

ESTUDO E MELHORIAS DE UM CABEÇOTE DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO FUNDIDO POR MEIO DE ANÁLISE TRANSIENTE TÉRMICA DE ELEMENTOS FINITOS.

Frederico David Alencar de Sena Pereira, frederico.pereira@cti.gov.br¹

Matheus Stoshy de Freitas, matheus.freitas@cti.gov.br¹

Jorge Vicente Lopes da Silva, jorge.silva@cti.gov.br¹

João Maurício Rosário, rosário@fem.unicamp.br²

¹Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Divisão de Tecnologias Tridimensionais

²Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projetos Mecânicos

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo a análise e melhorias da região aquecida de um cabeçote de impressão 3D de pequena dimensão, que permite a utilização de polímeros termoplásticos em forma de filamentos, baseados na tecnologia de Manufatura Aditiva (MA) por Deposição de Material Fundido (FDM), na máquina de Fab@CTI. A Fab@CTI é um projeto open-source de máquina de MA, com base na Fab@Home, a qual foi construída e adaptada no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) com a finalidade de colaborar nas iniciativas de pesquisas no campo da bioengenharia e biomateriais, tendo parceiros em muitas instituições de pesquisa. Foi proposto um novo modelo de região aquecida, reduzindo o bloco aquecido em 50% da altura em relação ao modelo prévio, bem como a adição de um dissipador aletado de alumínio no tudo de inox, por onde o filamento é conduzido até a região de fusão do termoplástico. Estas alterações visaram resolver os problemas de instabilidade quando do uso do Poliláctico (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Este novo modelo foi projetado utilizando o Solidworks 2012 e a análise feita no software de elementos finitos ANSYS versão 14 com o módulo de transiente térmico. Nesta análise foram simuladas as condições de temperatura de extrusão do Policaprolactona (PCL) a 90 °C, Ácido Poliláctico (PLA) 170 °C e ABS a 220 °C. Os resultados das análises computacionais mostraram que o modelo proposto apresenta um melhor controle da distribuição de temperatura ao longo do tubo de inox. O novo modelo foi implementado e testado experimentalmente imprimindo modelos 3D de ABS, PCL e PLA. Foi concluído que as alterações realizadas mantiveram a capacidade do sistema em utilizar o PCL além de expandir a gama de materiais para deposição com a inclusão do PLA. A extrusão do ABS não obteve total êxito, necessitando de maior investigação. O resultado obtido foi satisfatório, uma vez que o PCL e o PLA são biomateriais de grande importância para pesquisas na área de bioengenharia, contexto o qual a Fab@CTI se aplica.

Palavras-chave: Bioengenharia, Scaffolds, Prototipagem Rápida, Impressão 3D

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) consiste na fabricação de um modelo físico tridimensional camada-a-camada a partir de um arquivo do computador (ASTM F2792-10). A MA permite obter geometrias de alta complexidade que seriam virtualmente impossíveis de se obter por outros meios de fabricação (Cooper, 2001).

Este processo tem como ponto de partida um modelo computacional 3D do objeto que é fatiado virtualmente, obtendo-se então curvas 2D que definem onde serão ou não solidificado o material. Estas camadas são processadas empilhando-as, gerando então o objeto físico (Volpato, 2007).

Desde seu primeiro uso nos processos industriais, a MA tem se expandido para vários campos, indo desde o setor de aviação até as áreas de artes. O seu uso na área médica ainda é incipiente, porém já tem alcançado resultados bastante significativos. Esta tecnologia é usada, por exemplo, em cirurgias ortopédicas, reconstrução dental e maxilo-facial e construção de *scaffolds* para engenharia tecidual (Hoque, 2011).

Muitos são os processos que geram estes objetos, chegando a passar de 20 diferentes sistemas em 2007 (Volpato, 2007). Neste artigo é abordado somente a Modelado por Deposição de Material Fundido (FDM de Fused Deposition Modeling), que consiste em uma cabeça de extrusão em um sistema cartesiano XYZ onde este cabeçote recebe continuamente o material em forma de filamento, aquecendo-o até o ponto de se tornar semi-líquido ou pastoso. O próprio material ainda rígido funciona como êmbolo, pressionando a parte fundida através do bico calibrado. Este filamento fundido se solidifica ao entrar em contato com o material previamente depositado. A mesa onde é construída

a peça desce um valor referente à espessura da camada e todo o processo se repete até o fim da construção (Volpato, 2007).

A partir de 2009 tornou-se possível adquirir máquinas de MA, também conhecidas como impressoras 3D, por menos de \$1, 000. Este valor é aproximadamente 5% do custo de uma máquina de nível profissional de semelhante tecnologia (Additive3D, 2014). Este preço acessível se deu após a criação em 2004 de um projeto open-source chamado RepRap (Replicating Rapid-Prototyper), que consiste em uma máquina baseada na tecnologia FDM capaz de criar suas próprias peças para replicação com o menor custo possível (Bradshaw *et al*, 2010).

Na tecnologia de FDM, há a ocorrência de material fundido na região próxima ao bico de extrusão, sendo que o próprio filamento funciona como êmbolo para empurrar o material fundido no sentido descendente de forma a empurrá-lo para fora do bico, caracterizando a extrusão.

Inspirado na RepRap, porém com outro objetivo, surgiu em 2006 a Fab@HOME, com um cabeçote de extrusão que faz uso de uma seringa para deposição do material de construção, sendo possível utilizar silicone, pasta de dente, epóxi, cerâmicas ou qualquer outro material viscoso. Com esta máquina já foi produzido estruturas mecânicas funcionais, baterias eletromecânicas, atuadores poliméricos, circuitos elétricos bem como alimentos e engenharia tecidual (Malone, 2008).

As máquinas industriais de nível profissional têm seus parâmetros limitados, tornando inadequadas para algumas situações de pesquisa como a exploração de novos materiais e processos. A Fab@HOME oferece essa flexibilidade, uma vez que todo o projeto é aberto, tanto o hardware quanto o software. Devido a isso, ela foi implementada no Centro de Tecnologias Tridimensionais Renato Archer (CTI) em 2007, e após várias modificações, ela foi nomeada de Fab@CTI (Inforçatti, 2007).

Com a necessidade de utilizar termoplástico em forma de filamento para construção de scaffolds de Policaprolactona (PCL), foi criado em 2009 um cabeçote FDM capaz de utilizar filamentos entre 1.8 a 3mm e pode alcançar a temperatura de até 400 °C. (Inforçatti, 2012).

Neste estudo é utilizado o método dos elementos finitos (FEM). Segundo, Huebner(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(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 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.

2. DESENVOLVIMENTO

A primeira versão funcional do cabeçote vista na Figura 1 (Inforçatti, 2012) apresentou resultados excelentes quando do uso do plástico biocompatível Policapropactona (PCL) para construção de *scaffolds* – matrizes porosas para crescimento celular, com poros de diâmetro de 200 micrometros em média. Outro material testado para construção de geometrias 3D neste cabeçote foi filamento de plástico de engenharia Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) proveniente do refugo das máquinas comerciais. Embora tenha sido possível imprimir objetos de ABS, algumas vezes a extrusão do ABS era interrompida, sendo necessária a remoção do filamento manualmente e a reinserção para então dar continuidade à impressão.

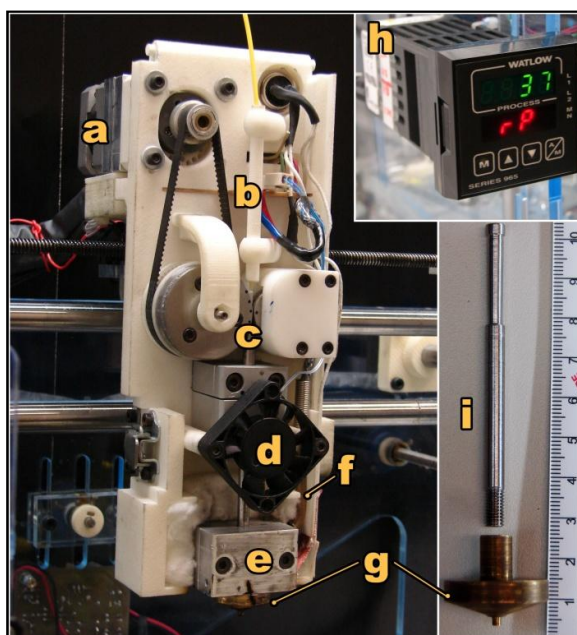


Figura 1 - a) Motor de passo; b) tubo guia; c) Polia tracionadora dentada; d) Ventoinha; e) Bloco aquecido; f) Termopar; g) Bico extrusor; h) Controlador PID. (Inforçatti 2012).

Devido à alta temperatura de trabalho do ABS (entre 210°C e 230°C) em relação ao PCL (de 90°C), foi observado que o gradiente de temperatura que se forma ao longo do tubo por onde 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, que por sua vez impede a extrusão, sendo esta a principal causa de falhas neste sistema.

Na impressão de *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, para isto, foi utilizado o software de análise de elementos finitos ANSYS versão 14 com o módulo de Transiente Térmico para estudar a propagação da temperatura na região aquecida do primeiro cabeçote de extrusão (Figura 2a) bem como o proposto (Figura 2b) 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%.

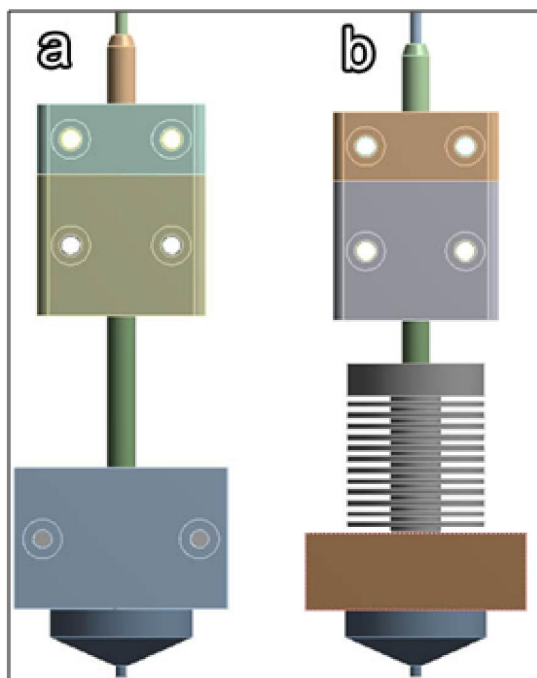


Figura 2 – Modelos CAD a) Cabeçote antigo; b) Cabeçote atual.

As propriedades tanto dos materiais para extrusão quanto dos materiais estruturais do cabeçote FDM são listadas na Tab 1.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações. Fonte: Matweb, 2013

| 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 para 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 3). No cabeçote atual, com dissipador, o sistema entrou em regime permanente aos 60 segundos enquanto que no projeto anterior, a temperatura estabilizou aos 270 segundos.

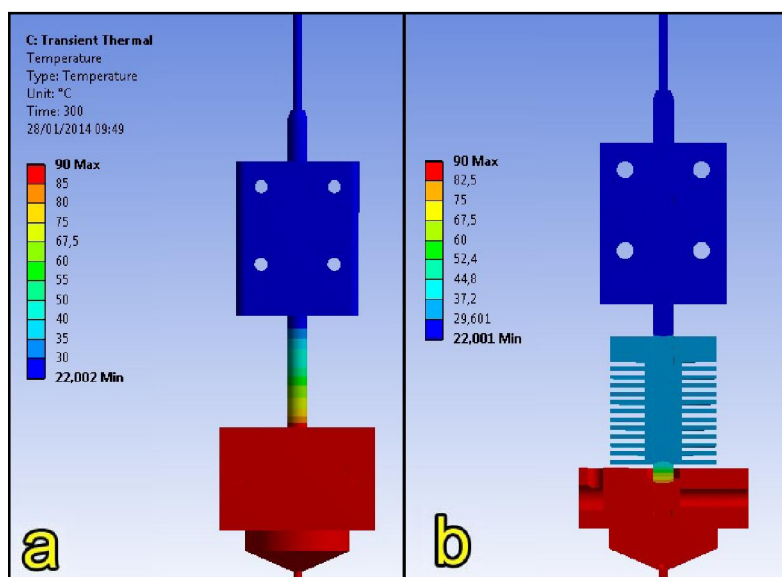


Figura 3 - Teste com PCL a) anterior; b) atual.

Na simulação do poli-ácido láctico (Erro! Fonte de referência não encontrada.), a temperatura de trabalho configurada foi de 170 °C. As características de condutividade e capacidade térmica 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 em 200 segundos sendo que no atual, estabilizou em 150 segundos.

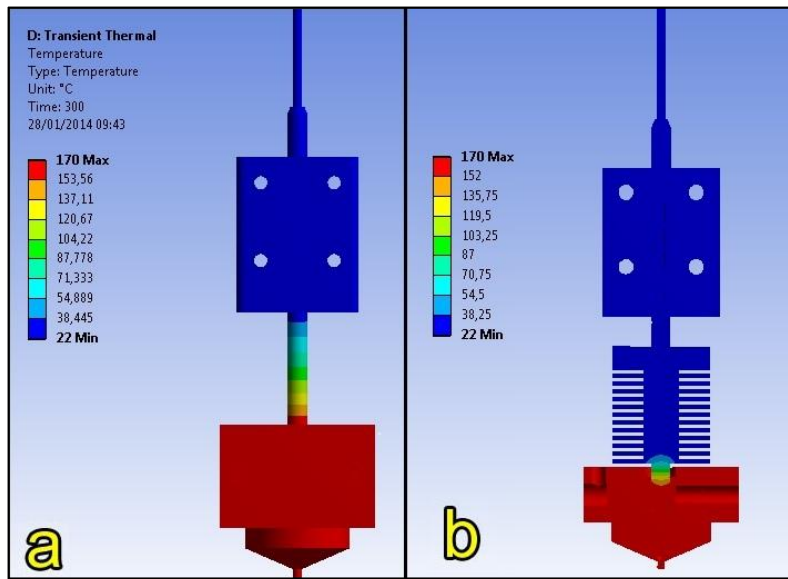


Figura 4 - Simulação para PLA a) anterior; b) atual.

O ABS sofre fusão a 175°C e a temperatura de trabalho é de 220 °C. Estes dados foram inseridos na simulação, o qual entrou em regime permanente para a versão atual em 150 segundos enquanto o anterior em 220 segundos. A Figura 5 mostra como ocorreu a propagação da temperatura ao longo dos elementos do cabeçote.

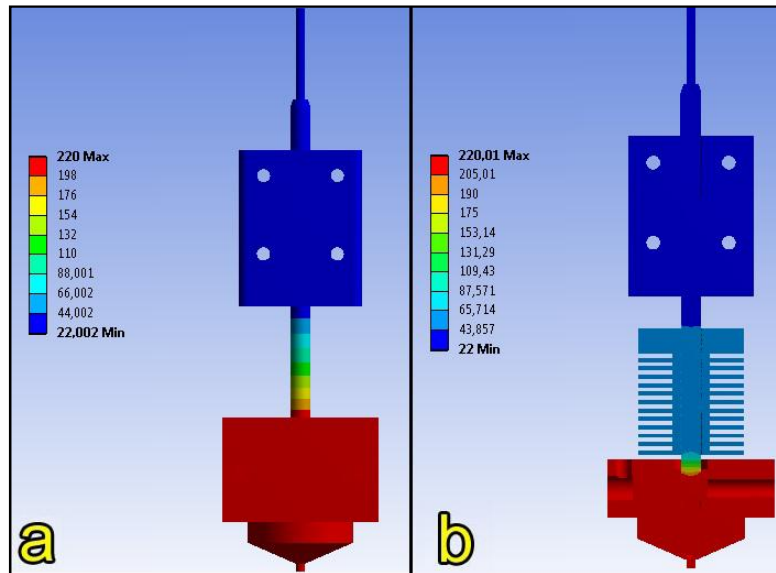


Figura 5 - Simulação para ABS a)anterior; b) atual.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da utilização experimental do material PCL, verificou-se que ele funciona de maneira adequada, ou seja, com deposição contínua e controlada, para ambas as configurações de região aquecida, anterior e atual implementada (Figura 6). A simulação por elementos finitos mostra uma grande melhoria na distribuição de calor no tubo de inox ao reduzir essa propagação. Com a temperatura do bico extrusor estabilizada em 90 °C, o dissipador mantém o tubo de inox em aproximadamente 30 °C.

O PLA tem a temperatura de transição vítrea (T_g) por volta de 55 °C e temperatura de fusão (T_m) por volta de 180 °C (Södergård, 2002), assim, as simulações por elementos finitos (Figura 4) mostram que na versão anterior (Figura 4a), o início do tubo de inox estava a 66 °C, ou seja, acima da temperatura de transição vítrea, sendo esta a causa dos travamentos do filamento. Com a nova configuração (Figura 4b), há uma clara diminuição na extensão vertical do gradiente de temperatura, limitando-se próximo do bloco aquecido, evitando assim uma grande extensão de material semi-fundido e permitindo sua fusão na região adequada para um funcionamento contínuo.

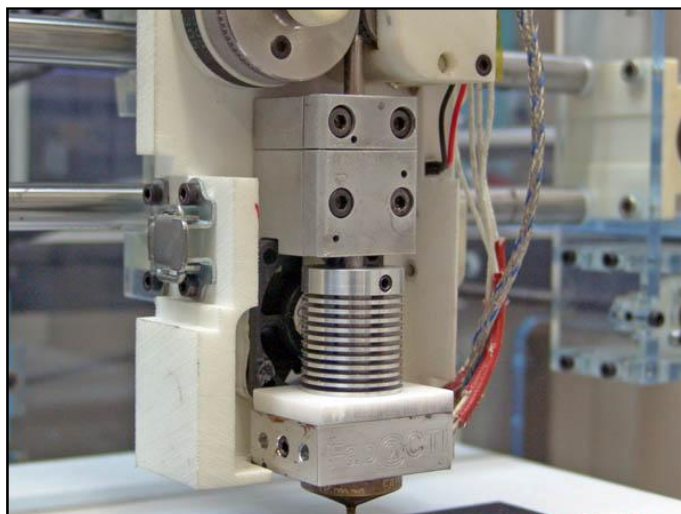


Figura 6 - Novo sistema de aquecimento implementado.

Vários experimentos empíricos foram conduzidos a fim de observar o comportamento do ABS no sistema, como por exemplo, alteração da posição do dissipador relação ao bloco aquecido, uso de uma ventoinha mais potente, alteração da geometria das aletas, alterações na de temperatura de extrusão entre 210°C e 230°C. Em todos estes testes, o filamento de ABS travou não teve uma extrusão contínua confiável, vindo a travar em algum momento.

Foi possível determinar que este fenômeno de travamento ocorre exatamente na linha de entrada do bloco aquecido, ao retirar manualmente o filamento do tubo de inox e posicionar externamente no sistema.

Ainda que tenha ocorrido falhas com o ABS, foi possível imprimir alguns objetos nesta material. É possível observar na Figura 7, algumas geometrias impressas na Fab@CTI com o novo sistema implementado.



Figura 7 - Peças impressas na Fab@CTI com cabeçote FDM. a) Peças de ABS; b) Peças de PCL; c) Peças de PLA.

4. ALTERAÇÕES PROPOSTAS

É proposto para este projeto alterações na região aquecida a fim de ter total confiabilidade na extrusão do ABS sem perder a capacidade de utilizar outros materiais.

Para esta alteração será estudado modificações no tubo de inox onde é conduzido o material até a sua extrusão. Este tubo se propõe a duas tarefas: conduzir o filamento termoplástico e servir de elemento estrutural como suporte do bloco aquecido.

5. CONCLUSÕES

No cabeçote anterior, no qual não havia dissipador, não era possível a utilização de extrusão de material PLA, pois este por apresentar maior viscosidade em estado fundido em relação ao ABS, havia um aumento na resistência fluidica para empurrar o filamento dentro do tubo. Com a introdução do dissipador de calor, a temperatura no filamento cai bruscamente no interior do mesmo, como verificado nas simulações, devido à sua eficiência térmica na retirada de calor de forma a reduzir o volume de material fundido dentro do tubo de inox e conseqüentemente se reduz a força necessária para realizar a extrusão. Outra mudança que reduziu a zona de derretimento foi a diminuição na altura do bloco aquecido.

Assim, verifica-se que estas mudanças construtivas no cabeçote possibilitaram a utilização do PCL e PLA, além do uso do ABS ainda que alguma limitação. O PCL e o PLA têm grande importância para pesquisas na área de bioengenharia devido ao fato destes materiais serem biocompatíveis, aumentando não só a versatilidade da máquina no que diz respeito ao uso de novos materiais, mas também o escopo de pesquisa científica ao que ela se aplica.

6. REFERÊNCIAS

- Additive3D, 2014 <http://www.additive3d.com/lcs_001.htm, acessado em 10/Jan/2014.>
- ASTM F2792-10, 2010 “Standard terminology for additive manufacturing Technologies, copyright ASTM International”, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.
- Bradshaw, S.; Bowyer, A., Haufe, P., 2010, “The Intellectual Property Implications of Low-Cost 3D Printing,” SCRIPTed p5. Disponível em <http://www2.law.ed.ac.uk/ahrc/script-ed/vol7-1/bradshaw.asp>
- Cooper, K. G., 2001, “Rapid Prototyping Technology, Selection and Application”, Marcel Dekker Inc. New York pg. 1.
- Hoque M. E., 2011, “Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering”, InTech, pg. 1.
- Huebner, K.H., Dewhurst, D.L., Smith, D.E., Byrom, T.G., 2001, “The Finite Element Method for Engineers”, 4th edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Inforçatti Neto, P., Silva, J.V.L., 2007, “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 Graduação, Faculdade Independente do Nordeste.
- Inforçatti Neto, P., Pereira, F.D.A.S, Rezende, R.A., Lopes da Silva, J.V., 2012, “Development of a Extrusion Head for Biopolymers Handling and Application.. 1st International Conference on Design and Processes for Medical Devices”- Padenghe sul Garda - Brescia – Italy.
- Krishnamoorthy, C. S., 1994, “Finite Element Analysis, Theory and Practice, 2nd edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited”.
- Malone, E., 2008, “Freeform Fabrication of Complete Electromechanical Devices”, Doctoral Dissertation, A dissertation presented to the faculty of the Graduate School of Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Cornell University, Ithaca, USA.
- Matweb, 2013. <<http://www.matweb.com>> acessado em 24/Set/2013
- Moldflow Material Testing Report MAT2238 NatureWorks , 2007, <http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Properties_Documents/PropertiesDocument_7000DMoldFlowReport_pdf.pdf, acessado em 05/Jan/2014>
- Södergård, A., Mikael, S., 2002. "Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition". Progress in Polymer Science 27 (6). pg. 1137.
- Volpato, N. 2007, “Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações.” São Paulo: Blücher, pg 9-10.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY AND IMPROVEMENT OF A FUSED DEPOSITION MODELING TOOL HEAD THROUGH FINITE ELEMENT ANALYSIS WITH TRANSIENT THERMAL MODULE

Frederico David Alencar de Sena Pereira, frederico.pereira@cti.gov.br¹

Matheus Stoshy de Freitas, matheus.freitas@cti.gov.br¹

Jorge Vicente Lopes da Silva, jorge.silva@cti.gov.br¹

João Maurício Rosário, rosário@fem.unicamp.br²

¹Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Divisão de Tecnologias Tridimensionais

²Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projetos Mecânicos

Abstract: *The present study aimed the analysis and improvement of the heated region of an FDM tool head which allows the use of thermoplastic polymers in the form of filaments , based on Additive Manufacturing (MA) technology Fused Modeling Deposition at the Fab@CTI machine. The Fab@CTI is an open-source MA machine based on the Fab@Home project, which was built and adapted in Centre of Technology and Information Renato Archer in order to collaborate on research initiatives in the field bioengineering and biomaterials with partners in many research institutions . A new physical model has been proposed a heated region, reducing the heated block at 50% of height relative to the previous model as well the addition of a finned aluminum heat sink attached to stainless steel tube, where the filament is driven into the heated region to your fusion and further deposition. These changes were aimed at solving the problems of instability when the use of Poly-Lactic Acid and Acrylonitrile Butadiene Styrene. This new model was designed using Solidworks 2012 and the analysis in the finite element software ANSYS version 14 with the transient thermal module. The results of computational analysis has shown that the proposed model provides a better control of the temperature distribution along the stainless steel tube. The new model was implemented and tested experimentally by printing 3D models with ABS , PLA and PCL. It was concluded that the changes made have kept the system capable of process PCL in addition to expanding range of materials deposition with the inclusion of the PLA . The extrusion of ABS not achieved with total success, although it is possible to print with this material, it requires further investigation. The result was satisfactory, since the PCL and PLA are of great importance in biomaterials research in the field of bioengineering, context which the Fab@CTI applies.*

Keywords: *Bioengineering, Scaffolds, Rapid Prototyping, 3D Printing*