

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE FÍSICA *Gleb Wataghin*

F 896 MONOGRAFIA

Fabricação de sensores microfluídicos utilizando  
uma impressora 3D

Aluno: Melissa Mendes

E-mail: m118166@dac.unicamp.br

Orientador: Prof. Dr. Varlei  
Rodrigues

E-mail: varlei@ifi.unicamp.br

Departamento de Física Aplicada

Instituto de Física *Gleb Wataghin*

Universidade Estadual de Campinas

Orientador: Prof. Dr. Antonio  
Riul Júnior

E-mail: riul@ifi.unicamp.br

Departamento de Física Aplicada

Instituto de Física *Gleb Wataghin*

Universidade Estadual de Campinas

2

Campinas-SP  
Dezembro 2014

i



# Resumo

---

Neste projeto, construímos uma impressora 3D com a finalidade de fabricarmos dispositivos microfluídicos. Esse processo de fabricação utiliza-se de uma tecnologia nova denominada FDM - do inglês *fused deposition modelling* - mais simples e barata que os métodos fotolitográficos convencionais para produção de microcanais, adicionando flexibilidade no desenvolvimento e integração de sensores e dispositivos. O processo de selagem é crucial em dispositivos microfluídicos, e foi uma etapa que consumiu um tempo significativo dentro de nossos desenvolvimentos. Entretanto, com a impressora 3D conseguimos viabilizar alterações mais rápidas de design que os processos convencionais, fabricação mais rápida de microcanais, incluindo um caso com selagem completa, possibilitando o desenvolvimento futuro de dispositivos ‘lab-on-a-chip’. Cabe ressaltar que microcanais com diferentes geometrias possibilitam adaptação a vários tipos de aplicações, especialmente em áreas inter-disciplinares, como análise de alimentos, bebidas e monitoramento ambiental, por exemplo. Nessa etapa do projeto, após otimizarmos os parâmetros de impressão especificamente para microcanais de ABS e PLA, testamos sua selagem.



# Abstract

---

In this project we built-up a 3D printer aiming the fabrication of microfluidic devices. It is based on a new technology named Fused Deposition Modelling, cheaper and simpler than conventional photolithographic methodologies to manufacture microchannels, adding flexibility in the development and integration of sensors and devices. Sealing is crucial in microfluidic devices and it was a time consuming step faced in the development of this work. However, with a 3D printer we could enable faster changes in design and in microchannel fabrication than conventional processes, with a complete sealing case study presented, permitting future developments of 'lab-on-a-chip' devices. It is worth mentioning that microchannels with distinct geometries allow adaption to several applications, especially those in interdisciplinary areas such as foodstuff, beverages and environmental monitoring, for example. We could optimize printing parameters for ABS and PLA microchannels, testing the sealing of the microchannels produced.



# Biografia do Autor

---

Melissa Mendes nasceu em Feira de Santana, Bahia, onde morou até o fim do ensino médio. Iniciou seu curso de bacharelado em física neste instituto em 2011 e participou de projetos de iniciação científica tanto na área teórica quanto experimental. Seu primeiro projeto foi “Oscilação de neutrinos no vácuo”, orientada pelo Prof. Dr. Marcelo Guzzo, onde estudou o fenômeno não totalmente compreendido da oscilação de neutrinos com técnicas de relatividade especial. Esse projeto rendeu uma bolsa FAPESP e participação no Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP.

Após a conclusão desse projeto, foi convidada pelo Prof. Dr. Varlei Rodrigues para seu segundo projeto de iniciação científica, que dá origem à presente monografia. Financiado pelo CNPq, esse projeto tem sido além de uma imersão no mundo inédito da instrumentação, uma oportunidade única de conhecer a fundo o outro lado da moeda: a física experimental. Seu maior desafio atualmente é fazer uma impressora 3D “cheia de personalidade” obedecer ordens e sua maior recompensa, a constatação de que a física é bela sobre qualquer ponto de vista, teórico ou experimental.



À minha querida avó,  
Maria Inês, *in memoriam*



# Agradecimentos

---

Ao CNPq, pelo financiamento do projeto.

À Oficina Mecânica do Instituto de Física *Gleb Wataghin*, pela constante disponibilidade.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Varlei Rodrigues e Prof. Dr. Antônio Riul, por acreditarem que eu seria capaz.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa e em especial, ao doutorando Tiago Pedroso, que foram bastante gentis ao me ajudar sempre que precisei.

À minha família que me apoiou e nunca me deixou desistir dos meus sonhos, mesmo quando eles pareciam grandes demais para mim.

A todos os meus amigos, em especial às garotas que moraram e ainda moram comigo, sem vocês essa aventura não teria sido tão divertida.



# Sumário

---

Resumo	iii
Abstract	v
Biografia do Autor	vii
Agradecimentos	xi
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Microfluídica</b>	<b>4</b>
2.1 Definições . . . . .	4
<b>3 Caracterização da impressora 3D</b>	<b>8</b>
3.1 Impressoras 3D . . . . .	8
3.2 Mendel90 . . . . .	10
3.2.1 Mecânica . . . . .	10
3.2.2 Eletrônica . . . . .	14
<b>4 Impressão de microcanais</b>	<b>22</b>

---

4.1	Impressão 3D . . . . .	22
4.1.1	Em ABS . . . . .	24
4.1.2	Em PLA . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>34</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>36</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Parâmetros de impressão</b>	<b>39</b>
A.1	Impressora . . . . .	39
A.2	Filamento . . . . .	40
A.2.1	ABS . . . . .	40
A.2.2	PLA . . . . .	40
A.3	Impressão . . . . .	40

# Introdução

---

Microfluídica é a ciência que estuda o comportamento de pequenas quantidades de líquidos por gravidade, pressão e capilaridade no interior de microcanais, permitindo a passagem de fluidos em fluxo laminar de volumes que podem variar de  $10^{-9}$  a  $10^{-18}$  litros [1, 2, 3, 4]. O controle de fluxo nessas dimensões potencializa desenvolvimentos de sensores e biossensores micro/nanofluídicos, com a vantagem de utilizar microlitros de substâncias para análise, o que resulta em pouco descarte de amostras, além de aumentar a velocidade de reações em alguns processos [5].

Os processos fotolitográficos, em geral, [6] são caros e dispendiosos, em muitos casos exigindo uso de salas limpas. Com o objetivo de fabricar dispositivos microfluídicos de maneira mais rápida e barata, estudamos a viabilidade do uso de impressoras 3D. Outra possível vantagem do uso de impressoras nesse tipo de fabricação seria a maior flexibilidade na alteração de design dos microcanais para adaptações em aplicações variadas. Assim, não haveria necessidade de novas fotomáscaras para novo design e seria até mesmo possível selar o microcanal diretamente no processo de impressão, pois a selagem é um problema crucial que inviabiliza muitos desses desenvolvimentos.

Neste projeto, construímos uma impressora 3D baseada no modelo Mendel90, do projeto de

hardware aberto RepRap [7, 8, 9]. Estudamos em detalhes os componentes da impressora, sua montagem e limitações para posterior fabricação de microcanais. O objetivo inicial era utilizar o escoamento laminar que ocorre nos dispositivos microfluídicos para fabricarmos filmes ultrafinos nanoestruturados por adsorção física no interior dos microcanais. Posteriormente, faríamos a caracterização desses filmes nanoestruturados com auxílio de espectroscopia vibracional Raman, o que nos levou à impressão de microcanais em materiais transparentes como Nylon e poliláctico (PLA).

Após termos impresso com sucesso três diferentes modelos de microcanais, tanto em ABS quanto em PLA, injetamos fluidos contendo corantes com o auxílio de microbombas, verificando quais técnicas de selagem eram mais adequadas. Obtivemos resultados promissores em uma delas, que serão apresentados nesta monografia, entretanto, o tempo exigido para os desenvolvimentos não permitiram verificar a automontagem de filmes ultrafinos e sua caracterização com espectroscopia Raman. Indicamos as dificuldades encontradas assim como possíveis soluções aos problemas que apareceram.

Como resultado positivo, ressaltamos a impressão de uma geometria de microcanal que evita problemas de selagem, viabilizando um grande avanço no desenvolvimentos de dispositivos microfluídicos, com rapidez na produção e elevada flexibilidade de ajuste nos designs que podem ser feitos.



# Microfluídica

---

Neste capítulo introduzimos conceitos básicos envolvidos na microfluídica, como escoamento laminar e turbulento, além do número de Reynolds. Estimamos este parâmetro para os microcanais desenvolvidos e ainda salientamos algumas recentes aplicações da microfluídica, em especial para sensoriamento.

## 2.1 Definições

Microfluídica é a ciência que estuda o comportamento de pequenos volumes de fluidos, de cerca de  $10^{-9}$  a  $10^{-18}$  litros [1, 2], conforme eles escoam em canais de diferentes geometrias, submetidos às forças da gravidade, pressão e capilaridade.

Genericamente, um fluido pode escoar em um dos três regimes: laminar, turbulento ou de transição. O regime laminar consiste na movimentação do fluido em camadas adjacentes uma a outra, de tal forma que o movimento relativo perpendicular entre camadas vizinhas é minimizado [10]. Seu fluxo é aproximadamente constante e forças viscosas - de cisalhamento entre as camadas - são dominantes. Já o regime turbulento é predominante para fluxos de médios e grandes volumes de líquidos ou com relativamente grandes velocidades de escoamento. Ele é dominado por forças inerciais, portanto, seu movimento tende a ser instável e caótico[4]. O

regime transitório é um estado intermediário entre os descritos acima.

O número de Reynolds é uma quantidade adimensional utilizada para estimar o regime de escoamento de certo fluido em uma dada geometria e velocidade. Ele foi definido a partir da equação de Navier-Stokes para um fluido newtoniano [4],

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \frac{\mu}{\rho LV} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2.1)$$

$$\frac{\mu}{\rho LV} = \frac{1}{\text{Re}} \quad (2.2)$$

sendo  $\mathbf{v}$  a velocidade média de um objeto imerso em relação ao fluido,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido,  $\rho$  a densidade do fluido,  $L$  a dimensão linear e  $V$ , a velocidade de escoamento do fluido.  $p$  e  $\mathbf{f}$  são, respectivamente, pressão e força externa aplicada.

Também pode ser escrito como [4]

$$\text{Re} = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.3)$$

$\nu$  é a viscosidade cinemática,  $\nu = \mu/\rho$

Utiliza-se como referência para o regime laminar para um canal aberto  $\text{Re} < 5 \times 10^2$  [3]. Cabe comentar que este valor de referência muda para cada geometria de canal e é um valor empírico, não determinando com exatidão o regime do fluxo.

Para canais de geometria genérica, teremos que [4]

$$\text{Re} = \frac{\rho V D_H}{\mu} = \frac{V D_H}{\nu} = \frac{\mathbf{Q} D_H}{\nu A} \quad (2.4)$$

$\mathbf{Q}$  é a taxa de fluxo volumétrica e  $D_H$  é o diâmetro hidráulico, determinado empiricamente para cada geometria de canal. Em específico, para canais de seção reta retangular, [3]

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{2ab}{a+b} \quad (2.5)$$

$A$  é a área de seção reta e  $P$  o perímetro por onde o fluxo passa. Adicionalmente,  $a$  e  $b$  são as altura e largura do canal.

Reescrevendo, temos que

$$\text{Re} = \frac{2QA}{\nu A(a+b)} = 0,556 \frac{Q}{(a+b)} \quad (2.6)$$

Particularmente aos casos que estudamos, substituímos o valor de densidade e viscosidade da água - o fluido utilizado para testar a selagem dos microcanais, conforme descrito no capítulo 4.

Utilizamos um fluxo de  $50\mu\text{l}/\text{s}$  com auxílio das microbombas (New Era, modelo NE4000), durante o teste de selagem, em microcanais produzidos com  $500\mu\text{m}$  de largura e  $400\mu\text{m}$  de altura, resultando em  $\text{Re} = 3,1 \cdot 10^{-5}$ , dentro da ordem de grandeza prevista para que obtenhamos fluxo laminar [4].

(+) Devido ao pequeno volume de fluido tratado, geralmente trabalha-se no regime laminar. Para a maioria de suas aplicações isso é essencial, pois permite controle do fluxo, necessário em várias aplicações nas áreas química, biológica e médica, por exemplo. Desta maneira, estuda-se o desenvolvimento de microdispositivos altamente integrados para pesquisas biomédicas, farmacêuticas e em análises clínicas (preparação de amostras, biosensores, análises clínicas e genéticas, detecção de drogas, análise de uma única célula, etc.), como também aplicações nas áreas de engenharia e física para sistemas de controle e gerenciamento de calor, tecnologias de displays, geração de energia, entre outras [10].

Especificamente a este trabalho, nos interessamos em desenvolvimentos futuros de uma “língua eletrônica”, um dispositivo amplamente utilizado para análise de sistemas líquidos complexos, baseada em medidas de impedância elétrica e filmes ultrafinos depositados sobre eletrodos interdigitados (IDE's) [10]. Neste projeto, buscamos verificar se microcanais produzidos através de uma impressora 3D são capazes de formar em seu interior filmes ultrafinos automontados. Para isso, avaliamos a qualidade do microcanal, assim como de algumas técnicas de selagem, a partir do escoamento de fluidos inseridos.



# Caracterização da impressora 3D

---

Neste capítulo, descreveremos a impressora 3D utilizada para impressão dos microcanais, assim como seu processo de fabricação. A partir da caracterização de seus componentes e do estudo de suas limitações para impressões de microcanais, justificaremos a escolha do modelo Mendel90.

## 3.1 Impressoras 3D

O conceito e a tecnologia por trás de dispositivos de impressão 3D não são novos. Desde a década de 80 [11] existem dispositivos que através de processos subtrativos modelam materiais no formato 3D desejado. Técnicas como usinagem e EDM por CNC's funcionam genericamente a partir de sucessivos e automatizados cortes e polimentos do bloco original de gesso, madeira ou até metal. Devido ao alto custo desse processo, assim como a grande produção de lixo decorrente do material inutilizado e a pouca versatilidade do equipamento com diferentes materiais e tamanhos de peças produzidas, dispositivos como esses eram restritos a poucos profissionais e indústrias.

Mais recentemente, foram desenvolvidas técnicas de impressão 3D baseadas em processos aditivos, isto é, que fabricam peças a partir da deposição do material camada a camada ao

invés de sua retirada. Nossa impressora utiliza a técnica FDM - do inglês, *Fused Deposition Modelling* - que consiste na construção da peça a partir da deposição de material derretido, como esquematizado na figura 3.1. Dessa forma, o material (em geral, plástico) é forçado a passar por um bico quente, que o derrete e deposita em uma mesa quente, ambos possíveis de movimentar-se no espaço com ajuda de motores de passo, de acordo com sua montagem. Assim que toca a mesa, o material torna-se sólido novamente, compondo a peça de acordo com seu modelo digital. Essa técnica foi desenvolvida em 1989, por S. Scott Crump [11] e tem se popularizado principalmente devido à expiração de sua patente, à existência de hardwares *open source* como Arduino e à disponibilização integral de projetos para construção de impressoras 3D na Internet.

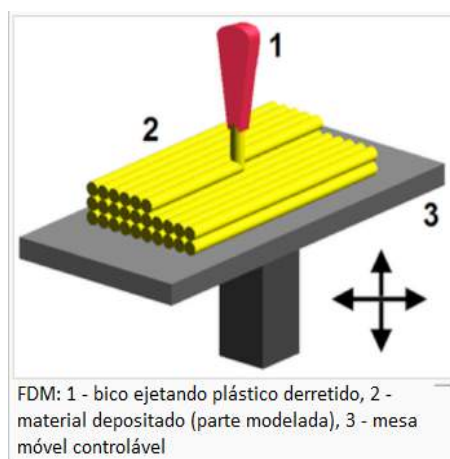


Figura 3.1: Representação esquemática de técnica FDM. De [11].

Um desses projetos é o RepRap [9], o primeiro completamente *open source* disponibilizado na Internet. O principal objetivo de seus idealizadores era popularizar a tecnologia de impressão 3D FDM não só para profissionais e pesquisadores mas também para hobbystas e curiosos em geral. Seu repositório digital [12] é constituído por vários modelos de impressoras, com instruções detalhadas de montagem e calibração, além de fóruns para discussão. Outra característica importante desse projeto é que quase todos os modelos de impressoras foram criados para serem

auto-replicantes, ou seja, permitir que a maior parte dos componentes da impressora possam ser impressos nela mesma. Essa é mais uma medida para a popularização e barateamento de impressoras 3D FDM.

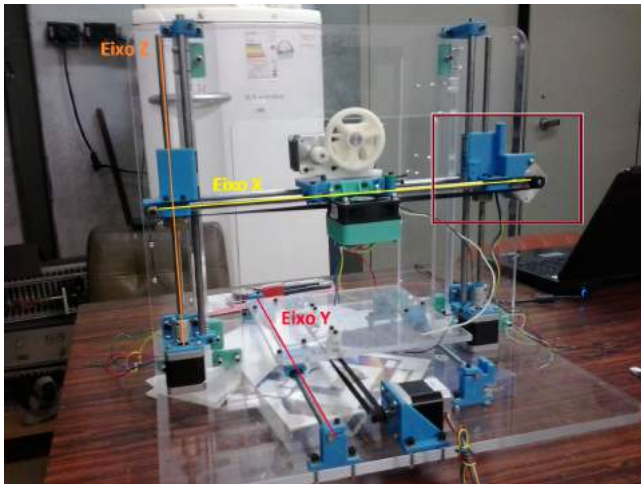
Nesse projeto, escolhemos construir uma impressora FDM pelo baixo custo de fabricação, alta resolução das peças produzidas - isto é, peças com estruturas micrométricas bem definidas e detalhadas - e possibilidade de utilização de materiais adequados para a produção de microcanais transparentes, como Nylon, PLA e PET, por exemplo. Escolhemos também construir uma impressora 3D ao invés de comprá-la pela possibilidade de adaptação do seu modelo às nossas necessidades técnicas específicas para a produção de microcanais, como a utilização e fácil troca de diferentes materiais para impressão, a possibilidade de conseguir uma resolução maior, entre outros. Essas potencialidades serão explicitadas na Seção 3.2.

## 3.2 Mendel90

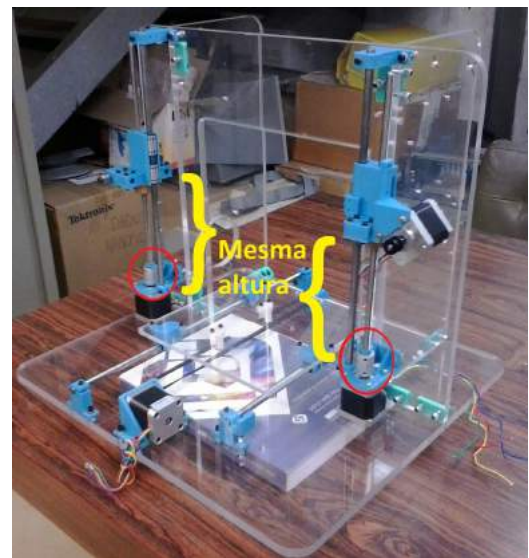
A Mendel90 foi projetada por Chris Palmer [7] em uma tentativa de resolver problemas de alinhamento e estabilidade da impressora modelo Mendel [13]. Os principais componentes da Mendel90 construída são 5 estruturas independentes de acrílico, que servem de base, 4 motores de passo (modelo 17HS8401), 6 eixos ( $(8 \times 22)$ mm,  $(8 \times 271)$ mm,  $(8 \times 340)$ mm,  $(8 \times 385)$ mm e  $(8 \times 418)$ mm), 2 barras roscadas ( $(M8 \times 300)$ mm), uma mesa quente (modelo PCB MK2A), um bico quente (modelo E3D-v6), uma extrusora, um controlador Arduino (RAMPS 1.4), 3 dispositivos fim de curso (Mech v1.2) e uma fonte de tensão (Thermaltake modelo TR2 450W/500W). Nas Seções 3.2.1 e 3.2.2 descrevemos detalhadamente suas partes mecânica e eletrônica.

### 3.2.1 Mecânica

Toda a impressora é montada em cima de estruturas de suporte, que no nosso caso são feitas de acrílico. Escolhemos esse material pelo seu pequeno coeficiente de dilatação térmica e grande resistência ao peso. Como esse modelo de impressora exige que os três eixos cartesianos de movimentação, da mesa e do bico (x, y e z), estejam sempre perpendiculares entre si, é



(a) Eixos evidenciados. Em destaque, peça de encaixe da barra roscada.



(b) Em vermelho, os acoplamentos flexíveis e em amarelo, altura das peças de encaixe do eixo x.

Figura 3.2: Fotografia da impressora, apenas com parte mecânica montada.

extremamente importante que as estruturas de suporte dos eixos não se movam ou se deformem. Toda a furação necessária para o posterior encaixe das peças foi cortada por laser da estrutura de acrílico. Embora o plano original fosse de que os parafusos fossem não-passantes - isto é, fossem fixados na própria estrutura sem atravessá-la - percebemos que parafusos passantes eram mais adequados para diminuir o risco de trincamento do acrílico. A figura 3.2a é uma fotografia da nossa impressora, em processo de construção, com toda a parte mecânica instalada e os eixos de movimento evidenciados, assim como uma das peças de encaixe das barras roscadas.

Os eixos são feitos de aço cromado - ou seja, aço com camada superficial de cromo metálico - para aumentar sua resistência à ferrugem. Precisamos evitar a ferrugem não só para diminuir o desgaste do eixo e assim aumentar seu tempo de vida, mas principalmente para que os eixos não percam precisão. Se a passagem dos eixos pelos rolamentos não for suave e finamente controlada, então haverá solavancos durante a impressão e as peças impressas podem ficar



Figura 3.3: *Extrusora e parafuso trator.*

deformadas. Por essa mesma razão, é necessário engraxar constantemente todos os eixos, o que fazemos com graxa a base de lítio - resistente às altas temperaturas, que ocorrem devido ao atrito constante. A qualidade dos rolamentos também é essencial para garantir um deslizamento suave dos eixos. Nessa impressora utilizamos rolamentos modelo LM8UU.

A extrusora (Figura 3.3a) é a peça que controla o fornecimento de material para ser derretido no bico quente durante a confecção da peça impressa. Seu principal componente é o parafuso trator (Figura 3.3b), o responsável direto pelo fluxo de material. Suas ranhuras laterais forçam a passagem do material diretamente no bico quente (Figura 3.3c), por isso é importante que elas sejam bem definidas e igualmente espaçadas, do contrário haverá distribuição heterogênea de material na peça, o que a tornaria deformada. Nosso parafuso foi construído na Oficina Mecânica do Instituto de Física *Gleb Wataghin*.

Também é importante notar que nas peças por onde as barras roscadas passam há roscas feitas de latão (Figura 3.2a). Conforme essas peças se movem para cima ou para baixo, deslocando a extrusora no eixo z, o latão da rosca vai sendo consumido e depositado nas barras roscadas, servindo como lubrificante. Por esse motivo, essa configuração denomina-se autolubrificante. Isso só é possível porque o aço cromado é mais duro que o latão, debastando-o com o atrito.

Começamos montando cada eixo separadamente, encaixando nas estruturas de suporte de acrílico as peças e parafusos adequados, de acordo com as instruções em [8]. As peças utilizadas nessa impressora foram produzidas por outra impressora, em plástico ABS, pois comprar as peças em outro material seria um custo desnecessário, uma vez que o ABS é bastante resistente, em especial à temperatura, e além disso as peças possuíam alta resolução. Adicionalmente, nessa montagem, nenhum componente impresso é exposto a grandes forças de tração, sendo seu principal desafio resistir a altas temperaturas, especialmente para aqueles em contato com os motores de passo.

Montamos a estrutura de suporte da mesa quente e o eixo y e para garantir que o deslizamento dos eixos nos rolamentos era suave, antes de instalar os rolamentos nas peças, os limpamos cuidadosamente em uma solução de água e detergente em um banho ultrassônico, eliminando resíduos de graxa seca nos rolamentos, o que é comum devido ao seu processo de fabricação. Em seguida, lubrificamos a parte interna dos rolamentos com graxa azul e então os posicionamos nas peças adequadas.

Ao encaixar os dois eixos em suas peças correspondentes, tomamos o cuidado de verificar que eles estavam paralelos um ao outro. Isso é importante não só pelo alinhamento da peça a ser impressa, mas também para não tracionar as peças onde os eixos estão presos e para não forçar desnecessariamente o motor de passo.

Especial atenção foi dada ao posicionamento da correia dentada pois ela, juntamente com um dos motores de passo, movimenta a mesa quente no eixo y (para frente e para trás). É, portanto, essencial que a correia não esteja folgada - tal que o motor gire em falso, “perdendo” passos, o que diminui a precisão do movimento - ou muito apertada - o que poderia danificar o motor ao exigir um torque maior do que ele pode fornecer. Esse sistema permite deslocamentos de 0,01 mm ( $10 \mu m$ ). Na seção 3.2.2 trataremos em mais detalhe sobre o funcionamento do motor de passo e sua resolução máxima fornecida.

Em seguida, passamos à montagem do eixo z, que move o bico quente para cima e para baixo, ao girar duas barras roscadas que funcionam como fuso. Elas foram acopladas nos motores de

passo com auxílio de acoplamentos flexíveis (Figura 3.2b) que permitem que, dentro de certo limite, mesmo que o alinhamento entre a barra e o motor não seja perfeito, o motor de passo não seja forçado durante o movimento e a barra se mova conforme esperado. A resolução no eixo z é de aproximadamente 0,0004 mm por passo do motor quando o mesmo é usado no modo de micropasso. Entretanto, como no caso dos eixos x e y, o bico quente determina a resolução das espessuras das camadas com  $4/5$  do diâmetro do bico (aproximadamente 0,32 mm).

Antes de montar o eixo x e acoplá-lo no eixo z, procuramos agrupar as estruturas de acrílico e alinhá-las corretamente, conforme a montagem. Para isso, utilizamos um esquadro robusto - portanto mais confiável - e garantimos que todas as intersecções das peças de acrílico estavam perpendiculares umas às outras. Isso é extremamente importante para assegurar que a impressora realmente reproduza um sistema de eixos cartesianos. Posteriormente, todas as estruturas de acrílico foram aparafusadas umas às outras e pudemos finalmente acoplar o eixo x ao z, completando a montagem da parte da mecânica.

Note que ao realizar este último acoplamento é importante verificar que as peças onde o eixo x se encaixará estejam exatamente à mesma altura (Figura 3.2b), para que o movimento da extrusora durante a confecção da peça seja exatamente paralelo à mesa de impressão. Outro detalhe essencial é o posicionamento da extrusora. Ela deve se posicionar de tal forma que não limite o movimento do bico quente no eixo x, para que o bico quente tenha acesso ao máximo de área da mesa de impressão e, portanto, a largura e comprimento das peças impressas sejam limitados apenas pelo tamanho da mesa. Todos esses detalhes observados, temos a montagem mecânica final da impressora.

### 3.2.2 Eletrônica

Descrevemos agora as especificações das componentes eletrônicas da impressora, assim como os pontos principais da firmware do seu controle integrado.

Os motores de passo são dispositivos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos gerando variações angulares discretas, os passos [16]. Eles são compostos internamente por solenóides alinhados dois a dois que, quando energizados, atraem o eixo do motor fazendo-o

se alinhar com a direção dos solenóides, produzindo a movimentação de um passo [16]. Através desse mecanismo é possível produzir um passo inteiro ou passos fracionários, de acordo com o controle fino da energização do solenóide e, portanto, do alinhamento do eixo do motor (Figura 3.4.)

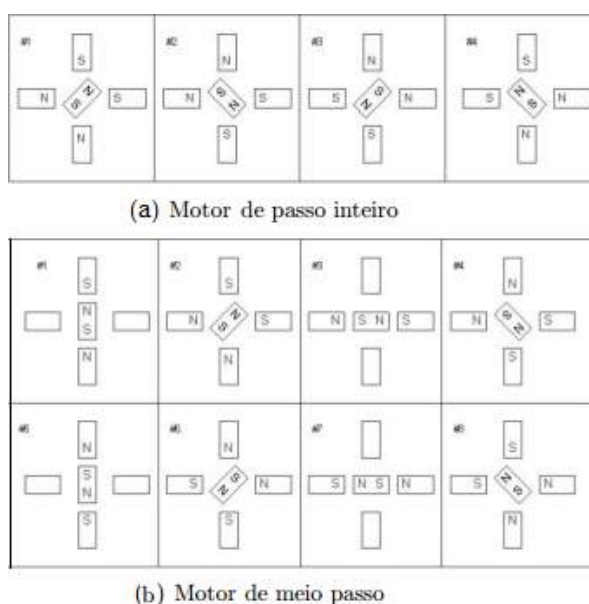


Figura 3.4: Em a) um esquema do funcionamento de um motor de passo. Em b) um esquema do funcionamento de um motor de micropasso. De [16].

O motor de passo utilizado foi NEMA modelo 17HS8401, que em um passo produz deslocamento angular de  $1,8^\circ$ . Utilizando o controle de micropasso temos que uma volta completa no eixo ( $360^\circ$ ) corresponde a 2560 micropassos. Escolhemos utilizar o controle de micropasso apenas para suavizar o movimento, então vamos calcular a precisão do movimento dos eixos nos baseamos no deslocamento dos passos.

Essa escolha foi feita levando em consideração que a precisão do movimento dos eixos não é determinada apenas pela precisão do motor, mas também pela precisão dos sistemas onde ele está acoplado. Para a montagem da impressora utilizada, dois motores de passo estão acoplados

em barras roscadas de passo 1,25mm - isto é, de distância entre os filetes 1,25 mm. Dois motores estão acoplados em uma correia de passo 1,15mm e um motor acoplado em uma roldana da extrusora, com 20 dentes (Figura 3.3a). Como o erro propiciado pelas barras roscadas, correias e roldana é maior do que o erro do deslocamento de um micropasso, justificamos nossa escolha.

Para calcular a resolução do deslocamento do eixo z, com barras roscadas de passo 1,25 mm, temos que uma volta completa corresponde a um deslocamento de 1,25 mm. Sabendo que uma volta também corresponde a 200 passos para o motor, então temos que um passo corresponde a um deslocamento linear de 0,01 mm. Para a confecção de microcanais, escolhemos sempre trabalhar com alturas múltiplas de 0,01 mm, para garantir a melhor resolução possível, pois caso contrário forçaríamos as barras roscadas a trabalhar em passo fracionário e poderíamos não ter total controle sobre a altura da peça impressa.

Para a precisão dos eixos x e y, o cálculo é análogo, apenas considerando o passo da roldana e correia, respectivamente. Assim, sabendo o número de dentes da roldana acoplada ao motor de passo, temos que

$$res_{eixo y} = \frac{passo_{correia} \times dentes_{roldana}}{200passos_{motor}} \quad (3.1)$$

$$res_{eixo x} = \frac{dentes_{extrusora} \times dentes_{roldana}}{200passos_{motor}} \quad (3.2)$$

Substituindo os valores, obtemos que  $res_{eixo y} = 0,0125$  e  $res_{eixo x} = 0,0125$ . Comparando com o valor já calculado de  $res_{eixo z} = 0,0005$ , podemos notar que a resolução do eixo z é maior. Isso advém do uso das barras roscadas, que em geral são mais precisas que as correias, embora menos rápidas que estas [17]. Conforme já mencionado, para a impressão de microcanais, escolhemos larguras múltiplas de  $res_{eixo x}$  e comprimentos múltiplos de  $res_{eixo y}$ , para maior precisão nas peças confeccionadas.

As peças são impressas na superfície da mesa quente, que precisa ter uma temperatura diferente da ambiente para que as peças fiquem melhor fixadas durante a impressão. Para alguns

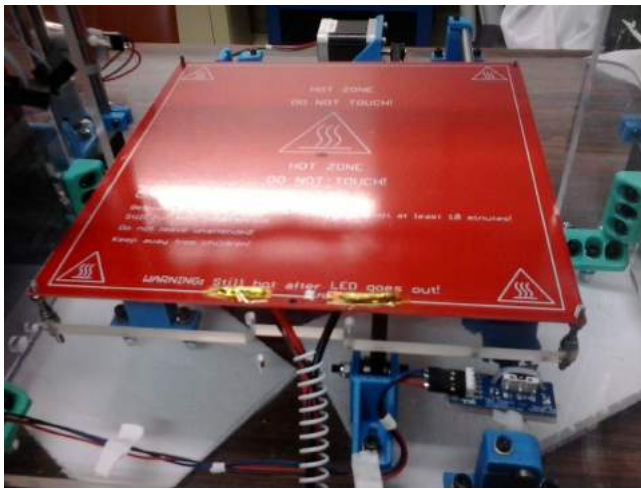
materiais, como ABS, ainda é necessário realizar um tratamento térmico. A mesa utilizada na nossa impressora é modelo PCB MK2A, com camada superficial de  $35\mu\text{m}$  de cobre, para garantir um aquecimento homogêneo. Suas dimensões são  $(214 \times 214 \times 1.6)$  mm, o que indica a largura e o comprimento máximo que uma peça única pode ter.

No seu centro há um furo para passagem de um termistor, responsável por medir a temperatura alcançada pela mesa. Na nossa impressora, cobrimos a mesa quente com um espelho de mesmas dimensões. Além de garantir que a superfície onde as peças serão impressas está plana, podemos realizar qualquer tratamento térmico necessário sem correr o risco de que a mesa perca potência ou se danifique. Também tomamos o cuidado de isolá-la termicamente do ambiente posicionando folhas de alumínio embaixo, exigindo, portanto, menos energia para conservar o calor da mesa.

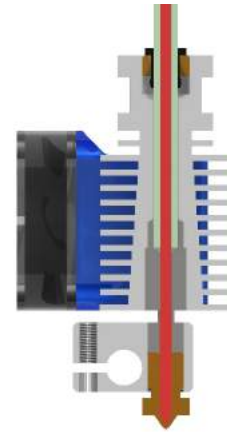
Finalmente, ao instalar a mesa colocamo-na a uma certa distância do suporte de acrílico, com ajuda de quatro parafusos sem cabeça (Figura 3.5a). Dessa forma podemos regular a altura da mesa em cada um dos seus vértices independentemente, caso ela não esteja exatamente paralela à superfície de acrílico. Esse procedimento é necessário para garantir o nivelamento da mesa e, portanto, fixação completa da peça levando à sua impressão alinhada.

O bico quente instalado é o responsável pelo derretimento da matéria prima das peças impressas. Nosso modelo é E3D-v6 1.75 mm, que trabalha com filamentos de 1.75 mm de diâmetro. Por ser totalmente metálico, ele consegue chegar a temperaturas de  $300^\circ\text{C}$  e seu design (Figura 3.5b) permite impressão com filamentos flexíveis além de um controle de temperatura bastante fino devido ao posicionamento diferenciado do termistor - em contato direto com o aquecedor do bico. Ele também permite a troca fácil de filamentos para extrusão.

O diâmetro de sua abertura é de 0,4 mm, o que determina a espessura mínima de cada filamento que compõe a peça impressa. Essa abertura poderia ser menor mas optamos por esse valor para testes iniciais, sendo fácil substituir o bico atual. Para garantir a precisão da confecção das peças, imprimimos sempre com espessura mínima de 0,5mm, evitando possíveis falhas de extrusão do filamento.



(a) Fotografia da mesa quente instalada na impressora.



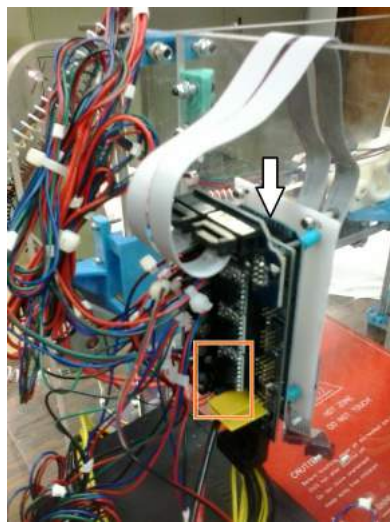
(b) Seção transversal do bico quente. De [18].

Figura 3.5: Mesa e bico quentes.

Utilizamos ainda 3 dispositivos fim de curso (Mech v1.2) que têm o papel extremamente importante de indicar para o controlador onde começa cada eixo. Dessa forma, sabendo o comprimento total dos eixos, ele calcula automaticamente a quantidade de passos que cada motor deve dar em cada movimento para a confecção da peça. O posicionamento do dispositivo do eixo z é extremamente importante, pois ele determina a altura da primeira camada de impressão e, portanto, deve estar exatamente à mesma altura da mesa quente para que a impressão fique bem fixada. Utilizamos também uma fonte de tensão Thermaltake modelo TR2 450W/500W, que alimenta todo o circuito elétrico da impressora.

Finalmente, utilizamos um controlador Arduino (RAMPS 1.4) que controla todos os motores de passo e, portanto, todas as movimentações da mesa e do bico quente, além da extrusão de matéria prima. Além disso, ele controla e mede as temperaturas da mesa e do bico assim como ativa todos os fins de curso e ventiladores da impressora.

Controladores Arduino são muito utilizados atualmente pela sua versatilidade, baixo custo e relativa facilidade de operação. Combinados a motores de passo, eles permitem movimentações



(a) Em laranja, destaque de um driver de motor e na seta, ‘shield’.



(b) Montagem final da impressora, com destaque para tela LCD.

Figura 3.6: Controlador RAMPS 1.4 e dispositivos adicionados.

muito precisas, o que justifica seu uso na maioria das impressoras 3D RepRap. RAMPS é a abreviação de “*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*”, especialmente desenhado para gerenciar toda a eletrônica necessária para uma RepRap e ainda permitir placas de expansão, para adicionar dispositivos extras. Na nossa montagem, adquirimos (+)drivers para motor de passo, um “shield” e um controlador de LCD (Figura 3.6a).

Os drivers para motor de passo permitem que a potência da fonte de tensão seja direcionada para os motores de passo e para o Arduino separadamente. Isso é necessário porque o Arduino não consegue alimentar diretamente os motores, portanto, é importante configurarmos para cada driver - que alimenta cada motor de passo - a corrente e tensão elétrica máximas fornecidas ao motor [19]. Essa configuração fina, além de garantir o funcionamento apropriado dos motores, ainda produz uma movimentação mais suave. O ‘shield’ é uma proteção para o chip do controlador e posiciona-se de forma que este esteja protegido ao máximo do contato com o ambiente.

Finalmente, o controlador de LCD é uma facilidade para utilização da impressora independente do computador. Com um leitor de cartão de memória, um display de LCD e uma placa adaptadora para Arduino, consegue-se controlar o movimento dos eixos, realizar calibrações e imprimir peças cujo arquivo digital esteja gravado no cartão sem auxílio do computador. Providenciamos ainda dois ventiladores para serem instalados em cima do controlador. Isso é essencial porque devido à alta potência dissipada os drivers do motor de passo esquentam bastante, e esse aumento de temperatura pode queimá-los (Figura 3.6b).

A firmware do controle é feita em código aberto e totalmente configurável. Seus parâmetros devem ser ajustados para cada impressora em específico, pois o controlador necessita saber as dimensões exatas de todos os componentes da impressora assim como suas limitações - temperaturas máximas alcançadas, área efetiva para impressão, etc - para realizar os cálculos corretos e fornecer as instruções adequadas para confecção das peças. Há ainda uma série de comandos de segurança que podem ser acionados em casos-limites, como, por exemplo, tempo máximo que os componentes podem ficar submetidos à temperatura máxima alcançada.

Por último, para calibrar a impressora - isto é, definir as posições iniciais dos seus eixos - utilizamos o software *open source* Printron. A partir de sua interface, podemos controlar a movimentação de cada eixo individualmente assim como da extrusora e determinar temperaturas para mesa e bico. Posteriormente, posicionamos os fins de curso nas posições adequadas e, em particular para o eixo z, testamos se na posição inicial o bico quente estava próximo o suficiente da mesa para prender uma folha de papel. Isso garante que o erro no posicionamento desse fim de curso é menor que 0,1 mm, a espessura da folha. Também checamos se a mesa quente estava nivelada, repetindo o teste do papel nas suas quatro extremidades. Caso contrário, poderíamos nivelá-la ajustando a altura dos parafusos sem cabeça que a prendem.



# Impressão de microcanais

---

Neste capítulo vamos descrever em detalhes o procedimento para impressão de peças 3D a partir de um modelo digital e caracterizaremos os microcanais impressos. Também descreveremos as técnicas testadas de selagem e sua eficácia.

## 4.1 Impressão 3D

Antes de imprimir qualquer objeto 3D, é necessário ter seu modelo digital. Os desenhos 3D podem ser feitos em qualquer programa tipo CAD, e exportados no formato STL. No nosso projeto, utilizamos com frequência o programa *open source* OpenScad, pela facilidade em alterar as dimensões de um dado objeto e criar um novo desenho, uma vez que os modelos são parametrizados.

O formato STL descreve apenas a superfície de um objeto tridimensional, representada pelos vértices e vetores normais unitários de triângulos, segundo um sistema cartesiano tridimensional (Figura 4.1). Em geral, quanto mais triângulos em uma determinada área, melhor a resolução da peça a ser impressa. Todavia, dependendo do programa onde o desenho foi feito e de sua complexidade é possível que alguns triângulos se superponham ou não cubram certa área do desenho, o que gera falhas. Essas falhas podem ser corrigidas nos fatiadores.

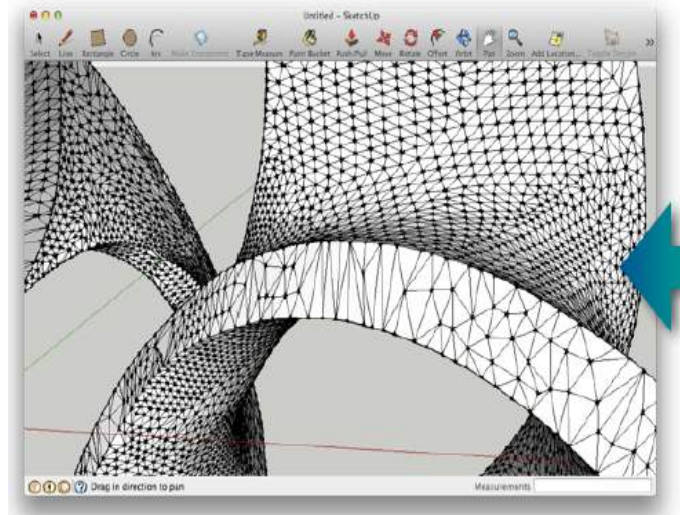


Figura 4.1: Exemplo de objeto em formato STL. De [11].

Os fatiadores são programas que dividem a peça em trechos bidimensionais ( $x$  e  $y$ ) que serão impressas individualmente, em cada altura  $z$ . Eles geram um arquivo em *gcode*, que é a linguagem de controle numérico usado em fresas mecânicas (CNC's), e que controlam a movimentação cartesiana da impressora e a extrusão do filamento durante a fabricação da peça. Esse processo é bastante complexo, pois depende de configurações da impressora e do filamento - como o tamanho da mesa quente (que determinará a área de impressão), a temperatura da mesa e do bico, o diâmetro do filamento, etc - e de características da peça a ser impressa - como porcentagem do preenchimento interno, velocidade de impressão, largura das paredes, etc.

Utilizamos em todo esse projeto o fatiador “Slic3r”, que possui o maior número de parâmetros livres a serem escolhidos, logo, nos garantindo maior liberdade possível para a configuração da impressão dos microcanais. Esse fatiador também é bastante eficaz ao corrigir possíveis falhas do desenho. A melhor escolha dos parâmetros está descrita em detalhe para cada desenho no Apêndice A.

Após o arquivo *gcode* ter sido gerado, é sempre bom conferir se não sobrou alguma falha

óbvia no desenho. Para isso, utilizamos o programa *open source* “Repetier-Host<sup>®</sup>” versão 1.0.3 que, dentre outros recursos, possibilita a visualização do arquivo *gcode* e, portanto, das instruções encaminhadas para a impressora. Caso haja alguma falha, precisamos corrigi-la, seja no arquivo STL ou nos parâmetros do fatiador. Caso contrário, a peça já pode ser impressa.

### 4.1.1 Em ABS

ABS é a sigla para o copolímero acrilonitrila butadieno estireno, de fórmula química  $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$ , bastante utilizado hoje em dia como matéria prima de inúmeros produtos na indústria por ser um material rígido e leve, além de relativamente resistente a impacto, tração e temperaturas em torno de 60 °C.

Os primeiros microcanais produzidos foram impressos com o polímero ABS natural. Acreditamos que a pigmentação do filamento pode alterar a qualidade da peça impressa, uma vez que não há controle fino por parte do fabricante do filamento em relação à homogeneidade de sua distribuição. Por essa razão, preferimos trabalhar com filamentos despigmentados.

O plástico ABS não é o mais indicado para impressão 3D de microcanais, pois mesmo despigmentado não é transparente o suficiente para medidas com espectroscopia Raman. Mesmo assim, fizemos os primeiros testes nesse material pelo fato de já possuímos experiência anterior utilizando-o, além de toda parametrização necessária para os primeiros ensaios.

Já possuíamos também uma impressora 3D semelhante à descrita no Capítulo 3, de fabricação caseira e com bico quente não-comercial construído pelo Prof. Varlei Rodrigues, com diâmetro de 0,3 mm e feito em polyether ether ketone (PEEK) e latão, que alcança temperaturas de até 250 °C. Com essa impressora, realizamos testes iniciais e constatamos a viabilidade do projeto, ao imprimir um bloco com alguns microcanais.

Podemos notar na Figura 4.2 que os microcanais com larguras diversas, profundidade de 0,4 mm e comprimento de 200 mm foram impressos com sucesso, após seus parâmetros de impressão terem sido devidamente configurados. Embora esses parâmetros sejam semelhantes para o mesmo modelo de impressora, dado um desenho, é necessário refiná-los para cada dispositivo específico. Com esse objetivo, imprimimos vários microcanais com desenho semelhante,

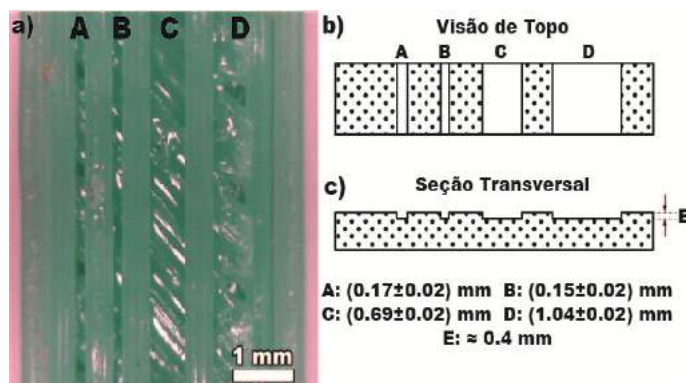


Figura 4.2: Testes iniciais de impressão de microcanais. Em a) fotografia de microcanais com larguras diversas, em b) visão de topo e em c) seção transversal, com medidas das larguras respectivas.

mudando a cada vez a temperatura de extrusão ou porcentagem de material derretido.

Na Figura 4.3 temos fotografias tiradas com auxílio do microscópio digital Dino-Lite AM2011 que auxiliam na determinação visual da qualidade da superfície dos microcanais. A partir daí, obtemos a otimização dos parâmetros ótimos para a impressão em ABS como temperatura do bico quente de  $205^{\circ}\text{C}$  e porcentagem de material derretido, 94%.

Se a temperatura fosse maior, o material derretido demoraria mais tempo para endurecer após entrar em contato com a mesa quente, conseqüentemente, quando a próxima camada de material a cobrisse, ela não estaria sólida o suficiente para suportá-lo, e se deformaria, como visível na Figura 4.3 a, nas paredes dos canais menores. Se a temperatura fosse menor, o material não derreteria de forma homogênea, o que também deformaria a peça. Note que esses mesmos problemas podem ocorrer para peças maiores, porém nesses casos, como a impressora demora mais tempo para depositar a camada seguinte de material, esses efeitos não ocorrem ou são bastante reduzidos.

A porcentagem de material derretido influencia a impressão da peça de forma semelhante. Cabe ainda ressaltar que para melhor fixação da peça na mesa quente, deixamos a temperatura

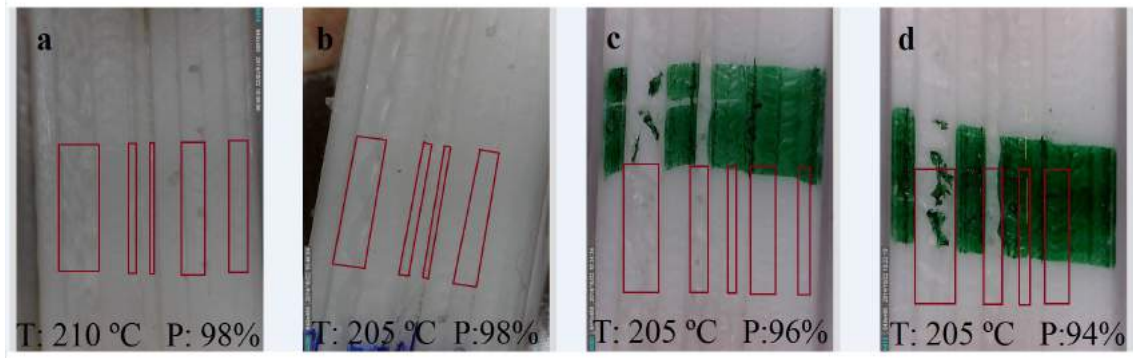


Figura 4.3: Fotografias de alguns microcanais com parâmetros de impressão variados. Destaque em vermelho para sua localização e em verde para demarcação de suas paredes. Em a) temperatura de 210 °C e porcentagem de material derretido, 98%. Em b) temperatura de 205 °C e porcentagem, 98%. Em c) temperatura de 205 °C e porcentagem, 96% e em d), temperatura de 205 °C e porcentagem, 94%.

da mesa em 110 °C durante a impressão e a temperatura do bico em 215 °C, apenas para a primeira camada. Em particular para o ABS, que tem um coeficiente de dilatação térmica relativamente alto dentre os filamentos utilizados, é necessário deixar a mesa aquecida também para que o gradiente de temperatura - material saindo do bico quente e sendo depositado na mesa - não seja suficiente para deformar a peça impressa. Esse efeito, conhecido como efeito *warp*, pode ocorrer até entre as camadas que compõem a peça e é mais comum para objetos maiores.

Em seguida, testamos a orientação do padrão de preenchimento (vertical ou horizontal). Conforme descrito no Apêndice A.3, o padrão de preenchimento era retilíneo, formando malha retangular, e poderia ser orientado ao longo do canal ou perpendicular a este (Figura 4.4). Testamos ambas as configurações para descobrir se esse fator afetaria o escoamento dos microfluidos e caso positivo, qual o privilegiaria.

No entanto, ao observar a superfície do microcanal com auxílio do microscópio digital, nota-

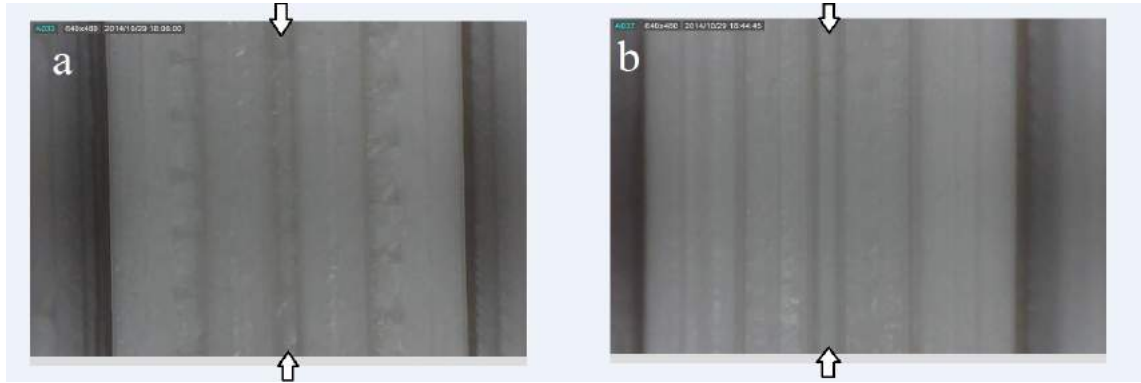


Figura 4.4: *Fotografias de microcanais com diferentes orientações de preenchimento. Em a) preenchimento orientado horizontalmente e em b) orientado verticalmente. As setas destacam a localização do microcanal.*

mos que a orientação do padrão de preenchimento não altera significativamente sua superfície. Portanto, imprimimos todos os canais subsequentes com preenchimento orientado perpendicularmente ao microcanal, na horizontal.

O último teste realizado, antes de trocarmos de material, determinou o melhor desenho de microcanal para otimizar sua selagem. Testamos duas configurações possíveis (Figura 4.5), uma base com um microcanal e uma base com três microcanais, lado a lado. Sabendo que a selagem do microcanal consiste em, de alguma forma, colar em cima deste algo que sirva como tampa para limitar o fluxo de fluido, testamos nesses diferentes modelos se a disposição da cola na estrutura interferiria no escoamento dos fluidos dentro do microcanal.

Para o desenho com três microcanais, utilizamos apenas o microcanal do meio para a passagem de fluidos e colocamos cola dentro dos outros dois. Utilizamos para isso as colas “Loctite<sup>®</sup> Power Flex Gel Control” e “Loctite<sup>®</sup> Original”, além de filme para transparência para selar. Escolhemos esse filme justamente pela sua transparência, o que permitiria que mesmo o canal sendo feito em ABS transparente, ainda conseguiríamos ver seu interior e, portanto, medir a formação do microfilme com espectroscopia Raman. As colas foram escolhidas pelo seu conhecido

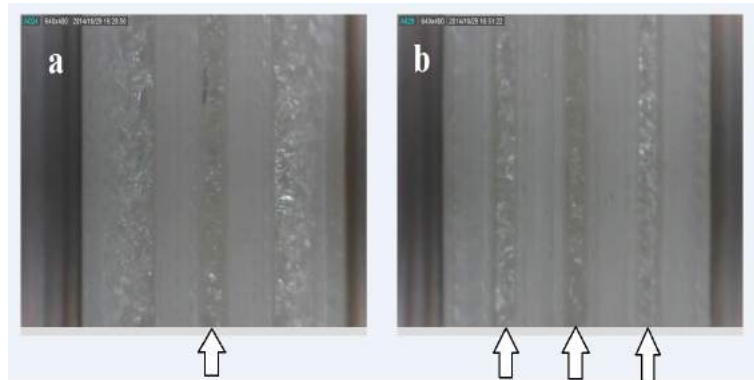


Figura 4.5: *Fotografias de diferentes desenhos de microcanais. Em a) base com único microcanal e em b) base com três microcanais. As setas destacam a localização do microcanal.*

poder de aderência em materiais plásticos e flexíveis.

Após algumas tentativas de aplicação de ambas as colas, notamos que a aderência do filme transparente não estava adequada. Acreditamos que inserir cola dentro de um microcanal não foi eficaz para a selagem pois a área de contato do filme com a cola era reduzida em relação a maior parte de seu volume, que não estava em contato com o filme transparente. Por essa razão, abandonamos esse modelo de microcanal. Também observamos que a cola não aderiu muito bem ao microcanal em ABS, mesmo assim testamos em PLA, pois diferentes materiais apresentam diferentes respostas.

#### 4.1.2 Em PLA

Antes de imprimirmos em PLA, testamos Nylon. Ambos os materiais têm características parecidas, como transparência e flexibilidade, que são pré-requisitos para impressão de microcanais a serem utilizados em alguns dispositivos microfluídicos, como as “línguas eletrônicas”. Todavia, tivemos dificuldade em encontrar os parâmetros de impressão adequados para o Nylon, pois por ser um material pouco utilizado em impressão 3D, havia poucas referências digitais a esse respeito. As peças de calibração impressas obtiveram um padrão de qualidade abaixo

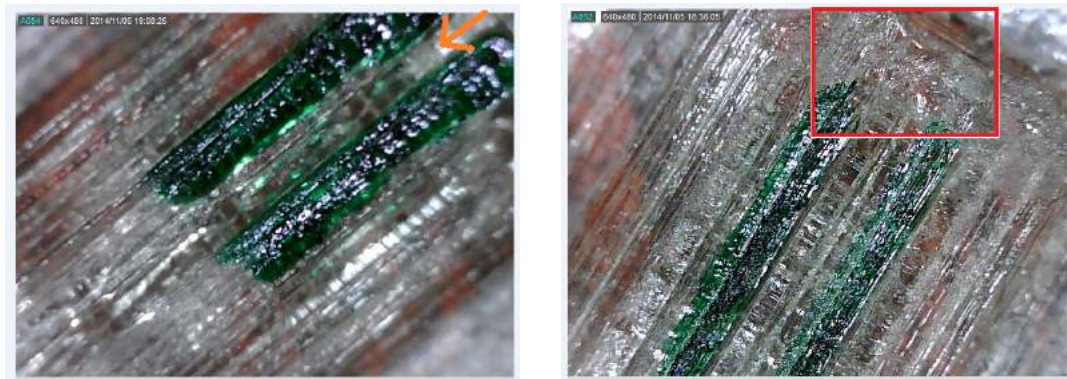
do necessário para fabricação de microcanais e, por esse motivo, escolhemos testar o PLA, que tem histórico de sucesso em impressão 3D.

PLA é uma sigla para ácido poliláctico, um poliéster de fórmula química  $(C_3H_4O_2)_n$ , que é derivado de recursos naturais e biodegradável. Ele é mais flexível e transparente que o ABS e apresenta baixa resistência a temperatura e tração, sendo por isto pouco utilizado como matéria prima para peças de impressora, embora seja de mais fácil impressão.

Para imprimir em PLA, novamente, foi necessário otimizar os parâmetros de impressão. Dessa forma, após algumas tentativas, obtivemos os parâmetros descritos em detalhe no Apêndice A.2.2, com destaque para o novo conjunto de temperaturas: mesa quente, 60 °C na primeira camada e temperatura ambiente nas seguintes; bico quente 215 °C na primeira camada e 205 °C nas seguintes. Como o PLA é um material com baixo coeficiente de dilatação térmica, observamos que mesmo após submetido a um gradiente de temperatura durante a impressão quase não há deformação, evitando a necessidade de aquecer muito a mesa para fixação da peça.

Preferimos realizar os testes iniciais de fluxo dentro do microcanal em PLA - ao invés do em ABS - devido à sua alta transparência. Conseqüentemente, até fluidos pouco pigmentados permitem boa visualização do escoamento. Os microcanais impressos com sucesso (Figura 4.6a) possuíam 500 $\mu$ m de largura e 1 cm de comprimento, com paredes de 400 $\mu$ m de altura, assim como os em ABS. Notamos ainda que uma das extremidades do microcanal (Figura 4.6b) sempre apresentava defeitos de construção, pois devido à trajetória do bico quente na confecção da peça sempre ocorria fechamento do microcanal devido ao acúmulo de plástico derretido no final da impressão, o que inutilizava aquela região para escoamento de fluidos. Isso acontecia também com os microcanais em ABS.

Antes de inserir os fluidos nos microcanais, testamos sua selagem. Testamos quatro técnicas: aplicação da cola diretamente em cima das paredes dos microcanais - para garantir maior fixação do filme na região de interesse - aplicação na base do microcanal, dos lados das paredes - para garantir maior área de contato entre a cola e o filme - utilização de uma fita adesiva dupla-face em cima das paredes dos microcanais e utilização da fita adesiva na base do microcanal



(a) Paredes do microcanal destacadas em verde e seu interior indicado pela seta. (b) Paredes do microcanal em verde e em destaque, uma de suas extremidades.

Figura 4.6: Fotografias de microcanais em PLA.

(Figura 4.7). Testamos todas as configurações com as duas colas disponíveis já descritas e as fitas adesivas “Dupla-Face Fix Scotch<sup>®</sup>”.

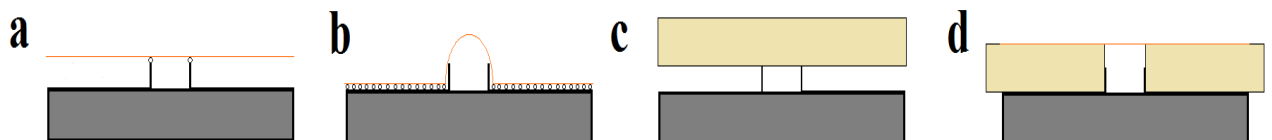


Figura 4.7: Representações esquemáticas da seção transversal do microcanal, com técnicas de selagem. Respectivamente, primeira, segunda, terceira e quarta. Em laranja, o filme; em creme, a fita adesiva e esferas representando a cola.

Utilizando a primeira técnica, conseguimos boa fixação do filme, porém frequentemente a cola ainda molhada caía no microcanal com a pressão do posicionamento do filme, e conseqüentemente quando seca o entupia. Assim, além de não conseguirmos qualquer escoamento dos fluidos ainda perdíamos a visibilidade do canal pois a cola seca tende a se tornar branca. Uma possibilidade de correção desse problema seria a utilização de cola de contato, que não forma

gotas e, portanto, tende a não se espalhar.

Mencionaremos a segunda técnica de selagem em breve. Ao utilizar a terceira técnica de selagem, notamos que não havia vazamentos nos testes iniciais de escoamento. Esses testes consistiram em inserir manualmente tinta de caneta azul no microcanal através de seringa e agulha de diâmetro 0,4mm. Esse resultado foi promissor, pois o não aparecimento de vazamentos ao longo do microcanal indica ausência de poros, aberturas ou defeitos significativos. Portanto, comprovamos que impressão 3D é uma técnica adequada para a produção de microcanais utilizáveis. Não persistimos utilizando essa técnica de selagem, pois percebemos que o contato direto da cola presente no adesivo com os fluidos dentro do microcanal poderia alterar seu fluxo e, conseqüentemente, causar contaminações e resultados não confiáveis.

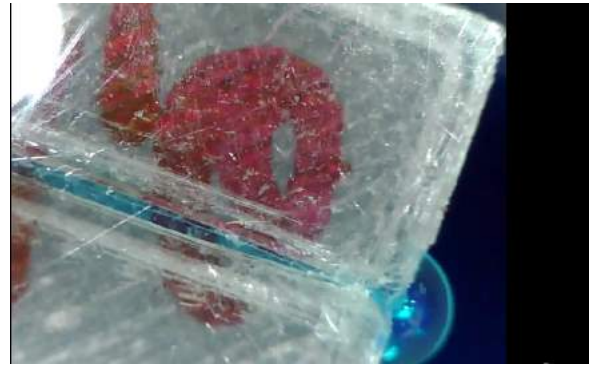
Para utilizar a quarta técnica, cortamos os adesivos de  $(17,2 \times 17,2)$  mm de forma que sua largura resultante coubesse aproximadamente dos dois lados na base do microcanal. Todavia, nada podíamos fazer para aumentar o comprimento da fita adesiva de forma que ela cobrisse todo o canal, então tentamos posicionar outro desses o mais próximo possível. Nos testes iniciais de escoamento observamos que havia vazamentos nas áreas de junção da fita adesiva.

Tentamos ainda utilizar a terceira técnica de selagem, cortando os microcanais para que tivessem aproximadamente 20 cm de comprimento e pudéssemos utilizar apenas um adesivo de cada lado para selagem. Com auxílio de microbombas e tinta guache diluída (mais fácil de se identificar visualmente), inserimos fluidos dentro do microcanal cortado, selado com adesivo. Com o fluido escoando em velocidade constante e controlada, notamos que houve uma falha de selagem, pois o fluido ao invés de escoar ao longo do microcanal tendia a escoar acima deste, ultrapassando as paredes e parando apenas ao encontrar a barreira física do adesivo.

A partir desse resultado comprovamos a necessidade de que o filme ficasse diretamente em cima da parede do microcanal, limitando o movimento do fluido. Isso é necessário porque para velocidades baixas de escoamento, como a que estamos bombeando os fluidos, a interação entre as gotículas do líquido vence a força de bombeamento, e o fluido tende a agrupar-se ao invés de escoar pelo microcanal. Essa é outra razão pela qual não observamos esse vazamento durante



(a) Fotografia do microcanal com tinta guache vermelha diluída.



(b) Fotografia do microcanal selado com tinta de caneta azul.

Figura 4.8: Fotografias de microcanais durante teste de selagem.

o teste manual, pois a força de bombeamento aplicada foi bem maior e não controlada.

Para continuarmos insistindo nessa técnica de selagem precisaríamos cortar novamente o adesivo de forma que sua altura fosse aproximadamente a das paredes do microcanal. Pela dificuldade técnica desse procedimento, priorizamos o teste da segunda técnica de selagem.

Conforme esquematizado na Figura 4.7b, com essa técnica o filme não estará diretamente em cima das paredes do microcanal, mas estará fixo o suficiente para permitir selagem. Todavia inserindo o fluido com auxílio de microbombas obtivemos vazamento acima do microcanal, novamente indicando que o fluido ultrapassava suas paredes durante o escoamento e, portanto, a selagem não era perfeita (Figura 4.8a).

### Selagem durante impressão

Observando que a selagem dos microcanais à mão apresentava diversas fontes de erro e imprecisões - como a correta distribuição da cola no microcanal, o posicionamento adequado do filme transparente, etc - concluímos que seria mais eficaz tentar imprimir microcanais já selados. Imprimimos dois desenhos diferentes de microcanais e testamos sua qualidade. Os desenhos foram bastante simples, ambos consistindo do mesmo microcanal já descrito anteriormente, porém com uma camada de material apenas (de aproximadamente  $200\mu\text{m}$ ) no recobrimento.

Um deles, porém, possui entrada adaptada, em forma de círculo, para facilitar o posicionamento da agulha *a posteriori*.

Após a impressão, no entanto, notamos que os microcanais haviam sido soterrados pela camada que deveria apenas cobri-los. Já sabemos que a impressão de pontes - estruturas “flutuantes” com apenas dois pontos de apoio - é um desafio para impressoras 3D, posto que o material derretido muitas vezes curva-se antes de solidificar-se, o que o faz cair e deformar a impressão. Esse efeito é bastante reduzido para estruturas milimétricas, como as produzidas em microcanais.

Acreditamos que, em ambos os desenhos testados, as paredes dos microcanais estavam baixas demais para suportar a formação de pontes. Assim, mesmo que o material derretido tenha se curvado só um pouco com a deposição, isso já foi suficiente para entupir o microcanal. Cabe ainda dizer que na impressora utilizada nesse projeto não havia ventilação específica para a peça, de forma que não tínhamos como resfriar controladamente o material durante a confecção da peça tal que ele solidificasse mais rapidamente. Essa seria uma possível solução para o problema.

Como última tentativa, imprimimos o mesmo modelo de microcanal selado, com dimensões de  $500\mu m$  de largura,  $600\mu m$  de altura e  $200mm$  de comprimento. Ao testar a qualidade de sua selagem com microbombas não obtivemos vazamentos, o que configura uma selagem eficiente (Figura 4.8b).

Concluimos, portanto, que a impressão de microcanais selados é possível com o controle adequado de parâmetros durante a impressão e escolha de materiais. Mais testes serão necessários, no entanto, demos um passo importante para viabilizar um processo mais simples, barato e rápido em desenvolvimentos microfluídicos que as metodologias convencionais. Novamente, levando-se em conta o tempo para contornarmos os problemas de selagem, a etapa futura de desenvolvimento à fabricação é a caracterização por espectroscopia Raman de filmes automontados no interior dos microcanais impressos.

## Conclusões

---

Realizamos a montagem mecânica e eletrônica de uma impressora 3D visando à fabricação de microcanais por impressão. O objetivo é flexibilizarmos o processo atual que utiliza métodos fotolitográficos, reduzindo etapas nos processos de desenvolvimento, permitindo maior flexibilidade para ajustes de design e redução de custo e tempo para o desenvolvimento de dispositivos microfluídicos. A primeira barreira de potencial foi a própria montagem, mas a etapa mais difícil para execução do projeto foi a selagem dos microcanais. A construção de microcanais foi realizada inicialmente em ABS para aproveitarmos parâmetros que já estavam otimizados e treinarmos o processo de fabricação na recém-construída impressora. Posteriormente, migramos para o PLA, entretanto, a selagem dos microcanais impressos foi bastante difícil. Após várias tentativas e erros, foram verificadas maneiras distintas para viabilizar o processo de selagem, o que consumiu um tempo considerável e muito acima do planejado inicialmente. Entretanto, conseguimos uma configuração de microcanal selado durante a impressão, abrindo caminhos e perspectivas para desenvolvimentos futuros.



# Referências Bibliográficas

---

- [1] G. M. Whitesides. *Nature*, 442,368,2006.
- [2] J. C. Jokerst., J. M. Emory., C. S. Henry. *The Analyst*, 137, 24, 2012.
- [3] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi. Fundamentos da mecânica dos fluidos. São Paulo, SP, BR: Blucher, c2004. 571 p., il. ISBN 9788521203438.
- [4] C. Kleinstreuer. Microfluidics and Nanofluidics: Theory and Selected Applications. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, c2014. 436 p., il. ISBN 9781118749890.
- [5] A. J. de Mello. *Nature*, 442, 394, 2006.
- [6] A. I. Shallan et al. *Anal. Chem.* , 86, 3124, 2014.
- [7] <http://hydraraptor.blogspot.com.br/2011/12/mendel90.html>. Acesso em 22/11/2014.
- [8] <https://github.com/nophead/Mendel90>. Acesso em 22/11/2014.
- [9] [http://reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://reprap.org/wiki/Main_Page). Acesso em 22/11/2014.
- [10] C. A.R. Dantas. Fabricação de dispositivos para aplicação de conceitos de microfluídica a uma ‘língua eletrônica’. Tese de doutorado, POSMAT, UNESP, 2013.

- [11] E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro. *Low-Cost 3D printing for science, education and sustainable development*. ICTP, c2013. 202 p., il. ISBN 9295003489.
- [12] <http://reprap.org/wiki/RepRapoptions>. Acesso em 24/11/2014.
- [13] <http://reprap.org/wiki/File:Mendel.jpg>. Acesso em 24/11/2014.
- [14] <https://ravinagre.wordpress.com/2012/10/>. Acesso em 26/11/2014.
- [15] <http://reprappr.blogspot.com.br/2013/11/filamento-flexivo-parafuso-extrusor.html>. Acesso em 26/11/2014.
- [16] <http://www.telecom.ufr.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>  
Acesso em 01/12/2014.
- [17] <http://reprapbr-ge.blogspot.com.br/2011/10/correias-x-barras-roscadas.html>.  
Acesso em 01/12/2014.
- [18] <http://e3d-online.com/E3D-v6/v6-1.75mm-Universal>. Acesso em 02/12/2014.
- [19] [http://reprap.org/wiki/Stepper\\_motor\\_driver](http://reprap.org/wiki/Stepper_motor_driver). Acesso em 03/12/2014.
- [20] A. Riul Jr. et al. *Synthetic Metals.*, 132,109, 2003.
- [21] A. Riul Jr. et al. *Langmuir*, 18,239,2002.
- [22] C. M. Daikuzono. *Fabricação de Filmes Ultrafinos no Interior de Microcanais*. Dissertação de mestrado, PPGCM, UFSCar, 2013.
- [23] Y. Vlasov et al. *Pure and Applied Chemistry*, 77, 1965, 2005.
- [24] A. Riul Jr. et al. *The Analyst*, 135(10), 2481, 2010.
- [25] F. Hossein-Babaei., K. Nemat. *Microfluid Nanofluid*, 13,331,2012.

# Apêndices

---

# Parâmetros de impressão

---

No fatiador “Slic3r”, há três conjuntos de parâmetros: características da impressora, do filamento e da impressão. Descrevemos as alterações da configuração padrão apenas.

## A.1 Impressora

Tamanho da mesa: 180mm no eixo x e 180mm no eixo y

Centro da mesa: 90mm no eixo x e 90mm no eixo y

Z offset: -0.05mm

Extrusoras: 1

Diâmetro do bico: 0.4mm

Retração:

Comprimento: 2mm; Velocidade: 20 mm/s; Distância mínima depois da retração: 2mm

Retrair na mudança de camada: ativado

## A.2 Filamento

Permitir auto-refrigeração: ativado

Velocidade ventilador: mínima:0; máxima 30.

Desabilitar ventilador pelas primeiras: 5 camadas

Habilitar ventilador se impressão da camada está abaixo de: 60 segundos

Diminuir resfriamento se impressão da camada está abaixo de: 30 segundos

Velocidade mínima de impressão: 20 mm/s

### A.2.1 ABS

Diâmetro: 1.75 mm

Multiplicador extrusão: 0.94

Temperatura Extrusora: 1ª camada: 215 °C; seguintes: 205 °C.

Temperatura Mesa: 1ª camada: 110 °C; camadas seguintes: 110 °C.

### A.2.2 PLA

Diâmetro: 1.75 mm

Multiplicador extrusão: 1

Temperatura Extrusora: 1ª camada: 215 °C; seguintes: 205 °C.

Temperatura Mesa: 1ª camada: 60 °C; camadas seguintes: 0 °C.

2

## A.3 Impressão

Altura camada: 0.2 mm

Perímetros (mínimo): 2

Densidade de preenchimento: 20 %

Padrão de preenchimento: retilíneo

Velocidade de impressão: Perímetros: 15 mm/s ; Preenchimento: 15 mm/s

Velocidade de movimentos (fora da impressão): 80 mm/s