normal [4].

Como um dos principais trunfos da impressão tridimensional é a liberdade geométrica, inserida neste meio é algo bastante vantajoso. É possível agora a fabricação de determinadas formas que de forma convencional não seriam possíveis. A utilização de canais para ventilação e de padrões de enchimento em paredes é algo novo que poderá ser aproveitado como outra vantagem no isolamento térmico e de som (Figura 40) [4].



Figura 40 - Padrão interno duma parede impressa tridimensionalmente

A impressão de cimento e materiais estruturais a este nível terá de conter uma quantidade de fibras de reforço para que a estrutura não ceda.

Outra das vantagens deste tipo de impressora, é que pode ser expandida a qualquer tamanho, desde que a estrutura metálica confira a segurança do equipamento. Enquanto a nível estrutural podem haver mudanças enormes, a nível de software, para além da introdução das dimensões da área de impressão, pouco irá ser alterado em relação a um modelo mais pequeno. A partir deste princípio é possível adaptar uma impressora deste nível à construção de lotes habitacionais tornando este processo muito mais rápido [4].

4.4 - DESIGN

Uma das maiores vantagens que a impressão tridimensional nos traz é a liberdade geométrica, este fator é importante nesta área pois desbloqueia formas e geometrias que antes não poderiam ser concretizadas pelos processos utilizados previamente.

Desenhos de padrões e estéticas existentes na natureza são impossíveis de fabricar, um exemplo disso são os búzios, com padrões interiores em espiral que são praticamente impossíveis de replicar através dos processos de produção usados normalmente. A única maneira de produzir uma espiral com parâmetros controlados é através do fabrico aditivo, e à medida que os poderes de computação aumentam, vai-se verificando que nem os *software* convencionais de modelação tridimensional são capazes de replicar este tipo de parâmetros. Os *software* convencionais têm como base a modelação por geometrias básicas como cubos, esferas e cilindros ou em casos mais avançados modelação planar. A maneira de contornar essas limitações e retirar algo mais do potencial do fabrico aditivo é através de um novo conceito designado modelação algorítmica. O conceito de algoritmo está implícito na natureza, como por exemplo a espiral do búzio com a série de *Fibonacci*. O que esta nova gama de *software* usa é que ao contrário dos *software* convencionais, que contêm uma interface gráfica onde são manuseados os modelos, têm uma interface de ligação com operações matemáticas e a interface gráfica é meramente representativa dos padrões inseridos na parte de operações.

Este tipo de modelação pode ser feito através de uma componente do *software* *Rhinoceros*, chamada de *Grasshopper* 3D. O *Grasshopper* (Figura 41) permite a modelação de superfícies em padrões tridimensionais algoritmicamente definindo os seus padrões, como um conjunto de operações matemáticas.

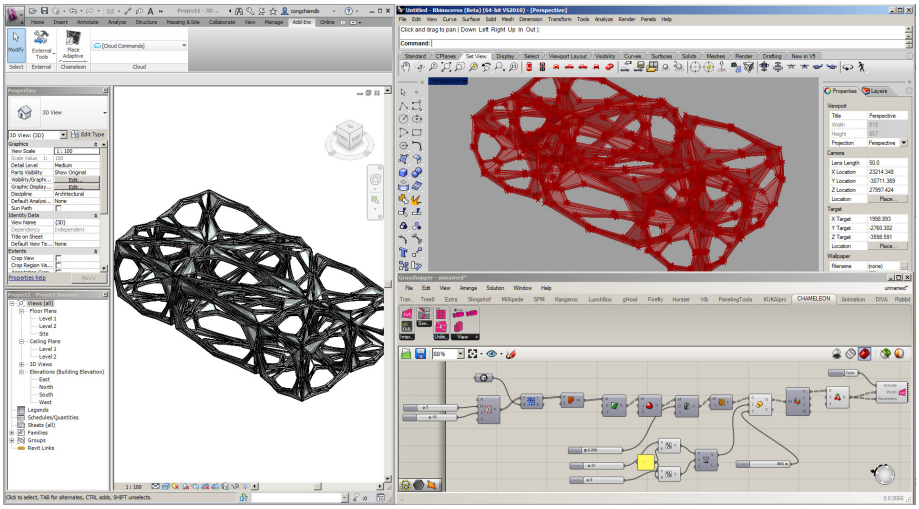


Figura 41 - Interface Grasshoper3D para Rhinoceros [52]

Através deste novo conceito de modelação algorítmica estão a ser desenvolvidos novos tipos de geometrias que antes não eram possíveis de fabricar, e é aqui que entra o design com uma nova estética. Juntando a liberdade geométrica da impressão tridimensional com a capacidade de desenhar padrões, fica disponível uma nova vertente presente no arsenal de um designer de roupa, de interiores, ou num arquiteto, entre outros.

A Figura 42 representa alguns exemplos da modelação algorítmica, a primeira imagem (esquerda em cima) é um conceito de Ross Barber, da *London College of Fashion*, é um sapato impresso tridimensionalmente numa peça sem qualquer tipo de cola, apenas com pele cosida por dentro para melhorar o conforto.

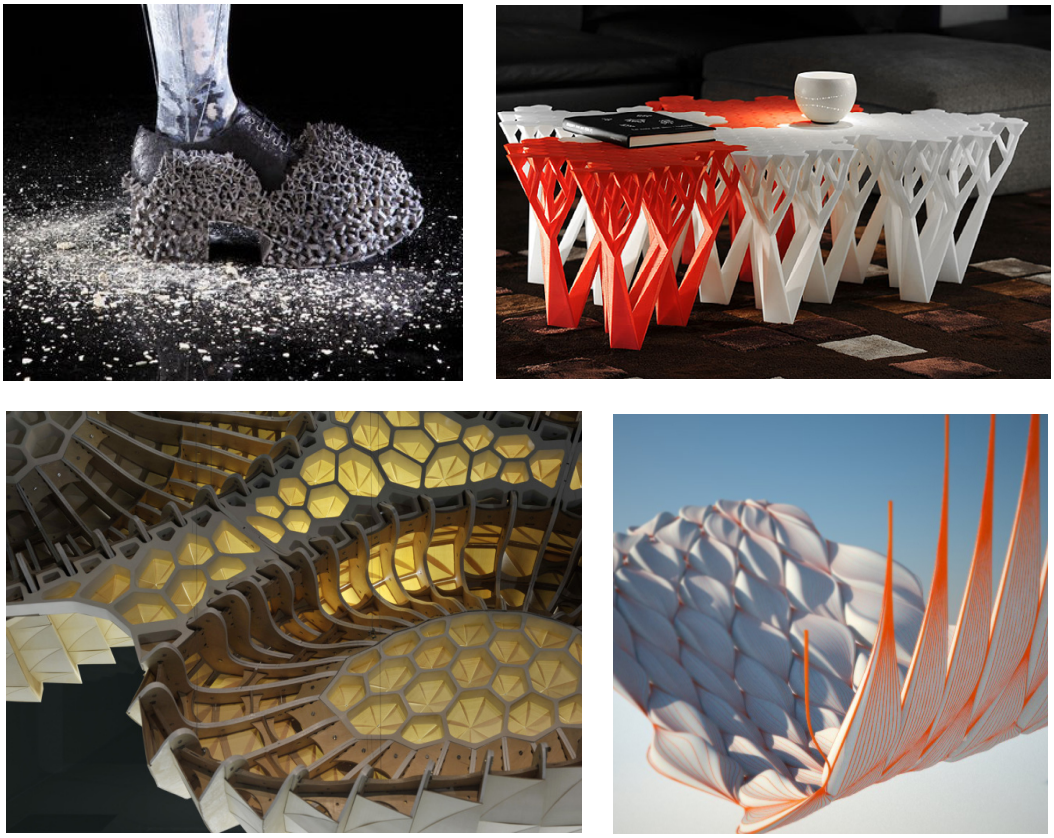


Figura 42 - Sapato impresso em 3d por ross barber london college of fashion (Esquerda cima), Mesa de café em forma de árvore (Direita cima) [4], Base de dados grasshopper3d (Baixo) [53]

O resultado desta construção é um sapato híbrido com pele na parte do peito do pé e com sola e gráficos impressos em 3D. À direita na parte superior da figura, encontra-se a mesa de café *Fractal-T*, feita com formas tipo árvores, produto dos designers *Gernot Oberfell*, *Jan Wertel* e *Matthias Bar*, que consideram a obra "uma ligação entre a natureza e a matemática" e que "seria impossível produzir com outro tipo de processo de fabrico". Esta obra esteve em exposição no *Victoria&Albert* Museu de Londres, no Museu da Arte em Nova Iorque e no *Design Hub* em Barcelona.

As duas imagens apresentadas em baixo são dois exemplos existentes na galeria do *Grasshopper3D* [4]. Como fica comprovado pelos exemplos acima referidos, o fabrico aditivo e o design estão interligados pelas vantagens que um pode trazer ao outro, sendo possível a exploração de uma nova estética que antes seria muito dificilmente alcançável.

Não será preciso ir tão longe para comprovar este facto, se visitarmos a base de dados *Shapeways* fica perfeitamente percetível o quão o design é importante. Uma das maiores galerias de *uploads* presente neste site é a de joalharia e com um número de vendas bastante elevado. É também percetível esta tendência no site *thingiverse.com*, onde a categoria de joias e acessórios é uma das com mais *uploads*.

4.5 - EDUCAÇÃO

Como é que este tópico pode ser afetado pela impressão tridimensional?

A evolução e expansão da tecnologia dá a grande parte da população desenvolvida este tipo de acesso. Cada vez mais é comum a assimilação da tecnologia pelas crianças, desde uma idade mais tenra. Isto não se propaga só na utilização de telemóveis e computadores, mas sim nas outras áreas. A impressão tridimensional consiste num processo que se inicia por uma ideia, pela modelação virtual, e concretização física dessa mesma ideia. Este processo faz parte de um conceito de estimulação mental, que aplicado a mentes em desenvolvimento, permite uma parte mais gratificante da aprendizagem para o estudante. De uma forma muito simples pode ser comparada com ideia do Lego de uma forma mais extrema, com ideia, de desenvolvimento e construção.

Cada vez mais o conceito, fazer para aprender é mais utilizado, uma vez que é uma maneira de estímulo para a aprendizagem. Um exemplo deste conceito foi a aplicação da impressão tridimensional através de projetos do tipo *open source* nas escolas da Grécia. A implementação deste tipo de estudo foi dividida em três fases distintas. Na primeira fase, foi examinado o lado educacional da impressão tridimensional em estudantes do secundário. Depois, foi estabelecida uma rede de colaboradores em escolas com a aplicação deste principio a vários tipos de alunos, em várias fases de aprendizagem, obtendo o *feedback* deste tipo de operação. Na última fase, haveria o estudo do potencial avanço que a impressão tridimensional traria em estudantes normais e invisuais [54].

Iniciando com a primeira fase, o estudo começou na introdução em duas escolas, uma pública e uma privada, duas horas por semana, num total de 700 minutos por escola. Começou por introduzir os estudantes ao conceito de Modelação em 3D, expondo-os ao *software*, ao *email*, *office,* entre outros, em inglês (lingua não nativa), com o intuito de aplicar o espírito crítico e desenvolver o carácter artístico de forma resolverem os problemas propostos através de tentativa e erro. Depois de terem ganho familiaridade com os *software*, os alunos tinham que formar equipas e propor objetos que poderiam ser impressos bem como utilizados por crianças, alguns dos quais para invisuais e deveriam de conter mensagens em braile. O passo seguinte foi a impressão dos objetos desenhados, dando oportunidade aos alunos de desenvolverem e trabalharem com a impressão de forma a que quando encontrassem problemas os resolvessem. Por fim foi pedido aos alunos que escrevessem um trabalho sobre o processo, com os problemas que encontraram tanto na modelação, como na impressão. Incluído no trabalho deveria ir uma explicação sobre o tipo *open source*. Este processo requereu que os estudantes desenvolvessem o conhecimento em design e pensamento 3D, a pesquisa tanto em grego como inglês, a aprendizagem da mecânica das impressoras 3D, a combinação do *software* com os problemas obtidos na impressão, capacidade de engenharia e resolução de problemas entre outros [54].

Como conclusão, os autores referem que este processo pode ser vantajoso para a aprendizagem dos estudantes, se estes forem devidamente estimulados para este processo, mas que se torna uma clara vantagem para os alunos a nível de visualização de modelos virtuais e resolução de problemas [54].

Assim como este, projetos como a *Fab@home*, neste caso *Fab@school* estão associados ao desenvolvimento da capacidade de engenharia de estudantes desde tenra idade, estando a ser aplicados em várias escolas primarias, e até secundarias.

4.6 - PRINCÍPIOS MORAIS E SEGURANÇA

Com a impressão tridimensional ao alcance de todos, existem muitos parâmetros a ter em conta, no que diz respeito ao cumprimento da lei, segurança e moralidade social da sua utilização.

4.6.1 - MORAL E PATENTES

Foi falado anteriormente no capítulo sobre a impressão livre, nas licenças do tipo open source, com segurança e limitações para o autor. O cumprimento deste tipo de parâmetros entra em cena novamente, quando cada um se torna um "Maker". Exemplificando, cada um pode modelar algo tridimensionalmente, fazer *upload* para uma base de dados como o *Thingiverse*, disponibilizando-o para venda. Imagine-se agora que este tipo de peça modelada tinha bastante sucesso pela sua utilidade. Para um utilizador comum existem duas hipóteses, comprar o ficheiro e tratar da sua impressão, ou pegar na ideia, desenhar algo similar e imprimir este mesmo. O verdadeiro problema seria se este segundo utilizador pusesse o seu desenho à venda como concorrente do qual se inspirou.

Com a expansão deste meio, cada vez mais difícil será o controlo deste tipo de atividades ilícitas. Este tipo de práticas, para as grandes indústrias poderá ter grande impacto no seu mercado. Da mesma forma que pode acontecer para um utilizador comum com um *upload* para o *Thingiverse*, pode acontecer para algo patenteado. Imagine-se que uma empresa internacional de brinquedos que reproduz uma figura às centenas, vende cada unidade por 20€. Alguém com 4 ou 5 impressoras 3D na cave, arranja o modelo da figura online e começa a imprimir às dezenas e a vender por 15€. A empresa terá duas hipóteses, partir logo para processo judicial ou pedir ao vendedor ilícito que cancele as vendas da figura. A primeira hipótese será extremamente dispendiosa para a empresa, que dificilmente verá retorno, quanto à segunda hipótese, esta permitirá ao vendedor ter também várias hipóteses. Este poderá continuar a produzir e esperar que a empresa não entre por caminhos litigiosos, pode retirar o modelo de venda e por último, poderia fazer algumas alterações à figura de maneira que fique fora da patente e continuar a vender [4].

4.6.2 - SEGURANÇA DO UTILIZADOR

A segurança do utilizador é cada vez mais um fator a ter em conta com a evolução da impressão tridimensional. Enquanto estamos nesta fase evolutiva, este critério tem mais a ver com a toxicidade dos materiais em uso, do que com os problemas que um objeto impresso possa causar.

A partir do momento que a impressão tridimensional chegar a um patamar como o referido no capítulo sobre o futuro da impressão alimentar, poderão surgir problemas de maior gravidade. Considerando que se consegue atingir este patamar, com um tipo de impressora que nos permite imprimir os nutrientes e compostos desejados. Aqui sim

poderão surgir os grandes problemas, quando uma receita não é cumprida, quando forem adicionados compostos de baixa qualidade ou produzidos de uma maneira que não cumpre os critérios mínimos de segurança. Isto pode levar ao aparecimento de novos problemas de saúde. Um dos maiores problemas que podem surgir através deste tipo de conceito, são os novos tipos de drogas que podem ser desenvolvidos. Mesmo que uma impressora tenha bloqueios a este tipo de práticas, mesmo que só haja hipótese de produzir algo já definido de maneira segura, irão sempre existir maneiras de desbloquear e "*piratear*" este tipo de dispositivo [4].

Este é um novo problema inerente à impressão tridimensional, nem será preciso imaginar uma impressora tão evoluída. Em 2012 *Nikki Olson* e *Lee Cronin* da Universidade de Glasgow, com uma *Fab@home* produziram um novo composto chamado de *Reactionware*. Este novo composto consiste num gel polimérico que ser torna a matriz para adição de químicos. Neste meio, combinações que antes seriam difíceis de fazer, são agora feitas de maneira relativamente simples. A aparição de novos medicamentos e de uma nova forma de administração deste tipo de drogas é uma possibilidade. No entanto, é falado pelos autores das implicações que este tipo de aplicação pode trazer, que o uso deste tipo de drogas teria de ser controlado de alguma maneira. Um controlo como é feito pela Apple com "*apps*" é uma possibilidade de os utilizadores administrarem as drogas de acordo as suas necessidades. Como tudo este tipo de segurança pode ser ultrapassado e alterado para a produção de outro tipo de drogas [55].

A produção de drogas desta forma será quase impossível de regulamentar porque existem centenas de compostos à venda que não serão problema sozinhos, mas se forem misturados com outros que podem ser adquiridos de maneira livre poderão tornar-se drogas potentes. A disponibilidade de planos ou CAD online, para este tipo de drogas torna este tipo de conceitos um perigo elevado que eventualmente irá aparecer. O que há a fazer neste caso é tentar controlar e regulamentar o mais eficazmente possível este tipo de práticas. Convém ter em conta que este tipo de droga foi desenvolvido num equipamento do tipo open source com pequenas alterações [55].

A impressão tridimensional pode vir a tornar-se um problema em qualquer uma das áreas em que estiver envolvida, sempre que existir a utilização não testada de produtos. Enquanto as grandes empresas submetem os seus produtos a rigorosos testes de qualidade, um pequeno vendedor de produtos impressos em 3D não terá esse tipo de capacidade, expondo o cliente a situações de possível risco.

Existirão sempre formas de contornar a lei e tornar algo inofensivo em algo que poderá ser letal. Em 2012 na base de dados *Thingiverse* apareceu um modelo de uma arma com todas as peças dimensionalmente corretas. Sendo que todas as armas tem um número de série, e este número deverá estar associado a um utilizador com licença de porte de arma, nos EUA existe um período de espera para atribuição desse número de série a um portador, para confirmação de dados, se este portador tiver passado criminal, a arma não lhe será atribuída. Com este modelo do *Thingiverse* seria possível ultrapassar esse período de espera, anulando o número de série, completando a arma com partes metálicas disponíveis para compra sem restrições. Passados dias o modelo foi removido da base de dados [56].

4.7 - DIFICULDADES

Ao contrário do que aparenta ser, a impressão tridimensional requer muito trabalho de bastidores, qualquer um dos tipos de fabrico aditivo requer um conhecimento muito aprofundado para um bom funcionamento do equipamento. Ao contrário do que é prometido por muitas marcas de impressoras de baixo custo, o processo de impressão tridimensional não é só baixar o ficheiro, e por a imprimir.

Quanto mais complexo for o equipamento em causa, mais complexa será a sua utilização. Um equipamento de impressão 3D por *Powder-Binder Bonding* requer um tipo de configuração totalmente diferente duma impressora de baixo custo, essencialmente é preciso ter em conta o tipo de peça que se vai imprimir, como será impressa e ter conhecimento do que pode correr mal, ou de onde surgirão as maiores dificuldades. Imprimir em 3D toda a gente consegue, independentemente do equipamento em causa. A maior diferença está entre imprimir e imprimir corretamente, com elevado nível de detalhe, ou tirar o maior rendimento do equipamento disponível.

Existem diversas marcas que oferecem ao utilizador um equipamento pronto a imprimir, este equipamento virá de facto pronto a imprimir, no entanto, não terá capacidade para imprimir uma peça de elevado detalhe.

Outra das maiores limitações dos utilizadores presentemente será, a difícil adaptabilidade a *software* de desenho. Apesar de cada vez mais existirem *software* de baixa complexidade, de modelação por figuras pré definidas facilitando o seu uso (*123Design, 123Sulpt*, entre outros), é de prever que este tipo de desenho não seja para todos.

Este é um dos motivos pelos quais existem muitos céticos sobre a liberdade oferecida pela impressão tridimensional. É questionada a dificuldade de desenho, de configurações de *software*, e mais importante, a dificuldade de resolução de problemas que possam aparecer durante a impressão. Por exemplo, quando se usa uma impressora de baixo custo, é preciso ter em conta a orientação do modelo a imprimir, se são ou não necessários suportes, se a peça irá descolar da superfície aquecida, a quantidade de filamento necessário, se este irá empancar no extrusor. Estes fatores só são conhecidos após interação com o mecanismo durante algum tempo.

A impressão tridimensional está a evoluir de dia para dia e um dos problemas agregados a esta rápida evolução é que o *software* não está a acompanhar esta velocidade. Os *software* mais avançados de modelação estão praticamente iguais desde há dez anos atrás e continua a apresentar extrema dificuldade modelar algo com geometrias curvas ou irregulares. O exemplo do osso é o ideal para entender este tipo de problema. A modelação de ossos é algo de elevada dificuldade porque a geometria não é regular, tem superfícies curvas que intercalam com direitas, que por sua vez podem estar descentradas. Este tipo de construção é possível, mas é muito demorado e pesado para processamento por qualquer tipo de *hardware*. Não existe nenhum tipo de *software* que nos permita modelar mais simplesmente uma superfície assim, com medidas e toleranciamentos corretos, sendo uma limitante dos processos de fabrico aditivo. Apesar do aparecimento da modelação , esta é ainda uma das áreas que não consegue acompanhar a rápida evolução da impressão tridimensional.

CAPÍTULO 5 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, irá ser realizado um estudo do funcionamento do equipamento Reprap Prusa I3. Este estudo inicia-se com a montagem, configuração e utilização do equipamento. Desta forma, pretende-se obter um guia de funcionamento para que quem adquira um kit, consiga torna-lo funcional com os passos fornecidos neste capítulo.

A segunda parte deste capítulo, está focada no desenvolvimento de um extrusor de pasta, que permita o funcionamento com materiais que previamente não poderiam ser usados. A criação deste extrusor será feita em torno do equipamento Reprap previamente montado. Novas configurações serão desenvolvidas de forma a tornar o novo extrusor funcional.

5.1 - CONSTRUÇÃO REPRAP *PRUSA I3*

Para a realização da parte prática deste trabalho foi adquirida uma Reprap Prusa I3. Inicialmente o objetivo seria a aquisição do mecanismo por montar, contudo esse objetivo não foi cumprido devido a dificuldades de aquisição do equipamento nessas condições, pois teria de ser uma entrega internacional. Foi então adquirido um equipamento já montado.

Independentemente de já estar em condições de impressão, o equipamento já teve de ser desmantelado para substituição de peças.

5.1.1 - CARATERÍSTICAS

A *Prusa* i3 (Figura 43) é a terceira iteração do modelo Reprap *Prusa Mendel*, desenvolvida por *Josef Jo Průša*. Como todos os modelos Reprap, a *Prusa* é do tipo open *source*, tanto em *hardware* como em *software*. Apresenta uma estrutura metálica mais rígida perante a iteração número, no entanto existem dezenas de variantes da i3 com estruturas em acrílico, MDF e em perfil de alumínio.

Com este tipo de estrutura a i3 é de fácil montagem, tanto da estrutura mecânica, como de componentes eletrónicos e respetivas configurações. O modelo adquirido tem estrutura vertical em alumínio de 6mm, o que torna a parte mecânica mais rígida, evitando oscilações durante o deslocamento em impressões.

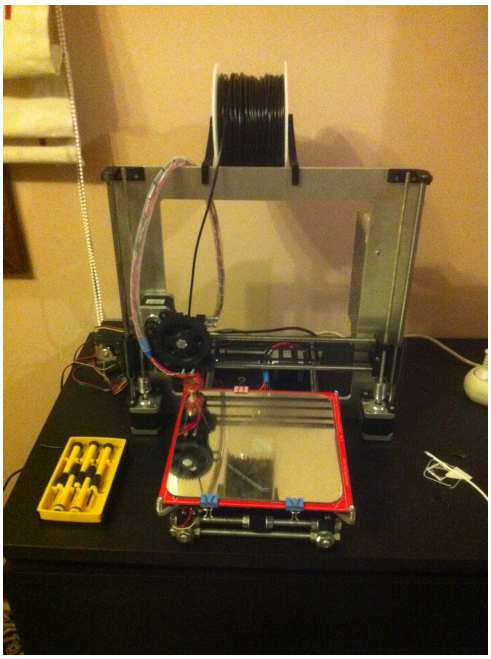


Figura 43 - Reprap prusa I3

Especificações

Partes Impressas: 20(Aprox);

Preço: 300€ e 1000€

Controladores eletrónicos: ARDUINO + RAMPS;

Área de impressão: 200x200x200 [mm];

Área de impressão: PCB aquecida;

Estrutura vertical: Alumínio 6mm;

Extrusor: *J-Head* de diâmetro variável de 0.3 a 0.5 mm

Filamento: PLA, ABS e PVA;

Diâmetro de filamento: 1.75 ou 3 mm;

A vantagem deste tipo de impressora é que qualquer um dos seus componentes, pode ser re-imaginado e/ou trocado. Com este critério em vista, existem centenas de variantes para cada um dos seus elementos disponíveis para compra, no caso de partes mecânicas como extrusor, motores, cama aquecida e controladores eletrónicos. No caso das partes impressas, a facilidade da geometria permite alteração das existentes sem grandes dificuldades.

Para um melhor entendimento da montagem da impressora tridimensional, deverá ser consultado o Anexo A, com a listagem numerada de componentes da mesma, onde estão descritos os vários tipos de componentes:

- Componentes Estruturais (Impressos);
- Componentes do Extrusor Wade (Impressos);
- Componentes Periféricos (Impressos);
- Componentes Mecânicos;
- Componentes Estruturais (Metálicos);
- Varões roscados, veios e parafusos.

5.1.2 - MONTAGEM

Para efetuar uma montagem correta da *Prusa i3*, esta deverá ser montada por eixos, a ordem destes será indiferente porque nenhum requer o funcionamento integral do outro. A acoplação dos eixos entre si e da estrutura vertical (39) (numeração proveniente do anexo B) será o passo posterior da montagem. Uma vez que cada um dos eixos possui várias guias, são necessárias medições constantes do paralelismo e distâncias.

5.1.2.1 - Eixo X, Y E Z

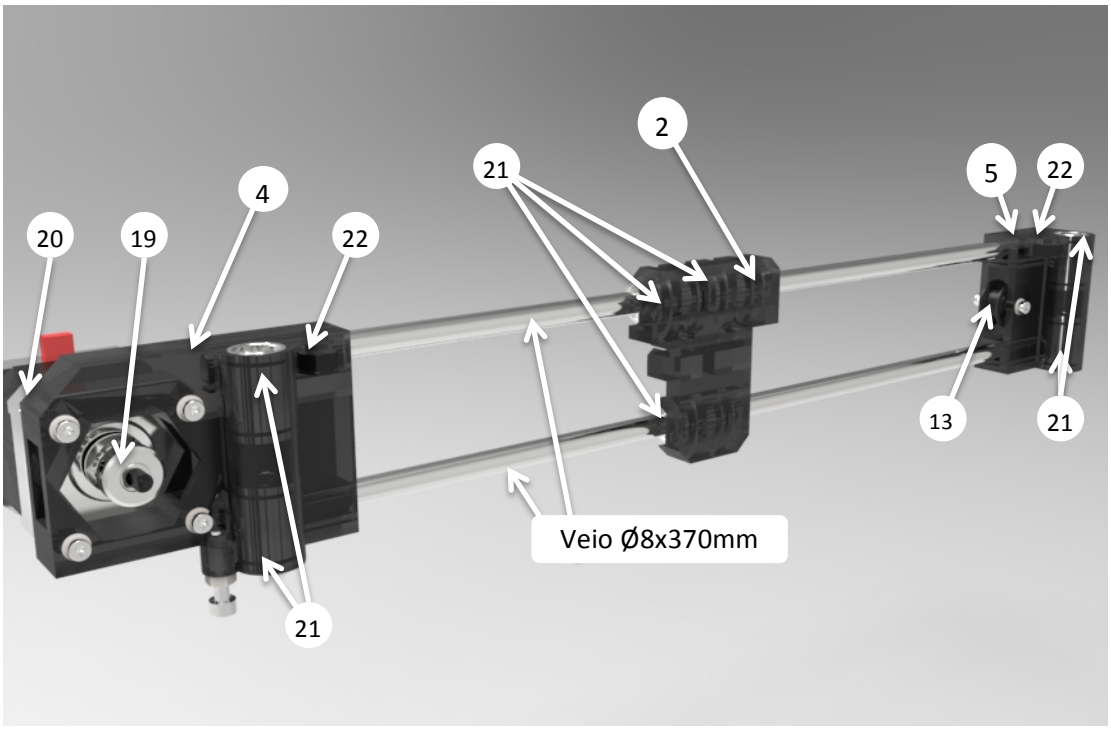


Figura 44 - Montagem eixo x

Para a montagem do eixo X (Figura 44) é preciso ter em conta que os veios horizontais estão bem presos e horizontais entre si, caso hajam desvios, os rolamentos lineares ficarão impedidos de se deslocar. Os rolamentos axiais – LM8UU(21) – serão acoplados à estrutura aperto de correia X(2), através de *zip ties* plásticos. A correia será tensionada em 2, passará pela Polia GT2 (19), Polia correia (13) e poderá ser montada nesta

fase ou na posterior de acoplação de eixos. A Polia GT2 (2) é presa ao Motor de passo NEMA17 (20) através dum parafuso sem cabeça M3x8mm.

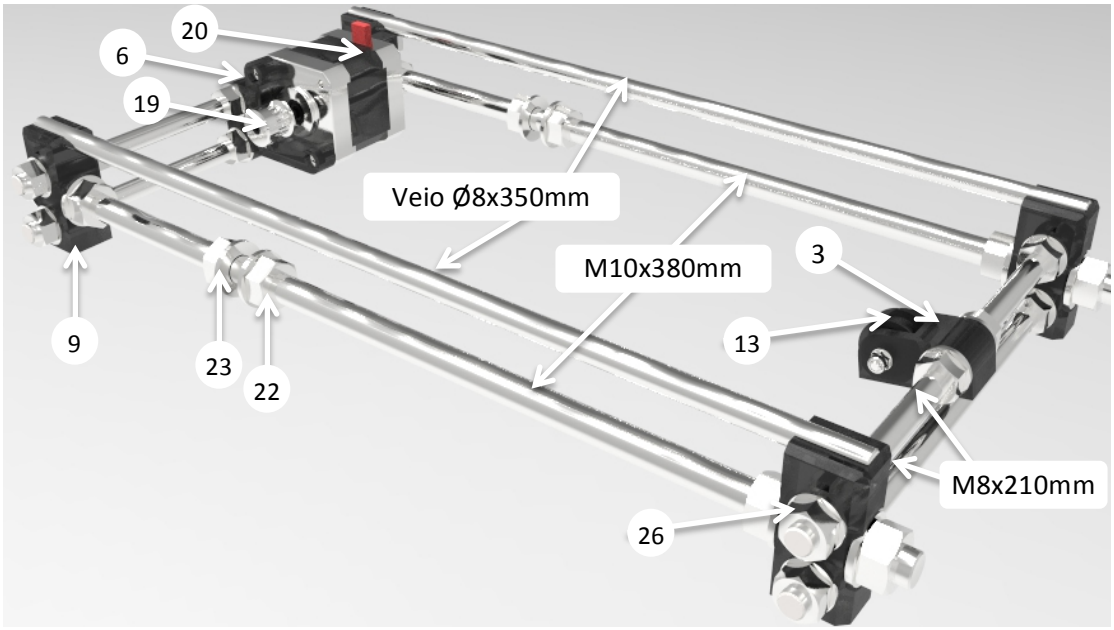


Figura 45 - Montagem eixo y

O eixo Y (Figura 45) será o mais complexo de montar e calibrar, pois possui elementos variáveis em várias direções. Para além das calibrações finais de esquadria é preciso ter em conta, os elementos (23) e (22), que têm que estar à mesma distância do pilar (9), caso contrario, a acoplação a Z terá um desvio indesejado. Os veios Ø8x350mm não deverão ficar fixos pois terão que ser removidos para a colocação de suportes e rolamentos lineares da base aquecida. O motor NEMA17 é acoplado à polia da mesma maneira que no eixo X.

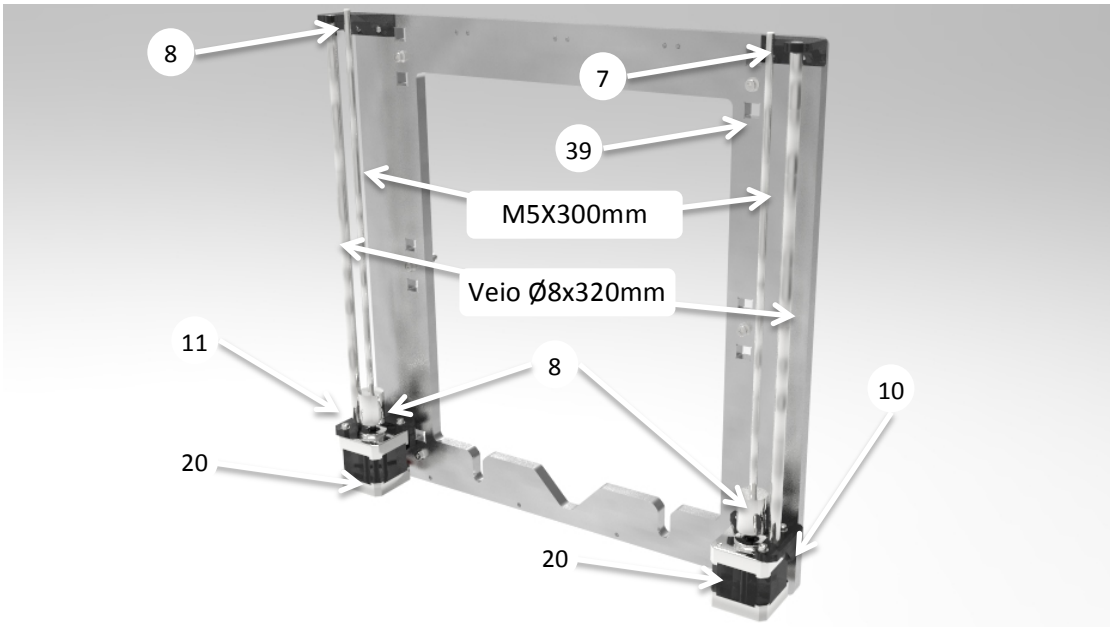


Figura 46 - Montagem Eixo z

O principal problema no eixo Z (Figura 46) será manter os varões roscados M5x300mm à mesma altura no topo, caso isto não aconteça, a posterior colocação do eixo X será efetuada de maneira errada, ficando a estrutura inclinada.

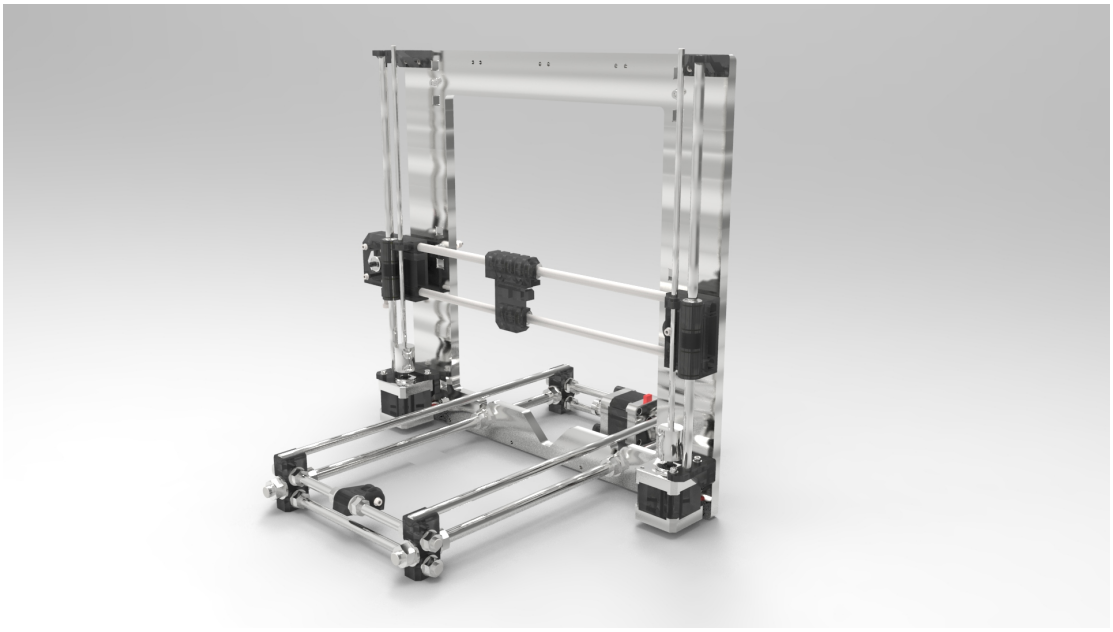


Figura 47 - Montagem após acoplamento dos eixos

É importante que as porcas dos veios roscados no eixo Y estejam à mesma distância, evitando desalinhamentos. Os eixos X e Y deverão ser revistos antes do acoplamento ao eixo estrutural Z. Posteriormente à colocação do eixo X, deverá ser feita a calibração do mesmo, verificando a altura da guia esquerda e direita, que deverá ser a mesma. A correia do eixo X deverá passar em (13) e em (19) sendo tensionada em (2). A correia do eixo Y, só poderá ser colocada quando a estrutura da *Heated Bed* (37) estiver colocada no eixo. (Ver Figura 47).

5.1.2.2 - Montagem eletrónica

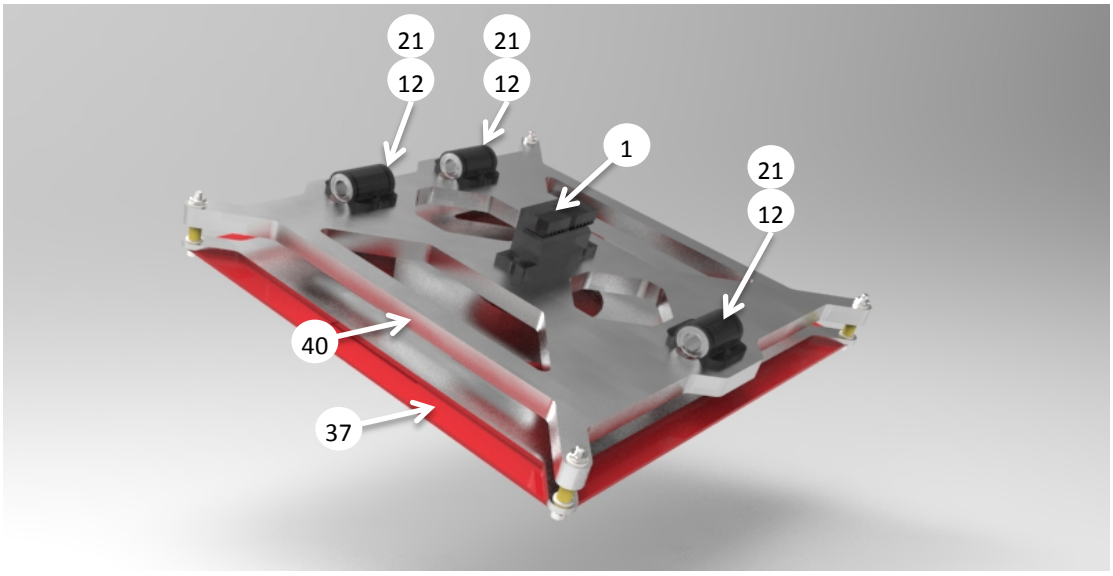


Figura 48 - Montagem da *Heated Bed*

A altura da *Heated bed* (Figura 48) deverá ser calibrada na estrutura através dos parafusos M3x30mm dos cantos. Todos os cantos deverão estar à mesma altura, será necessária uma posterior recalibração no pós acoplamento ao eixo Y.

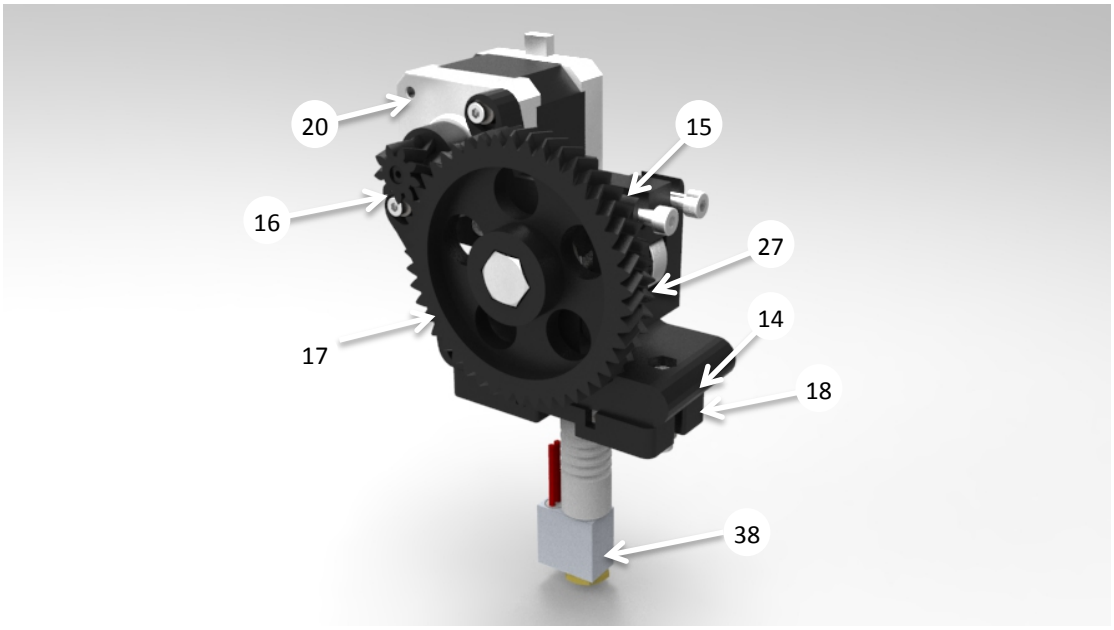


Figura 49 - montagem Extrusor Wade

O extrusor (Figura 49) deverá ser montado com vista a acoplamento posterior, a roda (17) usa um parafuso M8X30mm. O filamento será prensado por (15) com duas molas e dois parafusos M3x40mm. A ponta quente é constituída (no caso da imagem) por, um termístor 100k, um elemento aquecedor, e uma ponta de diâmetro variável (0,3 a 0,5mm) contendo um isolamento de PTFE.

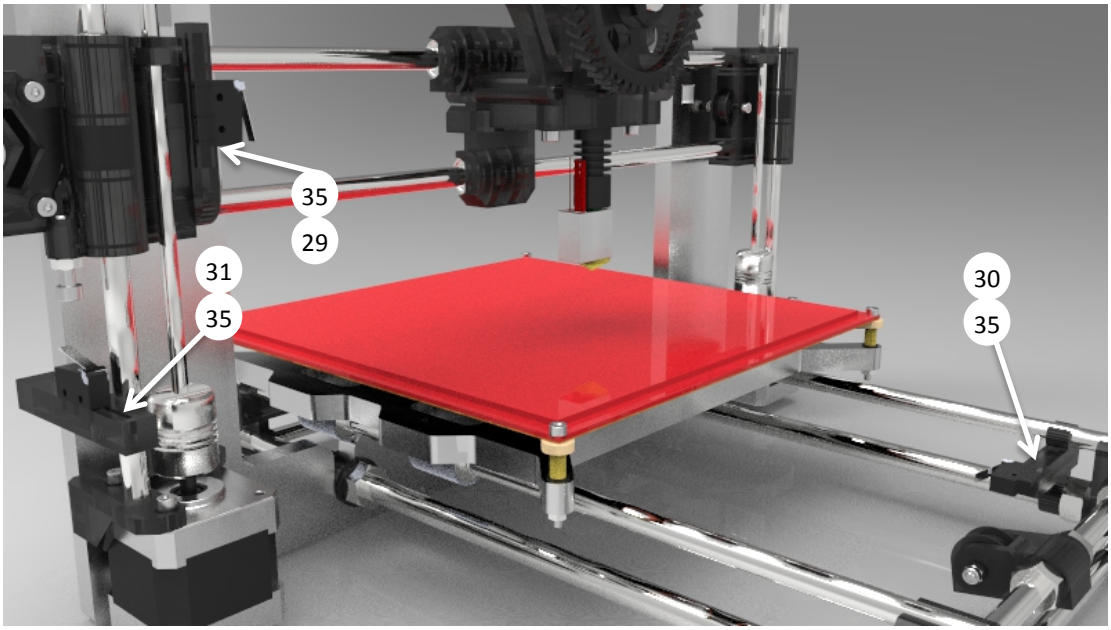


Figura 50 - Aplicação de suportes e sensores de fim de eixo

A aplicação dos suportes e sensores visíveis na Figura 50 deve ser o último passo da montagem, pois os primeiros são móveis, para calibração de posições do extrusor, definindo o zero máquina. Se este ponto não for bem definido, as impressões irão estar

descentradas e poderão até sair do tabuleiro. O sensor do eixo Z tem uma elevada importância na impressão, pois é com ele que é definida a altura do extrusor relativamente à cama aquecida. Esta não deverá ultrapassar os 0.3 mm e deverá ser calibrada com uma folha de papel dobrada entre a ponta extrusora e a cama, para que a ponta toque na folha mas não cause esforço.

5.1.2.3 - Montagem total

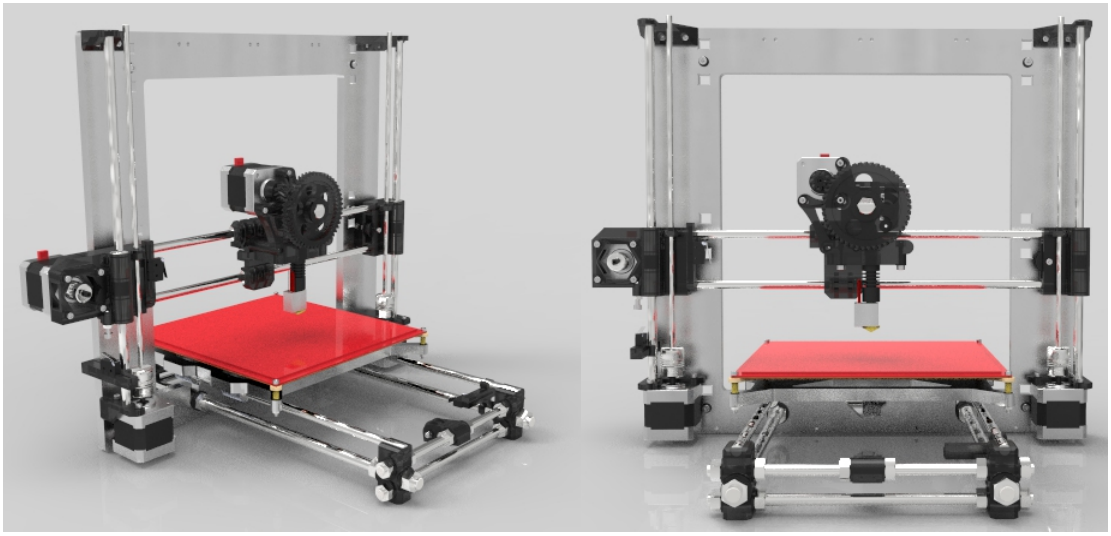


Figura 51 - Montagem final

Estando a montagem do mecanismo completa, será agora necessário a ligação de *hardware* do sistema. Esta ligação consiste numa ligação dos componentes elétricos ao controlador ARDUINO + RAMPS.

5.1.3 - MONTAGEM DE *HARDWARE*

Para o funcionamento do equipamento Prusa I3 será necessário o acoplamento do controlador ARDUINO+RAMPS (Figura 52). Este controlador irá comandar todas as ações da impressora, desde a rotação dos motores ao aquecimento da *Heated Bed*.

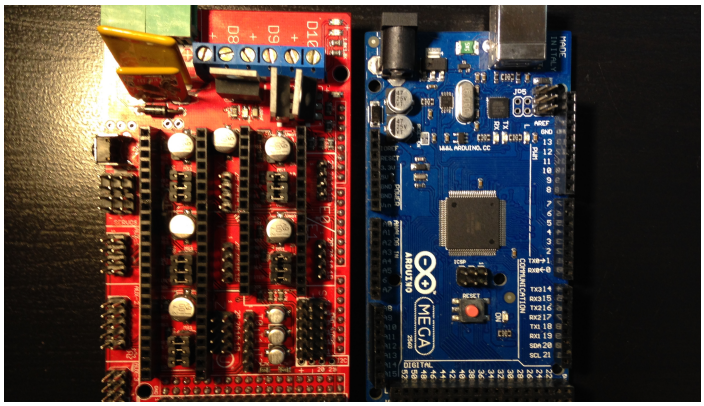


Figura 52 - Ramps 1.4 e arduino mega 2560

O Arduino é uma plataforma para desenvolvimento de protótipos eletrónicos do tipo *open source*. É um controlador que permite a *developers* amadores, desenvolverem os

seus projetos a um baixo custo. Neste caso vai ser utilizado em conjunto com outra placa desenvolvida em específico para projetos Reprap. A RAMPS 1.4 ou *Reprap Arduino Mega Pololu Shield*, como o nome indica é a *shield* desenvolvida para o Arduino Mega 2560, reorganizando os pinos por eixos, secções e tarefas a completar. Para o funcionamento dos motores de passo NEMA17 será necessário a conexão de uma placa *driver* por unidade, exceptuando o eixo do Z, onde estão dois motores a desempenhar a mesma função com a mesma *driver*.

A *Shield* RAMPS possui pinos na sua superfície inferior, que irão ser encaixados no Arduino de forma a ficar fixo. A alimentação será feita por uma fonte de 12V diretamente à RAMPS enquanto a conexão à interface no computador será feita através do Arduino.

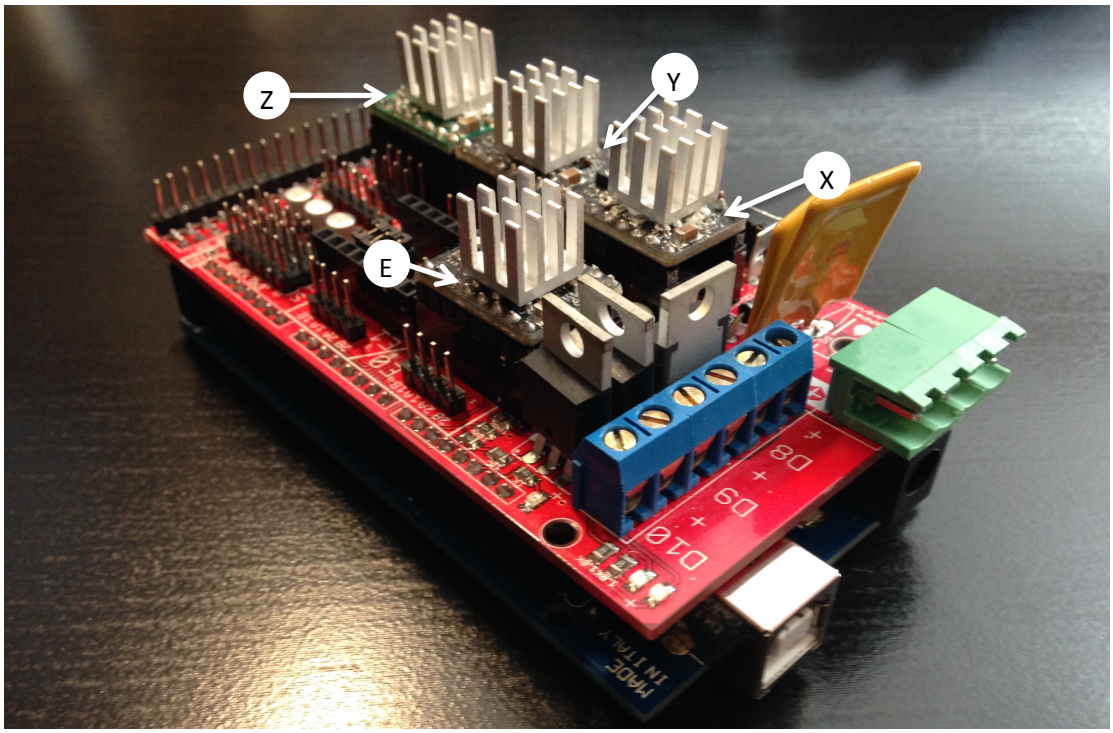


Figura 53 - Acoplamento Ramps+arduino+drivers

Na Figura 53 está demonstrado o acoplamento dos controladores, indicando também a posição dos *drivers* de cada motor de passo dos eixos X, Y e Z, assim como o E representando o motor do extrusor.

A Tabela 13 é representativa das siglas e respetivas funções que se irão encontrar na Figura 54.

Tabela 13 - Siglas do controlador RAMPS

Sigla	Função	Sigla	Função
CE	Corrente de alimentação do extrusor	**Z1,Z2**	Motores eixo Z
CB	Corrente de alimentação da cama aquecida	**TE**	Termístor do extrusor
CA	Corrente de alimentação externa	**TB**	Termístor da cama aquecida
E1	Extrusor 1	**ESX**	Sensor de fim de curso em X
X	Motor eixo X	**ESY**	Sensor de fim de curso em Y
Y	Motor eixo Y	**ESZ**	Sensor de fim de curso em Z

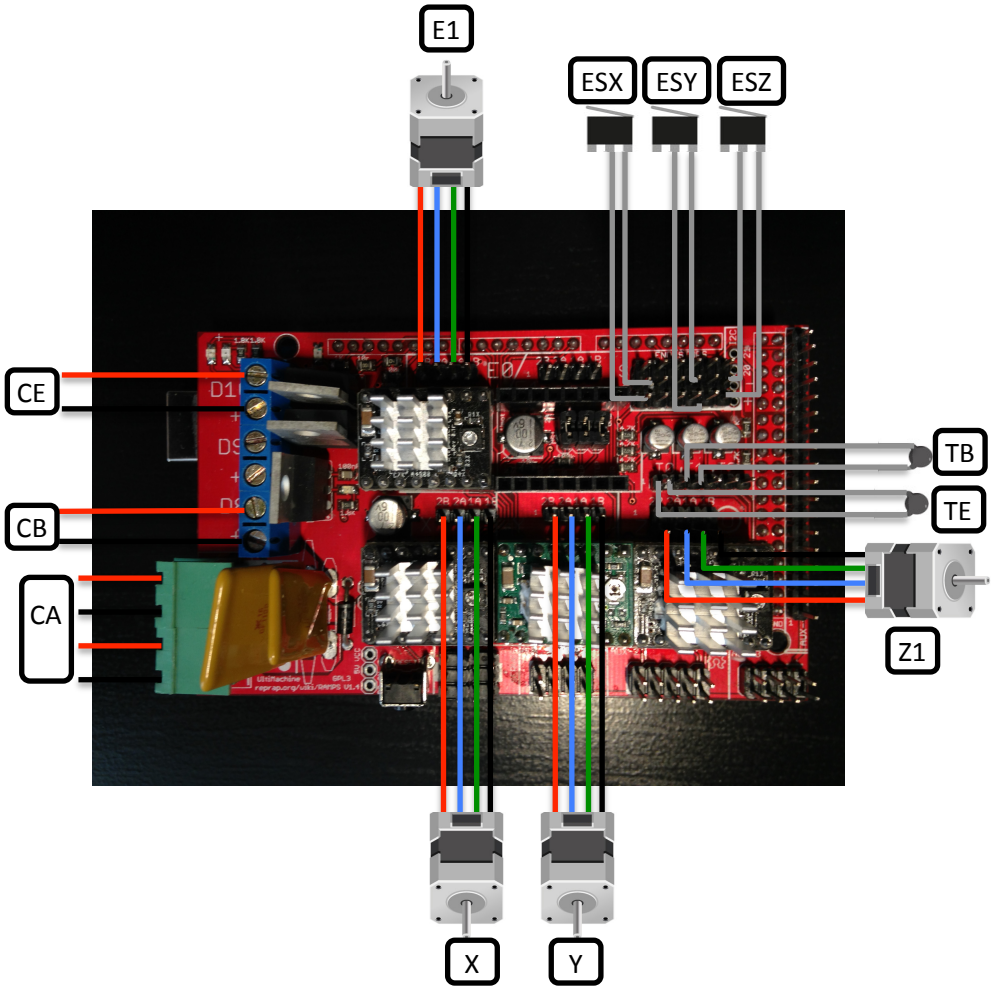


Figura 54 - Conexões de elementos ao controlador

Na Figura 54 estão representadas as ligações que deverão ser feitas para o funcionamento essencial da máquina, poderão ainda ser feitas ligações de ventoinhas, outro extrusor e LCD de controlo externo. Existe também a possibilidade de conexão de outro sensor de fim de curso para o eixo do Z. O segundo motor do eixo do Z será ligado no conector acima. Devido à sua geometria a Prusa necessita de dois motores para o movimento vertical (Z).

5.1.4 - PROGRAMAÇÃO ARDUINO+RAMPS

A programação destes dois componentes irá definir o controlo correto da impressora e das suas funções. Esta programação irá dizer aos motores, para determinado deslocamento quantas rotações serão necessárias, para fundir x milímetros de filamento quantas rotações serão precisas, irá definir também as posições iniciais dos eixos, as temperaturas mínimas e máximas de funcionamento, entre outros parâmetros.

Para começar com esta programação será necessário então usar dois *software*, o Arduino IDE correntemente na versão 1.06 e o *Marlin*. O *Marlin* será o *firmware* a aplicar através do programa Arduino na impressora.

Inicialmente, no programa Arduino será necessário escolher a *board* que estamos a utilizar, neste caso Arduino Mega 2560, e a porta em que estará conectada. De seguida será necessário abrir o ficheiro *marlin.h* ou *marli.ino* do diretório *Marlin*. Será então dado o acesso às configurações base da impressora. Os parâmetros deverão ser alterados, de acordo o modelo Reprap que se possui e de acordo com o *hardware* eletrónico em uso. Para a *Prusa i3* os parâmetros são os seguintes:

Definir *Baudradte* a 250000:
#define BAUDRATE 250000

Definir *motherboard* como 33:
#ifndef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD 33
#endif

Definir os termístores em uso:
#define TEMP_SENSOR_0 5
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1

Definir temperaturas máximas:
#define HEATER_0_MAXTEMP 260
#define HEATER_1_MAXTEMP 260
#define HEATER_2_MAXTEMP 260
#define BED_MAXTEMP 120

Definir temperaturas mínimas de extrusão:
#define EXTRUDE_MINTEMP 180

Desligar o eixo Z para poupar energia:
#define DISABLE_X false
#define DISABLE_Y false
#define DISABLE_Z true
#define DISABLE_E false // For all extruders

Direções dos eixos:

Positive moves:
X positive para a direita
Y positive para trás
Z positive para cima
Extrusor empurra filamento para a frente
#define INVERT_X_DIR false // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_Y_DIR false // for Mendel set to true, for Orca set to false
#define INVERT_Z_DIR false // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_E0_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E1_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E2_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false

Direção a partir do ponto zero máquina:
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1

Definir sensores de paragem:
#define min_software_endstops true // If true, axis won't move to coordinates less than HOME_POS.
#define max_software_endstops false // If true, axis won't move to coordinates greater than the defined lengths below.

Definir valor máximo de deslocamento caso os sensores não funcionem:
#define X_MAX_POS 200
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MAX_POS 200
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MAX_POS 200
#define Z_MIN_POS 0

Velocidade de extrusão de filamento:
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,(400*8/0.8)*1,1100} // default steps per unit for Ultimaker

#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {200, 200, 5, 45} // (mm/sec)

#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,1000,50,300} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E default values are good for skeinforge 40+, for older versions raise them a lot.

Estes comandos deverão ser copiados e colados na *tab configuration.h* aberta no Arduino, substituindo os valores originais e dando origem a um funcionamento melhor da impressora. Contudo estes valores não são finais e deverão ser atualizados de acordo com o desempenho da máquina em causa. Cada tipo de *hardware* tem as suas configurações específicas, sendo esta uma versão generalizada com bons resultados. Para uma melhor configuração das velocidades deve-se utilizar o calculador disponível em *prusaprinters.org/calculator*. Através deste calculador é possível definir os *steps* de rotação de cada um dos eixos. Caso estes parâmetros estejam errados, o deslocamento efetuado pelos eixos não irá ser igual ao que seria correto. Por exemplo, dar-se-ia a ordem de movimento de 10mm e o deslocamento real seriam 6mm.

Através desta programação é possível configurar todos os parâmetros da impressora, logo será de maior interesse que os componentes da impressora (termístores, aquecedores, entre outros) estejam de acordo com o código definido no *Marlin*.

Por fim, a configuração deve ser compilada e enviada para o Arduino de forma a que este e a RAMPS, estejam a utilizá-la na primeira utilização da impressora. Como o projeto Reprap é do tipo *Open source* é muito usual que os componentes variem de um modelo de *Prusa* para outro, logo estas configurações só serão válidas para o equipamento em causa.

5.1.5 - FUNCIONAMENTO DE *SOFTWARE*

Neste capítulo será relatado o funcionamento dos *software* necessários para fazer uma impressão, assim como os seus princípios básicos para o funcionamento incluindo configurações para filamento.

Como já foi descrito previamente, para efetuar uma impressão tridimensional com um equipamento Reprap serão necessários dois tipos de *software*, excluindo a parte da modelação. Uma vez que já se dispõe do ficheiro STL da peça a imprimir, é preciso que este passe por dois *software*, inicialmente o corte às camadas do modelo e depois o controlo e configuração da impressora relativamente ao que há a fazer.

O primeiro *software* em causa é o *Slic3r* onde, para além de se ir cortar o modelo se irá definir parâmetros como espessura de camada, refrigeração, temperaturas de extrusão, tipo de enchimento que se pode utilizar, entre outros. O segundo *software* é um *Host*, neste caso o *Repetier-Host*, que serve para conectar o *firmware* da impressora a uma interface onde este poderá ser controlado. O *Repetier-Host* serve como uma interface da impressora, onde podemos dar a ordem de impressão e controlar os movimentos na mesma.

5.1.5.1 - Configuração Slic3r para filamentos

Neste capítulo serão explicados os parâmetros de base a serem ajustados no *Slic3r* para um funcionamento de uma forma básica. Tendo em conta filamentos de ABS e PLA que apresentam características diferentes, serão necessárias configurações diferentes na impressão. Ao longo do trabalho com este tipo de impressora foi percetível que tendo dois filamentos do mesmo material de fornecedores diferentes, iriam ser necessárias configurações diferentes ou a qualidade de impressão não seria igual. Existem vários fatores a ter em conta, e estas configurações ou explicações de configurações servirão para um melhor entendimento do funcionamento deste software (Figura 55) e por consequência da máquina. Muitas das opções irão ser ignoradas, deixando os valores fornecidos por definição de forma a ter uma boa referência em caso de necessidade de alteração.

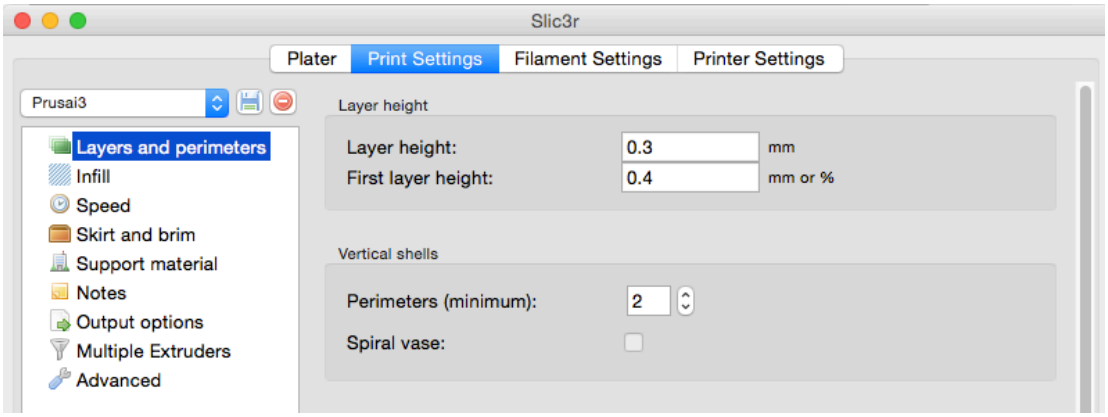


Figura 55 - Interface de configuração Slic3r

Para começar com a configuração deste *software* será necessário ir às opções, definir o modo de trabalho para *expert* e reiniciar o programa. Iremos então obter uma

interface como a apresentada na Figura 61. Inicialmente a configuração estará focada nas *print settings* e respetivos parâmetros, apresentados do lado esquerdo. As configurações de impressão são as mais importantes e mais prováveis de variar quando existe troca de filamento. Com estas combinações de parâmetros conseguem-se criar impressões com vários tipos de qualidade, tendo em conta a velocidade e a qualidade, que serão inversamente proporcionais.

Começando em *layers and perimeters,* um dos parâmetros mais importantes em toda a configuração é a *layer height* ou altura de camada, o valor por definição é 0.3mm que dá uma altura de camada bastante espessa. Um valor recomendado é 0.23mm, que conjuga bem a velocidade e qualidade da impressão, quanto mais baixo for, mais detalhe é possível obter mas mais lenta será a impressão. A espessura da primeira camada deverá ser sempre mais elevada que a das seguintes, o que permite uma boa adesão à cama aquecida. O valor aplicado para o primeiro *layer* deverá ser entre 110% e 150% superior ao valor das camadas seguintes.

Vertical shells define o número de perímetros ou paredes por cada camada de impressão, estas delimitam a figura a imprimir e tornam o modelo mais sólido, sendo o valor normalmente usado 3. O número de *Horizontal shells* define a quantidade de camadas nas faces, enquanto as verticais eram as laterais ou perímetros. Este parâmetro define e confere a rigidez do modelo pelas faces superiores e inferiores, sendo o valor normal, 2 camadas por face. Se for necessária mais rigidez, este valor tem de aumentar e se usarmos uma altura de camada menor este valor também deverá aumentar. O resto das configurações deverão manter-se, sendo estes os valores mais críticos para qualquer impressão.

De seguida configura-se o enchimento ou *infil,* o primeiro parâmetro é a densidade de impressão, este define a rigidez do modelo. Um valor usado para peças estruturais é 40%, acima desse valor a impressão será mais lenta, mas mais rígida, abaixo não deverá ser usado em peças estruturais sendo que a 100% a peça será maciça. Combinado com esta propriedade está o padrão de enchimento de camadas que poderá ser combinado de diferente forma com o *layer* de base ou de topo. Existem padrões retos paralelos, em hexágono, círculos concêntricos entre outros, sendo o reto o mais usado.

O próximo conjunto de padrões é o *Speed.* Para uma impressão de média qualidade os valores para todos os campos deverão manter-se por volta de 45mm/s, excetuando nas seguintes situações. No caso de perímetros pequenos que necessitam de baixas velocidades para terem tempo de arrefecer corretamente e aguentarem a deposição de outra camada. Se houver refrigeração do modelo, esta velocidade deve subir, caso contrário usar uma velocidade de 25mm/s. Para os perímetros externos a questão é idêntica, baixa velocidade para conferir boa deposição e arrefecimento da camada, permitindo solidez. As *bridges* são zonas onde não existe material de suporte logo devem ter uma velocidade mais baixa. A velocidade de deslocamento ou *travel* é um parâmetro que afeta o movimento quando não existe deposição do material, por isso a única limitação é o *hardware*. O último valor com relevância é a velocidade do primeiro *layer*, sendo aconselhável valores por volta de metade do resto das camadas.

De seguida define-se a *Skirt and brim*. A *skirt* consiste na impressão de uma silhueta de várias camadas a uma distância pré-definida do objeto a imprimir. Isto permite que o filamento fique mesmo na ponta do extrusor, evitando que se comece a imprimir sem material. Valores padrão são: 3 arcos, a uma distância de 5mm com a altura de uma

camada. *Brim* consiste na deposição de uma camada que no fim será retirada do modelo, permitindo uma melhor adesão à superfície, evitando empenos e que a peça descole da base. O valor normal será por volta de 1 a 2mm, dependendo da superfície a usar.

O material de suporte é mais usado em casos de dois extrusores, para que um dos materiais tenha propriedades diferentes do material da base, permitindo uma melhor impressão em pontes. Se existir necessidade desta opção, deve-se considerar o ângulo de acordo com a zona suportada e se este for muito alto, usar mais *layers* de suporte na primeira camada. As restantes secções de *print settings*, no caso da *Prusa i3*, não deverão ser alteradas, a não ser que se use um extrusor duplo.

Passando para as propriedades do filamento, os parâmetros a serem definidos nesta secção, são importantes na medida do funcionamento e não do detalhe. Existem dois diâmetros de filamentos, 1.75mm e 3mm que na verdade nunca correspondem a estes valores. Deve ser sempre medido o diâmetro da secção e colocado o valor correto. O outro parâmetro a ter em conta é a temperatura de funcionamento dos mesmos. As temperaturas de trabalho padrão para o PLA são de 190°C, enquanto para o ABS os valores sobem para 210°C. Estes valores diferem de um fornecedor para outro, por isso é de máximo interesse consultar a ficha técnica fornecida. No entanto, e dando o exemplo do PLA, deve-se usar um valor de 190°C para a primeira camada para que não agarre demasiado e para as seguintes por volta de 200°C, permitindo uma melhor fluidez. A temperatura da cama para PLA poderá manter-se à temperatura ambiente, enquanto para o ABS poderá subir para 80°C na primeira camada e depois voltar à inicial (ambiente). As opções para a refrigeração, para o caso desta existir, deverão ser mantidas como inicialmente sugeridas.

Por fim definem-se as propriedades da impressora, aqui delimitar-se-á a área de impressão, onde irá começar a impressão e o número de extrusores. Com o *G-code Custom*, pode-se definir ainda posicionamentos automáticos do extrusor assim como outras ações (poderá ou não ser útil). Em último lugar será definido o diâmetro da ponta extrusora de acordo com a ponta que está a ser usada (estes valores variam entre 0.3 e 0.5mm).

O *offset* de extrusor é útil no caso de haver outro extrusor, esta propriedade indica a distância deste segundo extrusor ao zero da máquina, centrando-o. Um fator bastante importante é a retração do filamento. A ativação deste parâmetro permite que após a impressão de cada camada, não exista a deposição do material indesejado que está fundido na ponta do *nozzle,* evitando imperfeiçoes na impressão. O comprimento desta retração deve ser por volta de 1mm. O *lift* ou levantamento do extrusor quando se muda de camada com 1mm também produz bons resultados. Por fim a *retraction tool* permite que se retire o filamento da ponta aquecida no fim da impressão, evitando que esta solidifique e fique presa, Sendo o valor padrão de 10mm.

Havendo a implementação destas configurações, o que há a fazer será importar o ficheiro STL para o programa, definir a orientação e posição da peça e criar o ficheiro *G-code* para o *Host*. É agora percetível como uma boa configuração do slicer é importante para uma boa qualidade de impressão. A conjugação destes valores foi obtida através de testes com filamento preto de 2,89mm de diâmetro de PLA sem informação do fornecedor. Com estes valores obtiveram-se os melhores resultados nesta conjugação de material e impressora, sendo meramente representativos, fornecendo uma base para alterações a outro tipo de conjugação.

5.1.5.2 - Configuração do Repetier-Host

Como referido previamente, este *software* serve como interface do equipamento a ser usado. Para um funcionamento correto do *software*, alguns parâmetros terão de ser definidos. Sendo a primeira utilização, é necessário definir nas preferências algumas propriedades da impressora. Na conexão é necessário definir a porta, a mesma que foi utilizada no *software* do Arduino para a sua deteção. Posteriormente será necessário definir o *Baudrate* de acordo com o escolhido através do *Marlin*. O valor definido em causa foi 250000, tudo o resto ficará com os valores por defeito. No separador do comportamento será necessário definir as velocidades de acordo com os valores impostos no *Marlin*. Outra opção a ter em conta será a ativação do desbloqueamento dos motores depois da impressão ou paragem forçada da impressão. Este parâmetro é importante uma vez que cancelando o trabalho será possível mover os eixos manualmente.

A última alteração necessária será definir as dimensões da superfície de impressão, o ponto inicial e o sentido de impressão de acordo com o que foi definido no *Marlin*. É possível definir várias impressoras sem que os parâmetros entrem em conflito uns com os outros, bastando apenas gravar cada uma delas em perfis.

Após estas alterações a conexão à impressora deverá ser feita normalmente e teremos o controlo manual no painel de impressão visível na Figura 56. Será possível agora mexer os eixos, controlar as temperaturas, assim como ventoinhas, e o movimento do filamento.

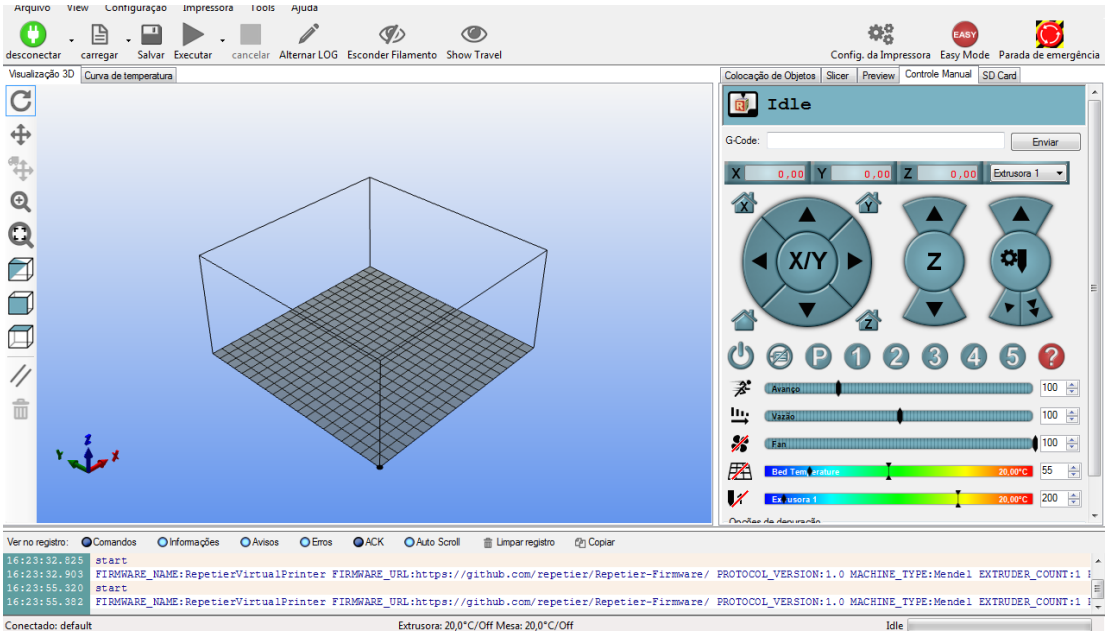


Figura 56 - Interface do controlo manual do Repetier-Host

É possível agora carregar o ficheiro *G-Code* gerado anteriormente e iniciar o processo de impressão. É possível fazer o corte da peça e gerar o código da peça dentro do *repetier-host*, no entanto este tem um nível de opções muito mais baixo que o próprio *slic3r*, não sendo considerado como mais valia para uma impressão. Após a ordem de execução de impressão, o extrusor irá deslocar-se para o zero máquina (*home*) e serão visíveis subidas nos valores das temperaturas. Uma vez que estas sejam atingidas com os

valores definidos no *G-code*, a impressão começará, sendo efetuadas primeiro a *skirt* e *brim*.

É possível parar a impressão a qualquer momento, através do controlo de emergência, pois podem surgir diversos problemas durante a mesma. Os erros que poderão ocorrer serão da natureza da adesão da peça ao tabuleiro assim como deformações indesejadas devido a contrações derivadas do arrefecimento da mesma. Existem vários tipos de soluções para este tipo de problema, é possível usar laca de cabelo no tabuleiro, fita-cola "*bluetape*" térmica e películas próprias. Todas estas hipóteses permitem uma melhor aderência do filamento impresso à superfície de impressão.

Contudo, outros problemas podem surgir, como o filamento ficar preso no extrusor devido a aquecimento excessivo da zona alhetada, para este caso é de maior conveniência usar refrigeração nessa zona. Este tipo de problemas surgem em extrusores de corpo metálico, que tem maior condutividade e com uma impressão mais demorada é provável que aconteça. Poderá também ser solucionado com o uso de outro extrusor com revestimento interno de PTFE, esta característica evita que o filamento agarre às suas paredes. Este tipo de problema é chamado de "*ghost print*" porque o extrusor continuará a fazer o movimento gerado no código G mas sem depositar filamento.

Uma má calibração dos eixos e do tabuleiro normalmente também leva a erros de impressão. Exemplificando, de um lado o filamento poderá estar a ser depositado corretamente, enquanto do outro não chega a tocar na superfície, ficando aglomerado na ponta do extrusor, originando entupimentos.

É aconselhado que se use filamento de 1.75mm pois trará melhores resultados de impressão, evitando que este fique preso no extrusor. Também se aconselha o uso de refrigeração do corpo do extrusor, assim como da zona de impressão. Isto permite um aumento de velocidade na impressão com a mesma ou melhor qualidade.

5.1.5.3 - Exemplos de problemas na impressão

A Figura 57 representa um dos erros obtidos durante a utilização da impressora. Este problema já referido acima tem a ver com o entupimento da ponta extrusora, levando a que o filamento não seja depositado de uma maneira homogénea, mas sim aos nós. O entupimento da mesma poderá ser derivado de lixo proveniente na superfície do filamento, de filamento de baixa qualidade contendo impurezas e de uma manutenção mal feita. Este tipo de problema pode ser evitado através do uso de filamento de boa qualidade, de uma limpeza com esponja molhada do mesmo, e de uma manutenção apropriada. No caso do aparecimento deste problema, as soluções serão, a substituição da ponta extrusora ou *nozzle,* ou colocação da mesma em acetona durante um período longo de tempo.

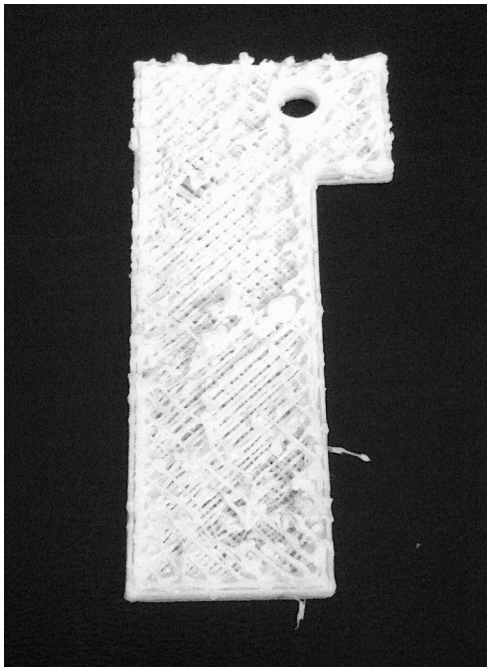


Figura 57 - Coágulos na impressão

Neste caso (Figura 58) é visível a diferença de qualidade de impressão entre zonas. O problema neste tipo de situação é a dificuldade de solidificação do PLA após a extrusão. Na zona superior, como existe um perímetro mais elevado, a impressora demorará mais tempo a percorrê-lo e a preencher a sua respetiva área, dando mais tempo ao material para baixar a temperatura e solidificar. Na zona inferior da mesma isso já não acontece. O perímetro da camada é bastante reduzido e o extrusor deposita o filamento sobre uma camada ainda por solidificar. Para evitar este tipo de problemas deve-se optar sempre por uma configuração no slicer que permita uma velocidade muito mais reduzida para perímetros (os perímetros definem a parede da peça e por cada camada existem duas ou mais passagens do extrusor) e áreas pequenas. Podem também ser evitados estes problemas colocando refrigeração na peça após a primeira camada.



Figura 58 - Defeito em baixos perímetros

5.2 - DESENHO E CONSTRUÇÃO DE EXTRUSOR DE PASTA DE AÇÚCAR

Após análise dos conceitos de extrusores disponíveis no mercado, a opção tomada foi o desenvolvimento de raiz de um extrusor para aplicação direta na impressora. A conclusão chegada sobre os extrusores disponíveis é que eram bastante rudimentares a vários níveis.

Apenas uma pequena parte dos extrusores de volume finito (de seringa) possui o retorno do êmbolo. O retorno do êmbolo poderá ser importante se o conjunto do corpo da seringa e êmbolo se mantiverem em vácuo. Esta propriedade permite um enchimento do recipiente pela ponta, evitando-se assim que este seja retirado da estrutura envolvente.

Outra propriedade importante para este tipo de utilização será o controlo de temperaturas de extrusão. Como já foi visto no Capítulo 3.5.2, a pasta de açúcar terá uma funcionalidade mais elevada na gama de temperaturas entre 55 e 65°C, logo um controlo das mesmas seria muito importante. Nenhum dos extrusores disponíveis para aplicação num modelo do tipo *Open Source* apresenta esse tipo de características.

5.2.1 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Para além das propriedades referidas anteriormente, será necessário ter em conta outros fatores. Como este projeto será desenvolvido em torno de uma impressora de baixo custo, é importante que este seja um extrusor que não fuja a esse princípio, relativamente ao conjunto total. A este fator agrega-se a facilidade de fabricação das partes estruturais e que cada um dos seus componentes eletrónicos seja de fácil aquisição.

Optou-se então por um princípio de funcionamento similar ao do conceito *Fab@home*. Este conceito confere pela sua simplicidade mecânica, as melhores características para desenvolvimento. O princípio consiste num veio roscado, que através da rotação de um motor irá provocar movimento descendente e ascendente no mesmo. Será então possível desenvolver uma estrutura relativamente simples agregando estes componentes móveis, de forma a ser possível um estudo dos componentes em uso para o aquecimento do material para impressão.

Como a pasta de açúcar necessitará de um pré aquecimento, independentemente do extrusor possuir elementos aquecedores, pois esta é adquirida como pasta sólida. O parecer inicial seria a utilização de uma ponta aquecida do género *J-HEAD*, como a dos extrusores de filamento normais. Estes possuem um bloco de alumínio com elemento aquecedor e um termístor, onde entra o filamento num dos lados, que será fundido e sairá extrudido por um bico de diâmetro variável no outro. O elemento aquecedor, *heater cartridge* é um componente de baixo custo e de fácil aquisição que é capaz do aquecimento até 270°C, tornando-se mais do que capaz para a tarefa em causa. O termístor que normalmente é encontrado neste tipo de pontas aquecidas funciona numa gama de temperaturas desde os -50°C até 300°C, sendo também de fácil e barata aquisição.

Após um primeiro desenho deste conceito, foi analisada a forma do seu funcionamento de maneira a resolver algumas das dificuldades. Um dos problemas encontrados foi que o aquecimento da ponta não seria suficiente para manter a pasta de açúcar quente. Foi sugerido então que se usasse um filamento de crómio níquel no copo do extrusor de forma a aquecer a pasta até uma temperatura não final de extrusão, mas para ser mais facilmente controlável a temperatura na ponta extrusora. Desta forma, o extrusor teria o controlo individual de duas temperaturas. A temperatura do corpo da seringa, com um valor aproximado do pretendido, e a temperatura da ponta para uma extrusão à temperatura pretendida.

Posteriormente foi pensado que seria de maior utilidade se houvesse refrigeração do material extrudido. A utilização de refrigeração na pasta de açúcar após a sua extrusão confere uma maior rigidez ao material. Como este é um material que mesmo quando solidificado não terá uma rigidez muito elevada a refrigeração permitirá uma maior estabilidade na adição de pasta numa segunda camada.

5.2.2 - DESENHO E CONSTRUÇÃO

Consoante os problemas resolvidos, a geometria do extrusor foi-se alterando. Inicialmente a ponta aquecida teria um volume muito maior, mas foi reduzida para o essencial, de forma a que o aquecimento desta fosse feito sem grandes problemas. No entanto, não foram só estas as alterações que o modelo sofreu, o varão roscado que irá deslocar verticalmente o embolo da seringa passou de um M8 para um M5. Para este tipo de função o veio M5 servirá perfeitamente sendo inclusive mais leve e de fácil manuseamento (Figura 59). Foi também eliminado um suporte que apertaria na base sendo posteriormente acoplado à impressora no elemento 2 ou aperto de correia X. Decidiu remover-se esse suporte pela sua complexidade e dificuldade de montagem na impressora.

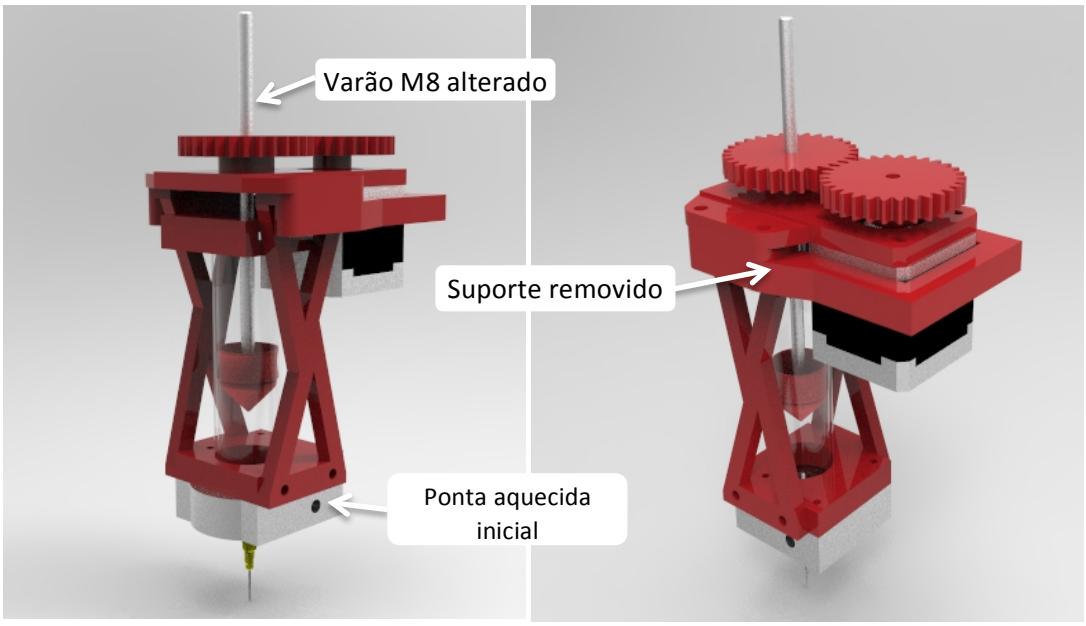


Figura 59 - Primeira versão do extrusor

O pilar direito do extrusor foi modificado de maneira a fazer o acoplamento diretamente na impressora de forma mais simples, evitando mais peças. O extrusor foi desenvolvido em torno do copo de uma seringa de 30ml, no entanto poderá ser utilizado com copos de seringas de outras quantidades (Figura 60).

Para um melhor entendimento desta montagem deverá ser consultado o Anexo B. No entanto os desenhos técnicos não poderão ser revelados por existir acordo de confidencialidade.

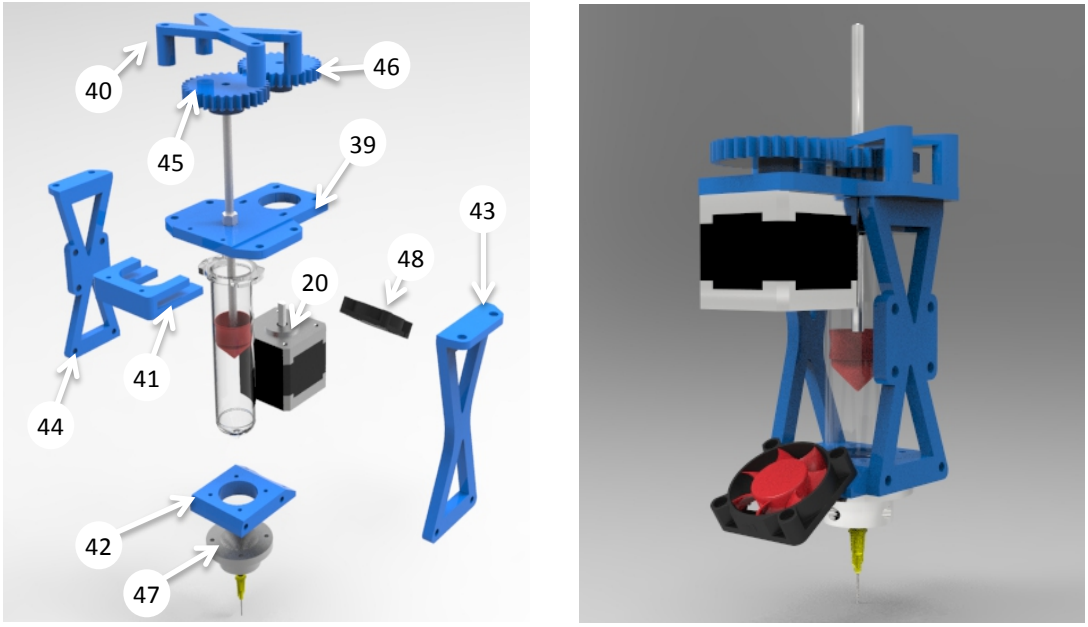


Figura 60 - Esquema da montagem do extrusor

O motor (20) irá provocar rotação na roda (46) que com uma relação de transmissão de 1 irá fazer rodar a roda (45). A relação de transmissão não é importante neste caso porque a velocidade do motor poderá ser controlada tanto nas configurações do *Marlin* como no *Slic3r*. A roda (45) tem um encaixe para uma porca M5, onde irá entrar o varão roscado. O varão roscado irá descer e subir de acordo com o sentido da rotação do motor. O copo da seringa ficará encaixado em (42) na parte inferior e em (41) na parte superior. A ponta aquecida (47) tem furos para a colocação de um *Heater* e de um termístor. Na parte traseira do extrusor será colocada uma ventoinha de 40mm com o caudal de ar a apontar para o material depositado. Como já descrito previamente o elemento (44) irá apertar no (2) ficando preso à impressora de forma funcional.

5.2.3 - APLICAÇÃO AO *HARDWARE*

Esta nova montagem (Figura 61) elimina o extrusor de filamento anteriormente colocado na impressora, com ele serão retirados o elemento de aquecimento e o termístor. Estes dois darão lugar ao novo elemento aquecedor e termístor do extrusor de pasta. Quanto ao aquecimento do filamento de crómio níquel, uma vez que é necessário um controlo de temperaturas separado do anteriormente referido, teria que se optar por uma de várias hipóteses de resolução deste problema.

A primeira hipótese seria a inutilização dos elementos aquecedor e termístor da cama e usar essas mesmas ligações de forma a ter o controlo através desses pinos. É a hipótese que permitirá menos modificações e uma vez que a cama não será necessária para a impressão de pasta de açúcar porque se necessita da superfície o mais fria possível, seria uma boa opção. A segunda hipótese seria alterar o *firmware Marlin* de forma a que este permitisse a utilização de dois extrusores. Desta forma conseguia-se ligar o aquecedor/termístor ao conjunto do extrusor 1 representado na figura por TE e CE para a ponta aquecida. Teríamos agora um novo TE2 do lado direito de TE e um CE2 abaixo de CE para a alimentação e controlo de temperaturas do filamento de crómio níquel. Esta opção de controlo de temperaturas seria mais complexa e poderia dar origem a erros de *firmware*, por isso de forma provisória será utilizada a primeira opção. O esquema abaixo representa as ligações para essa opção sendo que os novos elementos CF e TF representam a corrente do filamento e termístor do filamento respetivamente.

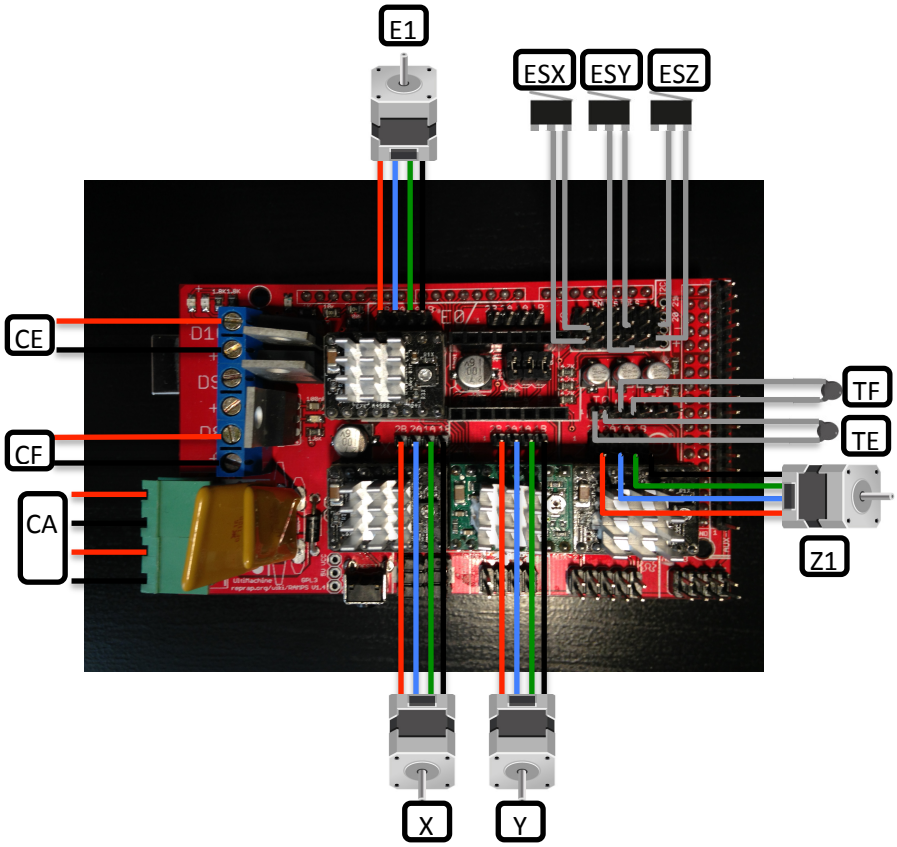


Figura 61 - Esquema de ligações para o novo extrusor

5.2.4 - FIO CRÓMIO NÍQUEL

Para o aquecimento inicial da pasta de açúcar, que corresponde ao aquecimento do copo da seringa foi conceptualizada a aplicação de um filamento de crómio níquel enrolado de volta do corpo da mesma. A temperatura requerida neste passo não deverá ser a final da extrusão, uma vez que a pasta ainda irá passar por um segundo estágio de aquecimento. Desta forma o aquecimento também não necessita de elevado rigor, uma vez que o filamento irá estar por fora da superfície da seringa, assim como o termístor. Desta forma haverá um desfasamento de valores das temperaturas desde a superfície aquecida pelo filamento e o centro do recipiente. Daí o segundo elemento aquecedor ter elevada importância.

A fonte irá fornecer uma voltagem máxima de 12V, foi então escolhido um diâmetro de filamento de 0.15mm, podendo então variar com comprimento do mesmo. Considerado a altura útil da seringa como 70mm e usando um espaçamento entre espiras de 8mm, foram efetuados os seguintes cálculos:

A = altura [mm]

D = Diâmetro do filamento [mm]

De = Diâmetro externo (cilindro e filamento)

N = Numero de voltas

S = Espaçamento entre espira [mm]

C = Comprimento do filamento [mm]

$$A = D * N + S * N \quad (1)$$

$70 = 0.15 * \mathrm{N} + 8 * \mathrm{N} \Leftrightarrow \mathrm{N} = 8.59\mathrm{mm}$, então:

$\mathrm{A} = 0.15 * 8 + 8 * 8 \Leftrightarrow \mathrm{A} = 65.2\mathrm{mm}$, correspondendo à altura útil final.

$$C = \sqrt{(\pi * De * N)^2 + (S * N)^2} \quad (2)$$

$$C = \sqrt{(\pi * 20.3 * 8)^2 + (8 * 8)^2} \Leftrightarrow \mathrm{C} = 514\mathrm{mm}$$

O comprimento de filamento a ser usado será de 514mm (Figura 62) enrolado em torno do copo da seringa. Usando o calculador para o fio crómio níquel, aplicando o comprimento obtido e diâmetro, consegue-se saber que para uma temperatura de 93ºC, com um uma potência requerida de 3.8W, intensidade de corrente de 0.356A e tensão de 10.8V. Como estes valores irão ser variados, de acordo com o necessário pelo controlador Arduino, estima-se que estejam dentro de um intervalo correto para o seu funcionamento.

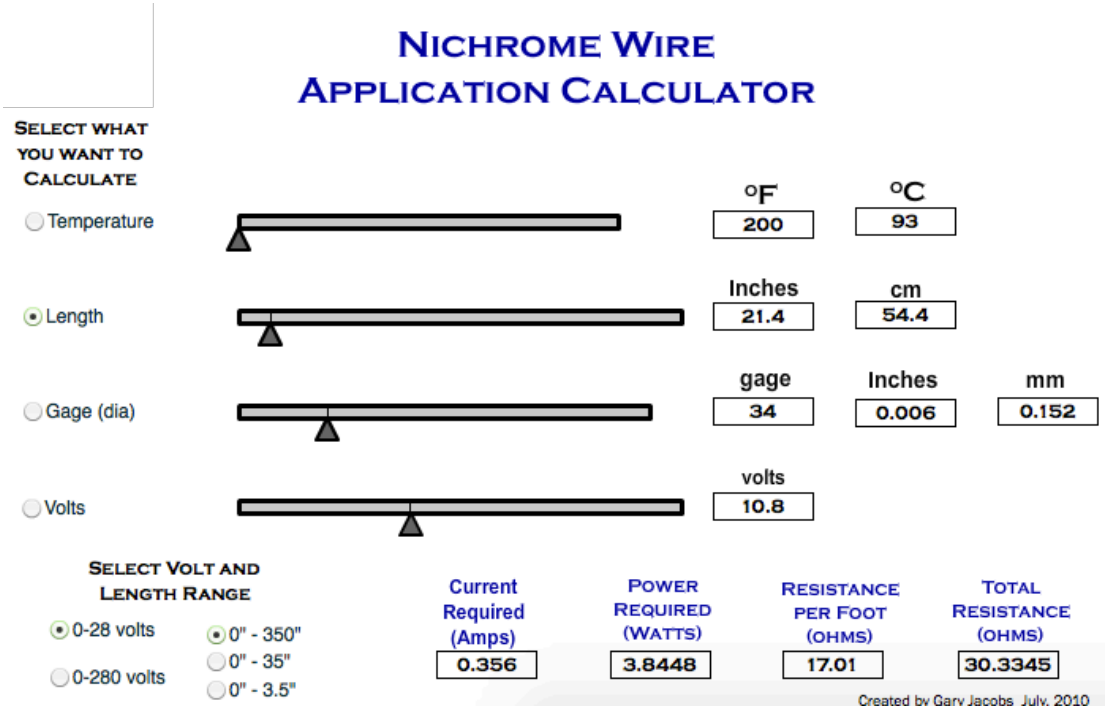


Figura 62 - Calculador fio de níquel-crómio[57]

5.2.5 - PRODUÇÃO DO EXTRUSOR

O principal objetivo do desenho deste extrusor seria que fosse produzido de maneira simples. Todos os seus componentes foram desenhados de forma a permitir a impressão por um equipamento igual aquele onde irá ser colocado. Desta forma todas as peças foram desenhadas em superfícies planas e sem grandes elevações, tendo em conta que a maior dificuldade deste tipo de impressoras será a sobreposição de pequenas áreas e as dificuldades estruturais que trazem.

Contudo as peças foram impressas em ABS (Figura 63) recorrendo a um equipamento *RepRapBCN*, com uma percentagem de enchimento de 40%. Esta percentagem não será a mais indicada para este tipo de utilização, pois será um conjunto em movimento com uma massa considerável. Uma vez que só o motor NEMA17 pesará perto de 200 gramas, e considerando o conteúdo do copo da seringa e o resto dos componentes, o peso será bastante elevado para a resistência obtida com esta percentagem de enchimento. Para uma boa fiabilidade do extrusor, o valor ideal seria então perto dos 70%.

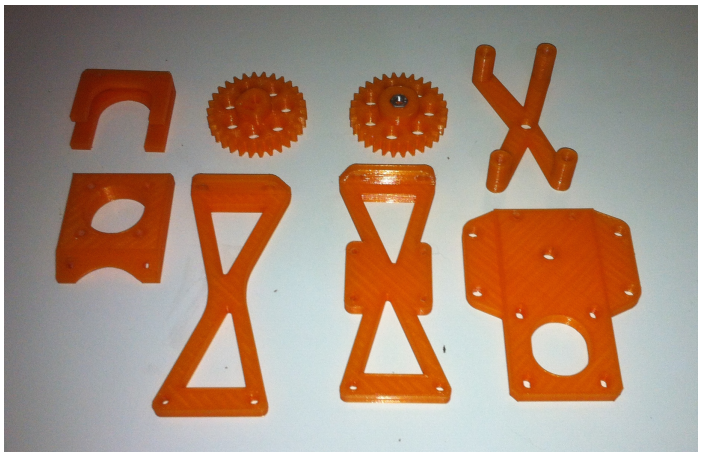


Figura 63 - Partes impressas

Outro problema verificado após a impressão dos componentes foi que seria necessário dar toleranciamentos maiores antes do envio para impressão. Como o material ao ser depositado tem tendência para se espalhar, independentemente do uso de refrigeração, seria aconselhável que para uma próxima impressão os desenhos fossem alterados nas zonas críticas; furos que necessitam de um alargamento para introdução dos elementos normalizados (parafusos). Poderá também ser produzido outro suporte inferior para a seringa com outro diâmetro interno, permitindo o uso de copos com outras volumetrias e mantendo a estanquicidade do modelo.

Uma vez que o modelo produzido foi para uma seringa de 30ml, com um diâmetro de 25.4mm, que se tornou bastante difícil de adquirir, terá de ser usado um adaptador de diâmetro para uma seringa de 20ml cujo diâmetro é de 20.5mm.

5.2.5.1 - Montagem física

Foi então montado o extrusor, da mesma forma que representado em 5.2.2, com as peças impressas e os componentes eletrónicos, sendo a ponta aquecida apertada ao suporte inferior com quatro parafusos M3x20mm. Os pilares verticais serão fixados em conjunto com a aranha e a base por parafusos M5x50mm e respectivas porcas de forma a garantir a rigidez da estrutura. O motor será fixado por quatro parafusos M3x10mm à base, enquanto a sua engrenagem será presa por um para fuso M3x5mm ao veio do mesmo. A engrenagem movida terá encaixada uma porca M5 posicionada onde irá passar o varão roscado M5. O suporte inferior será fixado aos pilares verticais com dois varões M3x70mm.

Após esta montagem, será possível a colocação do elemento aquecedor na ponta aquecida, assim como o termístor. O segundo elemento aquecedor, que corresponde ao copo da seringa, é de montagem mais complexa. Neste caso foi feito o enrolamento do filamento de crómio níquel à volta do copo, de acordo com os cálculos efetuados previamente, sendo fixado inicialmente com supercola. No entanto, a fixação correta do mesmo seria feita através de fita-cola térmica *kapton* de forma a garantir que este não se desloque (esta fita deverá ser colocada posteriormente). De seguida serão feitas as ligações do filamento de crómio-níquel, sendo as pontas soldadas com estanho a fios elétricos. De forma a fixar melhor o filamento (Figura 64), este foi ligado ao controlador onde foi efetuado um aquecimento até 100°C, derretendo o copo e entranhando o filamento no mesmo.

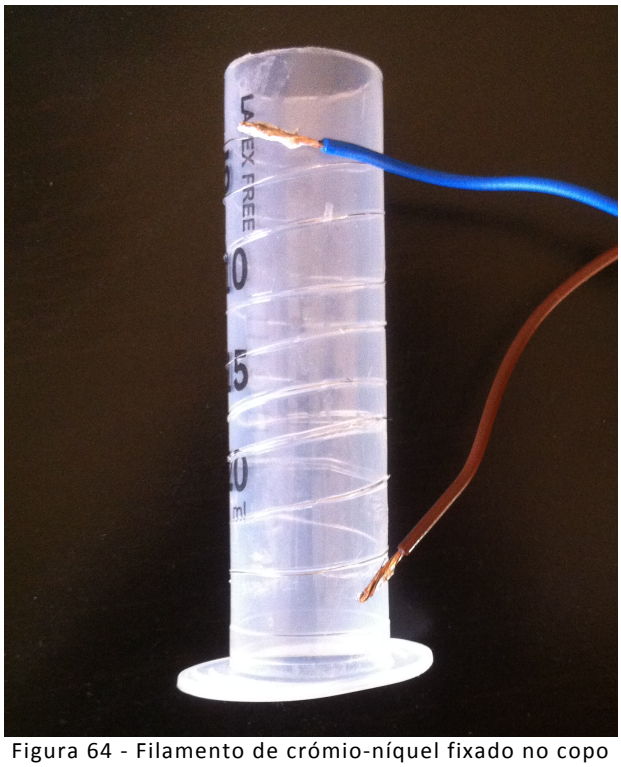


Figura 64 - Filamento de crómio-níquel fixado no copo

Desta forma o filamento permanecerá intrinsecamente ligado ao copo, no entanto a colocação da fita térmica *kapton* será sempre de maior interesse, pois esta massa irá estar em movimento, o que pode levar a que este descole. Este copo será posteriormente

colocado na montagem do extrusor devido à sua fragilidade. Para os primeiros testes optou-se por usar um copo sem o elemento aquecedor. Posteriormente o êmbolo da seringa será colado no varão M5 que irá percorrer o volume da mesma. A montagem poderá agora ser acoplada ao aperto da correia de x. Na Figura 65 estão representadas duas vistas da colocação do extrusor na impressora. Na imagem da esquerda não está colocado o batente superior da seringa de forma a visualizar-se de uma melhor forma a colocação do copo. Para a colocar a seringa o êmbolo deverá estar na posição superior para permitir a entrada do mesmo. Uma vez que seja colocado o batente superior a colocação do copo só será possível retirando um dos parafusos do batente inferior permitindo que a seringa desça.

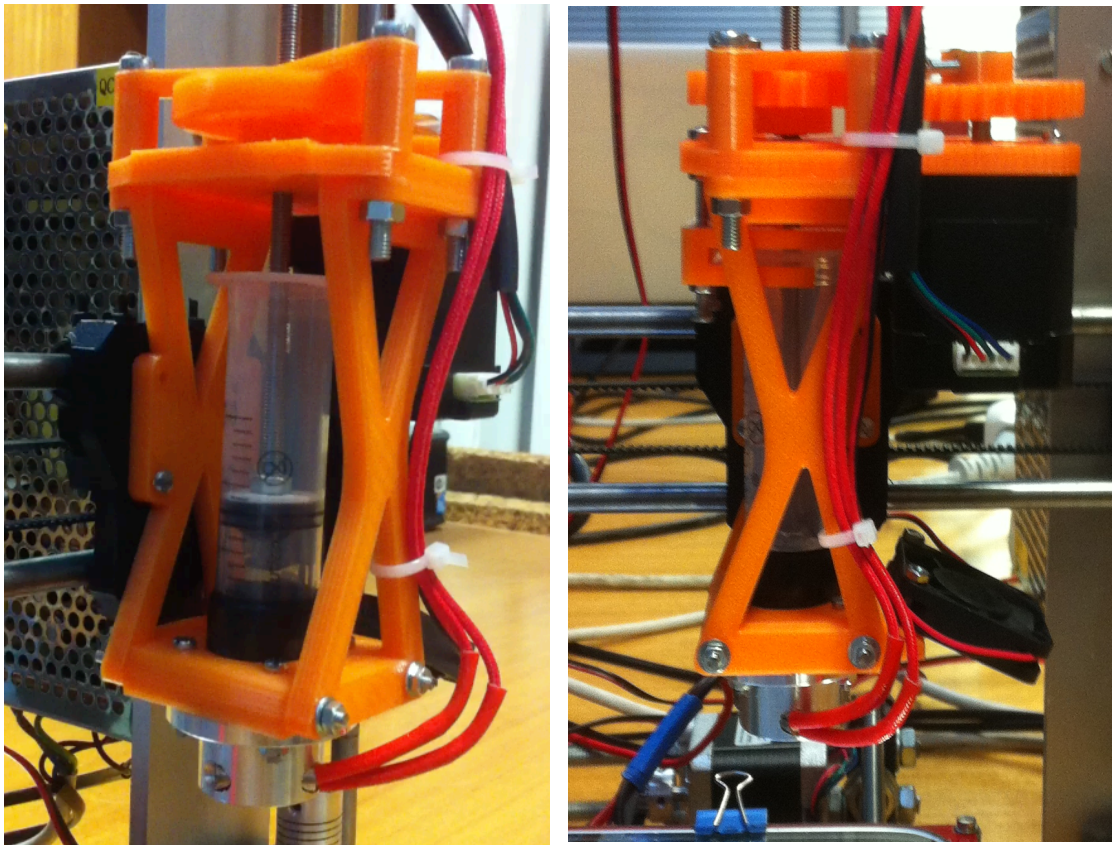


Figura 65 - Vista em perspetiva (esquerda) e lateral (direita)

5.3 - CONFIGURAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO EXTRUSOR

Como o componente inserido será de funcionamento estranho para o *hardware* do equipamento este necessitará de novas configurações de forma a garantir uma correta utilização. Como é um instrumento desenhado de raiz, o extrusor necessita de testes para verificar anomalias no seu funcionamento. Estes testes permitirão evitar problemas posteriores, em futuras impressões ou configurações, sendo divididos em módulos, de forma a que nenhum dos componentes fosse afectado pelo mau funcionamento do anterior. Estes módulos poderão ser consultados na Tabela 14. Desta forma este tipo de testes serão necessário antes de qualquer configuração ou teste de impressão.

Tabela 14 - Testes de funcionalidade do extrusor

Tipo de teste	Função a testar	Detalhes
Movimento e deslocação do veio	Movimentar o extrusor em todos os eixos	Deteção de interferências na movimentação
	Deslocamento do veio roscado verticalmente	Detetar causas de atrito na rotação do veio
Aquecimento da ponta	Funcionamento dos dois termístores a temperatura ambiente	Verificação de descalibrações dos termístores
	Aquecimento com o termístor na cavidade	Verificação de funcionamento do elemento aquecedor
	Aquecimento com um termístor na cavidade e outro no interior do cone	Comparação da temperatura exterior e interior da ponta aquecida
Aquecimento do corpo	Aquecimento do corpo do extrusor com termístor colocado entre espiras	Verificação de funcionalidade do elemento aquecedor

Posteriormente a estes teses foram criadas as configurações de funcionamento para um tipo de pasta. Antes da utilização da pasta de açúcar como objecto de teste, foi testado o funcionamento com uma pasta que não necessitasse do controlo de temperatura.

A utilização desta pasta (*Nutella*) permitiu uma configuração inicial dando origem a varias iterações e melhoramentos para uma posterior utilização da pasta de açúcar que poderão ser consultados na Tabela 15. A divisão da seguinte tabela foi feita por categorias, o que não indica que vários tipos de teste não poderão acontecer no mesmo ensaio. Os ensaios poderão ser consultados no capítulo 5.3.2.

Tabela 15 - Testes de pasta

Material	Tipo de teste	Função a testar	Detalhes
Pasta de *Nutella*	Configuração de parâmetros essenciais	Velocidade de deslocamento e de deposição	Relação entre as duas irá definir espessura de camada
		Percentagem de enchimento	Escolha da percentagem ideal
		Altura de camada	Escolha da percentagem mais correta
Pasta de açúcar	Inserção das temperaturas em extrusão	Extrusão da pasta de açúcar	Primeira utilização de temperaturas
	Adaptação dos parâmetros obtidos anteriormente	Enchimento, altura de camada e velocidades	Verificação de problemas das configurações anteriores
	Iteração de temperaturas da ponta aquecida	Aquecimento da pasta na zona da ponta aquecida	Verificação do conjunto de temperaturas ideal de funcionamento
	Iteração de temperaturas do corpo aquecido	Aquecimento da pasta no corpo aquecido	Verificação do conjunto de temperaturas ideal de funcionamento
	Testes de geometria	Capacidade de desenhar formas simples	Verificação de zonas circulares e linhas retas
	Testes de sobreposição de camada	Reação da pasta à sobreposição de varias camadas	Escolha de temperaturas ideais para uma boa sobreposição
		Testes de altura com varias camadas	Verificação da deterioração do modelo com a altura.
	Testes de ângulos	Capacidade de fazer ângulos fechados	Tipo de erros que surgem com os ângulos fechados.

5.3.1 - TESTES DE FUNCIONALIDADE

5.3.1.1 - Movimentação e deslocamento do veio

Numa primeira fase, os testes de movimento foram feitos de forma manual, movendo o êmbolo para dentro da seringa, verificando se não haveria nenhum bloqueio ao deslocamento do mesmo, assim como nas ligações engrenadas. Na fase posterior foi efetuado um movimento do extrusor em todos os eixos através do *software Repetier-Hos*t e *Printrun Pronterface*. Foi verificado que a massa do extrusor não causaria nenhum impedimento na deslocação do mesmo. Uma vez confirmados estes critérios, procedeu-se ao movimento do êmbolo através dos mesmos *software* com valores inseridos manualmente, tendo em conta que as velocidades de funcionamento do mesmo foram definidas pela configuração *Marlin* previamente inserida.

Após estes ensaios de deslocamento foi verificado que existiam alguns problemas. Os parafusos que prendem o motor, tinham tendência a desapertar-se, desregulando a posição do mesmo. O funcionamento das engrenagens nem sempre era o melhor, pois existia bastante atrito entre as mesmas, e a engrenagem motor ficava inclinada no eixo do veio do motor. Isto aconteceu porque o veio do motor é facetado para a colocação de um parafuso na engrenagem, para que esta fique fixa e rode solidária com o mesmo, que causa inclinação na mesma. Estes dois problemas conjugados levam a que, por vezes, as engrenagens encravem. Outro dos problemas encontrados foi o desalinhamento do êmbolo. Estando solidário com o veio, se não ficar completamente perpendicular ao copo da seringa, o deslocamento será dificultado pelo atrito da borracha do êmbolo.

A solução destes problemas passa por uma revisão da aplicação das peças. Os parafusos do motor poderão ser colados e as engrenagens poderão ser lubrificadas e alinhadas de forma permanente. Quanto à posição do êmbolo em relação ao veio, estes deverão ser separados e colados novamente.

5.3.1.2 - Testes de aquecimento da ponta

Previamente ao teste de aquecimento da ponta aquecida, foi efetuado um teste de verificação de temperaturas dos termístores. Sendo primeiro ligado o termístor da ponta aquecida e configurado no *Marlin* como 1, correspondendo a *100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup),* foi verificado se esta temperatura correspondia à temperatura ambiente. Como o resultado foi satisfatório, ligou-se o segundo termístor ao copo da seringa (as configurações utilizadas foram as mesmas pois o termístor é igual). Este irá ser ligado ao T1 agora TF, que corresponde à entrada do termístor para a cama aquecida. O valor de temperatura lido será o da mesa/*bed*/cama no software *Repetier-Host*.

Foram então ligados os dois termístores à temperatura ambiente de forma a comparar os valores obtidos, obtendo-se os resultados indicados na Figura 65.

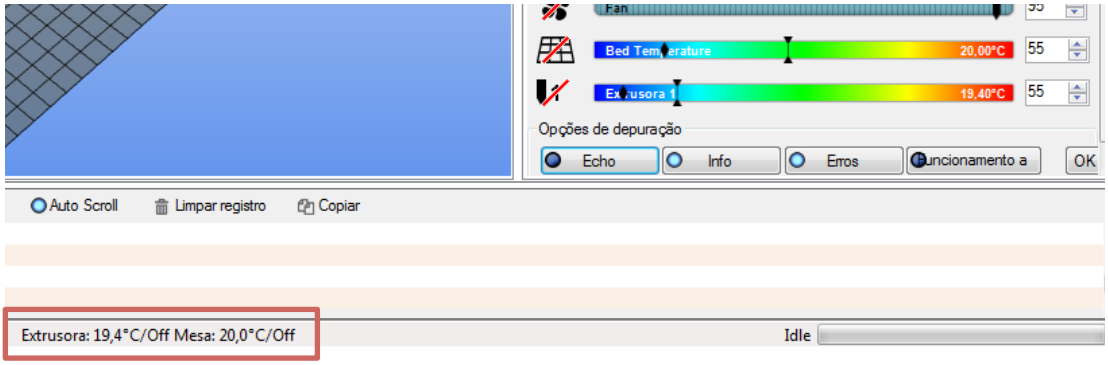


Figura 66 - Controlo de temperaturas dos termístores

Na Figura 66 é possível verificar que não existe qualquer tipo de aquecimento, nem da cama nem do extrusor. Para este teste, o *software* utilizado serve apenas para obtenção de dados.

Em suma, foi efetuada a ligação dos dois sensores e posterior configuração no *Marlin*, de seguida deixou-se estabilizar as temperaturas durante vários minutos e foram lidos os valores. Obteve-se uma diferença de temperaturas entre os dois termístores de 0.6°C. O termístor da ponta leu 19.4°C enquanto o termístor da mesa/filamento crómio níquel registou 20°C. Esta diferença pode ser causada pela falta de exatidão dos termístores ou sendo sensores do tipo resistivo, a resistividade do mesmo pode ter sido alterada pela solda do sensor ao fio condutor. Como esta diferença é bastante baixa foi desprezada.

A ponta aquecida tem uma geometria cilíndrica com um cone interno e dois furos laterais. O furo maior corresponde ao encaixe do elemento aquecedor, enquanto o mais pequeno é a entrada do termístor. Os furos estão colocados em lados opostos do cone para que as medições de temperaturas sejam mais corretas.. As temperaturas foram elevadas até 65°C e os valores registados (Figura 67).



Figura 67 - Teste de temperaturas da ponta aquecida

Tendo em conta a configuração de termístores utilizada, a diferença de temperaturas é justificada pela geometria do cone. O termístor do extrusor foi colocado do lado oposto do elemento aquecedor, enquanto o segundo termístor se situava mais perto do elemento aquecedor (*heater).* Os valores das temperaturas são aceitáveis visto que se mantiveram estáveis durante alguns minutos e ainda poderão ter as suas configurações aperfeiçoadas de forma a permitir uma melhor fluidez do material. Este teste foi realizado apenas com o intuito de verificação de estabilidade de aquecimento.

Conclui-se desta forma que a colocação do termístor do lado oposto ao elemento aquecedor é a melhor configuração a usar. Uma vez que o aquecimento é feito de forma incremental, ou seja, é comandada a temperatura x, o controlador envia corrente para o *heater,* o termístor lê a temperatura e informa o controlador que este valor ainda não foi suficiente, e o processo irá repetir-se até a temperatura x ser atingida e estabilizada. Se o termístor fosse colocado do mesmo lado do elemento aquecedor, a temperatura deslocar-se-ia na peça por condução numa distância mais curta. Isto originava uma medição mais correta, mas apenas na zona do aquecedor, enquanto no lado oposto da ponta aquecida, os valores seriam mais baixos. Com a configuração utilizada, terá de haver condução de calor em toda a peça até atingir o termístor, originando um aquecimento mais uniforme.

5.3.1.3 - Testes de aquecimento do copo

Os testes de aquecimento do copo consistiram apenas na elevação da temperatura do mesmo até 55°C, tentando estabiliza-la para obter leituras consistentes (Figura 68). Sendo que o filamento de crómio-níquel deu origem a um enrolamento de 8 espiras, com um espaçamento entre as mesmas de 8mm, decidiu-se colocar o termístor numa zona central do copo entre espiras (Figura 64).

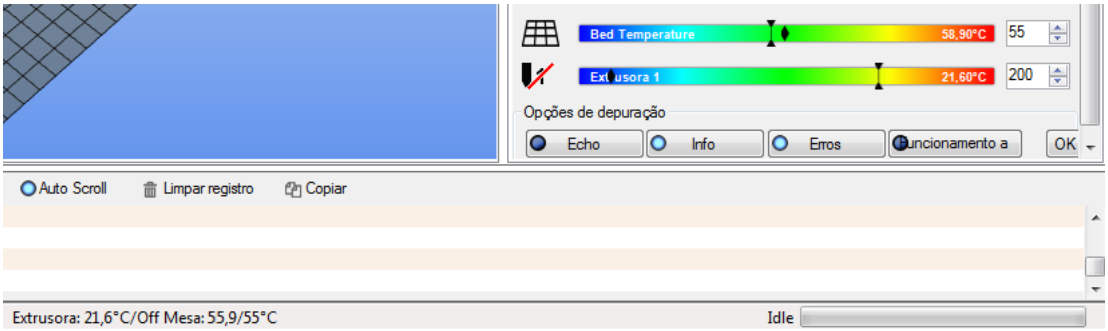


Figura 68 - Teste de aquecimento do copo

O resultado obtido foi bastante satisfatório, pois após a estabilização do controlador, as temperaturas rondaram os 54.9 até 55.9°C. A estabilização destes valores nunca dará origem a um valor fixo, pois trata-se de um controlo incremental, que foi efetuados com menor intensidade, mas em maior numero, tentando equilibrar o valor.

Os valores de funcionamento do filamento deverão estar compreendidos entre 55°C e 70°C. É sabido que a 90°C o corpo da seringa se irá começar a deteriorar, desta forma desde a temperatura máxima do intervalo de temperaturas funcionais até valores críticos ainda existem 15°C de segurança. Este intervalo será importante, pois o aquecimento da pasta de açúcar ocorrerá desde a superfície exterior até ao centro do recipiente. Desta forma, devemos ter uma temperatura mais elevada junto da parede enquanto no centro será mais baixa. Para permitir fluidez no centro, não existindo caramelização da pasta no exterior, estes valores terão de ser bem conjugados.

5.3.2 - CONFIGURAÇÃO SLICER PARA EXTRUSÃO DE PASTA SEM TEMPERATURAS

De modo a ter uma configuração funcional para este mecanismo são necessários vários testes. Já tendo sido provado que este funciona manualmente e através do controlo com o Repetier-Host, será agora necessário configurar em impressão. Esta nova configuração irá ser feita através do slicer, que requer uma mudança e estudo dos parâmetros em causa para o seu funcionamento.

É necessário agora recordar o capítulo 5.1.5.1 e entender estes parâmetros de modo a que a cada iteração o resultado seja melhorado. Este capítulo irá concentrar-se essencialmente em velocidades e enchimentos, desprezando para já a temperatura. O factor temperatura, após tudo funcional será ajustado facilmente. Sendo este factor desprezado, teve de ser utilizado um material que permitisse a extrusão sem grandes esforços no motor e engrenagens, mas que ao mesmo tempo permitisse que na deposição o material mantivesse a sua forma e resistisse a duas ou três camadas de sobreposição. O objecto de estudo para este caso foi a *Nutella* (creme de barrar de chocolate comercial) que conferia as características necessárias para um início de configuração.

As configurações criadas para estes testes tratam apenas dos parâmetros essenciais para o funcionamento. Uma vez que os materiais a extrudir são diferentes, será feito um refinamento dos mesmos uma vez que seja utilizado o controlo de temperaturas com o material apropriado.

O processo consistiu no enchimento de uma seringa com *Nutella*, colocando-a dentro do frasco e puxando o êmbolo para que esta fluísse para o seu interior. Desta forma foi possível conferir que usando a estanquicidade da seringa, seria possível encher o recipiente, característica que poderia ser utilizada no extrusor, facilitando o funcionamento. É necessário ter em conta que o cone frontal da seringa foi retirado, de forma que o caudal fosse apenas limitado pelo cone da ponta aquecida. Como a seringa utilizada tinha um volume de 20ml e o suporte inferior, foi projetado para uma de 30ml, a estanquicidade do conjunto foi conferida com fita de isolamento colocada em torno da mesma. De seguida foi colocada no extrusor. Ver figura 69.

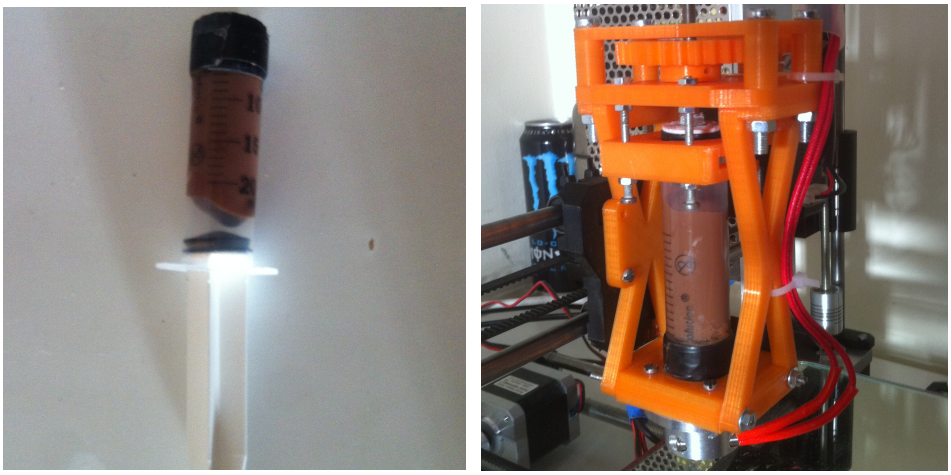


Figura 69 - Seringa com enchimento de Nutella (esquerda); montagem no extrusor (direita)

Foi então desenhada uma peça quadrangular com 4mm de altura, com um círculo em corte no seu interior. Este modelo permitirá efetuar ângulos retos e linhas curvas, assim como sobreposição de camadas.

Para a primeira configuração decidiu-se começar pelas *Print Settings,* definiu-se a *layer height* como 2mm, uma vez que a abertura do extrusor tem 2mm, e reduziu-se as *vertical shells* para 2 porque o material em causa não iria solidificar e acabaria por se espalhar com o peso de várias camadas. O *infill* foi reduzido para 30% com um padrão linear. Como o diâmetro da extrusora é bastante elevado este valor, ainda poderia ser reduzido. A velocidade é dos padrões mais importantes na utilização deste extrusor. As velocidades em perímetros e enchimento foram reduzidas para 30mm/s, deixando os outros parâmetros de origem. A *skirt* e *brim* foram removidas pois foi verificado que não existe controlo de velocidade para as mesmas, causando uma rápida descida do êmbolo, desperdiçando material. Passando para as *Filament Settings*, o diâmetro do filamento foi mantido em 3mm mudando o *Extrusion Multiplier* para 0.1, este factor ditará a velocidade de descida do êmbolo. Como as temperaturas não serão usadas, deverão ser colocadas a 0°C não enviando dados errados para o extrusor. No separador *Printer Settings*, a única alteração deverá ser no *Nozzle Diameter.*

Após o corte do modelo desenhado com as configurações definidas previamente, o *G-Code* importado para o *Repetier-Host* deu origem a um percurso com 1112 linhas, 4 camadas com um tempo estimado de impressão de 6m:16s. Obteve-se também o comprimento de filamento necessário, que corresponde a 203mm. Este valor irá permitir calcular o volume necessário para a impressão. Uma vez que no slicer foi definido 3mm como o diâmetro de filamento (de origem, não interferindo com o diâmetro de extrusão) o calculo será:

$$Volume = \pi * 1.5^2 * 203$$

$$\text{Volume} = 1434{,}9\text{mm}^3 = 14{,}34\text{ml}$$

Como o volume da seringa é de 20ml então a extrusão deste modelo será possível.

Para um primeiro teste (Figura 70), considera-se que estas configurações permitiram um bom desempenho durante a impressão. Apesar da lentidão do processo e de terem sido obtidas zonas sem depósito, consegue-se concluir que a velocidade de descida do embolo (*Extrusion Multiplier* = 0.1) a ser utilizada poderá ser mantida, elevando as velocidades de deslocamento do extrusor.

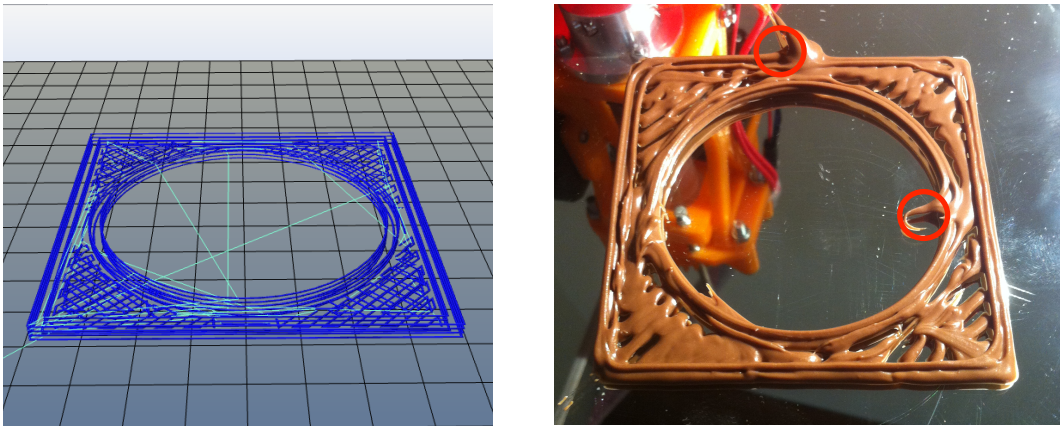


Figura 70 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido (direita)

Outro dos problemas obtidos foi a obtenção de depósito (assinalado na figura) após paragem da extrusão. Este problema tem como origem a falta de estanquicidade ou uma baixa retração. A retração do filamento numa impressão permite que não existam pontos de depósito indesejados. Neste caso, se houver retração do êmbolo e estanquicidade, estes erros serão evitados. As linhas curvas ficaram bem definidas, assim como os ângulos retos.

Os resultados obtidos no primeiro teste permitiram introduzir alterações nas configurações para futuros testes. A altura de camada definida como 1.5mm, irá estabelecer o número de passagens que a maquina irá fazer, para obter a altura da peça. O enchimento manteve-se o mesmo, assim como as suas propriedades. O parâmetro mais modificado foi a velocidade de deslocamento do extrusor. Subiu-se então a velocidade nos perímetros e no enchimento, de 10mm para os 40mm. Foi também considerada uma retração de 10mm no final da impressão. A retração entre camadas é uma característica com bastante utilidade se existir estanquicidade. Caso contrário, o que irá acontecer é uma retração do êmbolo com o aparecimento de bolsas de ar. Quando a impressora voltar a depositar material seguido desta retração, irão haver zonas em falta.

Os dados obtidos através do corte com esta configuração indicam um número menor de linhas, passando para 1001, 3 camadas e um tempo estimado de 3m:57s. O comprimento de filamento necessário é de 221mm.

$$Volume = \pi * 1.5^2 * 221$$

$$\text{Volume} = 1562{,}2\text{mm}^3 = 15{,}62\text{ml}$$

A extrusão deste modelo será possível pelo facto do volume utilizado ser inferior à capacidade total do recipiente. Este cálculo deverá ser sempre efectuado para assegurar que a capacidade volumétrica da seringa é suficiente. Esta segunda configuração mostra uma melhor estrutura, assim como uma melhor qualidade na sobreposição de camadas (Figura 71).

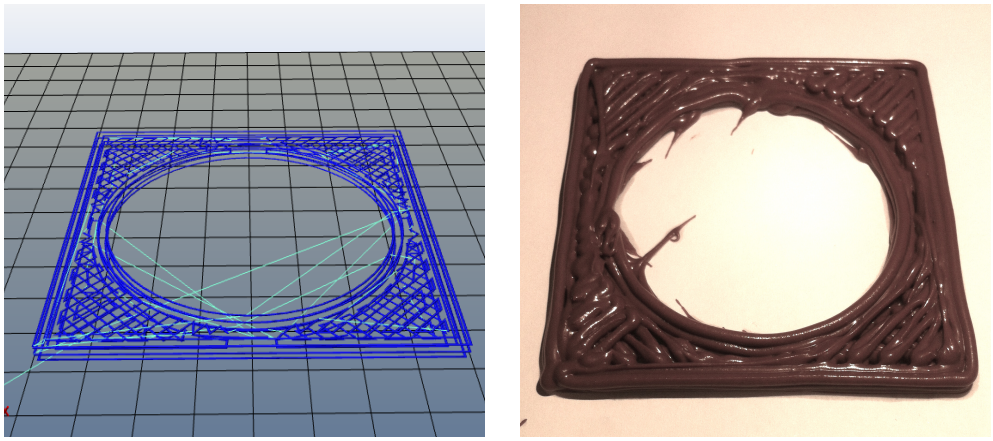


Figura 71 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido(direita)

No entanto, a sobreposição de camadas terá uma maior relevância no estudo com materiais solidificáveis. Os maiores erros nesta impressão são os excessos de pasta em determinadas zonas. Outro dos problemas foi que este depósito foi feito na superfície de vidro coberta com folha de papel que se foi deformando, dando origem a zonas mais altas. A ponta extrusora deverá estar a uma altura do prato de 2mm, e se não existirem irregularidades na superfície, os excessos não serão espalhados.

Para uma terceira impressão (Figura 71), na configuração os únicos parâmetros modificados em relação à anterior foram as velocidades. Foi comprovado que a 40mm/s ainda seria uma velocidade baixa de depósito, para a desmultiplicação da rotação do motor do extrusor. Desta forma, a velocidade de enchimento e do perímetro foram aumentadas para os 60mm/s, ficando todos os outros valores iguais aos do *setup* anterior. Com esta configuração obteve-se uma diferença mínima no número de linhas, passando para 999, 3 camadas, mas no entanto o tempo estimado foi de 3m:00s. O comprimento de filamento necessário manteve-se em 221mm, logo o volume requerido também. Estes resultados indicam o previsto, que numa alteração de velocidades, o volume mantem-se, mas mudando a altura de camada tal já não se verifica.

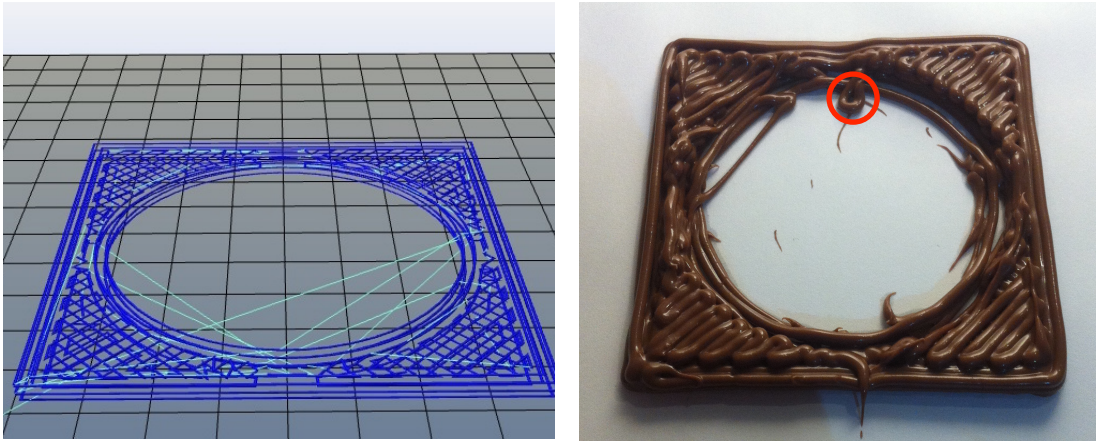


Figura 72 - Percurso do extrusor (esquerda); resultado obtido (direita)

Pode verificar-se na Figura 72 que a superfície superior do modelo impresso tem uma consistência e regularidade mais elevada que no teste anterior. No teste anterior é de notar zonas com menos depósito que outras, enquanto neste essas zonas estão em menor quantidade. Existem zonas com excesso de pasta, no entanto são na zona interior e facilmente removíveis. Verificou-se maior dificuldade em manter a estanquicidade, causando depósitos indesejados visíveis nos resultados obtidos, rodeado a vermelho na Figura 72.

5.3.3 - CONFIGURAÇÃO SLICER PARA EXTRUSÃO DE PASTA DE AÇÚCAR

Comparando a pasta de açúcar com o elemento de teste previamente usado, a *Nutella*, existem diversas diferenças. Ao contrário da *Nutella*, a pasta mantem uma consistência mais sólida a temperaturas baixas (ambiente). Como já referido no capítulo 3.5.2, para extrudir a pasta é necessário subir as temperaturas para valores entre 55 e 65°C, sendo agora necessária a introdução do copo com filamento de crómio-níquel que irá permitir esta elevação de temperatura. Desta forma é preciso considerar estes valores para as futuras configurações. Para estas definições teve-se em conta o esforço efetuado pelo motor ao êmbolo. Uma extrusão a frio de um elemento sólido como a pasta de açúcar poderá danificar as engrenagens e o motor. Verificou-se nos testes anteriores que o êmbolo não estaria perfeitamente perpendicular ao copo da seringa devido ao acoplamento deste ao varão roscado. Esta característica estava a causar um esforço mais elevado nos motores,

em especial no retorno, que se tornou na parte mais complexa do deslocamento. Tendo em conta este problema, o êmbolo foi alterado para a seguinte configuração.

Esta nova montagem consiste na perfuração do êmbolo com uma broca de 4.5mm, de menor diâmetro que o varão roscado M5, para que este entrasse roscado na parte plástica. Para evitar que houvesse o desaperto do mesmo, foi colocada uma anilha e respetiva porca, para que causasse um efeito contra-porca (Figura 73). Foi também adicionado lateralmente entre a rosca e o embolo, supercola.

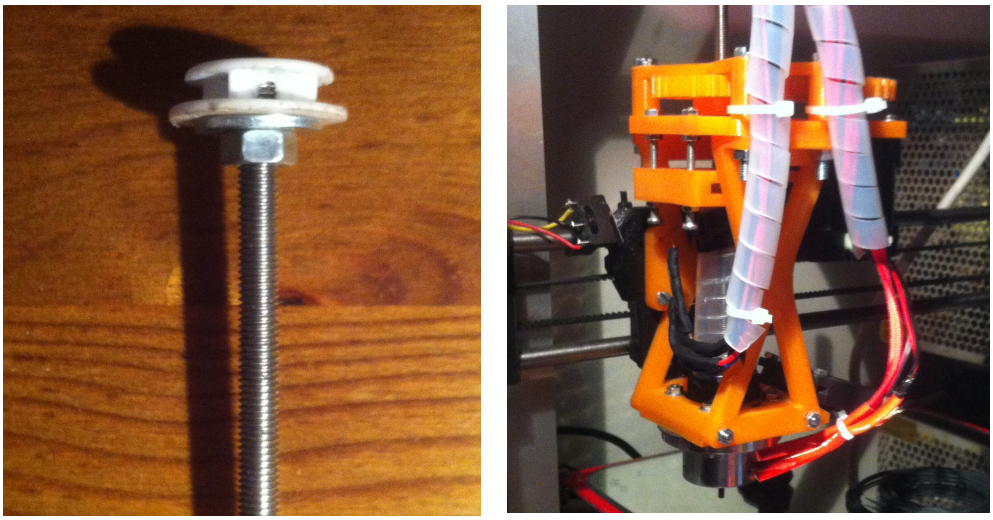


Figura 73 - Novo êmbolo (esquerda); extrusor com filamento aquecido (direita)

As configurações utilizadas foram denominadas como "Pasta de Açúcar – Rápido" no *software slicer*, sendo provenientes do último teste com *Nutella*. Em adição, a este conjunto de valores, as temperaturas de funcionamento foram modificadas para 65°C para a ponta aquecida e para o corpo da seringa. Desta forma seria permitida uma extrusão teoricamente correta. Foi então desenhado um hexágono com face de 4mm e uma altura de 3mm (Figura 74).



Figura 74 - Impressão pasta de açúcar - Teste 1

Este primeiro teste permitiu ter a percepção da reação da pasta de açúcar aos parâmetros definidos anteriormente, dando origem a vários melhoramentos. Deve-se evitar o uso de cortes (slicer) que contenham linhas inativas em cima de ativas. Isto quer dizer que por cima das linhas onde há a extrusão, não devem existir linhas de viagem do extrusor sem depósito. O motivo desta condicionante é a baixa estanquicidade a temperaturas mais

elevadas, causando erros de impressão (rodeado a vermelho na Figura 74). Outro problema detectado foi a falta de pasta de açúcar na ponta, no início da impressão. Como tanto a ponta como o corpo da seringa demoram alguns minutos a aquecerem até à temperatura desejada, e a partir dos 50°C começa a haver algum escorrimento de material, quando se inicia a impressão a ponta está com falta de material. Verificou-se também que 60°C seria uma temperatura demasiado elevada para que o depósito fosse efetuado com a geometria correta. Isto traduz-se numa demasiada fluidez da pasta de açúcar, dando origem a desalinhamentos, deformações indesejadas, assim como erros na sobreposição de camadas.

Para um segundo teste (Figura 75), as temperaturas foram reduzidas para 55°C, de forma a poder comparar o produto obtido com o resultado anterior. Para além desta modificação reduziu-se a velocidade de movimento do extrusor sem depósito de materiais e a refrigeração através da ventoinha do extrusor passou a ser ativada assim que a extrusão comece. Esta última modificação é bastante importante, uma vez que no teste anterior se verificou uma fraca qualidade na deposição de material na sobreposição.



Figura 75 - Impressão pasta de açúcar - Teste 2

Com este teste foi possível verificar que durante a impressão o primeiro problema seria o extrusor mal calibrado, querendo dizer que a distância do mesmo à cama aquecida deveria ser maior. Esta conclusão deveu-se à verificação da altura de camada, cada uma destas tornou-se mais baixa e mais larga, tendo sido pressionada pelo extrusor. Outro problema ocorrido foi a falta de adesão no início de depósito. A pasta foi arrastada ao longo do movimento, mantendo o contacto com a superfície, mas não aderindo durante algum tempo. Este erro poderá derivar do problema antes mencionado, em que devido ao aquecimento lento da ponta o material fluía pelo bico, e na impressão haveria material em falta e a uma temperatura mais baixa. Verificou-se uma maior solidez na sobreposição de camadas, não só pela temperatura ser 10°C mais baixa, mas também pela ativação da refrigeração.

Com o terceiro teste procedeu-se a várias alterações. Decidiu-se usar para o copo a temperatura de 50°C e para a ponta aquecida manteve-se os 55°C. Com esta alteração pretende-se, manter o controlo afinado a 55°C sem que seja necessário o aquecimento do copo a tão altas temperaturas, mantendo também a fluidez necessária para que o conjunto êmbolo/motor não tenha problemas no seu funcionamento. De forma a aumentar a adesão da pasta à superfície, foi adicionada uma folha de papel branca como base (Figura 76). Com o intuito de eliminar o problema do escorrimento da pasta na ponta, foi então reativada a *skirt* para duas passagens, a uma distância de 8mm do objeto. Inicialmente esta tinha sido desativada, porque a sua velocidade era excessiva e impossível de configurar. No entanto com a redefinição da relação alimentação este parâmetro foi controlado. A existência da *skirt* é importante para que quando a peça em causa for executada, exista pasta de açúcar na ponta, nas melhores condições para o depósito. Esta poderá ser removida depois da impressão.

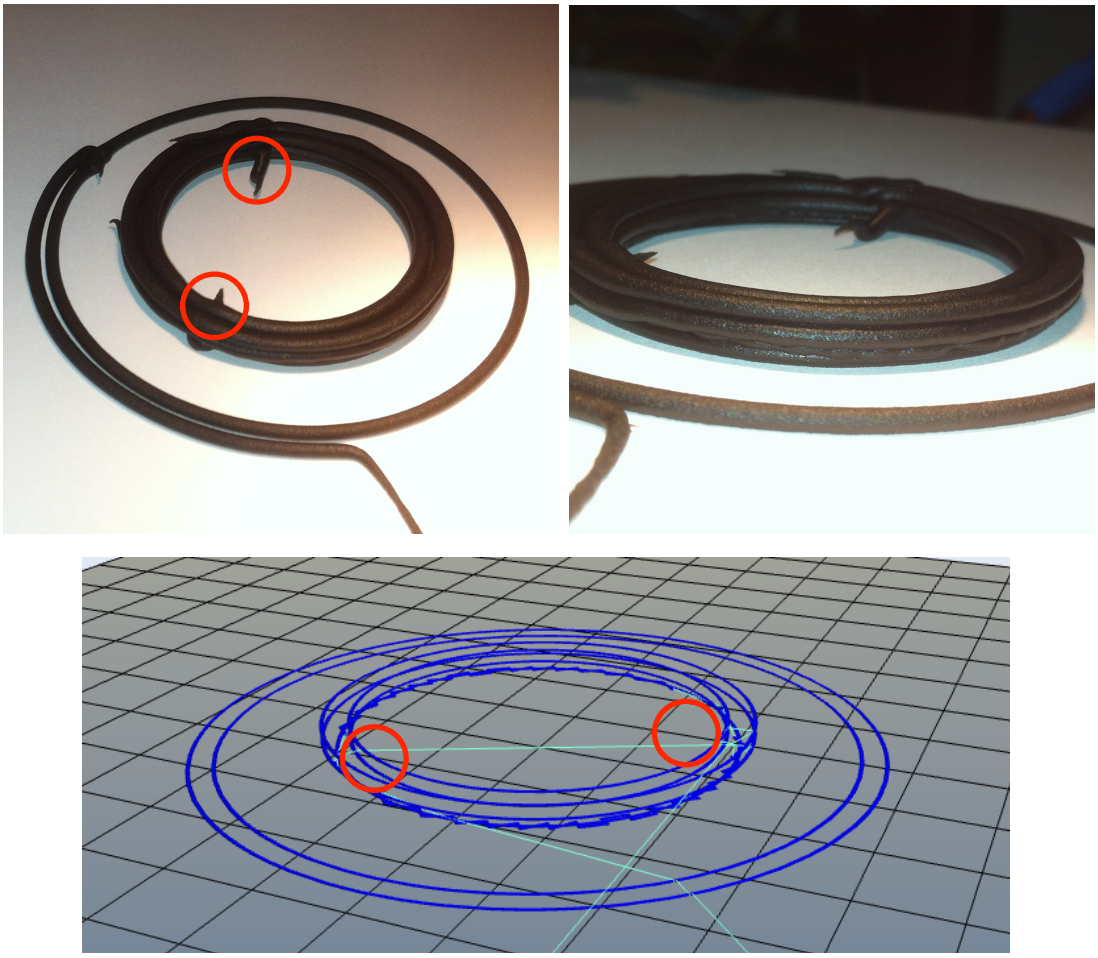


Figura 76 - Impressão pasta de açúcar - Teste 3 com repetier (em baixo)

Com estes novos parâmetros deu-se uma melhor adesão no primeiro contato, mas ainda com alguma dificuldade. Estes valores de temperaturas conferem uma boa rigidez após a deposição, levando a uma boa solidez na sobreposição de camadas. Uma vez que a pasta de açúcar se encontra mais sólida, os excessos por falta de estanquicidade são menores do que com a utilização de temperaturas mais elevadas, no entanto ainda estão presentes (assinalados na Figura 76). Como já referido, as passagens do extrusor em inatividade por cima do modelo levam a erros por falta de estanquicidade.

Com comparação da primeira imagem da Figura 76 (em cima à esquerda) com a terceira imagem (em baixo) é perceptível um melhor entendimento do seu aparecimento. Contudo, o funcionamento a temperaturas mais baixas, torna o movimento do êmbolo mais difícil. Existe uma dificuldade de extrusão com a utilização destes valores, dando origem a empanques do motor e esforços desnecessários nas engrenagens.

De forma a testar uma melhor aderência à superfície foi feito o teste com 65°C para a ponta e 60°C para o corpo da seringa. Através destes valores é possível também conferir um melhor deslocamento do êmbolo.



Figura 77 - Impressão pasta de açúcar - Teste 4

Chegou-se então à conclusão que 65°C seria a temperatura ideal de funcionamento para a primeira camada, pois a aderência no primeiro contacto foi a melhor de todos os testes. De forma a manter a fluidez no interior do corpo da seringa, subiu-se a temperatura de 50°C para 60°C. Este parâmetro veio facilitar o funcionamento do conjunto motor/êmbolo, reduzindo o esforço para empurrar a pasta de açúcar ao longo do recipiente. Ao contrário do esperado e registado em ensaios prévios, a sobreposição de camadas para estas temperaturas foi de boa qualidade, como é visível na Figura 77.

De modo a implementar os dados retirados do último ensaio, foi feito um novo teste. Nesta configuração foi definida a temperatura de funcionamento para uma primeira camada diferente das restantes. Para o primeiro *layer* a temperatura da ponta aquecida seria 65°C enquanto a temperatura do corpo da seringa 60°C. Estes valores correspondem aos do terceiro ensaio, o ensaio onde se obteve a melhor adesão da pasta à base. Para as restantes camadas, os 60°C do corpo manteve-se enquanto a temperatura da ponta, baixou 5°C, para 60°C. Desta forma é possível manter uma boa aderência e um bom deslocamento do êmbolo, com rigidez na sobreposição de camadas (Figura 78).



Figura 78 - Impressão pasta de açúcar - Teste 5

Esta configuração permitiu a melhor impressão de pasta de açúcar. Não considerando os excessos que podem ser removidos manualmente, a sobreposição das camadas não apresenta grandes deformações e a descida do êmbolo dá-se sem grande dificuldade nem empanques. Desta forma foi encontrada a melhor configuração para utilização com este tipo de pasta de açúcar. No entanto, foram feitos mais alguns testes (Figura 79) com outras geometrias, de maneira a verificar o correto funcionamento. Estes testes foram feitos sem *skirt* mas com extrusão manual da pasta antes de iniciar o processo automatizado de impressão, mantendo a pasta na ponta à temperatura correta.

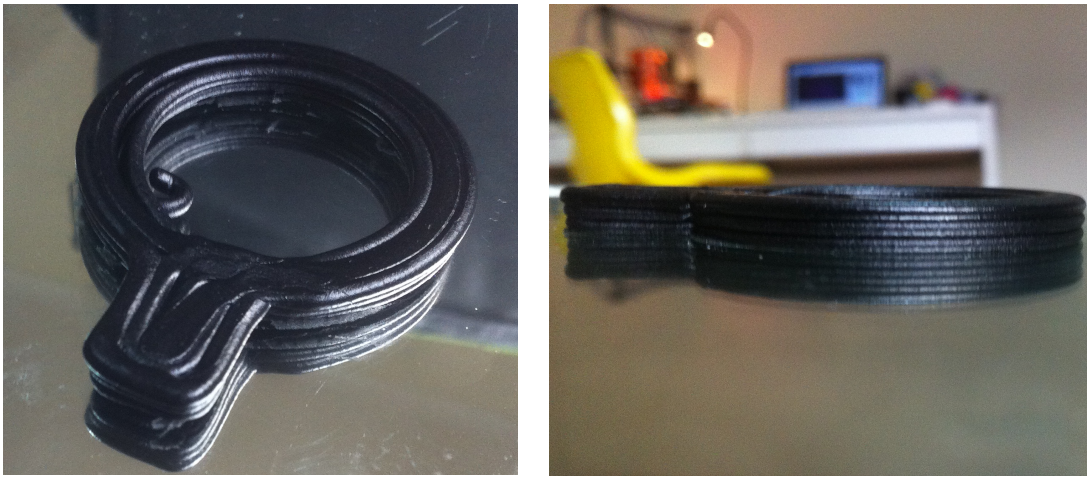


Figura 79 - Impressão pasta de açúcar - Teste 6

É possível verificar através da Figura 79 (imagem à direita) que a sobreposição de três camadas se dá de uma forma correta. O único erro visível é um excesso de pasta no interior do modelo impresso (imagem à esquerda), proveniente da falta de estanquicidade. Poderá ainda optar-se por fazer um enchimento mais baixo de forma aumentar o espaçamento entre paredes verticais.

Para um final teste de altura foi desenhado um modelo com 10mm de altura, de modo a verificar a estabilidade com um número elevado de camadas com uma pequena base de suporte. É visível alguma irregularidade no depósito (Figura 80), que pode ser originada por oscilações. Verifica-se também que o modelo depositado tem um diâmetro menor na superfície inferior do que na superior.

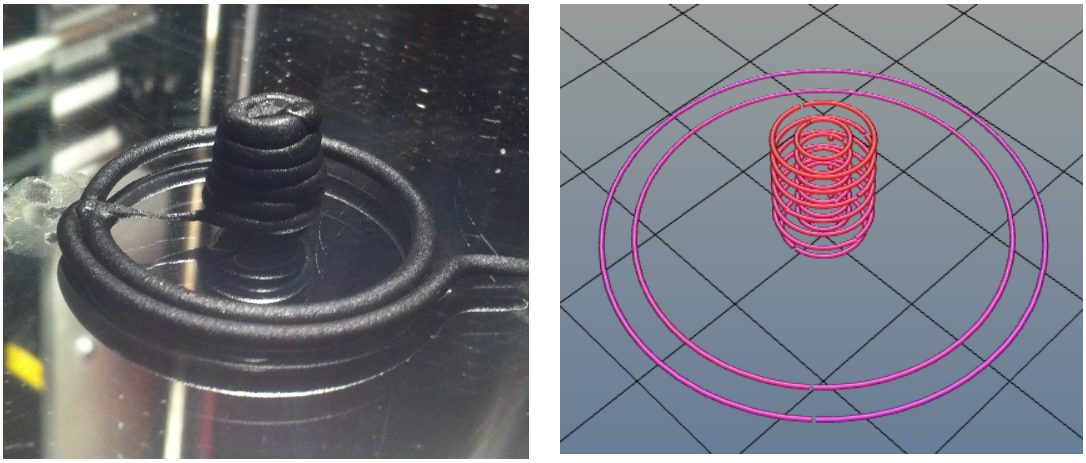


Figura 80 - Impressão pasta de açúcar - Teste 7 altura

De forma a testar o desempenho da impressora em ângulos muito baixos, foi desenhada uma estrela (Figura 81). A maior dificuldade encontrada neste teste foi a fraca aderência tanto da pasta à placa, como à pasta previamente depositada. O número elevado de linhas em inatividade do extrusor dão origem a pontas em excesso (assinaladas a vermelho). Estas linhas são dificilmente evitáveis, no entanto em figuras cheias só serão visíveis no exterior da figura.

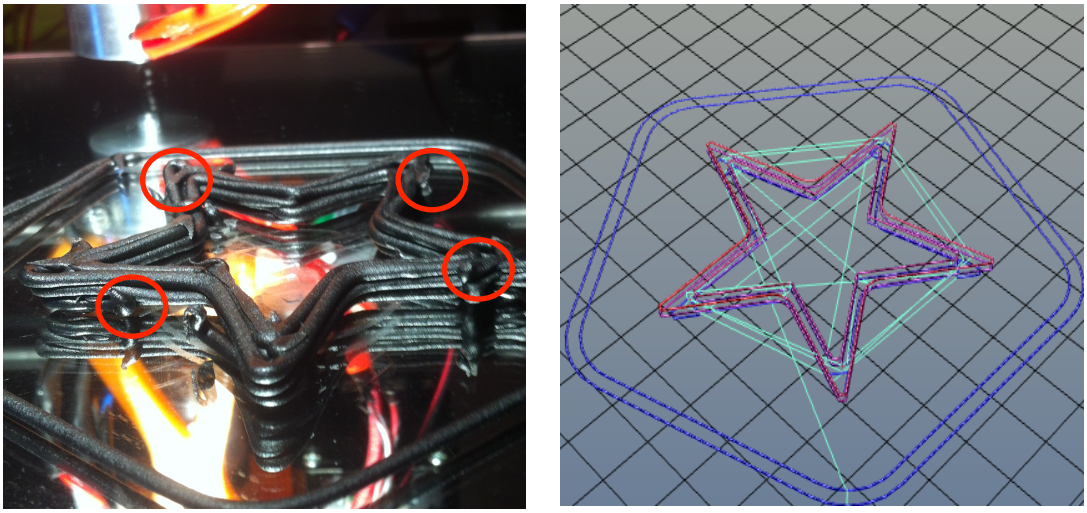


Figura 81 - Impressão pasta de açúcar - Teste 8 Ângulos

5.3.4 - RESULTADOS

Neste capítulo é possível demonstrar alguns dos resultados finais de impressões efetuadas. Foram criados alguns modelos puramente ilustrativos de impressões em pasta de açúcar de várias cores. As impressões foram feitas no tabuleiro revestido a folha de papel, para que esta pudesse ser humedecida e separada da pasta de açúcar sem danificar a impressão.

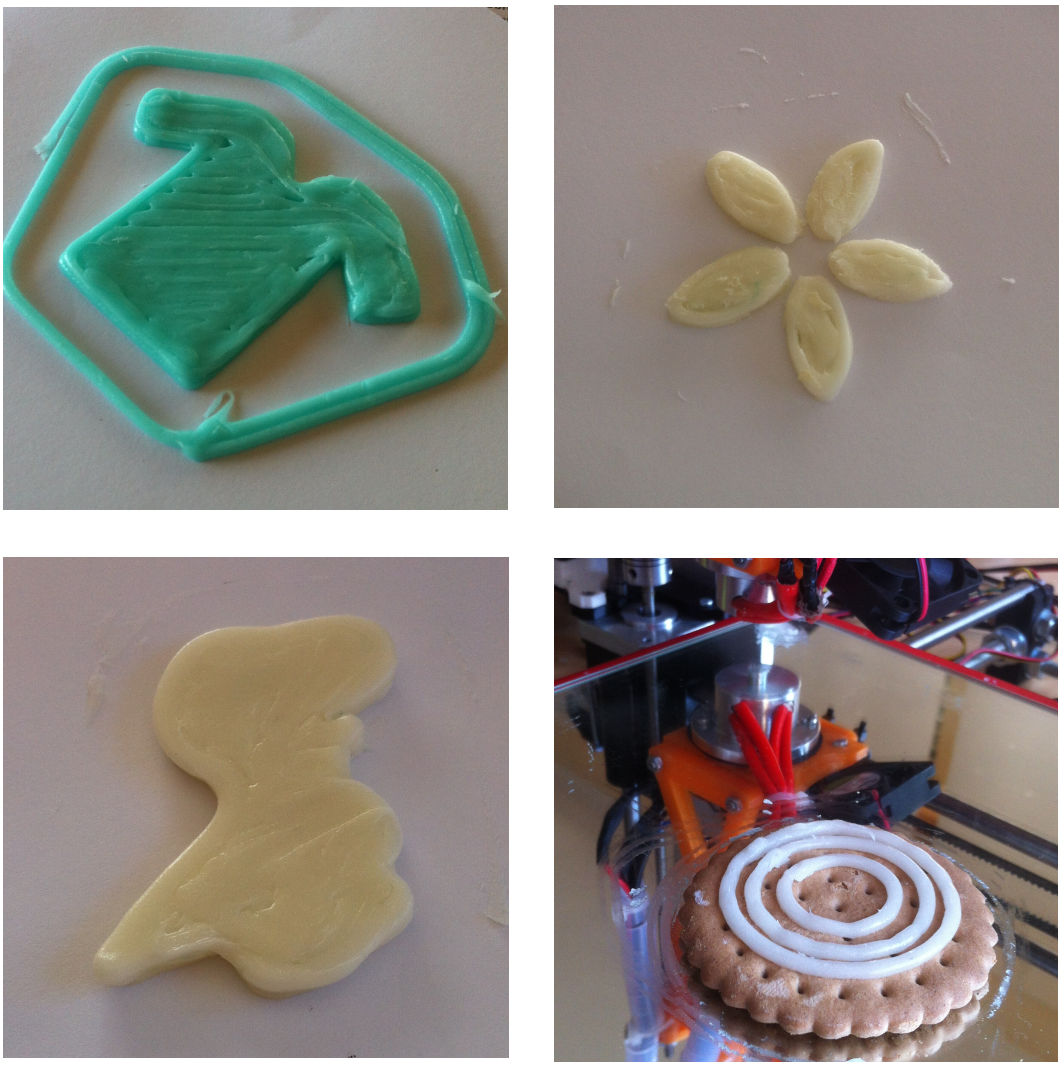


Figura 82 - Impressões finais 1







Figura 83 - Impressões finais 2

5.3.5 - PROBLEMAS DE FUNCIONAMENTO PERSISTENTES E POSSIVEIS RESOLUÇÕES

Após resolução da maior parte dos problemas de configuração, e sendo o modelo do extrusor em causa um protótipo, existirão ainda alguns obstáculos a contornar para um funcionamento correto. A falta de estanquicidade é um deles, apesar do corpo da seringa ter sido revestido por uma manga de borracha na zona de encaixe no batente inferior. Foi criada também uma junta de borracha para colocação entre o suporte inferior e a ponta aquecida, com o intuito de reduzir a transferência de calor para a parte plástica e de forma a aumentar o nível de estanquicidade do modelo. Apesar da utilização destes dois elementos, é bastante complicado evitar que exista um escorrimento da pasta pela abertura de extrusão, pois esta tem um diâmetro de 2mm. Quanto maior for a temperatura da pasta mais difícil será conter o material dentro do extrusor. Uma possível resolução futura para este problema será aplicar uma ponta à existente com diâmetro mais reduzido e que pudesse ser trocada. Isto poderia trazer vantagens na ordem do aumento do nível de detalhe e resolução. Outra maneira de resolução deste problema seria manter a mesma ponta mas com um mecanismo que tapasse a saída da pasta manualmente. Assim esta seria mantida dentro da ponta aquecida enquanto se procede ao aquecimento da mesma sem que houvesse desperdício, sendo que seria retirada na altura de início de impressão.

Outro problema persistente é a deterioração da borracha do êmbolo. Foi notório que ao longo dos sucessivos aquecimentos, movimentos descendentes e ascendentes, que esta começa a alargar e aumentar o atrito no corpo da seringa. Isto sucedeu só com a pasta de açúcar, pois esta tem uma consistência mais espessa e granular do que a pasta de chocolate. O problema detectado foi no movimento ascendente, já que esta tem tendência a deformar ao arrastar a pasta. Como é necessário mais força para puxar o êmbolo e alguma da pasta que resida no corpo da seringa, o motor por vezes encrava. Outro problema resolvido e mencionado previamente foi a inclinação do êmbolo relativamente ao veio e corpo da seringa. Esta inclinação levava à necessidade de um maior esforço por parte do motor e engrenagens. Este problema poderá ser resolvido substituindo o motor de passo, por um com um binário mais elevado, ou criando novas engrenagens com uma relação de transmissão diferente, de forma a esforçar menos o motor. Relativamente à parte de borracha do êmbolo, a única solução seria encontrar uma borracha mais resistente, que aguentasse temperaturas mais elevadas, ou remover a estanquicidade aplicando um êmbolo totalmente metálico ou polimérico. Esta solução resolverá o problema do esforço, mas piorará na questão do excesso de depósito indesejado.

Após diversas utilizações verificou-se que o filamento de crómio-níquel penetrou a parede plástica do copo da seringa. Isto deve-se ao facto do termístor estar colocado numa zona (plástica) entre espiras. Assim sendo, para elevar a temperatura do plástico ao nível requerido, o filamento tem que possuir um valor mais elevado, podendo por vezes levar à degradação do plástico, como foi o caso. Assim, o copo da seringa foi substituído, permitindo mais algumas utilizações, e movendo o termístor para uma zona mais perto da espira aquecedora. Uma solução definitiva será a substituição do filamento por uma fita adesiva aquecedora existente no mercado. Outra hipótese será a colocação de um copo metálico ou de vidro permitindo uma maior condutividade assim como uma gama de temperaturas mais elevada.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através do estudo realizado e do trabalho prático desenvolvido, foi possível o reconhecimento das vantagens e desvantagens do equipamento desenvolvido, assim como a sua praticabilidade no meio em que será introduzido. Foram também reconhecidos os maiores problemas, para além dos de funcionamento, problemas estes que dificultam o correto manuseamento do equipamento.

6.1 - CONCLUSÕES

Um dos principais objetivos deste trabalho foi entender quais as maiores dificuldades que um utilizador com poucos conhecimentos sobre a Impressão 3D teria que atravessar de forma a ter um equipamento funcional. O conhecimento inicial sobre o funcionamento de uma impressora de baixo custo era bastante reduzido, sendo a aprendizagem efetuada descrita para que se entendesse melhor este funcionamento. O objetivo era a aquisição de um equipamento Reprap Prusa I3 em Kit, para que pudesse ser feita a sua montagem e configuração. No entanto essa aquisição em Kit era bastante comprometedora para o intervalo de tempo disponível para esta dissertação, tendo-se optado pela compra dum equipamento já montado.

O equipamento adquirido sendo do tipo *Open source* está normalmente destinado a ambientes académicos, ou com algumas perspetivas de evolução e modificação do mesmo, não sendo por isso o mais indicado para todo o tipo de consumidores.

Tendo o equipamento funcional, o passo seguinte foi a definição de parâmetros de impressão para que se pudessem criar conjuntos de configurações tanto para esta máquina como para outra. Desta forma a que qualquer utilizador capaz de utilizar o equipamento possa ganhar este tipo de conhecimento com o manuseamento do mesmo. A criação destas configurações foi uma das partes mais complexas deste trabalho, pois envolveu inúmeros testes iterativos que só posteriormente permitiram o trabalho com o novo mecanismo.

A outra parte do trabalho que consistiu no desenvolvimento de um equipamento extrusor para pastas, só pôde ser executada tendo em conta a primeira. Se o estudo aprofundado da programação do equipamento não tivesse sido feito, o novo componente não seria funcional. A conceção deste novo extrusor passou por várias fases, apresentando diversos desafios.

A primeira parte consistiu no isolamento das características que o extrusor necessitaria para se tornar uma vantagem perante os equipamentos já disponíveis. Seguidamente foi conceptualizado e desenhado de forma que fosse "*plug and play*" na Reprap, tendo sido depois produzido com alguns componentes de raiz da *Prusa* e consequentemente programado. Desde a conceptualização até ao modelo funcional, foram solucionados vários problemas. A parte do aquecimento tornou-se a mais problemática conduzindo a várias falhas críticas.

A utilização do novo extrusor processou-se em duas fases. Na primeira fase utilizou-se pasta de *Nutella*, com o objetivo de perceção dos parâmetros a utilizar. Após uma primeira modificação de valores, conseguiu obter-se resultados bastante positivos para uma primeira impressão com um protótipo. De forma iterativa, foram-se alterando os parâmetros até ter uma impressão sem grandes falhas, podendo depois introduzir a pasta de açúcar, que foi desde o início o objetivo principal.

A impressão com pasta de açúcar revelou-se mais complexa do que a impressão da pasta de *Nutella*, pois a primeira possui uma consistência mais sólida, mesmo a elevadas temperaturas, e é muito mais granular. Estas propriedades tornaram o deslocamento do embolo mais difícil, causando alguns problemas mecânicos. Contudo, a deposição deste material apresentou uma solidez muito maior que o primeiro material de teste, permitindo uma melhor sobreposição de camadas e melhor definição de geometrias.

Apesar de esta dissertação ter originado um dispositivo funcional, fazendo impressões com alguma qualidade e nível de detalhe elevado, considera-se que este equipamento ainda necessita de mais desenvolvimento para se tornar um equipamento mais prático e funcional, com capacidade para despertar interesse comercial. No entanto o equipamento não é tudo, sendo as suas configurações tão importantes como a parte física para um bom funcionamento.

A impressão 3D com este equipamento e com as configurações de base é de relativa facilidade, contudo para fazer uma boa impressão o cenário já é diferente, tendo sido apresentados todos os detalhes para o conseguir.

Perante os objetivos propostos, considera-se que o trabalho foi um sucesso só pela funcionalidade do extrusor. A pasta de açúcar, que revelou ser um material de difícil extrusão, foi extrudida com sucesso controlando a temperatura e o seu arrefecimento. O desbloqueamento desta barreira permite que novos materiais, que anteriormente não poderiam ser utilizados na impressão 3D, possam agora ser alvo de testes.

Com esta impressora e com as inovações introduzidas, controlo de movimentos, aquecimento e arrefecimento durante e após a extrusão, abriu-se uma nova área de exploração para impressão com novos alimentos que mantenham estados físicos similares à pasta de açúcar.

6.2 - TRABALHOS FUTUROS

Como as maiores falhas de funcionamento já foram detetadas e com um possível conjunto de soluções apresentadas, este tópico vem complementar o já existente. Estes problemas detectados deverão ser corrigidos de forma a permitirem um funcionamento mais refinado do equipamento em causa.

Para além destas funcionalidades que deverão ser corrigidas, seria de maior interesse repensar a geometria do extrusor, para que se aumentasse a funcionalidade do mesmo. Um problema deste equipamento é a dificuldade de enchimento do reservatório. O suporte inferior poderia ser repensado, para que fosse facilmente desmontável, retirando o conjunto suporte/copo da seringa do êmbolo, reabastecendo desta forma o reservatório.

Como já foi discutido, um copo metálico seria uma evolução de maior interesse neste extrusor, permitindo um aquecimento mais rápido, e um deslocamento melhor do êmbolo. Dependendo do conteúdo a utilizar, a estanquicidade total será ou não necessária. No caso da pasta de açúcar, existirá sempre uma consistência bastante viscosa e granular e com o êmbolo de borracha a causar problemas no seu deslocamento. Poderá então ser testado um êmbolo plástico.

As geometrias dos suportes poderão ser revistas, diminuindo as massas em movimento, o que é sempre preferível em qualquer um dos equipamentos de impressão tridimensional, reduzindo assim possíveis folgas causadas por esforços.

Uma vez que os problemas de enchimento e de correção de deslocamento do êmbolo estejam resolvidos, equacionando também uma alteração de geometria, seria de maior interesse o uso de dois extrusores em paralelo. Voltando à impressão tridimensional de pasta de açúcar, a utilização de várias pastas seria uma vantagem. Dando o exemplo do *Cake Design,* a aplicação de pastas de cores diferentes na mesma impressão, evitando a paragem do programa e posterior recomeço, seria algo que só traria vantagens.

A equacionar também, seria um maior volume de extrusão. Neste momento, o extrusor está funcional com uma capacidade de 20ml, o que se revela escasso. Não existindo reservatórios de 30 e 40 ml, analisar o funcionamento e aquecimento da pasta com um reservatório de 50ml (já disponível) poderia ser de maior interesse. No caso de existir o recipiente com parede metálica estas medidas intermédias já poderiam ser testadas.

Outro melhoramento, no caso de o extrusor ter uma utilização elevada, poderia ser a criação dos componentes estruturais em alumínio, conferindo uma maior rigidez ao mesmo e um melhor funcionamento.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. 2010.
[2] Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing: Hanser; 2012.
[3] Biggest ever growth for 3D printing. Metal Powder Report. 2014;69(4):38.
[4] Lipson H, Kurman M. Fabricated: The New World of 3D Printing. 2013.
[5] Wohlers TT, Caffrey T. Wohlers Report 2013. 2013.
[6] Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. Business Horizons. 2012;55(2):155-62.
[7] Makezine.com. Ultimate guide to 3D Printing 2014. Make:. 2014.
[8] Goyanes A, Buanz ABM, Basit AW, Gaisford S. Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets. International Journal of Pharmaceutics. 2014;476(1–2):88-92.
[9] Open source software [13-10-2014]. Disponivel em: http://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_software.
[10] GNU GPL [13-10-2014]. Disponivel em: http://pt.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License.
[11] Reprap Darwin 1.0

[13-10-2014]. Disponivel em: http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/d/d8/All_3_axes_fdmd_sml.jpg/527px-All_3_axes_fdmd_sml.jpg.
[12] Diagrama Reprap [30-10-2014]. Disponivel em: http://reprap.org/mediawiki/images/5/5c/Reprap_family_tree_v0.1.png.
[13] Evan Malone HL. Fab@Home: The Personal Desktop Fabricator Kit. 2006.
[14] Jeffrey I Lipton DC, Michael Heinz, Maxim Lobovsky, Warren Parad, Garrett Bernstien, Tianyou Li, Justin Quartiere, Kamaal Washington, Abdul-Aziz Umaru, Rian Masanoff. Fab@Home Model 2: Towards Ubiquitous Personal Fabrication Devices. 2009.
[15] Makerbot [4-10-2014]. Disponivel em: http://www.makerbot.com.
[16] Lets try that again makerbot [26-10-2014]. Disponivel em: http://www.makerbot.com/blog/2012/09/24/lets-try-that-again/.
[17] Makerbot FORBES [26-10-2014]. Disponivel em: http://www.forbes.com/fdc/welcome_mjx.shtml.
[18] Makezine.com. Ultimate guide to 3D Printing 2013. Make:. 2013.
[19] Ultimaker [7-11-2014]. Disponivel em: https://www.ultimaker.com.
[20] Afinia [5-11-2014]. Disponivel em: http://www.afinia.com.
[21] Pp3dp [20-9-2014]. Disponivel em: http://www.pp3dp.com.
[22] Type A machines [26-9-2014]. Disponivel em: http://www.typeamachines.com.
[23] Cubify [25-9-2014]. Disponivel em: http://cubify.com.
[24] Felix Printers [25-9-2014]. Disponivel em: http://shop.felixprinters.com.
[25] Printbot [24-9-2014]. Disponivel em: http://printrbot.com.
[26] Fabtotum [25-Nov-2014]. Disponivel em: http://www.fabtotum.com.
[27] TOPTENREVIEWS [2-Nov-2014]. Disponivel em: http://3d-printers.toptenreviews.com.

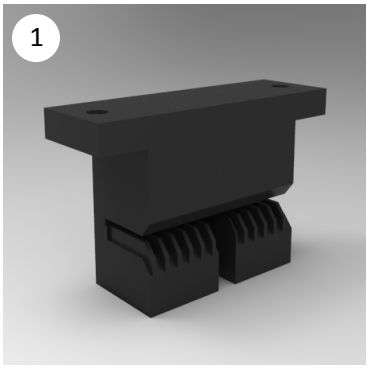
[28] Repetier Host [30-10-2014]. Disponivel em: http://www.repetier.com/w/wp-content/uploads/2012/08/rhm-startscreen.png.
[29] Chuensangjun C, Pechyen C, Sirisansaneeyakul S. Degradation Behaviors of Different Blends of Polylactic Acid Buried in Soil. Energy Procedia. 2013;34(0):73-82.
[30] Raquez J-M, Habibi Y, Murariu M, Dubois P. Polylactide (PLA)-based nanocomposites. Progress in Polymer Science. 2013;38(10–11):1504-42.
[31] Wittbrodt BT, Glover AG, Laureto J, Anzalone GC, Oppliger D, Irwin JL, Pearce JM. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. Mechatronics. 2013;23(6):713-26.
[32] Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Materials & Design. 2014;58(0):242-6.
[33] Extrusor ReprapBCN [18-11-2014]. Disponivel em: http://www.reprapbcn.com.
[34] Extrusor Richrap [18-11-2014]. Disponivel em: http://richrap.com.
[35] 3D printing of dental restorations. Metal Powder Report. 2013;68(2):32-3.
[36] Barros MJ. Impressão Tridimensional Oportunidades no Design Industrial: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto; 2014.
[37] Tucker R. Embracing 3D printing. Metal Powder Report. 2013;68(2):3.
[38] Wegrzyn TF, Golding M, Archer RH. Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. Trends in Food Science & Technology. 2012;27(2):66-72.
[39] Gray N. Looking to the future: Creating novel foods using 3D printing 2010 [20-Nov-2014]. Disponivel em: http://www.foodnavigator.com/Science/Looking-to-the-future-Creating-novel-foods-using-3D-printing.
[40] Soares S. Insects au gratin 2014 [20-Nov-2014]. Disponivel em: http://www.susanasoares.com.
[41] 3D systems [31-10-2014]. Disponivel em: http://www.3dsystems.com.
[42] Sugar lab [6-Jan-2015]. Disponivel em: http://the-sugar-lab.com/gallery.
[43] Zoran A. Cornucopia: The Concept of Digital Gastronomy. Leonardo. 2011;44(5):425-31.
[44] Cohen DL, Lipton JI, Cutler M, Coulter D, Vesco A, Lipson H, editors. Hydrocolloid printing: a novel platform for customized food production. Solid Freeform Fabrication Symposium; 2009.
[45] IInzana JA, Olvera D, Fuller SM, Kelly JP, Graeve OA, Schwarz EM, Kates SL, Awad HA. 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. Biomaterials. 2014;35(13):4026-34.
[46] Bose S, Vahabzadeh S, Bandyopadhyay A. Bone tissue engineering using 3D printing. Materials Today. 2013;16(12):496-504.
[47] Trounson A. Chapter 1 - Why Stem Cell Research? Advances in the Field. In: Lanza R, Atala A, editors. Essentials of Stem Cell Biology (Third Edition). Boston: Academic Press; 2014. p. 3-6.
[48] Mironov V, Visconti RP, Kasyanov V, Forgacs G, Drake CJ, Markwald RR. Organ printing: Tissue spheroids as building blocks. Biomaterials. 2009;30(12):2164-74.
[49] Mironov V, Kasyanov V, Markwald RR. Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line. Current Opinion in Biotechnology. 2011;22(5):667-73.

[50] 3D printing could make Li-Ion batteries. Metal Powder Report. 2013;68(6):43.
[51] Orcutt M. Printing batteries. Technology review. 2014;117(1):84-6.
[52] Interface Grasshopper 3D [29-Nov-2014]. Disponivel em: http://psudigitalbeehive.files.wordpress.com.
[53] 3D G. Photo Album Grasshopper 3D [29-Nov-2014]. Disponivel em: http://www.grasshopper3d.com.
[54] Kostakis V, Niaros V, Giotitsas C. Open source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece. Telematics and Informatics. 2015;32(1):118-28.
[55] Lee Cronin NO. 3D Printing Laboratories: The Age of DIY Designer Drugs Begins28-Nov-2014. Disponivel em: http://ieet.org/index.php/IEET/more/olson20120426.
[56] Ragan SM. Thingiverse Cracks Down on Firearm Parts2012 28-Nov-2014. Disponivel em: http://makezine.com/2012/12/20/thingiverse-cracks-down-on-firearm-parts/.
[57] Calculador niquelcromio [12-Dez-2014]. Disponivel em: http://www.jacobs-online.biz/nichrome/NichromeCalc.html.

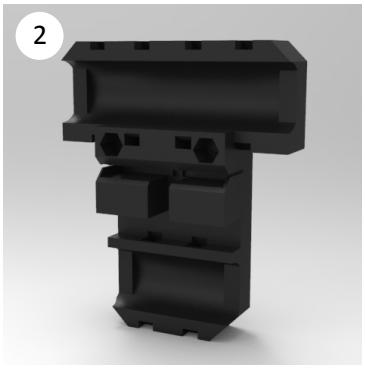
ANEXOS

ANEXO A - LISTA DE COMPONENTES PRUSA I3

COMPONENTES IMPRESSOS (ESTRUTURAIS)



1x – Aperto correia Y



1x – Aperto correia X



1x – Suporte correia Y



1x – Guia motor X



1x – Guia X



1x – Suporte motor Y



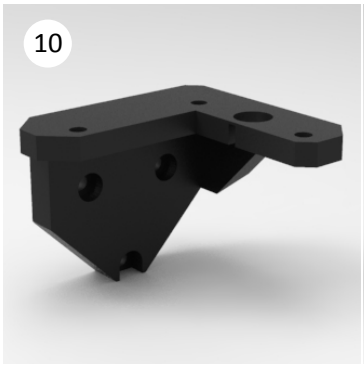
1x – Guia Z superior direita



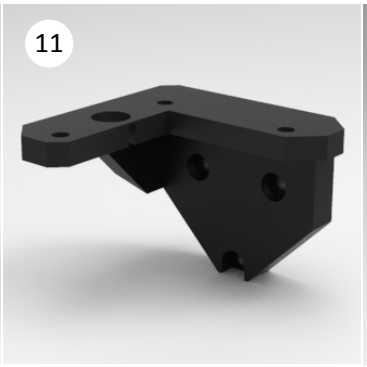
1x – Guia Z superior esquerda



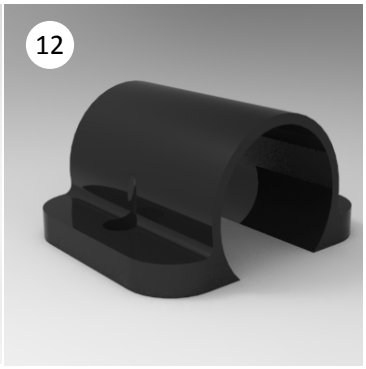
4x – Suporte Y



1x – Guia Z inferior direita



1x – Guia Z inferior esquerda



3x – Suporte LM8UU



4x – Polia correia

Figura 84 - Componentes impressos (Estruturais)

COMPONENTES IMPRESSOS (EXTRUSOR)



1x – Corpo Extrusor wade



1x – Tensor de filamento



1x – Engrenagem Motora



1x – Engrenagem movida



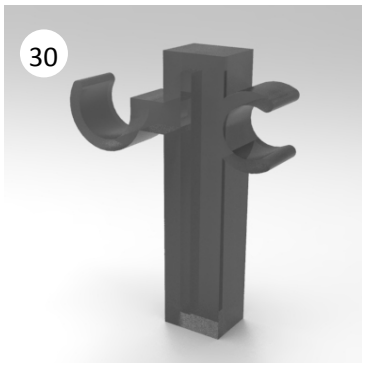
1x – Aperto extrusor

Figura 85 - Componentes impressos (extrusor)

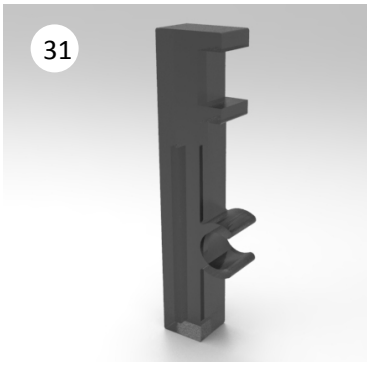
COMPONENTES IMPRESSOS (PERIFÉRICOS)



1x – Suporte sensor X



1x – Suporte sensor Y



1x – Suporte sensor Z

Figura 86 - Componentes impressos (Periféricos)

COMPONENTES MECÂNICOS



2x Polia GT2



5x Motor NEMA17



11x LM8UU Rolamento linear



33x M3, 6x M4, 2x M5, 14x M10



53x Ø3mm, 6x Ø8mm, 34x Ø10



2x Acopladores de veios



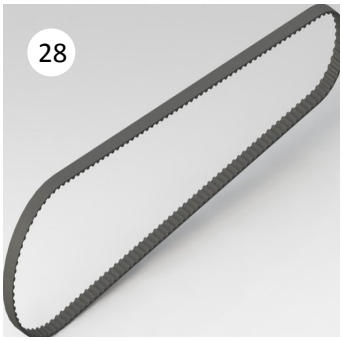
1xM8



20x M10



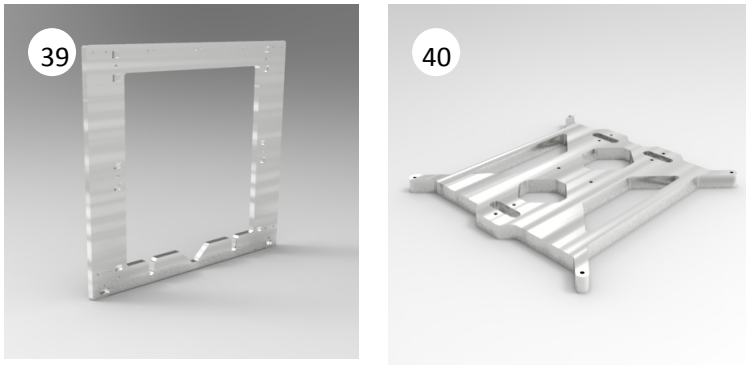
1x 624, 1x 628



GT2(760mm), GT2(900mm)

Figura 87 - Componentes mecânicos

COMPONENTES ESTRUTURAIS



1x – Estrutura vertical

1x – Base da BED

Figura 88 - Componentes estruturais

VEIOS, VARÕES ROSCADOS E PARAFUSOS

2x Veio liso Ø8x320mm

2x Veio liso Ø8x350mm

2x Veio liso Ø8x370mm

2x Fuso M5x300mm

4x Fuso M8x210mm

2x Fuso M10x380mm

41x M3x14mm

3x M3x24mm

4x M3x30mm

2x M3x60mm

6x M4x20mm

1x M8x20mm

1x M8x30mm

5x M3x8mm sem cabeça

COMPONENTES ELETRÓNICOS

32



1x - *Arduino* MEGA 2560

33



1x - RAMPS 1.4

34



4x - Driver Motor

35



3x – Sensor de paragem

36



1x – Fonte Alimentação 12V

37



1x – PCB HEATED BED com termístor

38



1x - Ponta quente J-HEAD

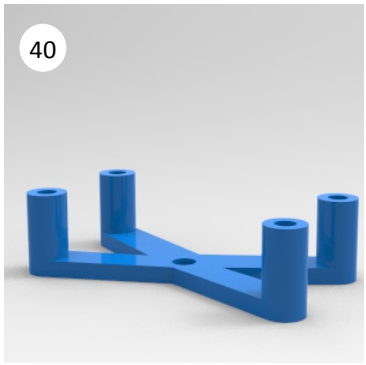
Figura 89 - Componentes eletrónicos Reprap Prusa i3

ANEXO B - LISTA DE COMPONENTES DO EXTRUSOR

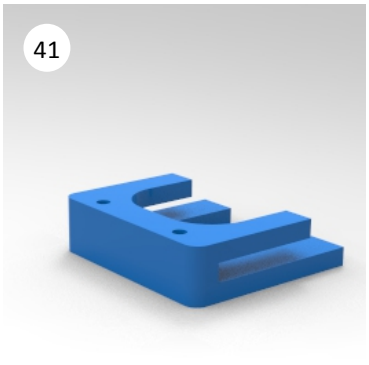
COMPONENTES IMPRESSOS



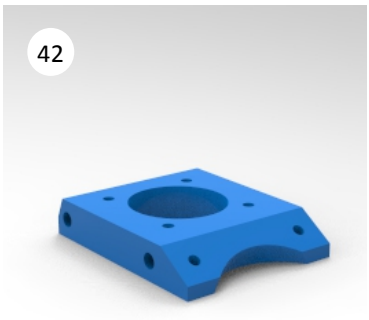
1x – Base de suporte



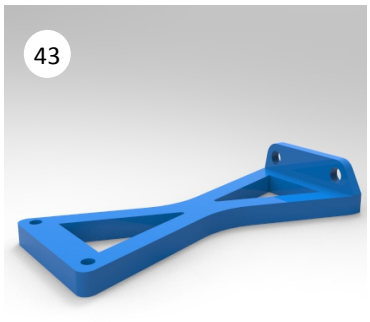
1x – Aranha de suporte de roda



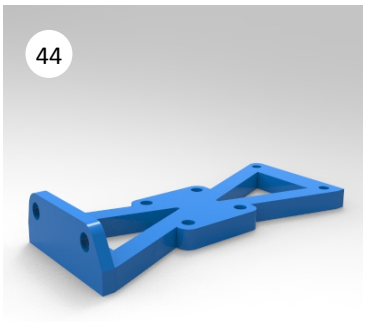
1x – Suporte superior da seringa



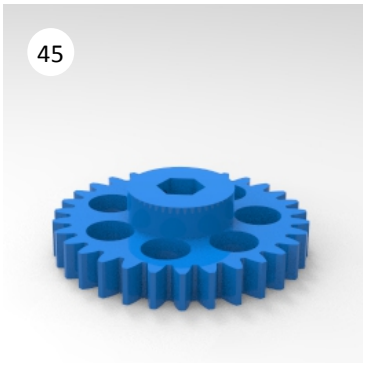
1x – Suporte inferior da seringa



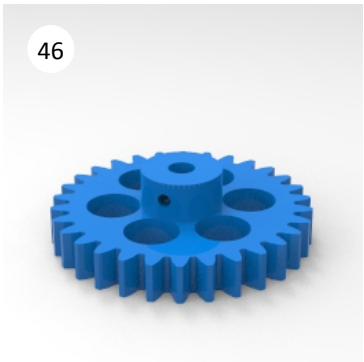
1x – Pilar esquerdo



1x – Pilar direito



1x – Engrenagem movida

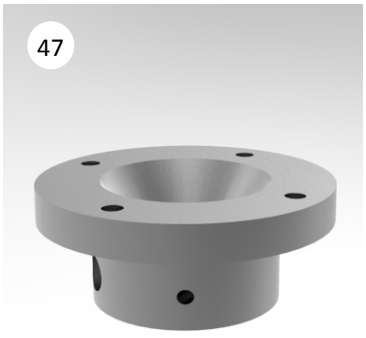


1x – Engrenagem motora

Figura 90 - Componentes impressos para extrusor de pasta

OUTROS COMPONENTES

47



1x – Ponta aquecida

48



1x – Ventoinha 40mm

49



2x – Termístor 100K ohm

50



1x – Heater cartridge

Figura 91 - Componentes estruturais e elétricos do Extrusor