



FREDERICO DAVID ALENCAR DE SENA PEREIRA

Desenvolvimento de um Cabeçote para Extrusão de Filamento Fundido Aplicado a Manufatura Aditiva

52/2014

**CAMPINAS
2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FREDERICO DAVID ALENCAR DE SENA PEREIRA

Desenvolvimento de um Cabeçote para Extrusão de Filamento Fundido Aplicado a Manufatura Aditiva

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
FREDERICO DAVID ALENCAR DE SENA PEREIRA
E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOÃO MAURÍCIO ROSÁRIO


ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P414d Pereira, Frederico David Alencar de Sena, 1983-
Desenvolvimento de um cabeçote para extrusão de filamento fundido
aplicado a manufatura aditiva / Frederico David Alencar de Sena Pereira. –
Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: João Maurício Rosário.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Polímeros. 2. Prototipagem rápida. 3. Biomateriais. I. Rosário, João
Maurício, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development of a toolhead for fused filament extrusion applied to additive manufacturing

Palavras-chave em inglês:

Polymers

Rapid prototyping

Biomaterials

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

João Maurício Rosário [Orientador]

João Maurício Rosário

Marcos Akira D'Ávila

Zilda de Castro Silveira

Data de defesa: 09-06-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETOS MECÂNICOS

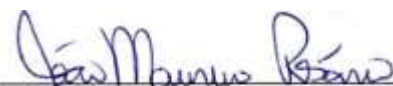
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Desenvolvimento de um Cabeçote para
Extrusão de Filamento Fundido aplicado a
Manufatura Aditiva**

Autor: Frederico David Alencar de Sena Pereira

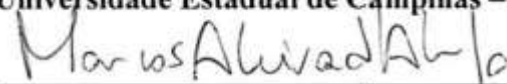
Orientador: **Prof. Dr. João Maurício Rosário**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. João Maurício Rosário

Universidade Estadual de Campinas – FEM / Unicamp



Prof. Dr. Marcos Akira D'Ávila

Universidade Estadual de Campinas – FEM / Unicamp



Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

Universidade de São Paulo – EESC / USP

Campinas, 9 de Junho de 2014.

Agradecimentos

Aos meus pais, Martha Cardoso Ladeia David Sena e Hegel Alencar de Sena Pereira pelo carinho e apoio.

Ao meu Orientador Dr. João Maurício Rosário pela confiança, paciência e orientação.

Ao Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva pela grande ajuda, paciência e amizade construída ao longo destes anos.

A meu amigo Paulo Inforçatti Neto pela amizade, confiança, companheirismo e ajuda neste grande projeto.

Ao Dr. Pedro Yoshito Noritomi pela amizade e apoio dado em varias etapas.

Aos amigos Mateus Stoshy, Arnaldo Lixandrão Filho e Ana Livia Senedese pela amizade e importante papel que tiveram neste trabalho.

Aos amigos e colegas da Divisão de Tecnologias Tridimensionais do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer: Daniel Takanori, Marcelo Fernandes de Oliveira, Airtton Moreira, Izaque Maia, Amanda Amorim, Solange Pereira e Rodrigo Alvarenga que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

*“Confira
tudo que
respira
conspira”*

Paulo Leminski

PEREIRA, F.D.A.S. Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão para Filamento Fundido Aplicado a Manufatura Aditiva. 2014. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Projetos Mecânicos. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2014.

Resumo

O processo mais difundido de Manufatura Aditiva baseia-se no princípio da deposição de termoplástico fundido e extrudado por um bico. Grande parte dos equipamentos comerciais de Manufatura Aditiva é de projeto fechado e isso dificulta sua aplicação em pesquisas, sobretudo na área de biofabricação, no entanto, outra linha de equipamentos vem surgindo com iniciativa de projetos de código aberto que permitem livremente a sua modificação para aplicações específicas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um cabeçote para Manufatura Aditiva baseado na extrusão de filamento fundido, que permite o uso de diversos polímeros termoplásticos na máquina de código aberto Fab@CTI. A metodologia do desenvolvimento constituiu de melhorias sucessivas de projetos. A concepção preliminar do cabeçote se deu por meio dos requisitos de usuário e de projeto e outras duas versões foram criadas como consequência das melhorias implementadas. Foi dado foco maior na região aquecida a fim de possibilitar o uso do maior número de polímeros possível. O cabeçote desenvolvido permite extrudar materiais termoplásticos com diferentes pontos de fusão e diferentes diâmetros de filamento (1,8 mm à 3,0 mm). Para pesquisa na fabricação de *scaffolds*, o cabeçote mostrou-se funcional para os polímeros policaprolactona, poli(ácido) láctico e polihidroxibutirato, os quais foram estruturados tridimensionalmente com poros a partir de 250 μm e camada mínima de 0,3 mm. A extrusão do acrilonitrila butadieno estireno se mostrou desafiadora e exige maiores investigações embora tenha-se impresso algumas geometrias. Conclui-se que o cabeçote desenvolvido neste trabalho se mostrou funcional, permitindo o processamento de polímeros termoplásticos e estruturar geometrias tridimensionais.

Palavras-chave: . Polímeros, Prototipagem rápida, Biomateriais

Abstract

PEREIRA, F.D.A.S. Development of a Toolhead for Fused Filament Extrusion applied to Additive Manufacturing. 2014. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2014.

The most widespread Additive manufacturing process is based on the principle extrusion deposition of thermoplastic through a nozzle. Much of the commercial Additive Manufacturing equipment are closed project and this complicates its application in research, especially in the field of biomanufacturing, however, a line of equipment with open source projects, allows the free modification for a specific applications. This work shows the development of an Additive Manufacture toolhead based on the fused deposition thermoplastic, which allows the use of various thermoplastics polymers in the open source platform Fab@CTI machine. The development methodology consisted of successive improvements projects. The preliminary design of the toolhead was through the user and design requirements. Two others versions were created as a result of the improvements implemented. Greater focus has been given in the heated region to enable the use of the largest number of polymers as possible. The toolhead developed is able to extrude thermoplastic materials with different melting points and different filament diameters (1.8 mm to 3.0 mm). For the research in scaffolds, the toolhead proved functional for polycaprolactone polymers and polyhydroxybutyrate polylactic acid, which were three dimensionally structured with pore size of 250 micrometers and a minimum of 0,3 mm layer. The extrusion of acrylonitrile butadiene styrene was challenging and requires further investigation although some geometries were printed. It was concluded that the head developed in this study proved to be viable and successfully met its proposal, to process thermoplastic polymers with three-dimensional geometries. Although it was originally developed for the Fab@CTI platform, the system is possible to be adapted to other machines.

Key Words: Polymers, Rapid Prototyping, Biomaterials

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação das principais etapas do processo de MA (Volpato, 2007).....	5
Figura 2 - Princípio do processo SL. Cortesia: CTI Renato Archer	7
Figura 3 - Princípio da tecnologia PolyJet. Cortesia: CTI Renato Archer.....	8
Figura 4 - Princípio do processo LOM - retirado de http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing	9
Figura 5 – Princípio do processo SLS. Cortesia: CTI Renato Archer.	10
Figura 6 - Princípio do processo 3DP. Cortesia: CTI Renato Archer.....	11
Figura 7 - Adaptado da patente US5340433 A de 1992; a) Esquema simplificado do processo FDM. b) Princípio do processo FDM. Cortesia: CTI Renato Archer.....	12
Figura 8 - Processo FDM. a) Flambagem do filamento (adaptado de Venkataraman (2000); b) Fusão do filamento no canal.....	12
Figura 9 - a) Impressora RepRap Modelo Mendel II (Sells, 2009) b) Impressora Fab@Home Modelo 1 (www.fabathome.org)	14
Figura 10 - Bio impressoras. a)NovoGem MMX (fonte: (http://www.organovo.com/3d-human-tissues) ; b)3D-Bioploter (fonte: http://envisiontec.com/products/3d-bioplotter/) ; c)BioFactory d)3DDiscovery (fonte: http://www.regenhu.com/).....	15
Figura 11 - Fab@CTI (Inforçatti, 2007)	16
Figura 12 - Sistema intercambiável de cabeçotes.....	17
Figura 13 - Software Fab@Home versão 0.24 mostrando telas de status e movimentação.....	18
Figura 14 - Modo de transferência de calor: condução, convecção e radiação (Incropera, 2008).	18
Figura 15 - Inchamento do Extrudado. Fonte: Bretas e D´Ávila (2005)	24
Figura 16 – Fratura do fundido. Fonte: Bretas e D´Ávila (2005)	25
Figura 17- Diagrama funcional do cabeçote de extrusão no sistema da Fab@CTI. Adaptado de Inforçatti (2014).....	30
Figura 18 - Desenho CAD da polia tracionadora.	31
Figura 19 - Sistema de pressionamento do filamento.....	31
Figura 20 - Região aquecida da maquina comercial FDM da Vantage i®	32
Figura 21 - Bicos extrusores. a) Bico Vantage i; b) Bico da Fab@CTI.	33
Figura 22 - Região aquecida da Fab@CTI.	34
Figura 23 - Modelo tridimensional CAD da primeira versão do cabeçote de extrusão.....	35
Figura 24- Peças do cabeçote de extrusão feitas por meio da MA.	36
Figura 25 - Bloco da região aquecida feito por meio da usinagem.	36
Figura 26 - Sistema montado e conectado à Fab@CTI para validação experimental.	37
Figura 27 - Polia tracionadora. a) Versão totalmente em ABS. b) Teste de viabilidade em ABS. c) Peças em ABS (branco) e titânio (cinza). d) Detalhe dos dentes amassados. d) Detalhe dos dentes em metal.	38
Figura 28 - Polia da caixa de pressão. a) conjunto em ABS. b) conjunto em metal. c) detalhe dos dentes.....	39
Figura 29 - Região aquecida reformulada. a,b) Vista CAD explodida c) Modelo CAD montado.....	40
Figura 30 – Segunda versão do cabeçote. a) Modelo CAD; b) Cabeçote implementado; c) Detalhe da região aquecida.	40
Figura 31 - Modelos impressos para calibração dos parâmetros do cabeçote.	41

Figura 32 -Alguns resultados com PCL fabricados na Fab@CTI, sendo eles uma <i>scaffolds</i> de 50 camadas (a) e um côndilo. Fonte: Senedese 2011.	42
Figura 33 – Modelos CAD da região aquecida da (a) segunda versão e (b) terceira versão.	43
Figura 34 – Simulação com PCL. a)segunda versão; b)terceira versão.	44
Figura 35 - Simulação com PLA a)segunda versão; b)terceira versão.	45
Figura 36 - Simulação com ABS a) segunda versão; b) terceira versão.....	46
Figura 37 – Terceira versão do cabeçote– Região Aquecida.....	46
Figura 38 - Impressão 3D de uma estrutura porosa de PLA, com formato de côndilo. Fonte: (Fermín, 2012).	47
Figura 39 - Cabeçotes de extrusão. a) versão preliminar; b) segunda versão; c) terceira versão ..	49
Figura 40 - Defeito com ABS. a) Local identificado do ocorrido. b) Inchamento do filamento...	50
Figura 41. a) Scaffold de PCL produzido na FAB@CTI; b) Análise MEV com foco nos tamanhos de poro e adesão das camadas; c) Análise MEV mostrando microporos como resultado natural do processo do PCL. Fonte: Senedese <i>et al</i> (2011a).	53
Figura 42 - Modelos de scaffolds de PCL variando tamanho de poros e ângulo de preenchimento. Adaptado de Senedese <i>et al.</i> (2011b).	54
Figura 43 - Imagens MEV dos scaffolds de PCL fraturados. a) Modelo 1 ampliado 70X, b) Modelo 1 ampliado 230X, c) Modelo 4 ampliado 65X, c) Modelo 4 ampliado 200X.. Fonte: Senedese <i>et al.</i> (2011b).....	55
Figura 44 - scaffolds de PLA com diferentes orientações de raster (a,b,c,d) e tamanho de poro (e,f). Fonte: Ferm�m (2012).	55
Figura 45 – Modelos CAD e imagens MEV correspondentes dos scaffolds impressos em PLA. Adaptado de Ferm�m (2012).....	56
Figura 46 - Protótipo impresso em PHB	57
Figura 47 - Foto das camadas (a) e dos poros (b).....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros configuráveis da Fab@CTI.....	17
Tabela 2 - Dado técnicos dos polímeros termoplásticos aplicados neste trabalho.	23
Tabela 3 -Análise morfológica com as melhores soluções selecionadas.....	28
Tabela 4 - Propriedades dos materiais para região aquecida.	34
Tabela 5 - Parâmetros para extrusão de ABS	41
Tabela 6 - Parâmetros para extrusão de PCL.....	42
Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações.	44
Tabela 8 - Parâmetros para extrusão de PLA	47
Tabela 9 - Modelos impressos em ABS	51

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviações

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Projeto Auxiliado por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FIR	Infravermelho com Transformada de Fourier
MA	Manufatura Aditiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PCL	Policaprolactona
PHB	Polihidroxibutirato
PLA	Poli(ácido) Láctico
PTFE	Politetrafluoroetileno
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	Stereolithography

Siglas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DT3D	Divisão de Tecnologias Tridimensionais
CTI	Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do trabalho	2
1.2. Objetivo	4
1.3. Estrutura do Trabalho	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Manufatura Aditiva.....	5
2.2. Classificação dos Processos de MA	6
2.3. Principais processos de MA	6
2.3.1. Estereolitografia (SLA, <i>Stereolithography</i>)	7
2.3.2. Impressão a Jato de Tinta (IJP) – Polyjet da Objet	8
2.3.3. Manufatura Laminar de Objetos (LOM, <i>Laminated Object Manufacturing</i>).....	8
2.3.4. Sinterização Seletiva a Laser– (SLS, <i>Selective Laser Sintering</i>)	9
2.3.5. Impressão tridimensional (3DP)	10
2.3.6. Modelagem por deposição de fundido (FDM, <i>Fused Deposition Modeling</i>)	11
2.4. Projeto de Máquinas de MA de Código Aberto	13
2.5. Bioimpressoras	15
2.6. A Fab@CTI	16
2.7. Considerações sobre Transferência de Calor.....	18
2.8. Introdução aos Polímeros	21
2.8.1. Termoplásticos e Termorrígidos	21
2.8.2. Considerações sobre Temperatura de Transição de Fase.....	22
2.8.3. Reologia do Polímero Fundido	23
2.8.4. Fenômenos Observados na Extrusão	24
3. DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE EXTRUSÃO	26
3.1. Metodologia do desenvolvimento	26
3.2. Definição dos requisitos do usuário.....	26
3.3. Desenvolvimento da solução construtiva	27
3.4. Desenvolvimento da solução construtiva	30
3.5. Construção do projeto funcional.....	35
3.5.1. Validação experimental da primeira versão do cabeçote	37
3.6. Segunda versão do cabeçote de extrusão.....	38
3.6.1. Análise da segunda versão	40
3.7. Terceira versão do cabeçote de extrusão	43
3.7.1. Análise da terceira versão do cabeçote	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1. Análise dos cabeçotes	48
4.2. ABS	50
4.3. PCL.....	52
4.4. PLA.....	55
4.5. PHB	56
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	59
Referências	61

1. INTRODUÇÃO

A competição global, customização em massa, bem como a redução do tempo de vida útil dos produtos e demanda contínua em reduzir custos forçam as empresas a procurar novas tecnologias para atender a estes requisitos, a fim de melhorar seus modelos de negócio e acelerar o ciclo de desenvolvimento de produtos. A Manufatura Aditiva (MA) tem se mostrado uma tecnologia importante, com sua capacidade de reduzir o tempo entre a concepção e a realização de um produto.

Segundo Volpato (2007), este processo de fabricação, cuja aplicação comercial teve início no final da década de 80 consiste na construção de um objeto, por meio de adição de material camada-a-camada, a partir de um modelo 3D virtual. O termo Prototipagem Rápida (RP) foi empregado, pois os primeiros objetos criados por esta tecnologia serviam principalmente para permitir o projetista a visualização física do modelo virtual (Kamrani; Nasr, 2006). Inicialmente, a RP gerava objetos pouco funcionais devido à restrições de materiais que forneciam baixa resistência mecânica e baixa precisão dimensional.

Com o atual avanço das técnicas e dos materiais empregados, esta tecnologia vem mudando o projeto de produtos, pois o seu desenvolvimento já é pensado levando em consideração esta tecnologia como único meio de obtenção da geometria desejada, uma vez que o resultado além de visual, também atende a função desejada. Devido a esta evolução, a denominação da tecnologia de Prototipagem Rápida foi ampliado para o termo Manufatura Aditiva. Alguns sinônimos incluem Fabricação Aditiva (*Additive Fabrication*), Processo Aditivo (*Additive processes*) Manufatura por Camada (*Layer Manufacturing*) e Fabricação de Forma Livre (*Freeform Fabrication*). (ASTM F2792-10).

Os equipamentos de tecnologia de MA existentes no mercado são em sua maioria, de grande porte e de alto custo, acessíveis somente a uma pequena parcela da indústria e pesquisa. Nos últimos anos, tem ocorrido uma grande tendência de se criar máquinas de MA com preços acessível ao público geral, ao mesmo tempo em que estes equipamentos ofereçam qualidade e

desempenho similar às máquinas industriais, permitindo gerar componentes e montagens funcionais.

Desta tendência, surgiram dois grandes projetos de máquinas de bancada conhecidos na comunidade de MA: São eles Fab@Home (MALONE, 2007) e RepRap a (do inglês *Replicating Rapid-Prototyper*). Devido ao seu baixo custo de implementação somado a uma documentação completa disponível abertamente ao público, estes projetos tem sido usados como plataformas de pesquisas.

O projeto RepRap, iniciado em 2005 por Adrian Bowyer, na Universidade de Bath, consiste em uma impressora 3D baseada em extrusão de filamento termoplástico cuja proposta é gerar uma grande parte de suas próprias peças com intuito de facilitar a disseminação da tecnologia de impressão 3D (Barnatt, 2013; Canessa *et al*, 2013).

Com base nestes dois projetos, a impressora 3D portátil Fab@Home iniciada em 2007 no CTI, se tornou a plataforma para desenvolvimento de novos cabeçotes de deposição tridimensional. Inicialmente a Fab@CTI era composta apenas de um cabeçote de deposição por seringa, e com as posteriores demandas de estruturação tridimensional de novos materiais em outras formas que não somente “líquido”, deu-se início ao desenvolvimento de um cabeçote de modelagem por deposição de filamento fundido. Assim, este trabalho trata do desenvolvimento e melhoria do referido cabeçote para diferentes materiais poliméricos, incluindo bio-materiais.

1.1. Motivação do trabalho

Atualmente, o processo de Manufatura Aditiva está presente em vários campos do conhecimento, desde a área de entretenimento até aplicação na área da saúde, na qual pode-se citar a criação de ferramental auxiliar para cirurgias, diagnóstico e próteses personalizadas (Silva *et al*. 2004). Ainda no campo da saúde, a engenharia tecidual é uma área de estudos incipiente, e procura na MA melhores tecnologias para reproduzir geometrias de alta complexidade de forma controlada, como por exemplo, estruturas porosas de suporte para crescimento celular denominada de *scaffolds*.

Apesar das máquinas de MA comerciais poderem ser usadas em linhas de pesquisas, sua aquisição e manutenção são custo elevados. Por se tratar de máquinas importadas, esta condição torna seu acesso e disseminação limitados para os pesquisadores no Brasil. Além do seu alto custo, há limitações técnicas nestes equipamentos, que por se tratar de tecnologias proprietárias, são limitadas quanto as variações dos parâmetros de funcionamento para garantir os resultados exigidos pela indústria, bem como limitar a gama de materiais (fornecidos em grande parte por eles mesmos). Estas limitações que envolvem tanto o *hardware* quanto o *software* vão de encontro aos requisitos básicos exigidos em um equipamento de laboratório para pesquisas.

Assim, atendendo ao planejamento estratégico do CTI (2006 a 2010), foi construída uma máquina básica para pesquisa e desenvolvimento em tecnologia de prototipagem rápida voltada a aplicações que exijam grande flexibilidade de configurações para operação e capacidade de utilizar pouca quantidade de material, preservando a capacidade de reproduzir geometrias complexas, como é o caso de pesquisas em bioengenharia e biofabricação (Inforçatti, 2007). Esta máquina é baseada no projeto Fab@Home Modelo 1, quando configurada e adaptada, passou a ser chamada Fab@CTI.

Em 2009, com a crescente demanda nos estudos em engenharia tecidual, surgiu a necessidade de estruturar tridimensionalmente e de forma controlada polímeros biocompatíveis. Neste ano, não havia disponível nenhum projeto que atendesse esta questão e com o domínio do projeto Fab@CTI que fora previamente modificada com um sistema intercambiável de cabeçotes, deu-se início o desenvolvimento de um cabeçote de modelagem por deposição de filamento fundido integrável, abrindo assim maiores possibilidades do uso da MA em pesquisas, antes dificultadas pelas imposições dos equipamentos comerciais.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do projeto e a construção de um cabeçote para extrusão de filamentos poliméricos. O cabeçote é intercambiável sendo montado e testado na plataforma experimental Fab@CTI. Como validação do cabeçote, espera-se extrudar um conjunto de polímeros sob a forma de filamento, dentre eles a acrilonitrila butadieno estireno, policaprolactona, poli(ácido) láctico e polihidroxibutirato.

1.3. Estrutura do Trabalho

Este documento está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 faz uma introdução a área do conhecimento, contextualiza o trabalho e a motivação deste bem como define os objetivos. O Capítulo 2 revisa os conceitos e as principais tecnologias em uso da Manufatura Aditiva com um maior foco na tecnologia de deposição de filamento fundido por ser o contexto deste trabalho. Neste capítulo também é visto o conceito de projetos abertos, bioimpressoras e um breve histórico da máquina Fab@CTI. É abordado o conceito de polímeros e as características principais dos polímeros utilizados neste trabalho. O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do cabeçote de extrusão de filamento fundido para a máquina Fab@CTI, mostrando desde o seu conceito preliminar até a construção e a evolução do mesmo em outra duas versões. Ao final de cada versão, é discutido brevemente os motivos que levaram ao desenvolvimento da versão conseguinte. O Capítulo 4 apresenta as discussões em torno das versões dos cabeçotes bem como os resultados obtidos por estes. O Capítulo 5 descreve as conclusões sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos de Manufatura Aditiva, revisando as principais tecnologias em uso no mercado. É dado um maior enfoque no processo de modelagem por deposição de filamento fundido dado o contexto do trabalho. É visto também o conceito de projetos abertos de, bioimpressoras e um breve histórico da impressora 3D Fab@CTI. É abordado o conceito de polímeros e as principais características dos polímeros utilizados, bem como uma breve introdução à transferência de calor.

2.1. Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva é definida pela ASTM (F2792-10) como um conjunto de tecnologias aditivas baseadas na construção, camada-a-camada de estruturas tridimensionais físicas a partir de um modelo digital gerado em um programa CAD (*Computer Aided Design*). O modelo digital é primeiramente fatiado em seções transversais, que são reproduzidas fisicamente por processos automatizados de construção camada-a-camada (Figura 1). Esses passos permitem a obtenção de objetos com geometrias complexas, praticamente inviáveis de fabricar por métodos tradicionais de manufatura por remoção de material ou conformação plástica (Cooper, 2001).

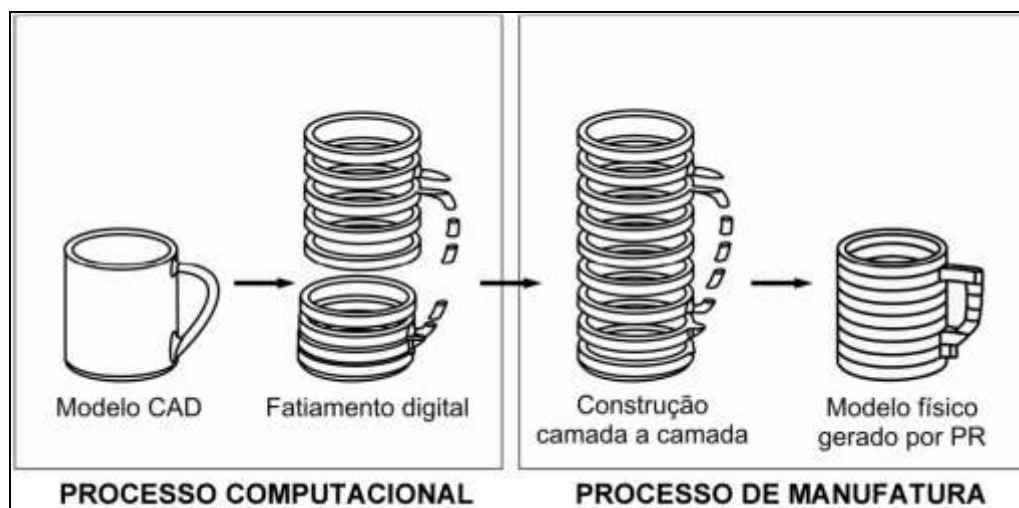


Figura 1 - Representação das principais etapas do processo de MA (Volpato, 2007)

O termo “Impressão 3D” é definido pelo comitê ASTM, como a fabricação de objetos pela deposição de um material usando um cabeçote de impressão, um bico ou outra tecnologia de

impressão. Wohlers (2012) reportou em Maio de 2011 que a mídia de massa, a comunidade investidora e a indústria CAD – três grupos de grande influência – usaram o termo Impressão 3D quando se referiam à tecnologia de Manufatura Aditiva. Desde então, o termo Impressão 3D tem ganhado cada vez mais notoriedade, nos meios de comunicação, na internet e nas instituições de ensino e universidades.

2.2. Classificação dos Processos de MA

Existem vários meios de classificar os sistemas de MA disponíveis no mercado. Pode ser observando o estado inicial da matéria prima. Há basicamente três tipos: líquido, sólido e pó (Chua *et al.* 2007; Volpato, 2007).

Ainda segundo Chua *et al.* (2003), no sistema baseado na matéria-prima em líquido, em um processo normalmente conhecido como cura, o líquido é solidificado, como por exemplo por meio da foto-polimerização. Os sistemas baseados que utilizam materiais sólidos como *pellets*, filamentos ou folhas são processados por meio de derretimento e solidificação/fusão ou corte e colagem para a estruturação da geometria. Nos sistemas baseados em matéria-prima em estado de pó, são utilizados líquidos aglutinantes ou feixe de *lasers* para promover a união das partículas para cada camada.

2.3. Principais processos de MA

Segundo Volpato *et al* (2007), os processos de MA mais utilizados no mercado, são:

- Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*)
- Impressão a Jato de Tinta (IJP, *Ink Jet Printer*)
- Manufatura Laminar de Objetos (LOM, *Laminated Object Manufacturing*)
- Sinterização Seletiva a Laser– (SLS, *Selective Laser Sintering*)
- Impressão tridimensional (3DP – *3 Dimensional Printer*)
- Modelagem por deposição de filamento fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*)

Estes processos são melhores descritos no item subsequente.

2.3.1. Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*)

Neste processo utiliza-se como matéria prima uma resina líquida fotocurável, sendo que a solidificação da mesma se dá através da aplicação de uma fonte de luz laser, geralmente no comprimento de onda ultravioleta (UV). A resina é inserida em um recipiente que contém uma plataforma sobre a qual será construída a peça. Esta plataforma se desloca na vertical a cada camada construída como mostrado na Figura 2. O feixe de laser passa sobre a superfície da resina referente à seção da geometria CAD, solidificando a matéria-prima em um processo de polimerização.

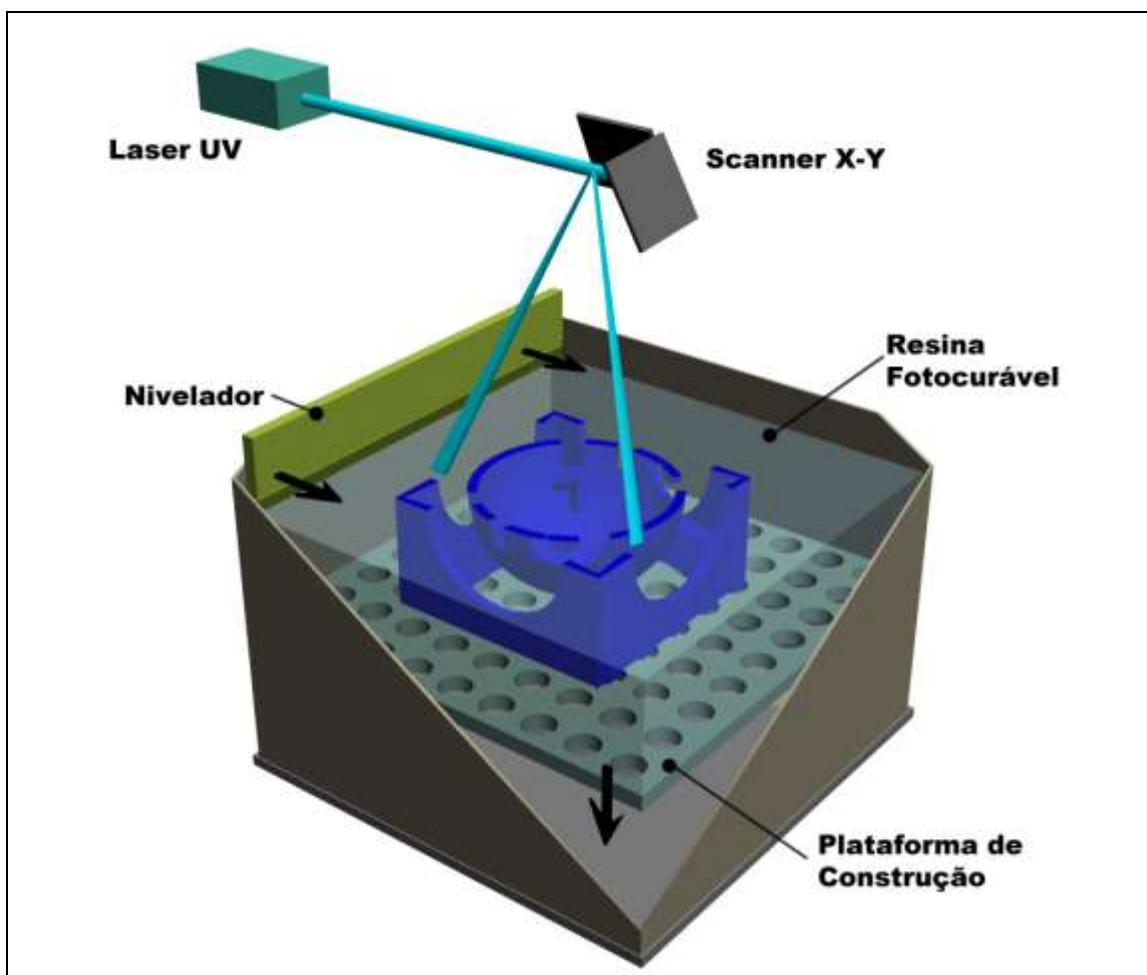


Figura 2 - Princípio do processo SL. Cortesia: CTI Renato Archer

2.3.2. Impressão a Jato de Tinta (IJP) – Polyjet da Objet

Esta tecnologia desenvolvida em 1998 pela empresa Objet Geometries Ltd., também utiliza resina líquida fotocurável, porém de uma forma diferente demonstrada na Figura 3: Um cabeçote semelhante ao de jato de tinta, deposita a resina em uma bandeja, e logo após a deposição, uma luz UV passa sobre a camada para polimerizar. A bandeja então desce e uma nova camada é depositada, repetindo este processo até a conclusão da peça.

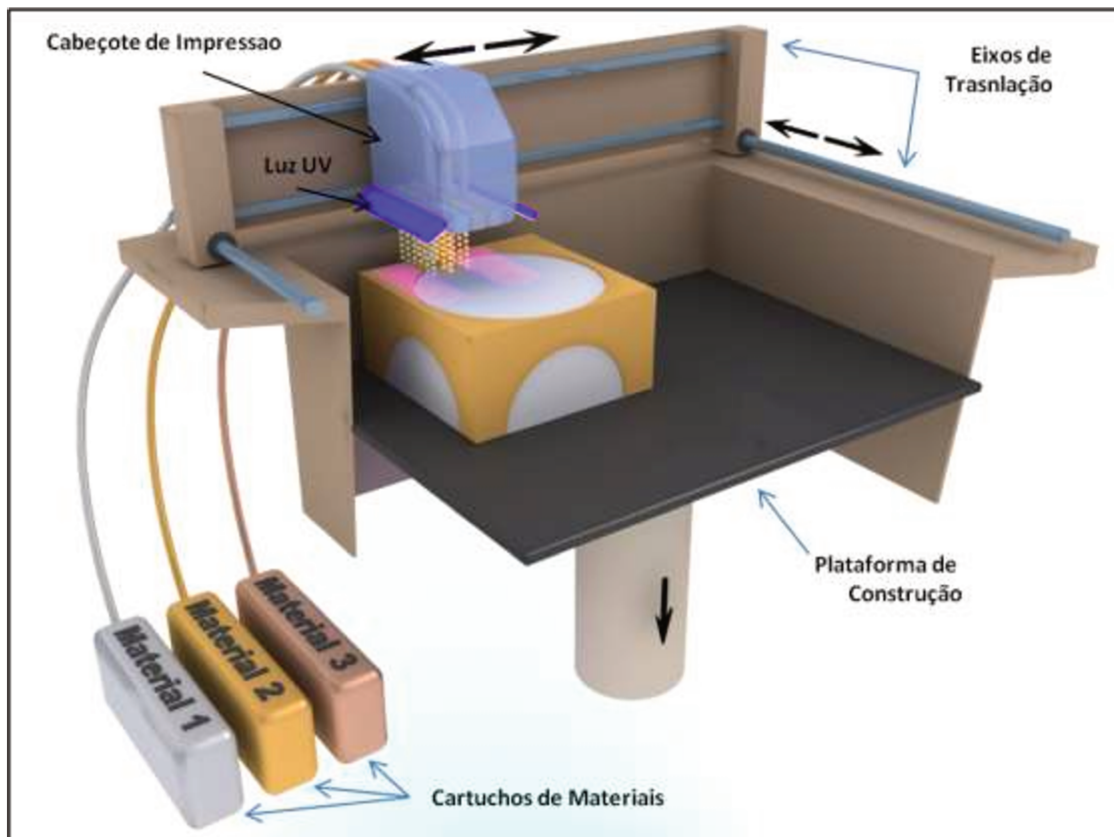


Figura 3 - Princípio da tecnologia PolyJet. Cortesia: CTI Renato Archer.

2.3.3. Manufatura Laminar de Objetos (LOM, Laminated Object Manufacturing)

Esta tecnologia LOM da empresa *Cubic Technology Inc.* se baseia na deposição camada-a-camada de folhas de materiais que são unidas por um adesivo. O processo apresentado na Figura 4 é iniciado pela deposição de uma folha que é aderida à anterior por meio de um adesivo. Um

feixe de laser de CO₂ corta o perfil da geometria da peça na camada em questão. Estas etapas se repetem até a conclusão da peça.

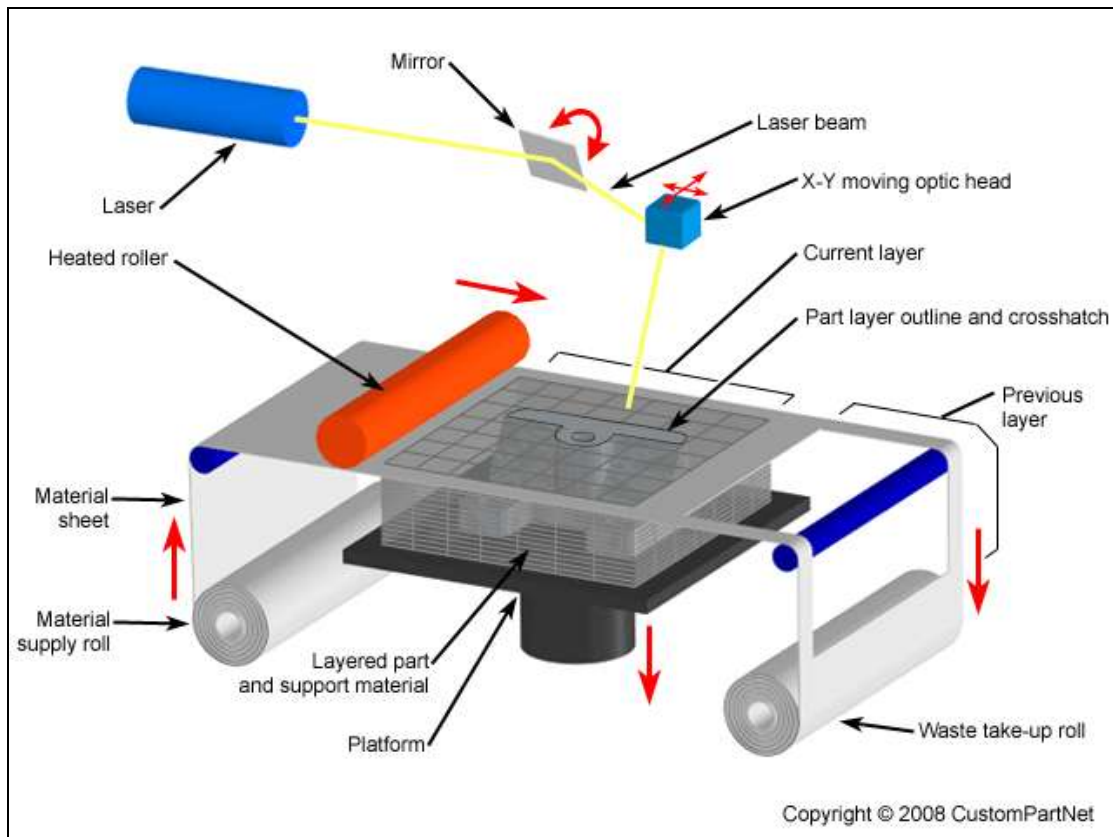


Figura 4 - Princípio do processo LOM - retirado de <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>.

2.3.4. Sinterização Seletiva a Laser– (SLS, *Selective Laser Sintering*)

Nesta tecnologia, a matéria-prima se encontra em forma de pó que é então inserido inicialmente em cartuchos laterais. Estes ejetam uma pequena quantidade de material para então ser espalhada na plataforma de construção por um rolo rotativo, deixando uma camada uniforme que é então sinterizada por um laser. Toda a construção se dá em uma câmara de atmosfera inerte com nitrogênio ou outro gás nobre (para evitar oxidação e explosão), e aquecida a uma temperatura um pouco abaixo da temperatura de fusão do pó, para que o feixe de luz laser forneça apenas a energia extra necessária para promover a sinterização. Este feixe de *laser* varre a superfície do pó por meio de espelhos percorrendo a trajetória da seção transversal da peça. Este processo é esquematizado na Figura 5.

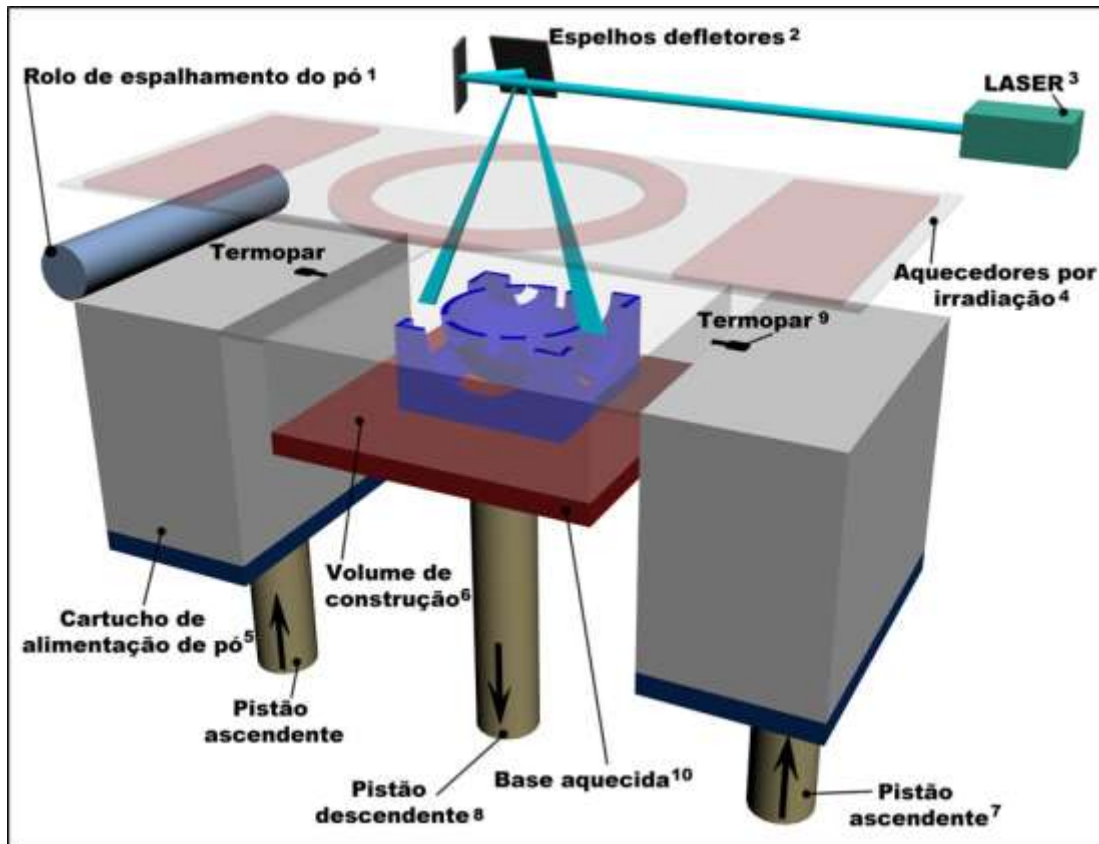


Figura 5 – Princípio do processo SLS. Cortesia: CTI Renato Archer.

2.3.5. Impressão tridimensional (3DP)

No processo de impressão da proposta pela ZCorp - atual 3D Systems, o material em forma de pó é aglutinado por meio de um líquido dispensado por um cabeçote de impressão a jato de tinta. A Figura 6 ilustra este processo, em que um rolo contra-rotativo espalha uma fina camada de pó nivelada sobre o leito de construção, então o cabeçote deposita o aglutinante na região 2D referente à seção de corte peça.

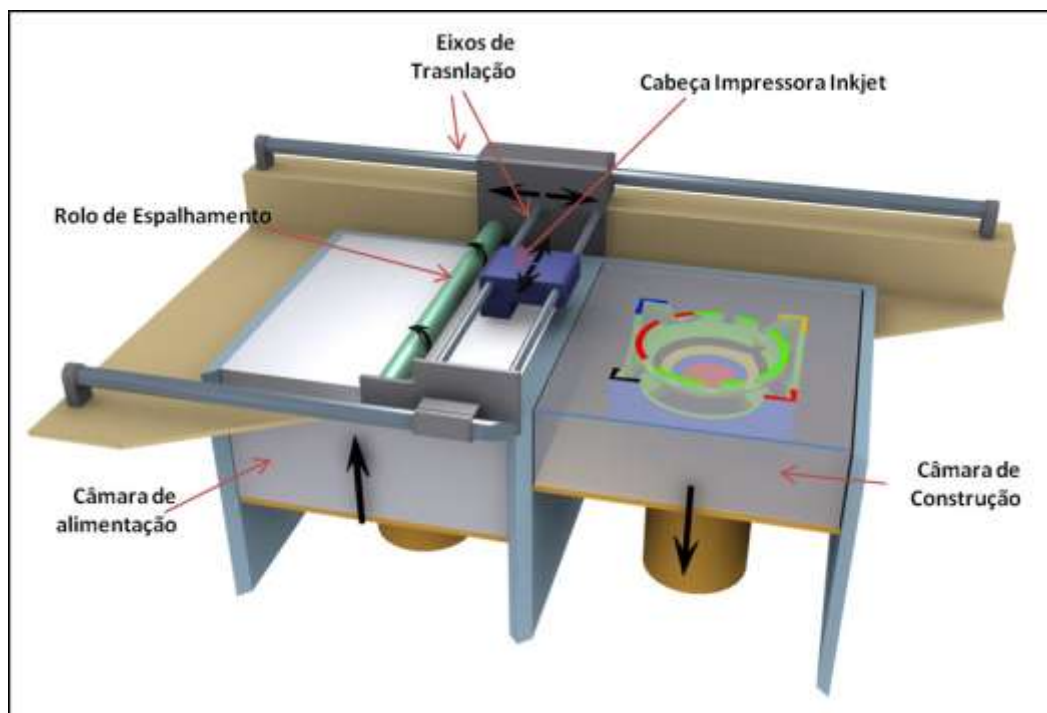


Figura 6 - Princípio do processo 3DP. Cortesia: CTI Renato Archer.

2.3.6. Modelagem por deposição de fundido (FDM, Fused Deposition Modeling)

O cabeçote intercambiável proposto é baseado na tecnologia FDM, portanto será dada uma abordagem mais detalhada neste trabalho considerando: funcionamento básico, os parâmetros de processamento, bem como as propriedades das peças fabricadas.

Este processo descrito na patente US5340433 de 1989 depositada por Steven Scott Crump, co-fundador da Stratasys (1992) é composto de um cabeçote que se movimenta no plano horizontal (eixos XY) de uma plataforma que se movimenta no sentido vertical (eixo Z). Este cabeçote é responsável por receber um filamento termoplástico, movê-lo por meio de polias, através de um canal até uma região aquecida no qual o filamento é fundido e extrudado por um furo de menor diâmetro no canal de entrada. Este material fundido sai em forma de filamento sendo depositado – e solidificando no plano horizontal de forma controlada camada-a-camada até a formação final do objeto. A Figura 7 apresenta um esquema simplificado deste processo bem como o cabeçote desenvolvido por Crump (1989). O processo de construção ocorre em uma câmara fechada, com temperatura controlada descrita na patente “*High temperature modeling*

apparatus“ (2004), com objetivo de minimizar a tensão gerada pela contração do filamento após a deposição, garantido a integridade estrutural do objeto gerado.

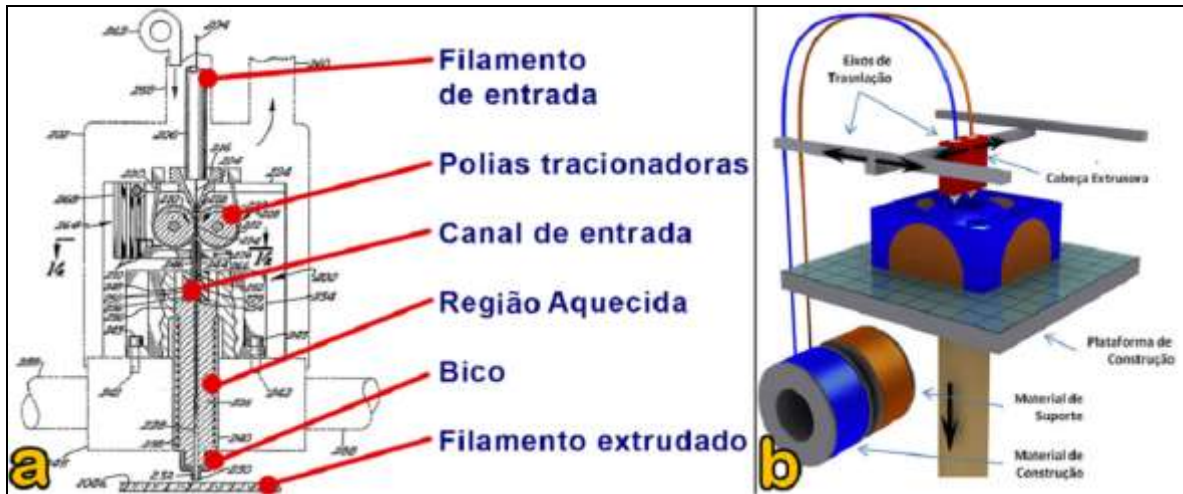


Figura 7 - Adaptado da patente US5340433 A de 1992; a) Esquema simplificado do processo FDM. b) Princípio do processo FDM. Cortesia: CTI Renato Archer.

Venkataraman (2000) aponta que é necessário haver um balanço entre rigidez e viscosidade do filamento de entrada, para promover a extrusão quando empurrado pelas polias tracionadoras. Do contrário, pode ocorrer a flambagem do filamento na entrada do canal da região aquecida (Figura 8a). Ao entrar na região aquecida, o material passa a ser fundido e entre as temperaturas de amolecimento e de fusão, o material sofre um amolecimento que gera um embolo dinâmico, empurrando a porção fundida através do bico (Figura 8b).

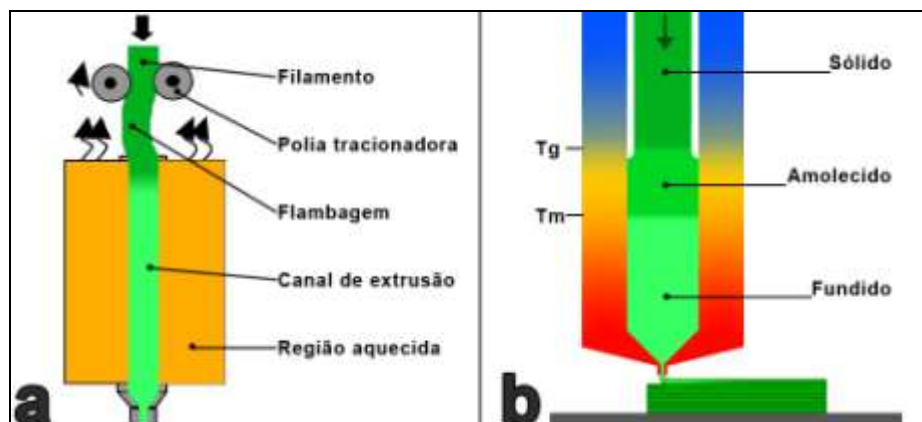


Figura 8 - Processo FDM. a) Flambagem do filamento (adaptado de Venkataraman (2000)); b) Fusão do filamento no canal.

Algumas das vantagens deste processo são apontadas por Chua *et al.* (2003) são:

- Fabricação de partes funcionais. Por exemplo, os objetos gerados por esta tecnologia apresentam 85% da resistência mecânica, quando comparados com objetos obtidos por moldagem por injeção.
- Mínimo desperdício: uma vez que somente é utilizando o material necessário para a construção e suporte da peça.
- Facilidade no pós-processamento, uma vez que é necessário apenas mergulhar a peça em uma banho ultra-sônico, com solução alcalina para remover todo o suporte. Muitas vezes, este suporte pode ser retirado manualmente sem maiores esforços.
- Facilidade de troca de material, pois este é fornecido em cartuchos, basta inserir na máquina como em uma impressora comum.

As principais desvantagens inerentes ao processo FDM, são:

- O processo FDM é lento, quando comparado com os demais processos de MA uma vez que toda a área de secção transversal tem que ser preenchida com o material de construção. A velocidade de construção está restrita pela taxa de extrusão do material, pois envolve polímero de viscosidade relativamente alta.
- O encolhimento ou retração dos objetos ocorre de forma imprevisível devido ao material extrudado ser resfriado rapidamente em sua deposição, induzindo tensões internas no objeto. Parâmetros de processo ajustados pelo usuário podem compensar este problema.

2.4. Projeto de Máquinas de MA de Código Aberto

O conceito de projeto de máquinas de código aberto ou *Open Source Hardware* (OSHW) é usado para definir qualquer dispositivo físico tangível, cujo projeto é de livre acesso ao público com informações o bastante para que qualquer um possa construir utilizar, modificar e distribuir estes dispositivos. (OSHWA, 2014). Pearce (2012) afirma que, o movimento *open source* está

possibilitando a criação de equipamentos científicos de baixo custo e que supre a demanda do usuário ao combinar impressão 3D com microcontroladores rodando softwares de código aberto. Este movimento resultou no que ele intitula “A Era das Máquinas Livres”.

Pioneiro nesta revolução, o projeto RepRap iniciado por Bowyer (2005) na Universidade de Bath visou proporcionar o uso da tecnologia de MA para uso doméstico. Para viabilizar a popularização desta tecnologia, Bowyer (2005) definiu um projeto de código aberto de uma impressora 3D (Figura 9a) de baixo custo com a capacidade de auto-replicação, a qual fosse capaz de imprimir todas as peças necessárias por meio da tecnologia FDM para sua montagem (Sells, 2009). O projeto Fab@Home, também de código aberto foi criado por Malone (2006) na Universidade de Cornell. Com o objetivo similar ao projeto RepRap, de difundir a tecnologia, a impressora 3D denominada Fab@Home (Figura 9b) foi projetada para a impressão de peças complexas composta de múltiplos materiais (Malone, 2007).

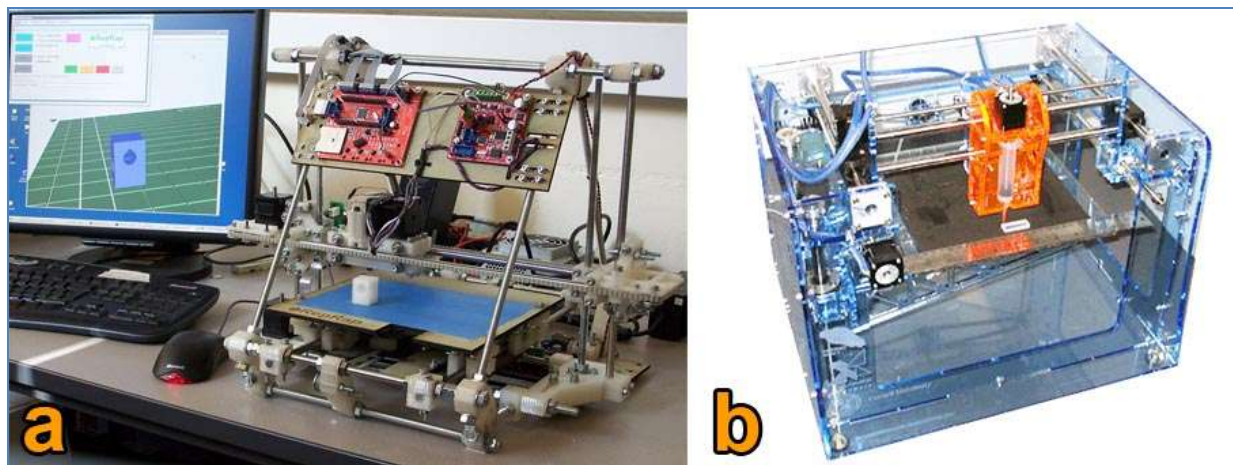


Figura 9 - a) Impressora RepRap Modelo Mendel II (Sells, 2009) b) Impressora Fab@Home Modelo 1 (www.fabathome.org)

As impressoras Fab@Home e RepRap tem sido utilizados não somente para impressão de peças de uso pessoal, também tem sido adaptada pela comunidade científica. Miller *et al.* (2012), da Universidade da Pensilvânia mostra a impressão redes de vasos sanguíneos, a partir de açúcar utilizando uma RepRap modificada. Outro exemplo é o uso da Fab@Home utilizada para a impressão de um reator químico para síntese orgânica e inorgânica, no qual os autores concluem que seria extremamente difícil de construir sem o uso da impressora 3D (Symes *et al.*, 2012). Em

pesquisas em biofabricação Hockaday *et al.* (2012) imprimiu *scaffold* no formato de válvula aórtica com hidrogel e posterior celularização, Melgoza *et al.* (2012) utilizou silicone de grau médico na Fab@Home para a impressão de *stent* traqueal personalizado, Cohen *et al.* (2010) propôs a reparação de defeitos osteocondral *in situ*. Kuehn e Rieffel (2012) utilizaram a máquina Fab@home no estudo em algoritmos evolucionários

2.5. Bioimpressoras

Enquanto por um lado, máquinas de código aberto vêm sendo aplicadas em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento, por outro lado, tecnologias proprietárias vem se especializando para suprir esta demanda de mercado na área da engenharia tecidual. Um exemplo comercial é a NovoGen MMX® (Figura 10a), uma bio-impressora da Organovo® que trabalha com dois dispensadores onde um faz a deposição de bio-tinta composta por esferóides celulares, e o outro dispensa um hidrogel como suporte. A 3D-Bioplotter® (Figura 10b) da empresa EnvisionTEC® tem a capacidade de trabalhar em um só processo com até 5 diferentes materiais, desde hidrogéis, polímeros, cerâmicas e metais. A Empresa Suíça regenHU® oferece duas bio-impressoras, a BioFactory® (Figura 10c) e a 3DDiscovery® (Figura 10d). Segundo a empresa, a primeira se trata de um instrumento de bio-manufatura tridimensional que permite pesquisadores criar modelos de tecidos bio-miméticos. A 3DDiscovery é um equipamento com 4 dispensadores capaz de processar biopolímeros, cálcio, células, proteínas, hidrogéis, colágeno, policaprolactona e poliéster.

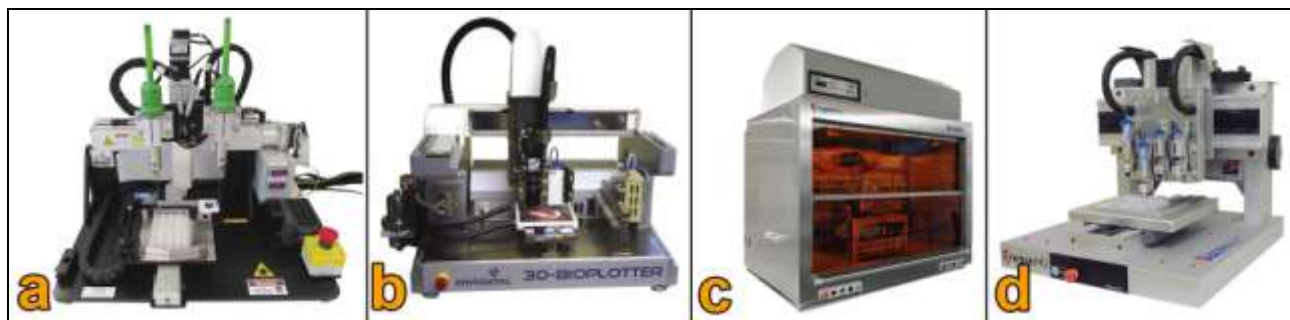


Figura 10 - Bio impressoras. a)NovoGem MMX (fonte: (<http://www.organovo.com/3d-human-tissues>) ; b)3D-Bioploter (fonte: <http://envisiontec.com/products/3d-bioplotter/>) ; c)BioFactory d)3DDiscovery (fonte: <http://www.regenhu.com/>)

Embora estas máquinas comerciais apresentem grande flexibilidade de configurações de materiais, pelo fato de adotarem uma plataforma proprietária encapsulada, elas não atendem plenamente demandas específicas das áreas de pesquisa.

2.6. A Fab@CTI

A Fab@CTI (Figura 11) consiste em uma máquina de MA, que pode ser separada em três elementos fundamentais: sistema de movimentação, cabeçotes e *software*. O sistema de movimentação é composto por uma plataforma cartesiana controlada por três motores de passo acoplados a fusos com porcas anti-folga, com uma resolução de 25 μm . O movimento X-Y ocorre em um plano fixo, enquanto o movimento Z é realizado pelo deslocamento da mesa. Os cabeçotes são os elementos responsáveis pelo processamento e pela deposição dos materiais. O *software* projeta a trajetória de deposição e controla a máquina.

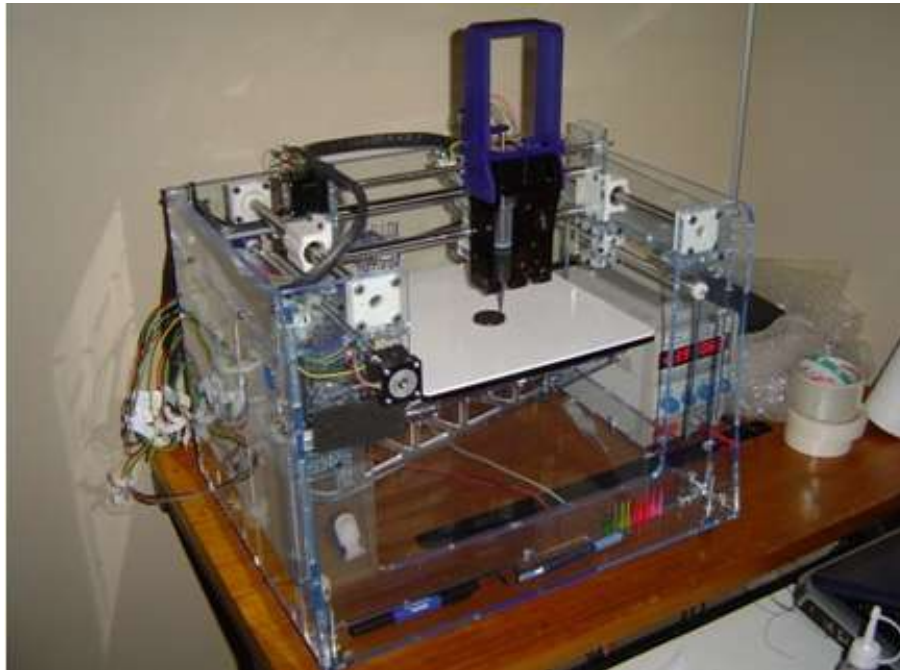


Figura 11 - Fab@CTI (Inforçatti, 2007)

O projeto original da Fab@Home é composto por um cabeçote de extrusão baseada em injeção (seringa) no qual, motores de passo empurram o êmbolo para realizar a deposição do material na plataforma. Desta forma, foram gerados de baterias, atuadores, sensores,

bioimpressão e impressão de comida (Lipson, 2013). Visando a expansão de tecnologias de deposição na Fab@CTI foi desenvolvido previamente a este trabalho um sistema intercambiável de cabeçotes. Esta solução expandiu as possibilidades tanto de uso quanto de desenvolvimento da plataforma.



Figura 12 - Sistema intercambiável de cabeçotes.

A interface gráfica com o usuário do programa de controle, apresentada na Figura 13, é de código aberto escrito em linguagem C++, permitindo o usuário manipular arquivos STL quanto a sua escala, rotação e posição na plataforma de impressão. É também possível abrir arquivos de vetor e *G-codes*. Com o arquivo tridimensional aberto, o *software* faz o planejamento do caminho da impressão para reproduzir a geometria se baseando nas configurações de parâmetros inseridas pelo usuário, sendo as mais importantes listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros configuráveis da Fab@CTI.

Parâmetros da Ferramenta de Deposição	
TIPDIAM	Diâmetro do bico de extrusão
PATHWIDTH	Espessura da camada
PATHHEIGHT	Altura da camada
PUSHOUT	Tempo de avanço do êmbolo para iniciar o escoamento
SUCKBACK	Tempo de retroação do êmbolo para parar o escoamento
DEPOSITIONRATE	Movimentação do êmbolo durante o trajeto na camada
PATHSPEED	Velocidade de deposição

Este *software* mostra uma representação tridimensional na máquina, que se move em sincronia com a máquina real utilizando as informações enviadas de volta pelo microcontrolador. Este *software* disponibiliza ao usuário, todas as informações da máquina como, por exemplo,

velocidade de movimentação de cada eixo, status do fim de curso e tempo previsto de execução da impressão.

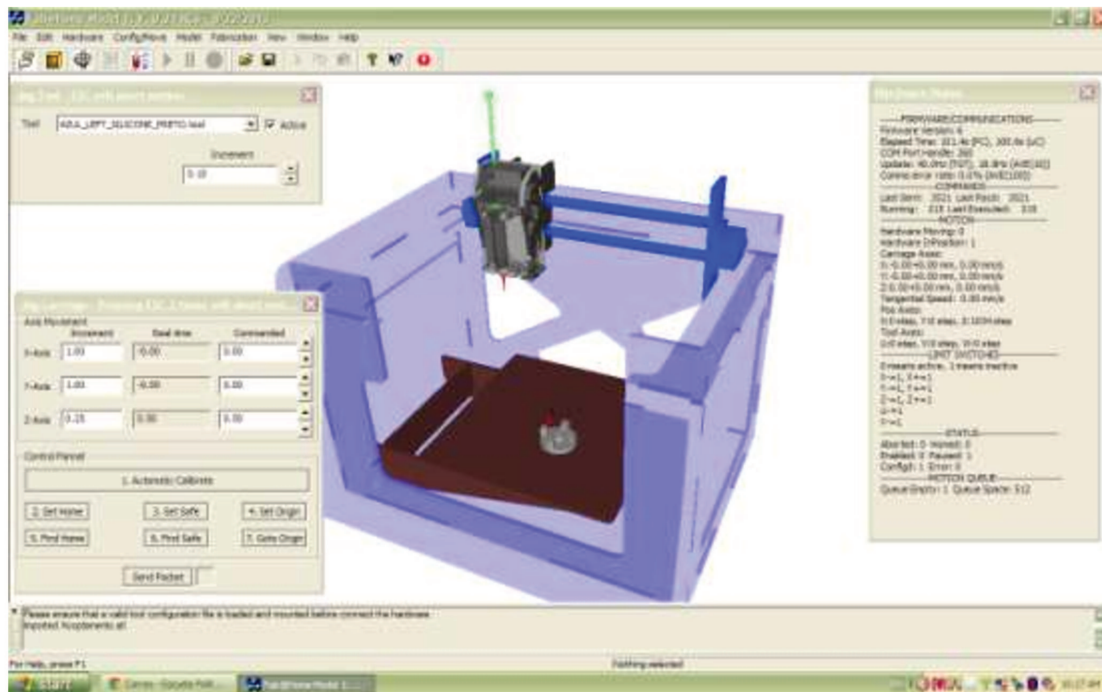


Figura 13 - Software Fab@Home versão 0.24 mostrando telas de status e movimentação.

2.7. Considerações sobre Transferência de Calor

No cabeçote de extrusão deste trabalho, ocorrem os três processos de transferência de calor: condução, convecção forçada e radiação. Estes três processos são ilustrados na Figura 14.

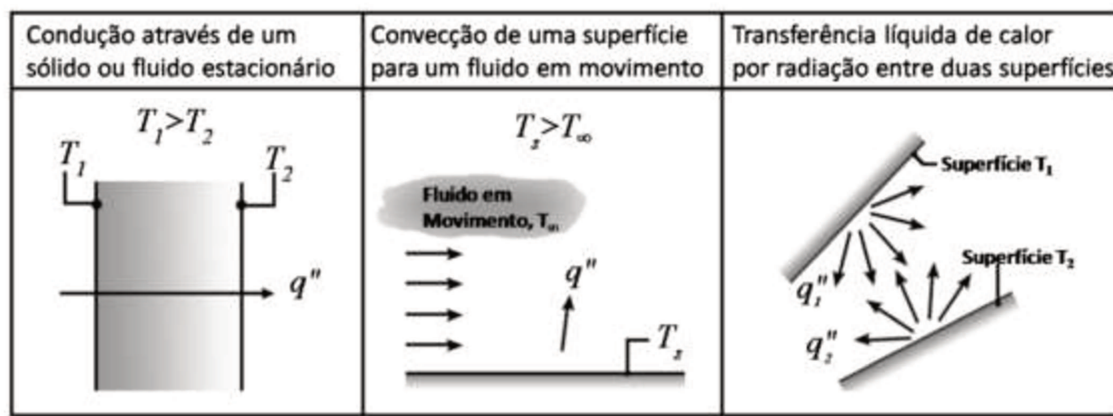


Figura 14 - Modo de transferência de calor: condução, convecção e radiação (Incropera, 2008).

Segundo Incropera (2008), no processo de condução ocorre a transferência de energia, por contato direto entre as partículas de matéria, na direção das mais energéticas para as partículas menos energéticas, devido às interações entre elas. Na presença de um gradiente de temperatura, ocorre a transferência de energia que pode ser quantificada pela equação da taxa de transferência conhecida como Lei de Fourier (Equação 1).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

No qual q_x'' é o fluxo de calor dado em $[W/m^2]$ no sentido da direção x , por uma unidade de área perpendicular à direção da transferência, que flui da região mais quente para a região mais fria, sendo esta proporcional ao gradiente de temperatura (dT/dx). A constante de proporcionalidade é dado por k , uma propriedade dos materiais conhecida como condutividade térmica (W/m.K).

Este gradiente térmico ocorre ao longo do tubo de aço inox responsável por guiar o filamento até a região aquecida e no dissipador aletado neste adicionado posteriormente. Uma análise numérica feita por elementos finitos permitiu o estudo da distribuição de temperatura no cabeçote.

A transferência de calor por convecção ocorre pelo movimento aleatório da molécula, ou difusão, e também através do movimento global ou macroscópico do fluido. Este processo pode ser classificado de acordo com a natureza do escoamento: forçada ou livre. A convecção forçada ocorre quando há o uso de um elemento externo para promover o escoamento. A convecção livre ou natural é induzida por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido. Independente das características particulares do processo de transferência de calor, a equação (Equação 2) apropriada para a taxa de transferência é dada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

No qual q'' , o fluxo de calor convectivo (W/m^2) é proporcional à diferença das temperaturas na superfície do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. Esta expressão é conhecida como Lei do resfriamento de Newton, e a constante de proporcionalidade $h(W/m^2.K)$ é chamada de coeficiente de transferência por convecção. No presente trabalho, foi considerada a convecção forçada devido ao uso de uma ventoinha de 40x40 mm, considerando um coeficiente de convecção de $17,5 W/m^2.K$ para a retirada de calor gerado ao redor do cabeçote de extrusão.

O terceiro mecanismo de transferência de calor ocorre por meio da radiação térmica, que é a energia emitida por sólidos, líquidos e gases que se encontram a uma temperatura pré definida. Esta energia é transportada por ondas eletromagnéticas que não necessita de um meio material diferente da convecção ou condução. A taxa de energia que é emitida dada pela unidade de W/m^2 é conhecida como poder emissivo, que tem seu limite superior previsto pela Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 3).

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3)$$

No qual T_s é a temperatura absoluta (K) da superfície e o σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$), que define um corpo negro ou irradiador ideal

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que o emitido por um corpo negro à mesma temperatura dada pela Equação 4:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4)$$

Na qual ε é uma propriedade radiante da superfície denominada emissividade. Com valores $0 \leq \varepsilon \leq 1$, essa propriedade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. A emissividade é fortemente dependente da superfície do material e seu acabamento.

No cabeçote de extrusão deste trabalho, o fenômeno da radiação térmica ocorre mais acentuadamente na região aquecida, fazendo com que se perca calor para o ambiente além de irradiar calor na peça em impressão.

2.8. Introdução aos Polímeros

Conforme visto na revisão de MA, os polímeros são predominantes entre os materiais utilizados nesta tecnologia, como por exemplo, a Poliamida Nylon nas máquinas SLS ou o ABS nas máquinas FDM e ainda polímeros fotopolimerizáveis como nos processos SL ou Polyjet. Este trabalho foi desenvolvido prevendo o emprego de polímeros convencionais de engenharia como o ABS e biopolímeros como PCL e o PLA.

Segundo Akcelrud (2007), os polímeros podem ter origem natural ou sintética com massa molar da ordem de 10^4 a 10^6 g/mol e são formados pela repetição de um grande número de unidades estruturais simples denominadas *meros*. Quando as cadeias de um polímero em estado sólido se encontram desordenadas denomina-se polímero amorfo, e quando as cadeias estão ordenadas, com periodicidade determinada, é então chamado de polímero cristalino. A forma como estas cadeias estão ligadas definem um polímero como termoplástico ou termofixo.

2.8.1. Termoplásticos e Termorrígidos

Os termoplásticos podem ter ligações lineares ou ramificadas e são moldadas pelo processo de injeção e extrusão, em função da sua capacidade de se tornar fluido por meio da aplicação de calor e adquirir um novo formato, que se mantém quando resfriado. Este processo pode ser repetido infinitamente - considerando que não haja degradação térmica. Exemplos de termoplásticos são as poliamidas, policarbonatos, poliésteres lineares e poliuretanos lineares.

Por outro lado, os termofixos contêm ligações cruzadas, em razão da sua infusibilidade, objetos produzidos com esse tipo de polímero são moldados em estágio anterior à formação do polímero reticulado e formação das ligações cruzadas por aplicação de pressão e calor. Alguns

exemplos de materiais termofixos são resina fenólica, resina epóxi e poliéster insaturado. (Akcelrud, 2007, Rico, 2012)

2.8.2. Considerações sobre Temperatura de Transição de Fase

A temperatura de fusão (T_m do inglês *Melting Temperature*) e a temperatura transição vítrea (T_g do inglês *Glass Transition Temperature*) são importantes parâmetros a serem observados no processamento de polímeros. Quando o polímero atinge a T_m , ocorre a mudança de fase cristalina para amorfa devido à alta absorção de energia para dissolução dos cristais. Materiais amorfos não possuem T_m por não existe fase cristalina para ser transformada, como é o caso do ABS. Nesta temperatura ocorre a mudança de fase de sólido para um líquido viscoso.

A transição vítrea ocorre em polímeros semicristalinos e é devida a uma redução no movimento de grandes segmentos de cadeias pela diminuição da temperatura sofrendo uma gradual transição entre o estado sólido para o estado fluido, adquirindo característica borrachosa. Nesta condição, o material sofre mudanças significativas em suas propriedades como rigidez, capacidade térmica, e coeficiente de expansão térmica. (Callister, 2007)

O ABS P-400 (Stratasys) utilizado neste trabalho foi obtido de de reuso da maquina comercial FDM da Stratasys® sendo este disponível em forma de filamento de 1.8mm. O PCL CAPA 6505 da Solvay® (Perstorp) disponível em forma de pó foi extrudado para formar filamentos de 2.0 mm. O PLA Biopolymer 3001D (NatureWorks) disponível em forma de *pellets* também foram extrudado em filamentos de 2.0 mm. Foi também utilizado o Polihidroxibutirato (PHB) Biocycle 1000 da Biocycle® em uma blenda com PCL CAPA 6505 (95% PHB: 5% PCL). A Tabela 2 apresenta os dados técnicos relevante destes materiais quanto à T_g , T_m e a temperatura de trabalho encontrada para a sua extrusão pelo cabeçote aqui desenvolvido.

Tabela 2 - Dado técnicos dos polímeros termoplásticos aplicados neste trabalho.

Material	Tipo	T_g	T_m	Temp. de trabalho
ABS	Amorfo	104° C	Não Aplicável	200° C a 230° C
PCL	Semicristalino	-60° C	60° C	80° C a 90° C
PLA	Semicristalino	55° C	200° C	170° C
PHB/PCL	Semicristalino	30° C	175° C	180° C

2.8.3. Reologia do Polímero Fundido

De acordo com Bretas e D'Ávila (2005), *“Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise, entre outras, das respostas (na forma de deformações ou tensões) de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação. A matéria pode estar em estado líquido, sólido ou gasoso.”*

No caso dos polímeros fundidos, como no processo FDM, os fenômenos reológicos apresentam respostas de um material viscoelástico, ou seja, estes dissipam e armazenam todo o trabalho externo aplicado. Quando aplicado uma tensão sobre o material, ele se deforma e recupera a certa taxa. Esta viscoelasticidade é inerente aos materiais de elevado peso molecular, como os polímeros.

No processamento dos polímeros fundidos, a viscosidade é a propriedade reológica mais importante para o seu processamento, já que as vazões, o aumento de temperatura e quedas de pressão – parâmetros importantes nesta operação são diretamente dependentes dessa propriedade.

A viscosidade é uma grandeza que indica a resistência do fluxo quando uma o material é submetido ao um campo de taxa de cisalhamento simples, assim, a viscosidade de um polímero, é função da taxa de cisalhamento, como mostrado na (Equação 5) , sendo τ (N/m²) a tensão de cisalhamento, η (Pa.s) a viscosidade e γ (s⁻¹) a taxa de cisalhamento. Quando a viscosidade é função da taxa de cisalhamento, o fluido é não-Newtoniano.

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (5)$$

2.8.4. Fenômenos Observados na Extrusão

Segundo Bretas e D'Ávila (2005), quando um material polimérico é extrudado através de um canal estreito, ocorrem alguns fenômenos neste material. O inchamento do extrudado é caracterizado pelo aumento do diâmetro do extrudado em relação à matriz, ou capilar. Isso ocorre quando as tensões cisalhantes cessam e as macromoléculas que antes se encontravam estiradas no canal, tendem a voltar às conformações aleatórias de equilíbrio. Isso produz o encolhimento longitudinal e expansão lateral conforme visto na (Figura 15).

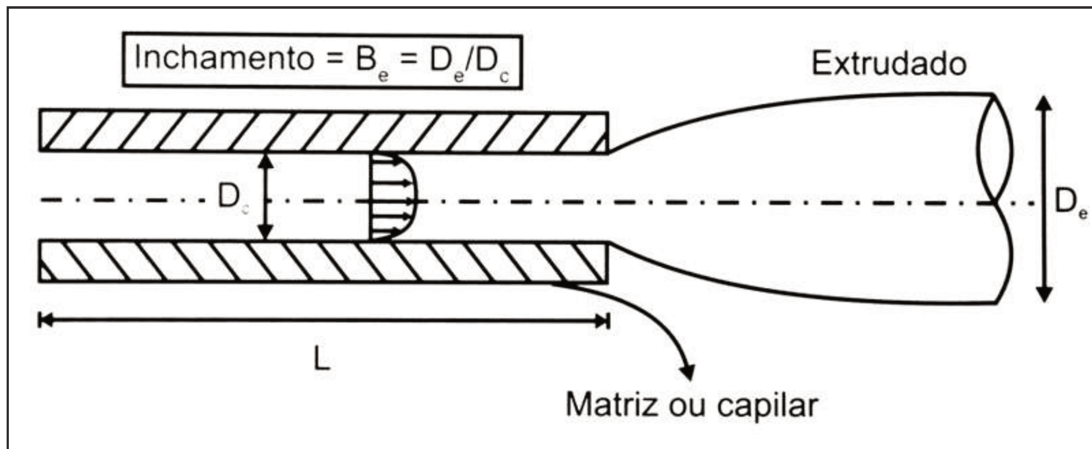


Figura 15 - Inchamento do Extrudado. Fonte: Bretas e D'Ávila (2005)

O inchamento do extrudado $B_e = D_e / D_c$, em que D_e = diâmetro do extrudado e D_c = diâmetro do capilar, aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento até um limite próximo à taxa de cisalhamento crítica $\dot{\gamma}_c$ após esse limite, o inchamento do extrudado diminui.

Outro fenômeno observado na extrusão é a fratura do fundido, caracterizado pela aparência irregular do extrudado, com formatos diferentes conforme pode ser visto na Figura 16.

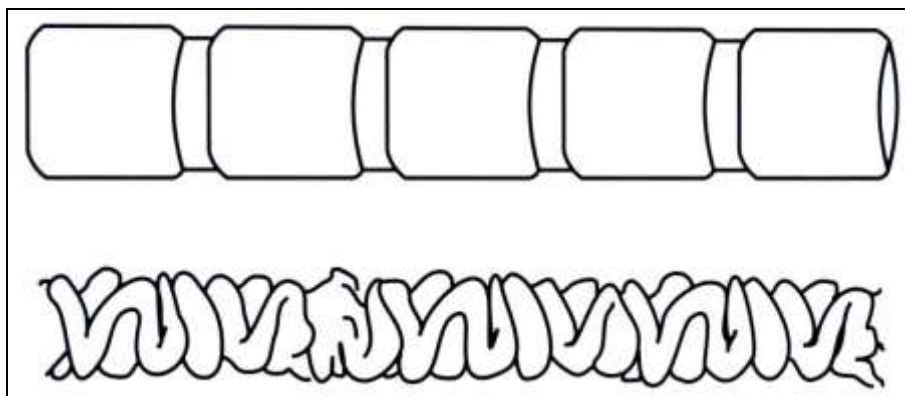


Figura 16 – Fratura do fundido. Fonte: Bretas e D'Ávila (2005)

A fratura do fundido ocorre acima da taxa de cisalhamento crítica γ_c . Esta taxa aumenta com o aumento da temperatura e também com o aumento da relação entre o comprimento da matriz e o seu diâmetro (L/D). É atribuído a este fenômeno, a interação do material da matriz com o polímero, pois supõe-se que a macromolécula adere à parede da matriz, sendo então tensionada axialmente por causa do emaranhamento com as outras moléculas. (Bretas; D'Ávila, 2005)

Um terceiro fenômeno que pode ocorrer em uma extrusão é a “pele de cação”, caracterizado pela irregularidade superficial que se forma ao longo do extrudado na direção do fluxo. Ele se diferencia da fratura, pois este ocorre apenas na superfície e não afeta a integridade do material. A “pele de cação” ocorre a taxas de cisalhamento menores e seu efeito é minimizado com o aumento da temperatura de processamento.

Estes fenômenos observados na extrusão de um polímero devem ser bem conhecidos e controlados em um processo FDM, pois o inchamento influencia diretamente no dimensional da peça a ser produzida, devendo este fenômeno ser compensado durante o planejamento do caminho da deposição do material. A fratura do fundido deve a todo custo ser evitada uma vez que a integridade e sucesso da conclusão da construção da peça dependem da qualidade e constância do filamento depositado. O efeito da “pele de cação” embora não aparenta ser crítico, deve igualmente ser evitado para se obter um bom acabamento superficial.

3. DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE EXTRUSÃO

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento do cabeçote de extrusão de filamento fundido para a plataforma Fab@CTI. É mostrando inicialmente os requisitos que nortearam os conceitos da versão preliminar e a sua construção. O projeto inicial conduziu a uma segunda e terceira versão, visando o uso do maior numero de polímeros possíveis. Ao final de cada versão, é discutido brevemente os motivos que levaram ao desenvolvimento da versão conseguinte

3.1. Metodologia do desenvolvimento

Este projeto teve como metodologia o desenvolvimento de projetos sucessivos a fim de implementar melhorias. Na primeira etapa, foram levantados os requisitos do usuário considerando as necessidades do usuário e as características técnicas da máquina Fab@CTI. Uma vez realizada esta etapa, foi elaborado um projeto conceitual em que foram definidos os materiais e as tecnologias a serem empregadas na construção do projeto.

3.2. Definição dos requisitos do usuário

Nesta etapa no desenvolvimento do projeto, foram levantados os requisitos básicos que atendam as necessidades do usuário bem como conhecer as restrições de projeto analisando as características encontradas na Fab@CTI.

1. Requisitos do usuário

- Utilização de material em forma de filamento: Devido a disponibilidade de filamentos de ABS provenientes do reuso de uma máquina comercial disponível no laboratório do CTI, bem como a possibilidade de se obter materiais poliméricos neste formato por meio de extrusoras.
- Uso de pequena quantidade de material para extrusão: Muitas vezes os materiais disponíveis para experimentos são criados em baixa quantidade a fim de se fazer testes piloto, assim de grande importância que o cabeçote de extrusão de adequa a este requisito.

- Uso de diferentes materiais: Por se tratar de um cabeçote de extrusão de polímeros, isso reflete quanto à faixa de temperatura que este pode alcançar a fim de promover a fusão bem como ter a capacidade de extrudar de forma controlada.
- Flexibilidade de configuração: Este deve ser capaz de ser modular com a finalidade de poder receber filamentos de diâmetros diferentes, porém este diâmetro deve ser constante para garantir uma extrusão consistente.
- Manutenção e usabilidade: Os usuários deste equipamento são provenientes de várias áreas da ciência, muitas vezes não familiarizado com este tipo de equipamento, logo, este deve ser de intuitiva operação e manutenção.

2. Restrições de Projeto

- Peso: É importante que o cabeçote seja o mais leve possível dado o projeto de construção da Fab@CTI, pois com peso excessivo, suas guias poderiam sofrer deflexão, ou ainda apresentar movimentação inadequada devido aos motores dos pórticos X e Y serem de baixa potência.
- Dimensão: A Fab@CTI tem uma amplitude de movimentação nos eixos X, Y e Z de 200x200x200 mm, no entanto é necessário que este seja o menor possível para um melhor aproveitamento do volume de trabalho.
- Formato: A existência de uma placa padrão de intercambiabilidade de cabeçotes definiu a geometria do acoplamento do protótipo à máquina, desta forma limitando ainda mais as dimensões do projeto, dada a forma e disposição dos elementos de encaixe mecânico e eletrônico.
- Eletrônica: Levaram-se em consideração as características do sistema de controle e acionamento disponíveis, objetivando padronizar os módulos existentes.

3.3. Desenvolvimento da solução construtiva

A partir do levantamento de requisitos de usuário e restrições do projeto apresentadas no item 3.2, foram desdobrados os principais parâmetros de projeto para o cabeçote de extrusão de filamento. A Tabela 3 apresenta as principais soluções técnicas identificadas para cada parâmetro.

O percurso indicado por uma linha indica a solução abordada para a primeira configuração do cabeçote de extrusão.

Tabela 3 - Análise morfológica parcial do cabeçote de extrusão por filamento

Parâmetro de Projeto	Soluções		
Acionamento	Motor de Passo	Motor DC	Servomotor
Tracionador do Filamento	Polia dentada	Polia com superfície emborrachada	Polia com superfície áspera
Elemento de aquecimento	Indutor	Resistência Elétrica Cartucho	Fio Niquel-Cromo (NiCr)
Sensor de temperatura	Termopar	Termistor	--
Controle de temperatura	Liga/desliga	Proporcional	PID
Estrutura	Fixa	Intercambiável	--
Bico de extrusão	Fixo	Intercambiável	--

O quadro morfológico é analisado observando os motivos da escolhas realizadas para as soluções selecionadas.

Para o acionamento do cabeçote, o motor de passo foi escolhido dada a configuração eletrônica existente da Fab@CTI, assim, não se faz necessário um re-projeto das placas de controle de motor tampouco da reescrita do software de controle. O motor em questão é um Nema 17 de 200 passos por revolução e *holding torque* de 155 mNm na configuração bipolar em série, modelo KTC-5017-008 adquirido na Kalatec Automação Industrial.

Dentre os tipos de polia, optou-se pelo modelo dentado, pois este oferece um melhor tracionamento do filamento termoplástico promovendo uma tração mais confiável em relação ao modelo áspero além de oferecer um maior tempo de vida útil em relação à polia de borracha.

Como elemento de aquecimento foi definido o uso de cartuchos de resistência elétrica por serem de fácil montagem, eficiente troca de calor, baixo custo em sua implementação e capacidade de atingir temperatura de até 750 °C. A resistência apresenta um dimensionamento de 6,35mm de diâmetro por 35mm de comprimento, 230VAC e 60W fabricados sob encomenda, duas unidades foram adquiridas na empresa Resist Aquecimento Industrial LTDA.

Para o controle de temperatura foram destacados três tipos: liga/desliga, proporcional e o PID (proporcional, integral, derivativo). O primeiro, liga e desliga a saída do controlador à medida que o sinal do erro ultrapassa a temperatura ajustada e por isso existe uma oscilação contínua na temperatura final no sistema. O controle proporcional consegue eliminar as inconvenientes oscilações presentes no controle liga/desliga, no entanto, há o aparecimento de erro de *off-set* (erro entre o valor desejado e o valor alcançado) quando da variação na carga. O terceiro tipo, PID, além de realizar o controle proporcional, tem a adição do controle integral e derivativo, que juntos, compensam automaticamente as variações das condições do processo como temperatura ambiente ou carga de material no sistema.

Dado os benefícios do sistema PID, este foi escolhido para o controle de temperatura da região aquecida. Foi utilizado o modelo Series 965 da Watlow® disponível no laboratório do CTI. Este controlador tem um sistema de auto-ajuste, o qual se adéqua ao sistema controlado. Para o sensoramento foi empregado um termopar tipo “J” dada a temperatura de trabalho da resistência e o modelo do controlador de temperatura.

A fixação do cabeçote à máquina é intercambiável, dada a configuração pré-existente da Fab@CTI, facilitando a manutenção e apresentando a possibilidade de adaptação à outras máquinas. O bico de extrusão é intercambiável devido a necessidade de adaptar o cabeçote para a entrada de filamentos de diâmetros dentro da faixa aproximada de 1,80 a 3,00 mm, bem como o diâmetro do filamento na saída para a construção das geometrias.

A Figura 17 mostra o diagrama de funcionamento do cabeçote de extrusão de filamento no sistema da Fab@CTI. Em relação ao sistema original, houve pouca alteração, sendo esta apenas a adição do controlador de temperatura, seguida do relê de estado sólido (SSR), termopar e resistência elétrica.

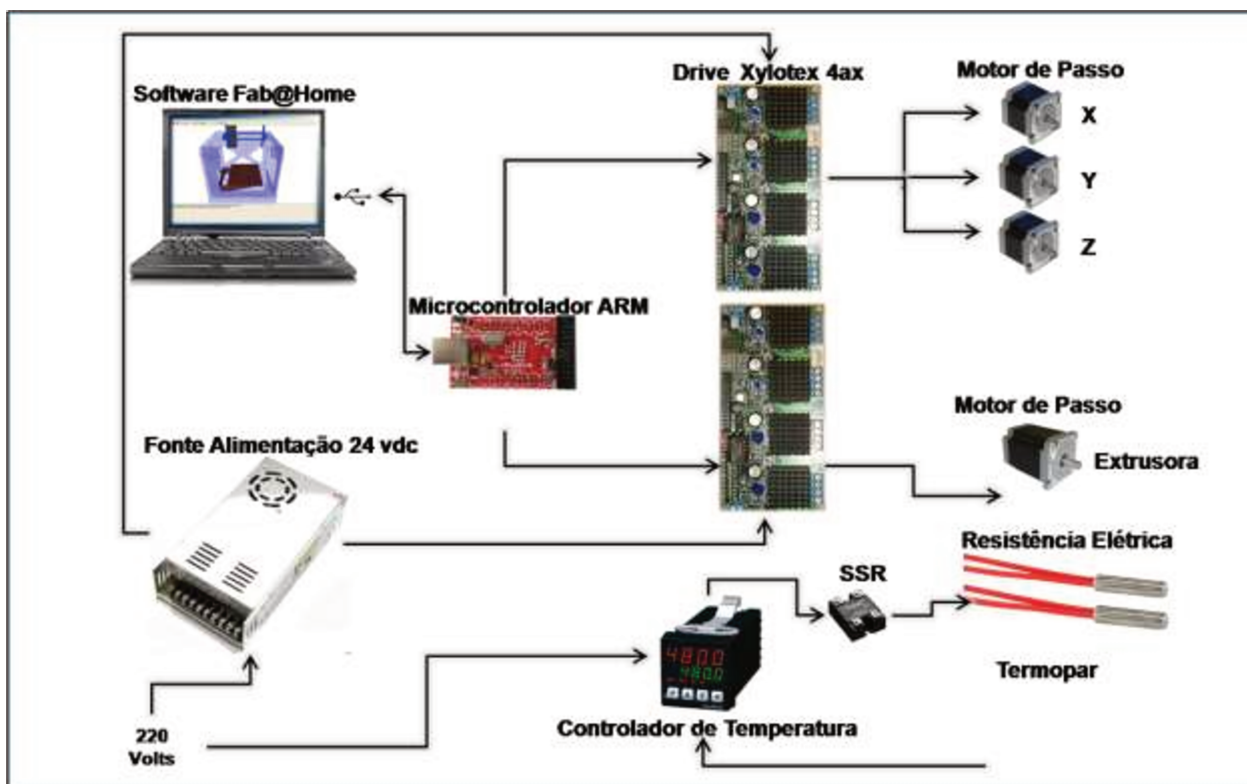


Figura 17- Diagrama funcional do cabeçote de extrusão no sistema da Fab@CTI. Adaptado de Inforçatti (2014).

3.4. Desenvolvimento da solução construtiva

Na etapa de concepção da configuração do cabeçote, levou-se em consideração não só os requisitos do usuário, mas também os componentes definidos por meio o quadro morfológico (Tabela 3) visto no item 3.3. Com as dimensões do motor de passo, resistência elétrica e termopar, estes foram modelados esquematicamente no SolidWorks® 2009 visando o volume e conexões, com isso foi possível realizar um estudo de distribuição destes componentes em uma placa base modelada para encaixar no sistema intercambiável existente da Fab@CTI. Uma vez que os componentes existentes foram posicionados na placa intercambiável, os outros elementos do cabeçote foram definidos conforme a necessidade.

A polia tracionadora do filamento (Figura 18) teve seu dimensionamento e distribuição dados pelo posicionamento central do bico extrusor, em relação à plataforma intercambiável (para um melhor aproveitamento do volume de construção), bem como a disponibilidade comercial de correia sincronizadoras MXL. Uma vez que a polia existente para o diâmetro do eixo do motor de

passo é deste padrão. O resultado é uma definição mutua pelo modelo da correia dentada MXL 920, e o diâmetro da polia tracionadora de 38 mm e distancia do eixo do motor ao eixo da polia de 58 mm, com folga para ajuste de tensão da correia $\pm 2,5$ mm. Assim, uma relação de transmissão de 1:3 foi utilizada para o tracionamento do filamento.



Figura 18 - Desenho CAD da polia tracionadora.

Uma vez gerada a polia tracionadora, seguiu-se a modelagem do sistema responsável por pressionar o filamento contra a polia tracionadora. Este sistema (Figura 19) permite o ajuste manual da distancia entre a polia tracionadora e a polia pressionadora para acomodar filamentos com diâmetro entre 1,80 e 3,00 mm.

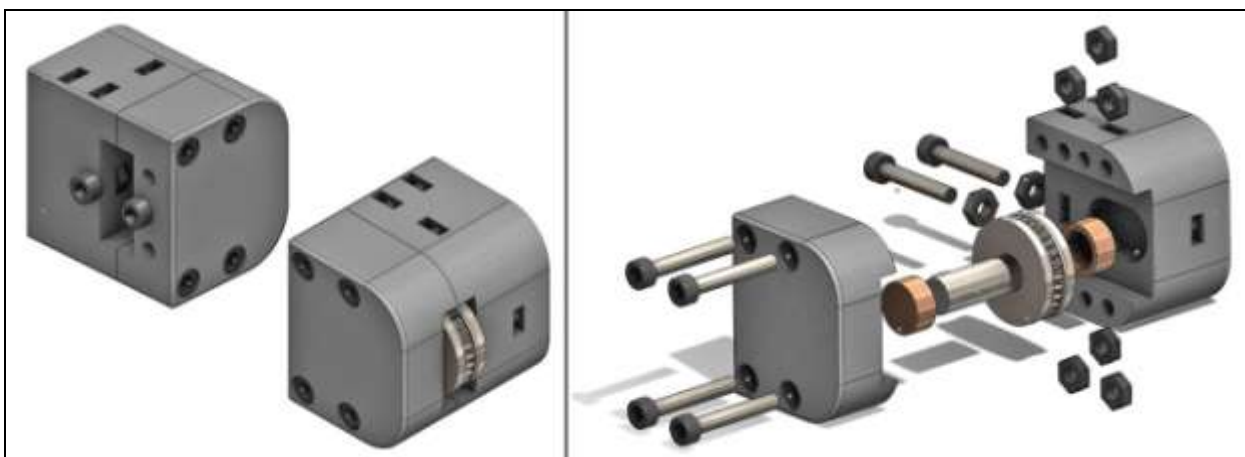


Figura 19 - Sistema de pressionamento do filamento.

Com o propósito de se conceber a região de aquecimento do cabeçote extrusor foi estudado o sistema da máquina FDM Vantage i (Figura 20) disponível no laboratório DT3D do CTI. A região aquecida desta máquina é feita de aço inoxidável e tem sua abertura frontal para troca e manutenção do bico extrusor, sendo este bloco fixado por dois parafusos. Todo o comprimento do corpo em aço inoxidável é aquecido para liquefazer o termoplástico. O termopar para leitura da temperatura é posicionado na parte mediana do bloco aquecido. Um escudo de material para o isolamento térmico é utilizado entre o bloco aquecido e a superfície de construção da peça, para evitar o aquecimento das peças impressas por meio da radiação térmica durante a deposição.

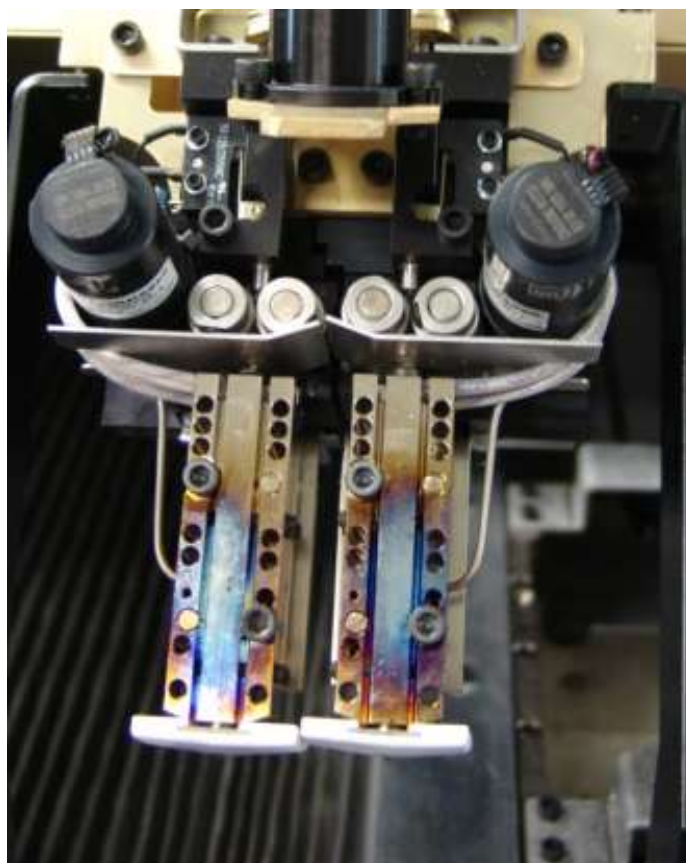


Figura 20 - Região aquecida da maquina comercial FDM da Vantage i®

Baseado nessas observações definiu-se um modelo de bico extrusor semelhante ao da máquina comercial, no qual o tubo que guia o filamento é unido de forma permanente ao bico propriamente dito. Com esta idéia, buscou-se uma solução para o tubo, optando-se por um tubo de aço inox com diâmetro interno de 1,80 mm, dado o diâmetro de filamento das máquinas

comerciais, que além deste, é possível mudar o diâmetro interno para acomodar outros filamentos de diâmetros diferentes. A solução comercial encontrada para este componente foi o uso de tubo trefilados de inox. Sendo o diâmetro interno definido como 1,80 mm, o fabricante informou que o diâmetro externo resultante é de 5,00 mm +/- 0,10mm. Estes tubos foram adquiridos na empresa Treficap Indústria de Conformação e Trefilação em São Paulo. Para compor o bico de extrusão, foram escolhidas agulhas metálicas cirúrgicas para saída do filamento fundido. Esta escolha ocorreu em função do objetivo inicial de se utilizar o máximo de componentes disponíveis no mercado nacional. O tubo de aço inox e o bico foram unidos por uso de soldagem, utilizando liga a base de prata como elemento de fusão. Na Figura 21 é possível ver os bicos da Vantage i (Figura 21a) e o do cabeçote de extrusão da Fab@CTI (Figura 21b) e em maior detalhes dos bicos na Figura 21c e dos tubos Figura 21d.

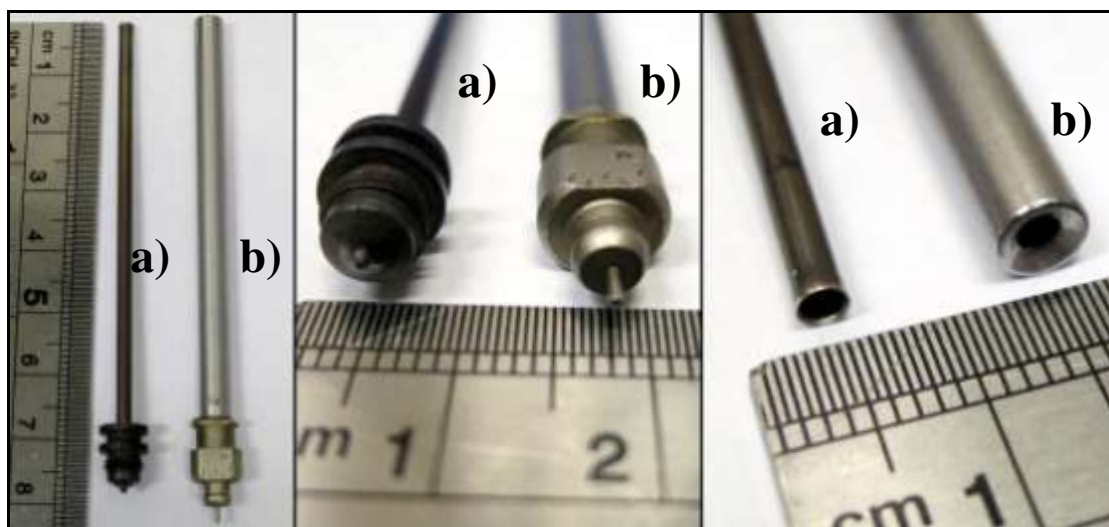


Figura 21 - Bicos extrusores. a) Bico Vantage i; b) Bico da Fab@CTI.

Uma vez definido o bico de extrusão, passou-se à escolha do material da região aquecida para integrar as resistências elétricas, o termopar e o bico. Foram eleitos o aço inox, o alumínio e o latão para a sua construção e a escolha foi realizada por meio de uma análise crítica de vários fatores tais como, densidade, condutividade térmica, calor específico e usinabilidade. Estes dados foram condensados na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais para região aquecida.

Material	Densidade $\frac{kg}{m^3}$	Condutividade de térmica isotrópica $\frac{W}{m.C}$	Calor Específico $\frac{J}{kg.C}$	Usinabilidade
Aço inox	8055	13,8	480	Baixa
Alumínio	2689	237,5	951	Alta
Latão	8600	111	162	Alta

O alumínio foi o material de escolha devido primeiramente pela sua alta condutividade térmica que se traduz em uma transferência de temperatura mais rápida e seu alto calor específico que se traduz em quantidade de energia necessária para aquecê-lo, que embora seu aquecimento inicial seja mais lento que os demais, o benefício se traduz em uma estabilidade térmica maior. Outro fator levado em consideração é a sua densidade, de aproximadamente três vezes menor do que a dos outros materiais e quanto a usinabilidade, este apresenta uma usinabilidade alta, que na prática se traduz em maior velocidade de execução. Assim, com o material da região aquecida definido, foi elaborado um modelo CAD (Figura 22) para agrupar todos os componentes visando ser o mais compacto possível.

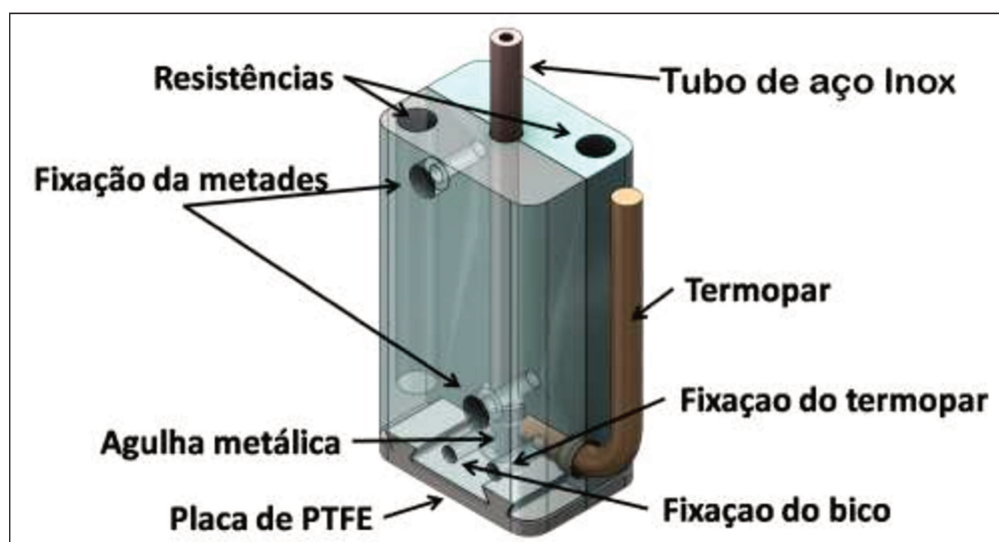


Figura 22 - Região aquecida da Fab@CTI.

Para integrar todas as partes anteriormente discutidas, levou-se em consideração na elaboração e construção do cabeçote as tecnologias de MA disponíveis no laboratório do CTI Renato Archer obtendo um modelo em CAD modelado no Solidworks 2012 apresentado na Figura 23. Cada peça foi projetada para fazer melhor uso das propriedades dos materiais e processo de cada tecnologia. A placa traseira, tampa, tubo guia, suporte da polia e dobradiças, foram feitas em SLS com poliamida Nylon-6 na máquina HiQ devido à sua resistência mecânica. As polias do sistema tracionador e sistema de pressão que por se tratar de geometrias mais críticas quanto ao dimensional foram feitas em FDM com ABS P400 na Vantage i. Todas as peças foram fixadas por meio conjuntos de parafusos e porcas, permitindo a modularidade e facilidade de montagem.

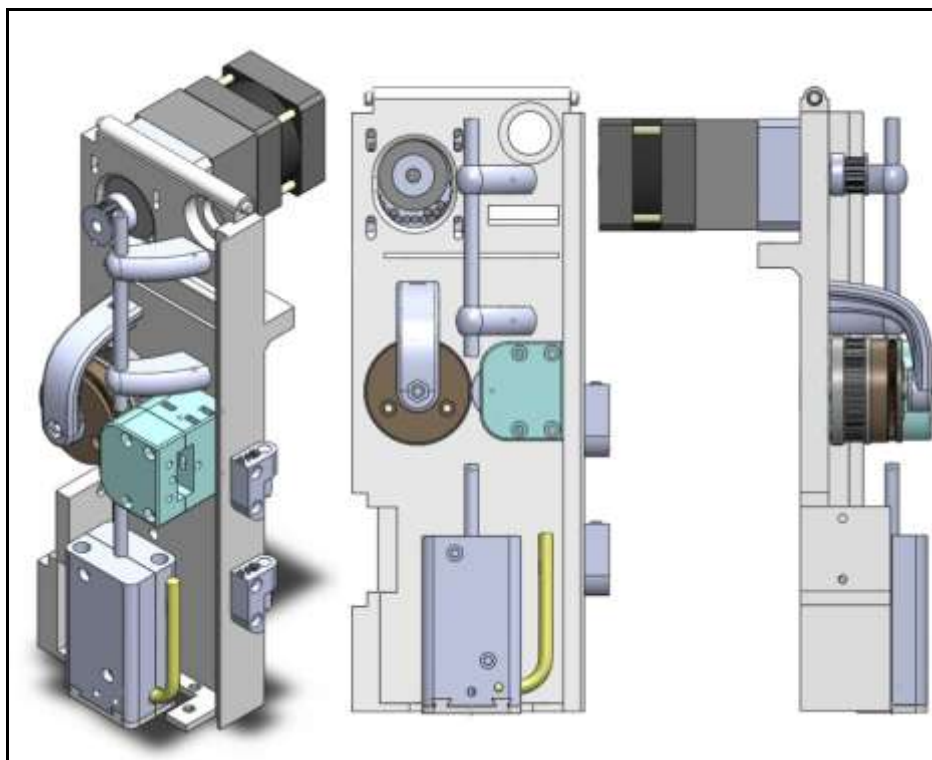


Figura 23 - Modelo tridimensional CAD da primeira versão do cabeçote de extrusão.

3.5. Construção do projeto funcional

Conforme as decisões tomadas no item 3.4, deu-se início à construção de um protótipo funcional da versão preliminar. Uma vez com o modelo CAD 3D, foi uma questão de converter o arquivo de cada peça no formato STL e impresso nas máquinas de MA (Figura 24) no quais a

tampa, placa base, tubo guia e apoio da polia tracionadora foram feitas por meio da tecnologia SLS e a polia tracionadora e caixa de tensão feitas em FDM. O bloco da região aquecida em alumínio foi usinado (Figura 25) na oficina nas dependências do CTI.

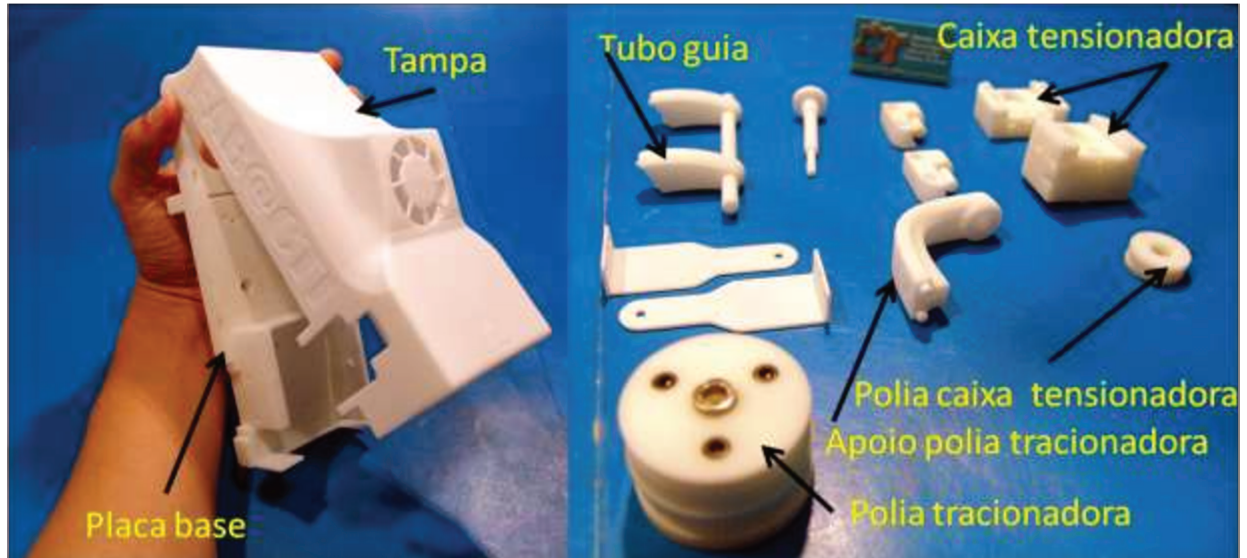


Figura 24- Peças do cabeçote de extrusão feitas por meio da MA.



Figura 25 - Bloco da região aquecida feito por meio da usinagem.

Após a impressão, foi montado todo o sistema (Figura 26) e então conectado à Fab@CTI, com isso deu-se início à fase de validação experimental do conjunto.

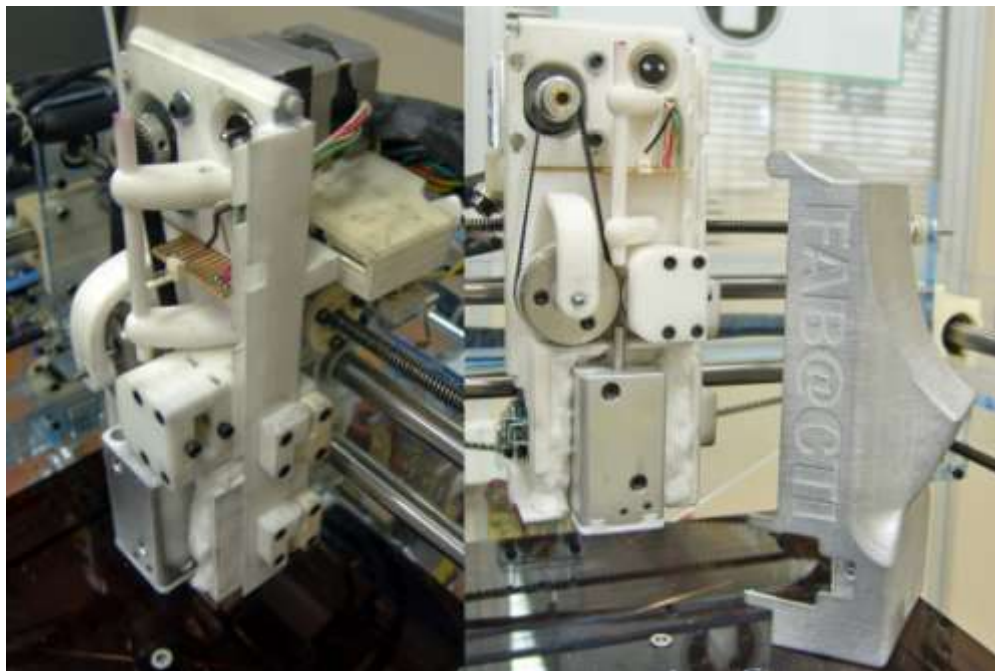


Figura 26 - Sistema montado e conectado à Fab@CTI para validação experimental.

3.5.1. Validação experimental da primeira versão do cabeçote

Com a finalização do projeto do cabeçote e sua interface com o software, procedeu-se a sua avaliação e validação funcional.

A polia tracionadora e a polia da caixa tensionadora feita em ABS não fornece atrito suficiente para tracionar os filamentos de PCL falhando por patinação. Embora a parte de tração da polia não tenha tido sucesso, a transmissão por correia se mostrou adequada.

A região aquecida não obteve êxito em sua função, o que foi identificado nos testes práticos, quando a temperatura era configurada a 90 °C, valor de trabalho do PCL, a região de entrada do filamento encontrava-se à mesma temperatura do bloco, causando o amolecimento prematuro do filamento. Assim, este não formava o embolo dinâmico para sua extrusão através do tubo até o bico de saída.

A partir desses resultados, foi proposta uma segunda versão do cabeçote de extrusão para implementação de melhorias, visando solucionar os problemas identificados.

3.6. Segunda versão do cabeçote de extrusão

A polia tracionadora (Figura 27) em ABS atendeu ao requisito de realizar a transmissão do movimento pela correia, porém falhou em tracionar o filamento de PCL, por este motivo optou-se por separar estas duas funções. A polia foi bi-partida, ficando a metade dedicada à transmissão do movimento em ABS e a outra metade responsável pelo tracionamento do filamento em metal, neste caso, em liga de titânio (Ti6Al4V) impresso na máquina da EOS M270 disponível na Faculdade de Engenharia Química da Unicamp.

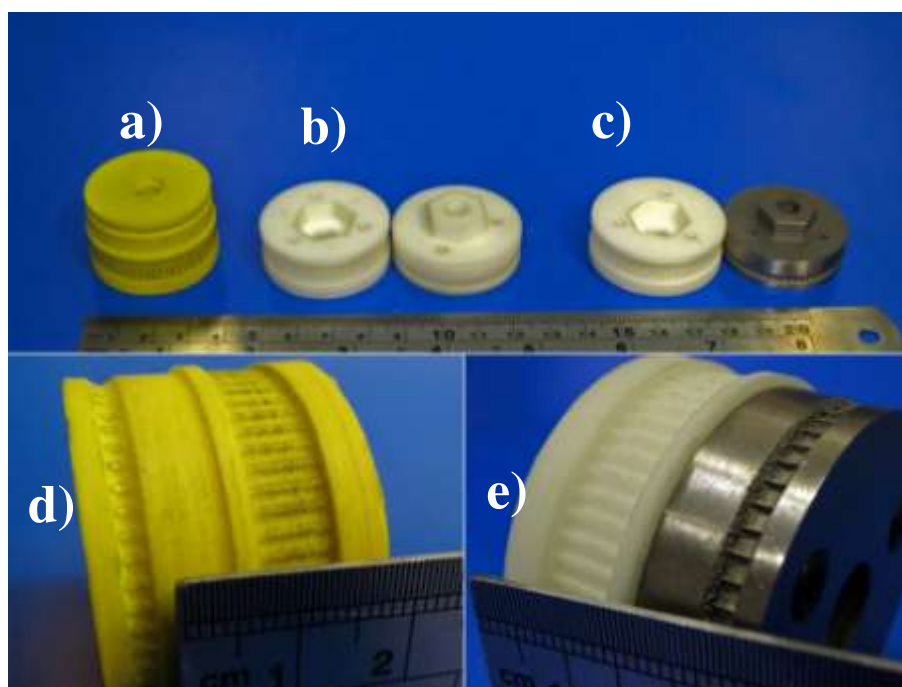


Figura 27 - Polia tracionadora. a) Versão totalmente em ABS. b) Teste de viabilidade em ABS. c) Peças em ABS (branco) e titânio (cinza). d) Detalhe dos dentes amassados. e) Detalhe dos dentes em metal.

A polia da caixa do tensionador apresentada na Figura 28 também passou por modificações. Inicialmente impressa em ABS, a polia e os mancais não resistiram ao esforço exigido, passando assim a serem construídos em metal. A nova polia é feita por meio de MA em titânio, o eixo em aço inox e os mancais feitos em latão foram usinados.

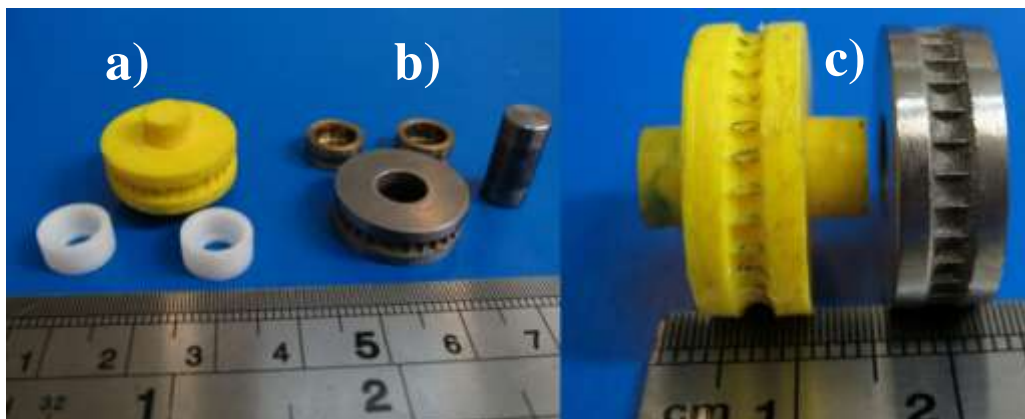


Figura 28 - Polia da caixa de pressão. a) conjunto em ABS. b) conjunto em metal. c) detalhe dos dentes.

Baseado no conhecimento prático observado na região aquecida da versão preliminar, uma reformulação sugerida deste sistema foi modelada em CAD (Figura 29) com as seguintes modificações:

- A fim de facilitar a limpeza e desbloqueio dos bicos, este passou a ser constituído de duas partes unidas por rosca M5: tubo de inox e o bico propriamente dito.
- O bico de agulha metálica foi substituído por bicos cônicos usinados em latão. Esta modificação se deu pela necessidade de aumentar a distancia entre o bloco de alumínio aquecido e a peça em construção, pois a radiação do bloco retardava o resfriamento dos filamentos depositados, causando deformações nas peças impressas em PCL.
- Blocos de alumínio foram usinados para segurar o tubo de inox. O bloco superior segura um tubo próximo ao sistema tracionador enquanto o bloco inferior segura o tubo de inox que conduz o filamento à região aquecida.
- A região aquecida passou a cobrir uma altura de 25,40 mm contra 60 mm da versão anterior e a ventoinha antes fixada na tampa, passou a ser fixada no cabeçote para refrigeração do tubo. Estas duas modificações visaram a diminuição da região de material fundido e a formação do embolo dinâmico no interior do tubo.

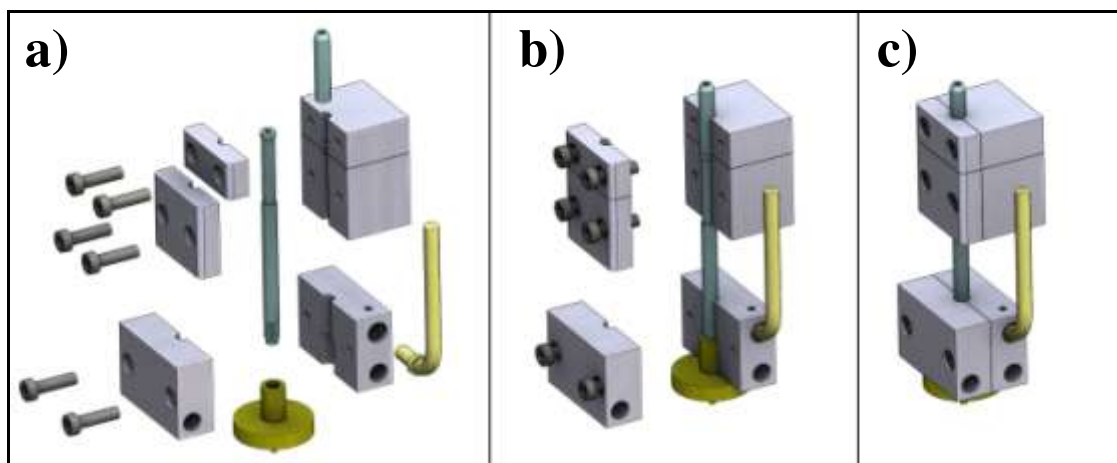


Figura 29 - Região aquecida reformulada. a,b) Vista CAD explodida c) Modelo CAD montado.

As modificações foram integradas no novo modelo virtual (Figura 30a) e implementadas conforme apresentada na Figura 30b.

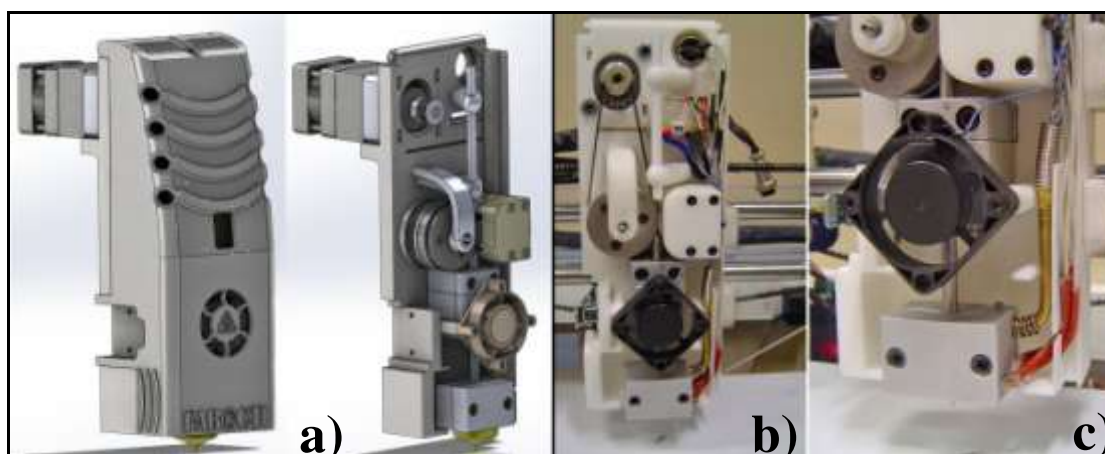


Figura 30 – Segunda versão do cabeçote. a) Modelo CAD; b) Cabeçote implementado; c) Detalhe da região aquecida.

3.6.1. Análise da segunda versão

Com o cabeçote montado e conectado à Fab@CTI, foram conduzidos ensaios de extrusão de filamentos de ABS e PCL com a finalidade de observar a funcionalidade das melhorias implementadas. Para isto os parâmetros da máquina visto na Tabela 1 do item 2.6 foram levantados empiricamente por meio de experimentos até obter valores com resultado consistente com o modelo virtual. Este procedimento consta em escolher valores iniciais aproximados

baseados em dados do sistema como o diâmetro do bico e velocidade de impressão da Fab@CTI. Assim para averiguação e refinamento destes valores foram impressas geometrias (Figura 31) base de 20x20 mm ao longo do eixo Z.

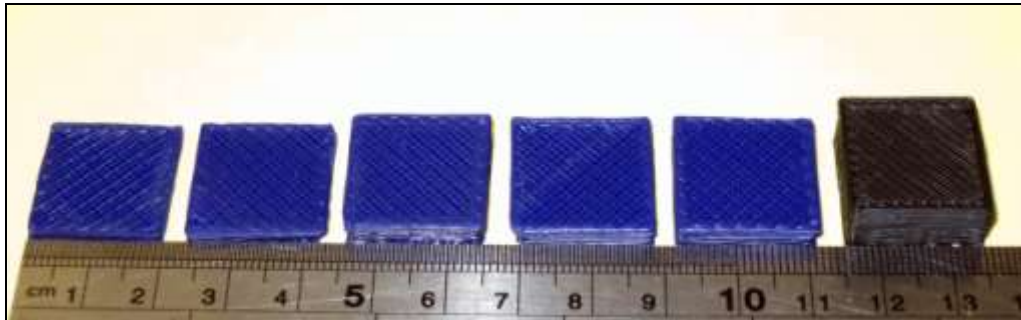


Figura 31 - Modelos impressos para calibração dos parâmetros do cabeçote.

Neste teste foram utilizados filamentos de 1,80 mm de diâmetro de ABS modelo P-400 da Stratasys® utilizando bico com saída de diâmetro 0,40 mm de diâmetro, tubo guia de 2.2 mm de diâmetro interno e temperatura de extrusão de 210°C. Utilizando o bico de 0.40 mm de diâmetro de saída, foi obtida a altura de camada de 0,40 mm e largura de filamento de 0.52 mm. A velocidade de deposição variou entre 3 e 10 mm/s. Os parâmetros obtidos podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para extrusão de ABS

Parâmetros da Ferramenta de Deposição para ABS	
TIPDIAM	0,40 mm
PATHWIDTH	0,52mm
PATHHEIGHT	0,40mm
PUSHOUT	0,82s
SUCKBACK	0,45s
DEPOSITIONRATE	0,08
PATHSPEED	3,0 a 10,0 mm/s

Devido à demanda em pesquisas de *scaffolds* de PCL, este foi o material utilizado nos testes iniciais para a definição dos parâmetros de impressão. Utilizando o bico de extrusão com diâmetro de saída de 0,4mm, foram inseridos filamentos de PCL CAPA 6505 de 2,0 mm de diâmetro no sistema. Baseado no ponto de fusão do PCL a temperatura inicial ajustada foi de 60°C sendo gradativamente elevada até chegar a temperatura de 90°C. Nesta temperatura, o

material tornou-se viscoso o suficiente permitindo uma extrusão contínua. Uma análise feita com difração de raios-X (DRX) indicou que não houve degradação do material após extrudado, mantendo inalterada a estrutura cristalina (Senedese, 2011).

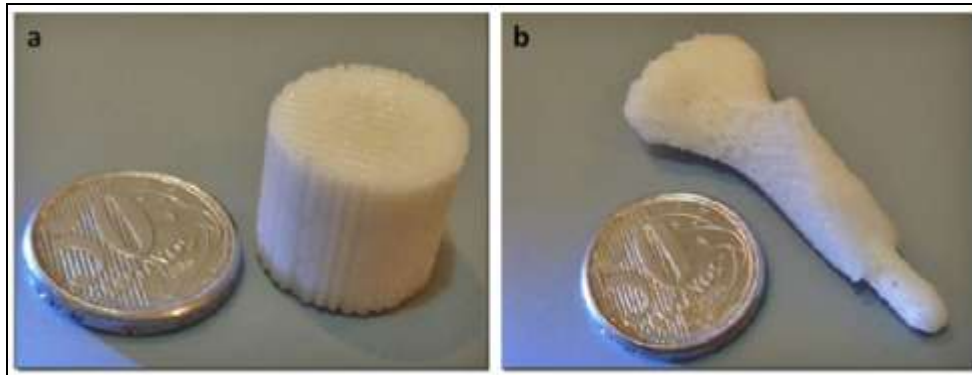


Figura 32 -Alguns resultados com PCL fabricados na Fab@CTI, sendo eles uma *scaffolds* de 50 camadas (a) e um cômulo. Fonte: Senedese 2011.

A velocidade de extrusão usada para o PCL foi obtida por meio de experimentos. A velocidade máxima de trabalho da Fab@CTI é de 15 mm/s. Assim essa velocidade foi adotada para o limite superior para a taxa de deposição do PCL nesta plataforma. Porém, o PCL apresentou um longo tempo de solidificação, o que causou o colapso da geometria quando da impressão de peças com base inferior a 15 mm de diâmetro. Por este motivo, verificou-se a necessidade de ventilação forçada direcionada para a peça produzida. Com esses ajustes, foi definida uma velocidade de extrusão de 6,0 mm/s para a impressão de *scaffolds*, obtendo-se uma espessura de camadas de 0,40 mm.

Tabela 6 - Parâmetros para extrusão de PCL

Parâmetros da Ferramenta de Deposição do PCL	
TIPDIAM	0,40 mm
PATHWIDTH	0,69 mm
PATHHEIGHT	0,38 mm
PUSHOUT	0,80 s
SUCKBACK	0,55s
DEPOSITIONRATE	0,075
PATHSPEED	6,0 mm/s

Devido à elevada temperatura de fusão para deposição do ABS (entre 210°C e 230°C), comparada com o PCL, cuja temperatura para deposição é de 90°C, foi observado que o gradiente de temperatura que se formou ao longo do tubo no qual o filamento é conduzido até a região de fusão, deve ser bem controlado, mantendo o mínimo comprimento possível entre a região fundida e a região sólida do filamento, pois na região de transição, o material se torna altamente viscoso, gerando um grande atrito com a parede do tubo, que por sua vez impede a extrusão, sendo esta a possível causa de falhas neste sistema quando da deposição do ABS.

Quando surgiu a necessidade de se construir *scaffolds* com o poli(ácido) láctico (PLA) sob a temperatura de trabalho de 170° C, a extrusão fora imediatamente interrompida, levando a necessidade de um re-projeto da região aquecida.

3.7. Terceira versão do cabeçote de extrusão

Com foco na região aquecida, esta terceira versão do cabeçote fez uso do *software* de análise de elementos finitos ANSYS versão 14 com o módulo de Transiente Térmico (Apêndice A) , para analisar a propagação da temperatura na região aquecida do primeiro cabeçote de extrusão (Figura 33a) bem como o proposto (Figura 33b) com as seguintes alterações: realocação da ventoinha para um melhor fluxo de ar, dissipador aletado de alumínio no tubo de inox e diminuição da massa do bloco aquecido em 50%.

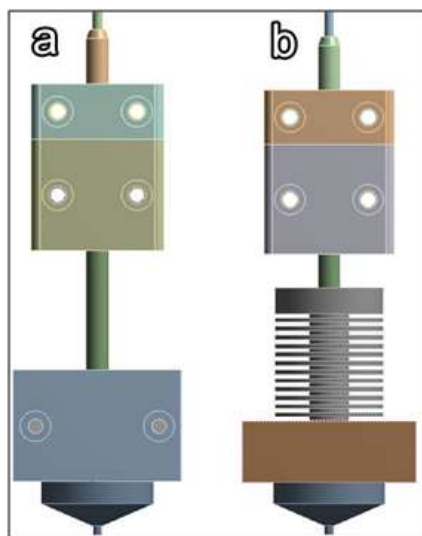


Figura 33 – Modelos CAD da região aquecida da (a) segunda versão e (b) terceira versão.

As propriedades, tanto dos materiais para extrusão quanto dos materiais estruturais do cabeçote FDM são listadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações.

Materiais	Densidade $\frac{kg}{m^3}$	Condutividade térmica isotrópica $\frac{W}{m \cdot C}$	Calor Específico $\frac{J}{kg \cdot C}$
ABS	1040	0,2	2000
PCL	1110	0,4	850
PLA	1072	0,2	1800
Alumínio	2689	237,5	951
Latão	8600	111	162
Aço Inoxidável	8055	13,8	480

Primeiro foi feita a simulação considerando o PCL cuja temperatura de fusão é de 60°C. Foram feitos testes prévios, para configurar a melhor temperatura de trabalho, determinada em 90°C, assim esta foi a temperatura máxima usada na simulação (Figura 34). No cabeçote desta versão, com dissipador, o sistema entrou em regime permanente no tempo de 60 segundos, enquanto que no projeto anterior, a temperatura estabilizou no tempo de 270 segundos.

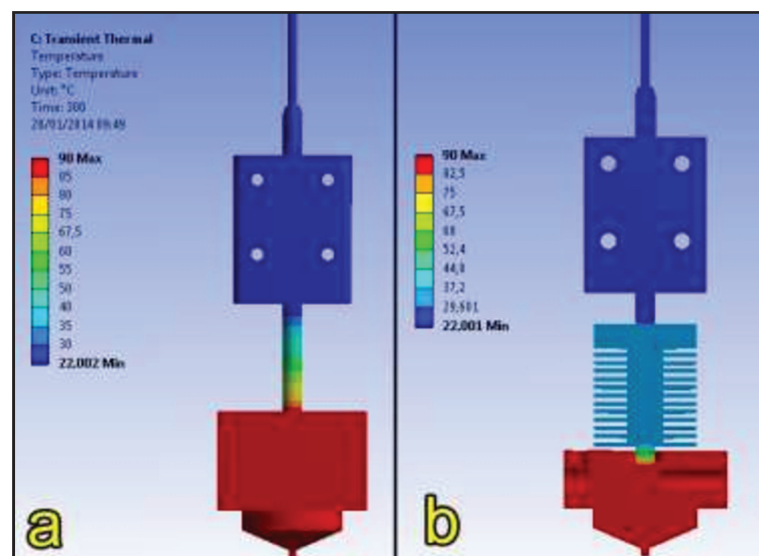


Figura 34 – Simulação com PCL. a)segunda versão; b)terceira versão.

Na simulação do poli-ácido láctico (Figura 35), a temperatura de trabalho ajustada foi de 170 °C. As características de condutividade e capacidade térmicas do PLA foram retiradas de *Moldflow Material Testing Report MAT2238 NatureWorks* (2007). Enquanto o bico extrusor está a 170 °C, o dissipador se encontra à temperatura ambiente.

No cabeçote anterior, o sistema entrou em regime permanente aos 200 segundos. Na terceira e atual versão, o sistema entrou em regime permanente aos 150 segundos.

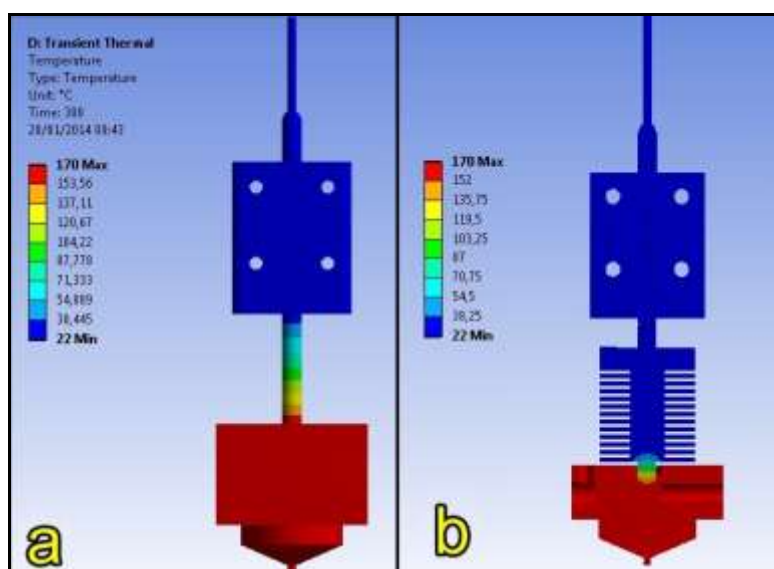


Figura 35 - Simulação com PLA a)segunda versão; b)terceira versão.

O ABS atinge o ponto de fusão a partir da temperatura de 175°C sendo e a temperatura de trabalho de 220 °C. Estes dados foram inseridos na simulação. O sistema entrou em regime permanente para a versão atual em 150 segundos enquanto o anterior em 220 segundos.

A Figura 36 mostra como ocorreu a propagação da temperatura ao longo dos elementos do cabeçote, indo do bloco aquecido, passando pelo tubo de aço inox e dissipador aletado.

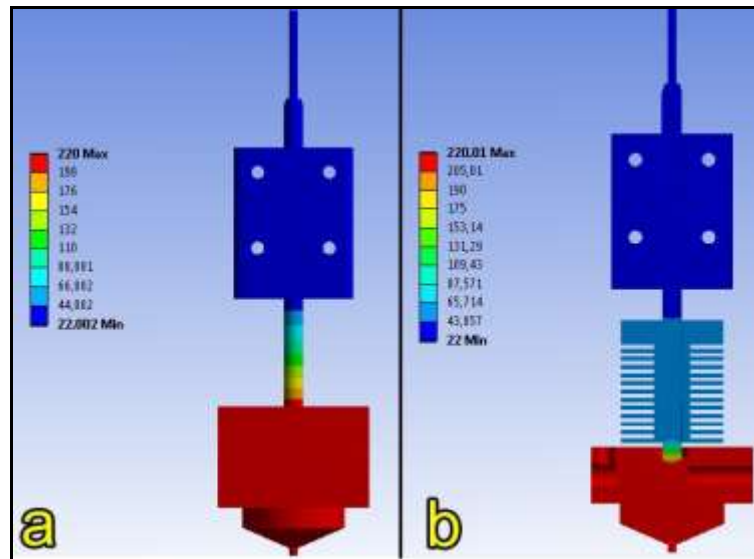


Figura 36 - Simulação com ABS a) segunda versão; b) terceira versão.

De posse destas análises, o modelo sugerido foi implementado (Figura 37) e testes de impressão foram conduzidos utilizando PCL, PLA e por ultimo ABS.

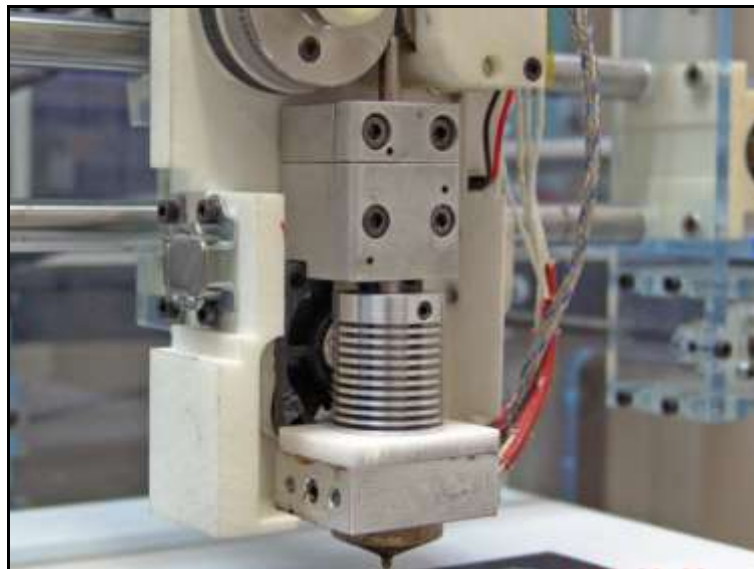


Figura 37 – Terceira versão do cabeçote– Região Aquecida.

3.7.1. Análise da terceira versão do cabeçote

A simulação térmica utilizando elementos finitos mostrou uma melhor distribuição de calor no tubo de aço inox, reduzindo a propagação de calor. Com a temperatura do bico extrusor

estabilizada em 90 °C, o dissipador mantém o tubo de inox em aproximadamente 30 °C, que é uma condição favorável, uma vez que a temperatura de transição vítrea de PCL é de 60 °C. Através da utilização experimental do material PCL, verificou-se que ele funciona de maneira adequada: apresentou deposição contínua e controlada, para a segunda e terceira configuração de região aquecida.

A análise numérica indicou que o início do tubo de aço inox, próximo à entrada estava por volta dos 66° C, ou seja, acima da T_g , sendo esta a possível causa dos travamentos do filamento. Com a terceira configuração, há uma significativa diminuição do gradiente de temperatura ao longo do eixo do tubo, ficando este gradiente restrito nas proximidades do bloco aquecido. Desta forma a fusão do filamento de PLA ocorre próximo ao bloco aquecido. Em experimentos práticos, estas análises se confirmaram verdadeira, uma vez que a impressão com PLA (Figura 38) ocorreu de forma contínua e controlada.

Tabela 8 - Parâmetros para extrusão de PLA

Parâmetros da Ferramenta de Deposição do PLA	
TIPDIAM	0,30 mm
PATHWIDTH	0,55 mm
PATHHEIGHT	0,34 mm
PUSHOUT	0,90 s
SUCKBACK	0,50s
DEPOSITIONRATE	0,085
PATHSPEED	8,0 mm/s



Figura 38 - Impressão 3D de uma estrutura porosa de PLA, com formato de côndilo. Fonte: (Fermín, 2012).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões das versões dos cabeçotes descritos no Capítulo 3 e conforme visto na fundamentação teórica, no Capítulo 2, a Fab@CTI encontra-se em um contexto de pesquisas voltadas principalmente para bioengenharia, assim, varias publicações derivadas do desenvolvimento deste cabeçote de extrusão (Apêndice B), estão relacionadas à geração de *scaffolds* de polímeros bio-compatíveis como o PCL, PLA e PBH, por isto neste capítulo também serão expostos alguns destes resultados além de outros utilizando o plástico de engenharia ABS, como forma de validação deste projeto.

4.1. Análise dos cabeçotes

Uma primeira característica a ser observada no protótipo funcional é a sua modularidade, a qual permite que os componentes possam ser modificados individualmente, sem que haja a necessidade de um re-projeto de todo o sistema, tornando-o uma plataforma flexível para melhorias e exploração de novas idéias.

Outro fato é que este cabeçote foi concebido para fazer uso das tecnologias de MA em seus componentes. Ficaram evidenciadas as vantagens desta abordagem, uma vez que novos modelos e idéias foram rapidamente implementadas, ao passo que se manteve a capacidade de gerar peças complexas.

O sistema motriz que compreende o motor, a polia e a caixa de pressão, constitui um subsistema que cumpriu sua função ao tracionar de forma adequada diferentes filamentos poliméricos. Nos primeiros estágios de desenvolvimento, este subsistema tornou-se estável e funcional, levando a maior atenção deste projeto para a região aquecida.

A versão preliminar (Figura 39a) foi importante para o conhecimento do funcionamento global do sistema do cabeçote. Com o modelo implementado, foi possível verificar que o peso final (1,20kg), volume e disposição dos componentes foram adequadas à plataforma Fab@CTI, permitindo fácil interface com o usuário.

Na segunda versão (Figura 39b) e terceira versão (Figura 39b) na qual foram feitos re-projetos da região aquecida, foi possível realizar a extrusão de filamentos, ajustar adequadamente os parâmetros para impressão e então estruturar geometrias tridimensionais de ABS, PCL, PLA e PHB.

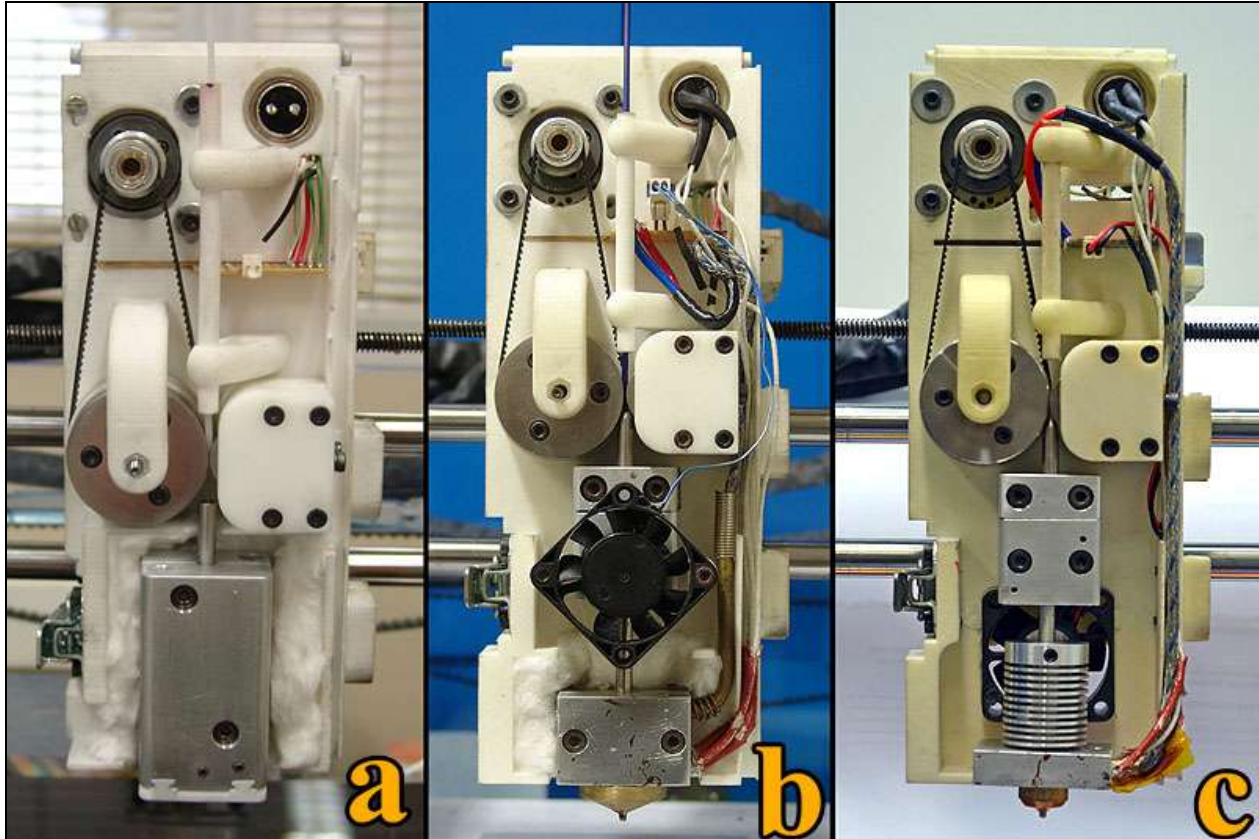


Figura 39 - Cabeçotes de extrusão. a) versão preliminar; b) segunda versão; c) terceira versão

Quanto à análise térmica, o modelo aplicado na simulação é bastante simplificado primeiramente devido ao contato dos filamentos com a parede interna do tubo de aço inox ser de 100% enquanto que na prática existe um espaço. Outra simplificação é que o filamento encontra-se estático no sistema. Embora esta seja um do cenário real, seria interessante também uma simulação dinâmica onde o filamento é aquecido e extrudado, para se obter dados quanto à formação do embolo dinâmico em diferentes taxas de alimentação e temperatura. Embora tenha

sido uma simulação simplificada, esta se mostrou válida ao propósito sugerido, que foi de analisar o gradiente térmico ao longo do tubo de aço inox do sistema.

4.2. ABS

Durante os testes de impressão com filamentos de ABS, ocorreu o seu travamento em algum momento da impressão, e não teve uma extrusão contínua como esperada. Foi possível determinar que este fenômeno de travamento ocorreu exatamente na linha de entrada do bloco aquecido (Figura 40a), ao retirar manualmente o filamento do tubo de aço inox e posicionar externamente no sistema. Neste ponto, o filamento encontra-se inchado (Figura 40b) com consistência borrachosa, levantando a hipótese que este está gerando assim grande atrito com as paredes do tubo, e impedindo seu fluxo pelo canal de saída.

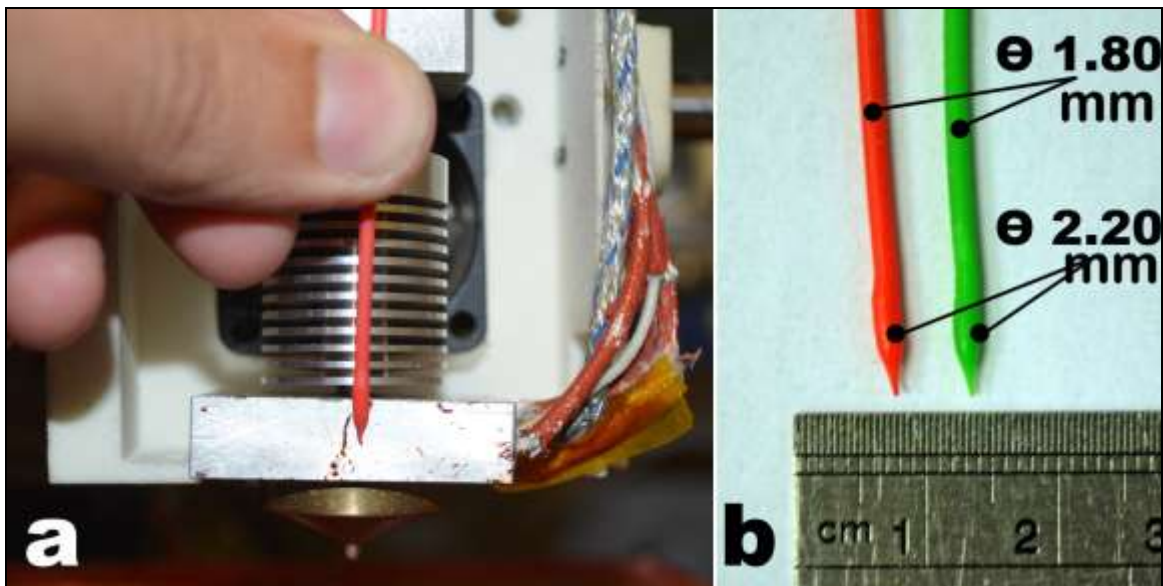


Figura 40 - Defeito com ABS. a) Local identificado do ocorrido. b) Inchamento do filamento

Halidi e Abdullah, (2012) apontam que à medida que o material é fundido, a umidade presente no filamento é vaporizada, causando mudanças morfológicas no material, levando a falhas como bloqueio de sua extrusão pelo bico de saída ou bolhas e protuberâncias na superfície do modelo impresso. Este apontamento corrobora com o fenômeno recorrente no cabeçote de extrusão quando da extrusão do ABS.

Apesar da falha recorrente, com a supervisão do usuário, foram impressos alguns modelos tridimensionais, utilizando-se os filamentos de ABS P-400 da Stratasy. Os resultados dos objetos gerados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos impressos em ABS

Modelo Impresso	Comentário
	Modelo de parafuso e porca, impressos separadamente com filamentos de ABS preto e branco. Neste exemplo, a porca rosqueia no parafuso conforme previsto. Este exemplo demonstra a capacidade de impressão de peças intercambiáveis com encaixes complexos.
	Modelo de engrenagens impressos separadamente com filamentos de ABS preto e azul. Embora um dos pinos tenha se partido da base após alguns testes, as engrenagens apresentam boa resistência e ótima adesão entre camadas, podendo ser utilizadas como peças em um sistema mecânico.

	Neste exemplo, foi modelado em 3D uma peça para acomodar uma ventoinha de notebook. Esta peça foi impressa em ABS, encaixada e aparafusada. Fica evidenciado a possibilidade de uso deste cabeçote para impressão de geometrias que se adaptam à peças previamente existentes.
	Modelo proveniente de escaneamento 3D de um orelha, este foi impresso em ABS amarelo utilizando uma porosidade proposital, apresentando uma de grande área de superfície. Fica evidenciada a possibilidade de impressão de geometrias de alto grau de complexidade geométrica.

4.3. PCL

Com a segunda versão do cabeçote, foram impressos *scaffolds* de PCL, sendo estes analisados e apresentados por Senedese *et al.* (2011a). Neste trabalho, foi impresso um *scaffold* quadrado com 16mm de lado e ângulo de preenchimento de 45/135° e quatro camadas (Figura 41a) . Por meio da imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é visto na (Figura 41b) poros anisotrópicos com diagonal de ~440 μm , boa adesão entre as camadas e na (Figura 41c) a presença de microporos e o diâmetro do filamento depositado de 400 μm , que corrobora com o especificado no software de controle.

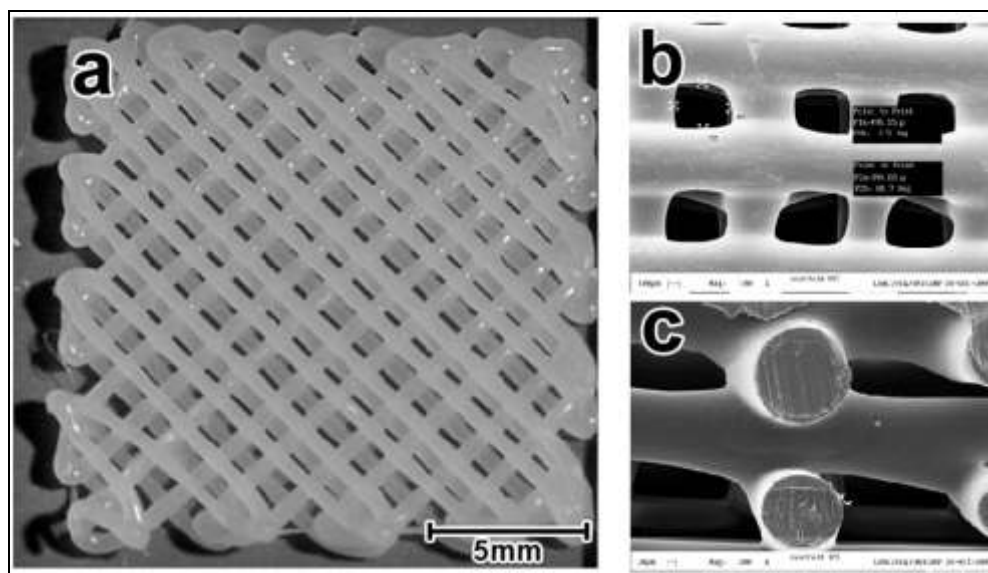


Figura 41. a) Scaffold de PCL produzido na FAB@CTI; b) Análise MEV com foco nos tamanhos de poro e adesão das camadas; c) Análise MEV mostrando microporos como resultado natural do processo do PCL. Fonte: Senedese *et al* (2011a).

Neste trabalho de Senedese *et al.* (2011) mostra uma comparação do PCL em pó, filamento e extrudado pelo cabeçote de filamento por meio da caracterização térmica utilizando Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), Análise Mecânica Dinâmica (DMA) e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). O DSC mostrou um pequeno deslocamento na T_m do *scaffold*, provavelmente devido a redução da cristalinidade entre o pó e o filamento extrudado. A análise por DMA foi realizada para obter o T_g do filamento obtendo o valor de 213K e a análise por FTIR mostrou que não houve modificações na estrutura química entre as amostras.

Após observar que os *scaffolds* de PCL obtidos pela FAB@CTI mantêm as suas características térmicas praticamente iguais e virtualmente nenhum tipo de degradação, Senedese *et al.* (2011b) realizaram uma análise de toxicidade e viabilidade de crescimento celular. Neste trabalho foram obtidos seis *scaffolds* de PCL, impresso na FAB@CTI sob a temperatura de 86 °C, altura de camada 0.3mm e variando o ângulo de preenchimento bem como a porosidade conforme indicado na (Figura 42).

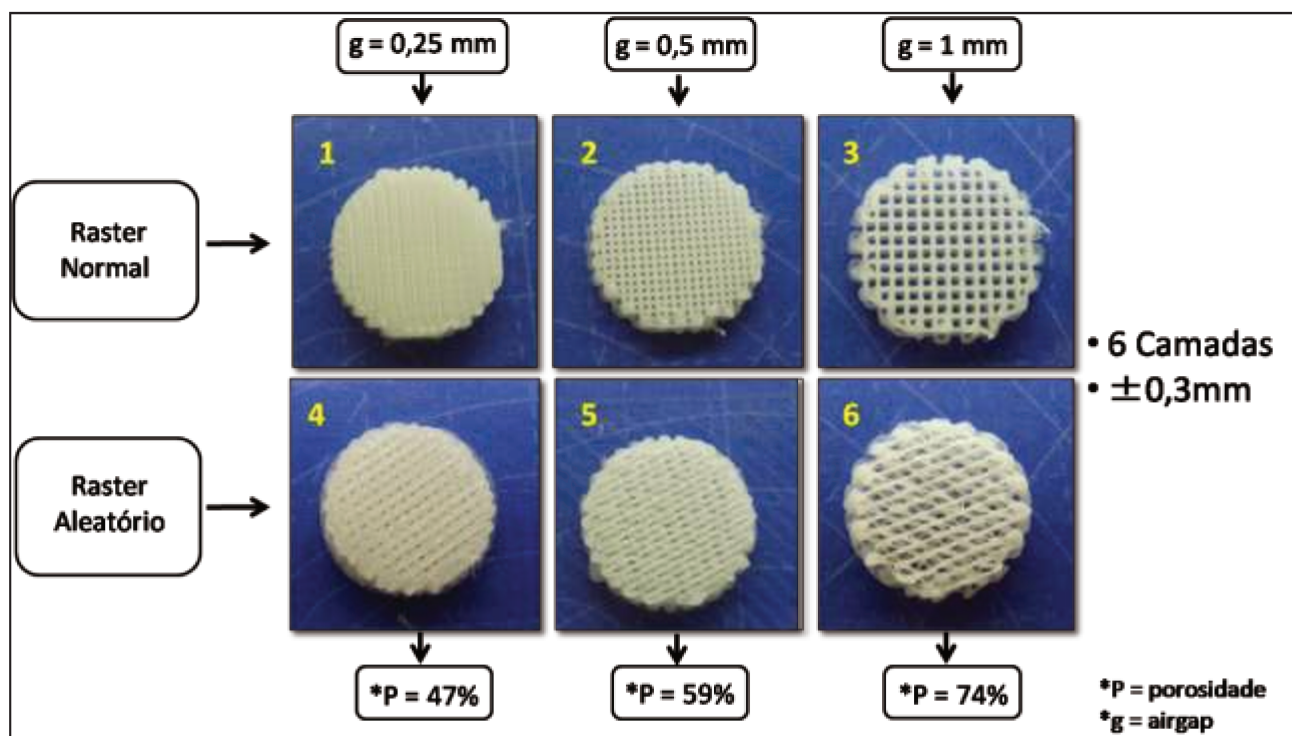


Figura 42 - Modelos de scaffolds de PCL variando tamanho de poros e ângulo de preenchimento. Adaptado de Senedese *et al.* (2011b).

Imagens MEV foram obtidas dos *scaffolds*, mostrando diferentes magnitudes de ampliação. Esta análise revela na a regularidade presente (Figura 43 a,b) no modelo 1 da Figura 42 bem como o aspecto aleatório (Figura 43 c,d) no modelo 4 da Figura 42. É possível observar a boa adesão entre camadas causada pela fusão superficial do filamento depositado sobre a camada solidificada. Conforme é aumentado tamanho do poro, maior é a deformação do filamento, causando um caimento deste e diminuindo o tamanho do poro vertical. Isto é causado principalmente devido ao longo tempo que o PCL leva até o seu retorno do estado fundido ao estado sólido. Este fenômeno de deformação pode ser comparado entre a Figura 43a, onde há uma mínima deformação dada a menor distancia entre os filamentos e uma deformação acentuada na Figura 43d.

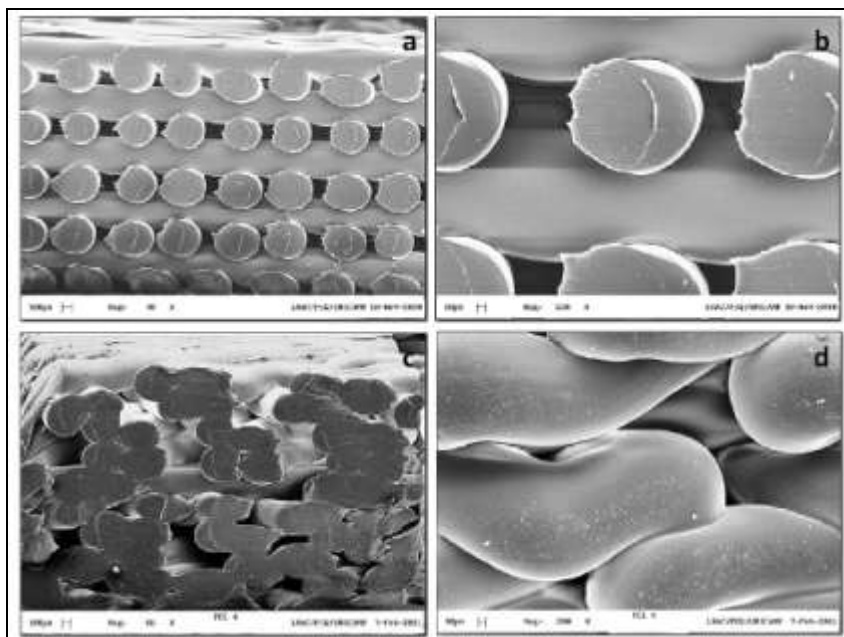


Figura 43 - Imagens MEV dos scaffolds de PCL fraturados. a) Modelo 1 ampliado 70X, b) Modelo 1 ampliado 230X, c) Modelo 4 ampliado 65X, c) Modelo 4 ampliado 200X.. Fonte: Senedese *et al.* (2011b)

4.4.PLA

Na dissertação de graduação, Fermín (2012), entre outros estudos, gerou *scaffolds* de PLA (Figura 44) a partir de filamentos de diâmetros entre 2 e 3 mm utilizando a terceira versão do cabeçote de filamento presente neste trabalho.

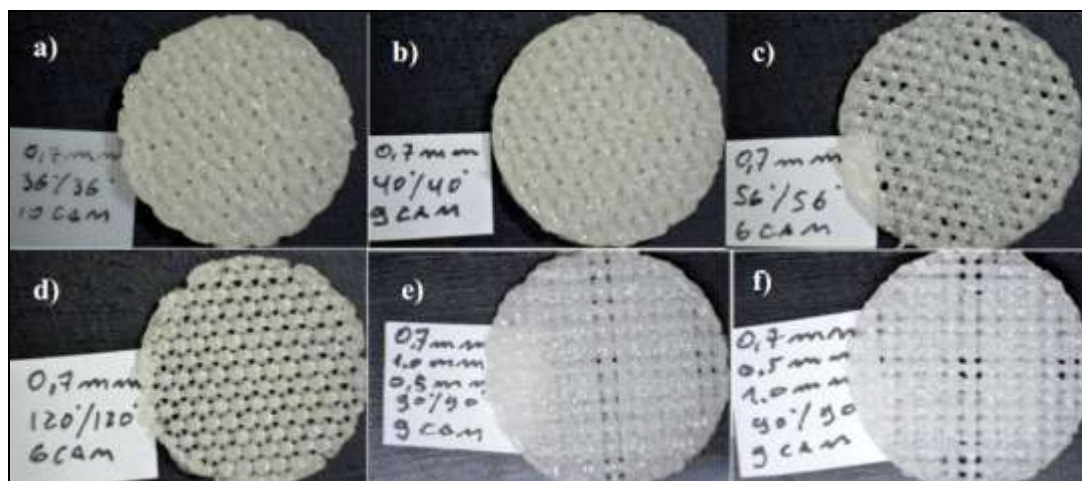


Figura 44 - scaffolds de PLA com diferentes orientações de *raster* (a,b,c,d) e tamanho de poro (e,f). Fonte: Fermín (2012).

Por meio de imagens MEV (Figura 45), Fermín (2012) comparou os modelos CAD com os resultados impressos concluindo que estes estão em conformidade.

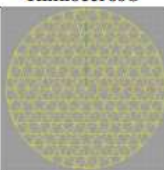
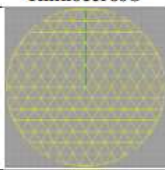
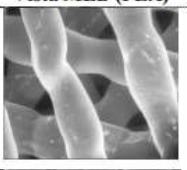
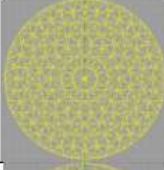
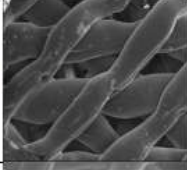
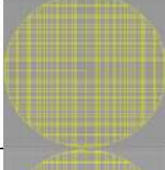
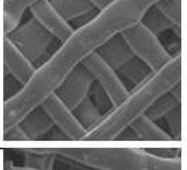
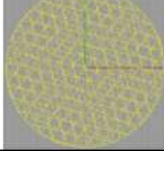
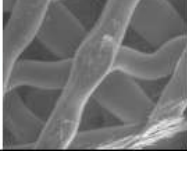
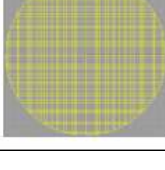
Características	Rhinoceros®	Vista MEB (PLA)	Características	Rhinoceros®	Vista MEB (PLA)
0,7mm /36°/36°/ 10 capas			0,7mm /120°/120°/ 6 capas		
0,7mm /40°/40°/ 9 capas			0,7mm-0,5mm-1mm /90°/ 9 capas		
0,7mm /56°/56°/ 6 capas			0,7mm-1mm-0,5mm /90°/ 9 capas		

Figura 45 – Modelos CAD e imagens MEV correspondentes dos scaffolds impressos em PLA.
Adaptado de Fermín (2012).

Fermín (2012) aponta que foi observada uma degradação térmica evidenciada pela redução do peso molecular, passando do estado inicial amorfo para um estado que apresenta alguma cristalinidade, porém é mencionado que a pesar desta degradação, não houve mudança visual no material, tampouco em seu comportamento reológico, permitindo a obtenção dos modelos impressos com uma boa estabilidade térmica e dimensional.

4.5. PHB

Neste teste, foi impresso um protótipo poroso (Figura 46) de dimensão 20x20x2 mm, com filamento da blenda de PHB com PCL (5%) sob uma temperatura de 180° C. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros para extrusão de PHB

Parâmetros da Ferramenta de Deposição do PLA	
TIPDIAM	0,50 mm
PATHWIDTH	0,50mm
PATHHEIGHT	0,43mm
PUSHOUT	0,80 s
SUCKBACK	0,60s
DEPOSITIONRATE	0,075
PATHSPEED	7,0 mm/s

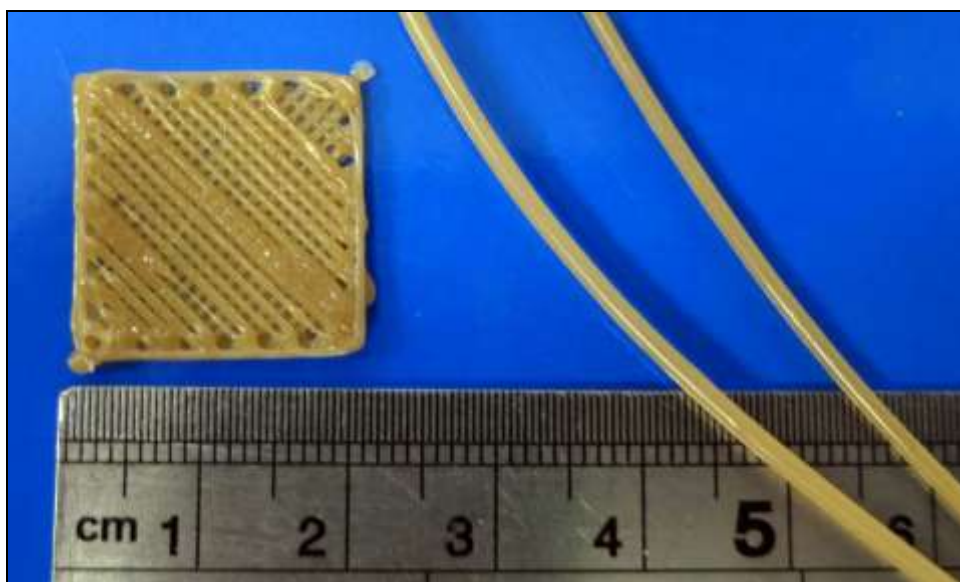


Figura 46 - Protótipo impresso em PHB

Foram obtidas fotos macro (Figura 47) do modelo impresso com o microscópio Opton modelo TIN-2T e câmera USB 10 Megapixels com o software ISCapture versão 2.2.1.

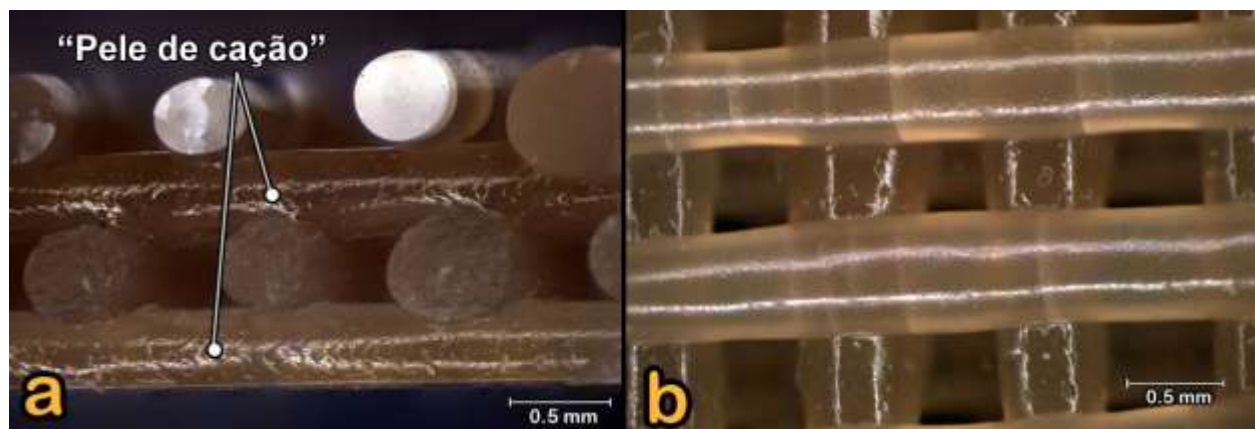


Figura 47 - Foto das camadas (a) e dos poros (b)

É possível identificar a fusão entre as camadas na (Figura 47a) nos cortes transversais e através da translucidez apresentada na (Figura 47b). O filamento de 1,5 mm de diâmetro utilizado neste teste apresentou uma variação de $\pm 0,2$ mm ao longo do comprimento de 200 mm. Esta variação de diâmetro é a responsável pela diferença no diâmetro do modelo impresso apresentado na (Figura 47a). Na Figura 47a é apresentada a formação do efeito da “pele de cação”.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O cabeçote de extrusão de filamento desenvolvido neste trabalho atendeu com êxito os objetivos propostos de processar filamentos poliméricos e estruturar geometrias 3D utilizando inicialmente quatro materiais: ABS, PCL e PLA e PHB.

Este desenvolvimento resultou em um protótipo funcional, o qual cumpriu os requisitos estabelecidos:

- Conectividade eletrônica e mecânica com a máquina Fab@CTI sendo este totalmente compatível com a solução de intercambiabilidade previamente disponível neste equipamento de MA, bem como com o software de controle;
- Capacidade de utilizar materiais poliméricos em forma de filamentos em pequenas quantidades e diâmetros variados;
- Modular quanto às partes que o integra, facilitando sua manutenção e desenvolvimento;
- Solução adequada para uso em aplicações de Manufatura Aditiva;

Embora os modelos produzidos neste equipamento apresentem uma resolução de camada (0,3 mm) inferior do que a resolução encontrada em equipamentos industriais de grande porte (0,1 mm), o cabeçote desenvolvido neste trabalho é capaz de processar vários materiais poliméricos em forma de filamento, especialmente em pequenas quantidades, incluindo biomateriais.

O cabeçote de extrusão foi desenvolvido especificamente para o equipamento Fab@CTI, porém é possível adaptá-lo facilmente para outras plataformas sem grandes modificações, já que pode ser integrado a outros sistemas ou trabalhar de maneira isolada.

Algumas sugestões para continuidade deste tema de pesquisa seriam:

- A instrumentação do sistema com célula de carga na região aquecida a fim de avaliar as forças envolvidas, abrindo varias possibilidades, tais como a detecção de falhas na extrusão, análise das propriedades do material, calibração automática das coordenadas x, y e z e detecção de choque entre o cabeçote a peça;
- Ensaio com outros materiais poliméricos e blendas de termoplásticos;
- Estudo e simulação computacional da dinâmica da formação da interface do embolo dinâmico;
- Portar para o cabeçote o controle de potência das resistências elétrica e de motor, a fim de torná-lo independente da eletrônica da máquina que o opera;
- Implementação do controle de temperatura pelo *software* da máquina.
- Caracterização mecânica de modelos impressos pelo cabeçote sob tração e compressão.

Referências

ASTM F2792-10 **Standard terminology for additive manufacturing technologies**, copyright ASTM International - 2010, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, 2010.

Akcelrud, L., **Fundamento da Ciência dos Polímeros**. Ed. Malone Ltda. ISBN 85-204-1561-X Barueri, SP, p. 1, 30,31, 2007.

Bretas, Rosário E.S.; D'Ávila, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos**. São Carlos: EdUFSCar, 2005, p. 19-23.

Barnatt, C. **3D Printing, The Next Industrial Revolution**. USA, 2013.

Biocycle. Folha de Dados: Biocycle 1000. Disponível em <http://www.biocycle.com.br/images/propriedades_1000.pdf> Acesso em: 02 de Abril de 2014

Bob King, **Criatividade uma vantagem competitiva**, Ed. Qualitymark, p. 330, 1999.

Callister, W.D., **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th Ed. John Wiley & Sons, Inc. ISBN-13: 978-0-471-73696-7. p 544-548, 2007

Canessa, E.; Fonda, C.; Zennaro, M.. **Low-Cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development**. 2013.

Cohen D. L., Lipton J. I., Bonassar L. J, Lipson H. **Additive manufacturing for in situ repair of osteochondral defects**. Biofabrication, Issue 2, p 12, 2010.

Cooper, K. G., **Rapid Prototyping Technology, Selection and Application**, Dekker ed. New York, p. 1, 2001.

Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C.S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications, 2nd Edition**. ISBN 981-238-117-1. p. 19, 2003.

Fermín, Z. C. **Obtención de Andaimos en base a poliésteres biodegradables mediante la tecnica de prototipada rápido**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais. Universidade Simón Bolívar. Venezuela. p 55-59, 64,65, 2012.

Incropera F. P., De Witt, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, Editora LTC, Sexta edição, John Wiley & Sons. p. 1-4, 2008.

Halidi, S. N. A. M. & ABDULLAH, J. **Moisture effectson the ABS used for Fused Deposition Modeling rapid prototyping machine**. IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Kuala Lumpur. p.839-843, 2012.

Hockaday L. A., Kang K. .H, Colangelo N. W., Cheung P Y C, Duan B, Malone E., Wu .J, Girardi4 L. N., Bonassar L. J., Lipson H., Chu C. C., Butcher J. T. **Rapid 3D printing of anatomically accurate and mechanically heterogeneous aortic valve hydrogel scaffolds** Biofabrication, Issue 4, p. 12, 2012

Inforçatti Neto, P.I.; Lixandrão Filho, A. L.; Pereira, F.D.A.S; Silva, J.V.L.; Silveira, Z. C.; Bártolo, P. **Thermoplastic filamento extruder head for desktop Additive Manufacturing machines**. In: Innovative developments in Virtual and Physical Prototyping. London: Taylor & Francis Group, p. 635-638, 2012.

Inforçatti Neto, P.I. **Máquina básica de prototipagem rápida de projeto aberto de hardware e software, para uso de pesquisas em bioengenharia, desenvolvimento, inovação e aplicações de prototipagem rápida**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade Independente do Nordeste, BA, 2007.

Inforçatti Neto, P.I. **Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão com rosca para impressoras tridimensionais portáteis** Dissertação de Mestrado.Universidade de São Paulo – USP. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC – São Carlos, SP. 2014.

Jones, R. O., Iravani, P, Bowyer, A.. **Rapid Manufacturing of Functional Engineering Components**. Report. University of Bath, Bath, UK, 20012.

Pearce M. J., **Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware** Vol.: 337 - p. 1303-1304, 2012.

Kamrani, A. K. Nars, E. A., **Rapid Prototyping: Theory and Practice**, Springer Science Business Media, Inc, p. 1, 2006.

Kuehn, T., Rieffel, J. **Automatically Designing and Printing Objects with EvoFab 0.2**, Proceedings of the 13th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALife XIII), p. 372-378, 2012.

Lipson H., Kurman M, **Fabricated: The New World of 3D Printing**, Wiley Press, 2013.

Malone E., Lipson H.: **Fab@Home: The personal desktop fabricator kit**, Rapid Prototyping Journal, Vol.13. n° 4, p. 245-255, 2007.

Melgoza E., Serenó L., Rosell A., Ciurana J. **An integrated parameterized tool for designing a customized tracheal stent**, Computer-Aided Design, Elsevier, Volume 44, Issue 2, p. 1173-1181, 2012.

Miller, Jordan S.; Stevens, Kelly R.; Yang, Michael T.; Baker, Brendon M.; Nguyen, ; Huy ;-Cohen, Daniel M.; Toro, Esteban; Chen, Alice A.; Galie, Peter A.; Yu, Xiang; Chaturvedi, Ritika; Bhatia, Sangeeta N.; Chen, Christopher S. **Rapid casting of patterned vascular networks for perfusable engineered three-dimensional tissues**; Nature Materials, Vol 11, p 768 – 774, 2012.

NatureWorks. Folha de Dados: Ingeo™ Biopolymer 3001D. Disponível em <http://www.natureworksllc.com/Japan/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3001D_injection-molding.pdf> Acesso em: 15 de Fevereiro de 2012

OSHW **Open Source Hardware Association**. Disponível em: <<http://www.oshwa.org/definition/>> Acesso em: 5 de Março de 2014

Perstorp. Folha de Dados da Policaprolactona (PCL) CAPA® 6505: CAPA Polycaprolactones, 2005. Disponível em http://www.chairsidesplint.com/docs/thermo-beads-cap6500_070321.pdf Acesso em 10 de Fevereiro de 2013

Rico, M.B., Gomis, A.M. **Tecnología de Polímeros Processado y Propiedades**. Universidad de Alicante, Unión de Editoriales Universitarias Españolas - UNE, p. 27, 2012.

Rhys Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani, Vik Olliver, Chris Palmer, Adrian Bowyer, **RepRap – the replicating rapid prototype**, Robotica v. 29, Cambridge University Press. p. 177–191, 2011.

Sells, E. A., **Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine**, Thesis of Doctor of Philosophy. University of Bath, Bath, UK, p. 43, 2009

Senedese, A. L. C. **Estruturação tridimensional de scaffolds de Policaprolactona via manufatura aditiva**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. UNICAMO, Campinas, SP, 2011.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., Inforçatti Neto, P., Pereira, F.D.A.S, Maciel Filho, R. **Additive Manufacturing to Build Polycaprolactone Scaffolds**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF. Caxias do Sul – SR, 2011a.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., Pereira, F.D.A.S , Inforçatti Neto, P., Bordeaux-Rego, P., Maciel Filho, R. **3D scaffolds structuring by additive manufacturing and cell viability analysis**. Periódico Biofabrication, 2011b.

Silva J. V. L.; Meurer E.; Meurer M. I. Prototipagem Biomédica – Aplicações Cirúrgicas, **Anais do III Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais**, Campinas, 2004.

Stratasys. Folha de Dados: ABS, 2007. Disponível em <<http://www.nrri.umn.edu/nltc/ABS07.pdf>> Acesso em: 10 de Fevereiro de 2013

STRATASYS INC. (Minneapolis). Steve Scott Crump. **High temperature modeling apparatus**. US 6722872 B1. Publicado em 20 Abr. 2004, Depósito 23 Jun. 2000.

STRATASYS INC. (Minneapolis). Steve Scott Crump. **Modeling apparatus for three-dimensional objects**. US 5340433 A. Publicado em 23 Ago. 1994, Depósito 8 Jun. 1992.

STRATASYS INC. (Minneapolis). Steve Scott Crump. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. US 5121329 A. Publicado em 09 Jun. 1992, Depósito 30 Out. 1989.

Symes, M. D.; Kitson, P. J.; Yan, J.; Richmond, C. J.; Cooper, G. J. T.; Bowman, R. W.; Vilbrandt, T.; Cronin, L.; **Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis**. Nature Chemical vol. 4; Issue 5; Nature Publishing Group; p. 349-354, 2012.

Venkataraman N., **The Process-Property-Performance Relationships of Feedstock Material Used for Fused Deposition of Ceramic (FDC)**, PhD Thesis, Dept. of Ceramic and Materials Engrg., Rutgers University, New Brunswick, 2000.

Volpato, Neri (Ed.). **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Blücher, p 4-10, 2007.

Wohlers, T. T. **Wohlers Report 2012**. Fort Collins, USA: Wohlers Associates Inc, 2012.

APÊNDICE A – Simulação por elementos finitos da região aquecida

Segundo, Huebner *et al* (2001), o método dos elementos finitos é uma técnica de análise numérica para solucionar uma grande variedade de problemas de engenharia. Krishnamoorthy (2007) define seu conceito básico como um método baseado na discretização de um domínio, estrutura ou contínuo em um número de elementos finitos e obtenção de uma solução. A discretização em elementos reduz o problema em um número finito de incógnitas através da expressão do campo de variáveis incógnitas em funções de aproximação para cada elemento. Segundo, Huebner *et al* (2001), a natureza da solução e o grau de aproximação depende não apenas do número de elementos, mas as funções de aproximação utilizadas, sendo assim necessário o uso de pacotes de funções específicas para cada tipo de problema.

Nas simulações realizadas utilizando o referido método, o modelo CAD do cabeçote FDM, é dividido em vários elementos utilizando o programa ANSYS versão 14® e definidas as condições do problema o programa realiza a solução numérica utilizando o módulo Transiente Térmico, possibilitando não só a obtenção das temperaturas durante o aquecimento como também o tempo para se atingir a condição de regime permanente e as temperaturas nesse estado.

O modelo CAD da segunda versão (Figura 48a) foi dividido em 75554 elementos com um total de 141060 nós e o modelo CAD da terceira versão (Figura 48b) foi dividido em 91182 elementos com um total de 173105 nós. Os elementos gerados são do tipo tetraédrico em geral, porém no tubo de aço inox nos filamentos, foi utilizada malha mapeada com elementos hexaédricos por serem de regiões de maior interesse.

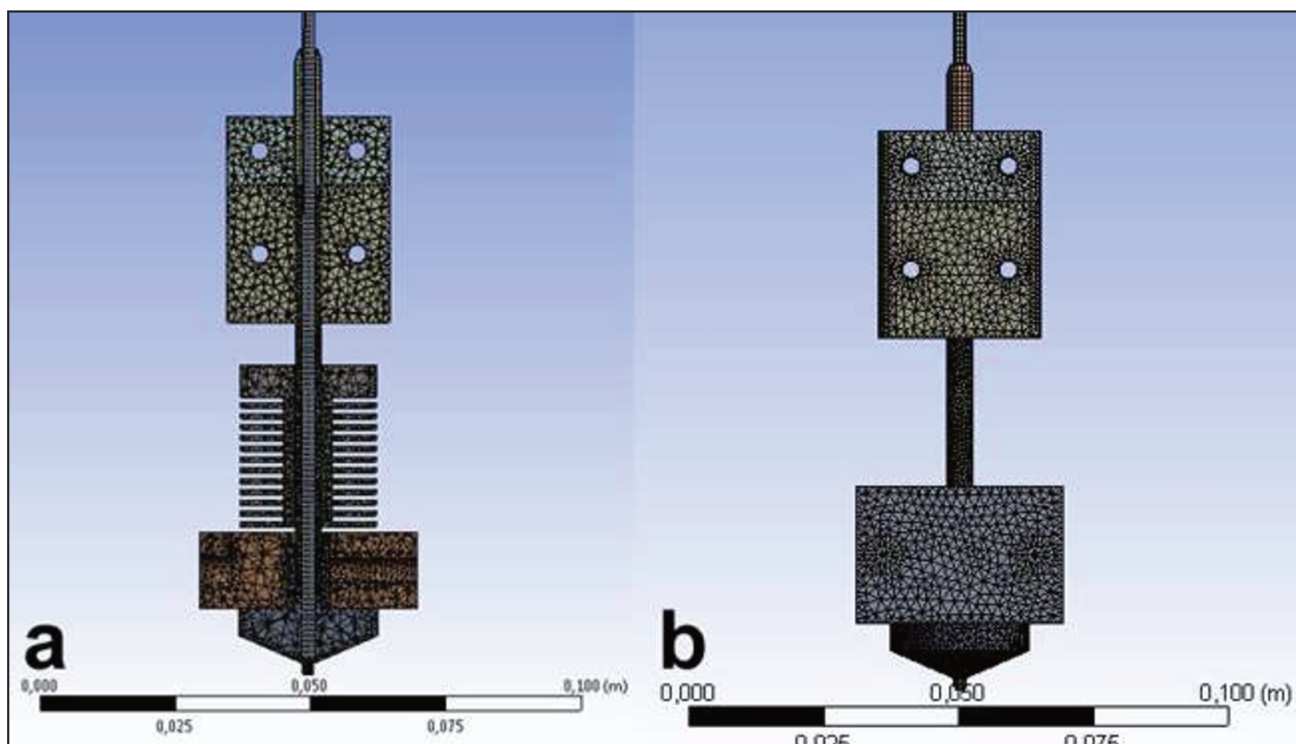


Figura 48 - Topologia dos elementos dos modelos CAD.

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações são apresentadas na Tabela 11. Foi utilizado nas simulações o valor de 0.1 s *time step* com total de 550 s.

Tabela 11 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações.

Materiais	Densidade $\frac{kg}{m^3}$	Condutividade térmica isotrópica $\frac{W}{m.C}$	Calor Específico $\frac{J}{kg.C}$
ABS	1040	0,2	2000
PCL	1110	0,4	850
PLA	1072	0,2	1800
Alumínio	2689	237,5	951
Latão	8600	111	162
Aço Inoxidável	8055	13,8	480

Na análise foi considerado que as temperaturas sobem segundo o perfil de aquecimento (Figura 49) das resistências de 120W (duas de 60W) sendo que para o PCL essa temperatura se estabiliza em 90° C, PLA em 170° C, e ABS em 220° C por meio do controlador PID. Foi

também inserida na simulação uma convecção ativa de 17,25 W/(m.K) proveniente de um cooler de área 40x40 mm incide sobre as superfícies do dissipador de calor e tubo de aço inox.

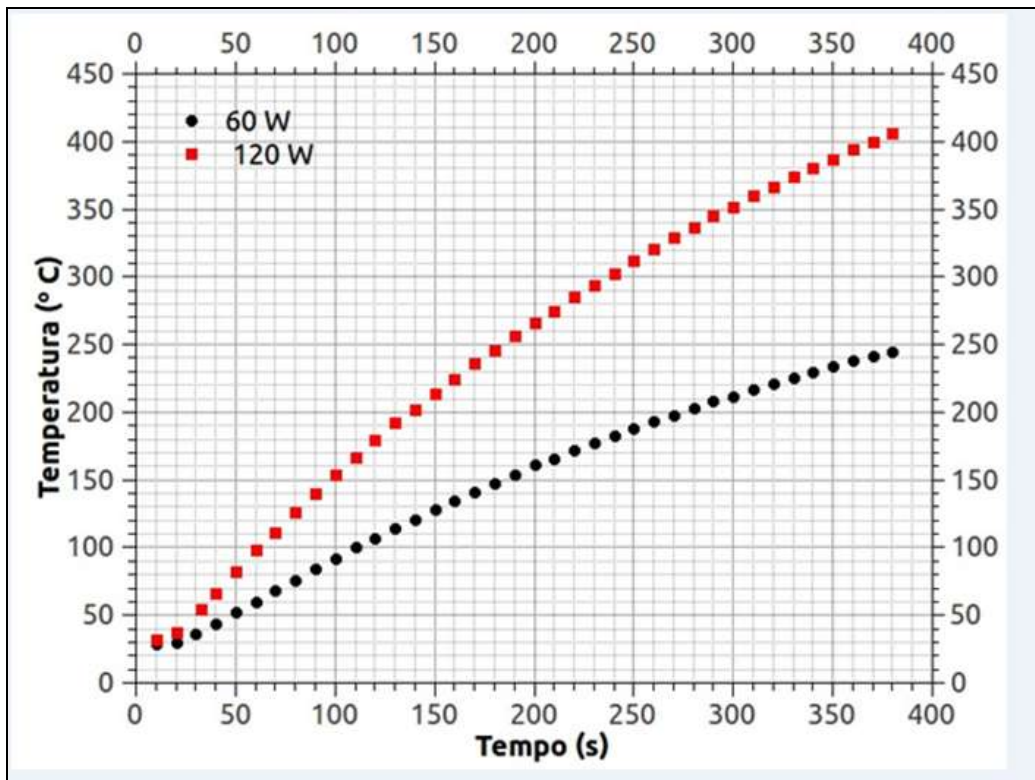


Figura 49 - Gráfico do aumento de temperatura pelo tempo das resistências de cartucho do sistema.

Referências

Huebner, K.H., Dewhurst, D.L., Smith, D.E., Byrom, T.G., **The Finite Element Method for Engineers**, 4th edition, John Wiley and Sons, Inc. 2001.

Krishnamoorthy, C. S., **Finite Element Analysis, Theory and Practice**, 2nd edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1994.

APÊNDICE B - Trabalhos resultantes deste trabalho de pesquisa

- **Dissertação de graduação:**

Cesín, Z. F. **Obtención de Andaimos en base a poliésteres biodegradables mediante la tecnica de prototipada rápido.** Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais. Universidade Simón Bolívar. Venezuela. 2012.

- **Tese de mestrado:**

Senedese, A. L. C. **Estruturação tridimensional de scaffolds de Policaprolactona via manufatura aditiva.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2011

- **Artigos:**

Pereira F.D.A.S, Freitas M.S., Silva J.V.L., Rosário J.M., **Estudo e melhorias de um cabeçote de modelagem por deposição de filamento fundido por meio de análise transiente térmica de elementos finitos.** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Urberlândia, MG – Brasil. 2014

Fermín Z., Silva J. V. L., Pereira F. D. A. S. P., Inforçatti Neto P., Gutierrez M. A. S.: **Degradation study of scaffolds based on biodegradable polyesters produced through additive manufacturing techniques.** The 1st International Conference on Design and PROcesses for MEDical Devices, Brescia, Italy, 2012a.

Fermín C. Z; Lopes da Silva, J. V.; Sena F.D.; Inforçatti, P. Sabino, M.A. **Producing polylactic acid scaffolds (PLA) by bioextrusion and degradation study during the manufacturing process.** . In: 1st International Conference on Design and PROcesses for MEDical Devices (PROMED), 2012, Padenghe sul Garda - Brescia, 2012b.

Inforçati Neto, P.; Pereira, F. D. A. S. ; Rezende, R.A.; SILVA, J. V. L. . **Development of a Extrusion Head for Biopolymers Handling and Application.** In: 1st International Conference on Design and PROcesses for MEDical Devices (PROMED), Pg. 49-52 Padenghe sul Garda - Brescia, 2012.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., ., Inforçatti Neto, P., Pereira, F.D.A.S., Maciel Filho, R. **Additive Manufacturing to Build Polycaprolactone Scaffolds**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF. Caxias do Sul – SR, 2011a.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., ., Pereira, F.D.A.S. , Inforçatti Neto, P., Bordeaux-Rego, P., Maciel Filho, R. **3D scaffolds structuring by additive manufacturing and cell viability analysis**. Periódico Biofabrication, 2011b.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., Pereira, F.D.A.S., Inforçatti Neto, P., Maciel Filho, R. **A new design approach for scaffolds parameters**. II International Conference on Tissue Engineering, Lisboa, 2011.

Senedese, A.L.C., Lixandrão Filho, A.L., Silva, J.V.L., Pereira, F.D.A.S., Inforçatti Neto, P., Maciel Filho, R. **Additive manufacturing of scaffolds: controlling mechanical properties by means of extrusion parameters**. VI International Materials Symposium MATERIAIS 2011, XV meeting of SPM - Sociedade Portuguesa de Materiais, Guimarães, 2011.

Senedese, A.L.C., Silva, J.V.L., Inforçatti Neto, P., Lixandrão Filho, A.L., Pereira, F.D.A.S., Maciel Filho, R. **Study of ϵ -polycaprolactone for Scaffolds Construction by Rapid Prototyping**. Biocell (ISSN 0327 – 9545), Argentina, v. 33, n. 3, p. 281, 2009.