

Análise de parâmetros de impressão de corpos de provas usando modelagem por deposição de fundido (FDM)

Martha Liliana González Villamil (Universidad Francisco de Paula Santander) marthagonzalez453@gmail.com
Gaudy Carolina Prada Botia (Universidad Francisco de Paula Santander) gaudy pb@gmail.com
Breno Ferreira Lizardo (Universidade Federal de Minas Gerais) bflizardo@gmail.com
Luciano Machado G. Vieira (Universidade Federal de Minas Gerais) lucianomgv@ufmg.br
Juan Carlos Campos Rubio (Universidade Federal de Minas Gerais) juan@ufmg.br

Resumo:

Este artigo apresenta uma análise de influência nos parâmetros de impressão 3D tais como: geometria de preenchimento, cores do ABS, temperaturas e velocidade de impressão, para corpos de provas impressos em ABS tomando em conta a norma ASTM D638:2014. Se procuram os parâmetros e combinação dos mesmos usando a metodologia de Taguchi visando obter peças impressas com desempenho adequado enquanto a suas propriedades físicas como: módulo de elasticidade, deformação máxima e resistência à tração. Finalmente são apresentadas as conclusões.

Palavras chave: ABS, impressão 3D, ASTM D638, Taguchi.

3D Print settings analysis of testing bodies using fused deposition modeling (FDM)

Abstract

This paper presents an influence analysis of 3D print parameters such as geometry filling, ABS colors, temperature and velocities printing of ABS testing bodies using the norm ASM. In order to get the best suitable ABS printed bodies in function of their physical properties such as Young module, maxima deformation and traction resistance, printing parameters selection are found by means of Taguchi methodology. Finally, is presented the conclusions.

Key-words: ABS, 3D printing, ASTM D638, Taguchi methodology.

1. Introdução

Nos últimos anos, com o desenvolvimento tecnológico nas áreas da computação, eletrônica e software de desenho assistido por computador (CAD), tem-se logrado a transformação dos modelos virtuais em modelos físicos com rapidez e precisão. A evolução e expansão destas tecnologias tem permitido o início da prototipagem rápida (PR) (Felgueiras Antas, 2007). A tecnologia de impressão 3D teve um crescimento considerável; sendo, um processo de fabricação por camadas. O progressivo interesse pela impressão 3D é evidente na indústria do plástico; este processo permite obter objetos 3D em um curto período de tempo admitindo flexibilidade no projeto, câmbios do mesmo e correção de erros nas primeiras etapas de desenvolvimento. Além disso, as peças fabricadas são totalmente funcionais e podem ser sometidas a provas em condições reais (Alcántara, 2015).

Dentro das técnicas da prototipagem rápida, a modelagem por deposição de fundido (FDM - Fused Deposition Modeling) é uma das mais usadas, já que possui vantagens como: relação custo-benefício, menor tempo de fabricação, eliminação de ferramentas complexas e com alto valor agregado e uma maior flexibilidade (Lizardo, 2016). Os materiais mais utilizados principalmente nesta tecnologia são: Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliláctico (PLA).

A prototipagem rápida foca-se em uma ampla gama de aplicações em diferentes áreas como: arquitetura, engenharia, topografia, educação, medicina, robótica, entre outras. Entre as diferentes aplicações na área da medicina, destacam-se a fabricação de estruturas ósseas, próteses, órgãos, entre outras, usadas para procedimentos de reabilitação em pacientes. Assim, a PR converte-se em uma tecnologia útil para produzir protótipos de objetos personalizados; desta maneira, resultou ser a melhor opção para a construção de próteses visando ajudar a criar e provar várias características de projeto, ideias, conceitos, funcionalidades, parâmetros de impressão adequados e seleção de materiais (Cuellar Rojas, 2015). Geralmente as pesquisas sobre peças impressas em 3D se realizam isoladas entre elas e por grupos de pesquisas mono disciplinares, onde só se persegue um objetivo em geral, normalmente de carácter mecânico ou eletrônico, deixando fora de estudo outros temas como a viabilidade ou factibilidade do produto, ou a influência dos parâmetros de fabricação (Loaiza Bernal, 2012).

Em alguns casos os protótipos obtidos pela tecnologia de Modelagem por Deposição de Fundido, não tem propriedades mecânicas adequadas no produto final, evitando obter o máximo potencial que estas tecnologias podem proporcionar (Colares Magalhães, 2010). Devido a isto, recentemente tem-se realizado grande quantidade de estudos, tratando de compreender os fatores que influenciam no comportamento mecânico das peças obtidas através das técnicas de prototipagem rápida (Colares Magalhães, 2010). As tecnologias de fabricação por camadas mostram alto potencial para a produção de peças funcionais com propriedades mecânicas desejadas. Desde a seleção dos parâmetros, o processo FDM pode potencialmente produzir protótipos com propriedades desejadas dentro de limites impostos (Colares Magalhães, 2010).

Nos últimos anos foram realizados estudos focados em conhecer como influem os parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas de tração em peças fabricadas com FDM (Colares Magalhães, 2010), (Albuquerque, 2014) (Molina Osejos, 2016) (Lizardo, 2016). Os parâmetros de impressão estudados tem sido: a velocidade de impressão, a temperatura da base de impressão, a temperatura do extrusor, o preenchimento, o número de perímetros, altura da camada, o diâmetro do bico e uso do ventilador de camada. Em estes estudos se escolheram três parâmetros de avaliação: cores diferentes de ABS, temperatura de impressão, as geometrias de preenchimento e as velocidades de impressão baseados em estudos prévios (Lizardo, 2016) (Wittbrodt & Pearce, 2015).

Neste trabalho se apresenta a influência dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas obtidas para peças de ensaio de tração fabricadas em Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), utilizando a modelagem por deposição de fundido (FDM), escolhendo-se três (3) cores de ABS, três temperaturas de impressão, três geometrias de preenchimento e três velocidades de impressão. Visando identificar os parâmetros que maior influência tem nas propriedades mecânicas minimizando o número de experimentos o método estadístico de Taguchi foi usado (Lizardo,2016) (Torres, Cotel, Karl & Gordon, 2015).

1.1 Tecnologia de Modelagem por Deposição de Fundido (FDM)

O processo FDM consiste em construir um protótipo mediante o depósito de um material extrudado. A extrusão realiza-se com a passagem contínua do material em forma de filamento dentro de um tubo aquecido com um orifício restringente, esquentando-o até ficar semifluido. Quando o material extrudado entra em contato com a superfície da peça que está sendo fabricada, solidifica-se e cola-se na camada anterior. A mesa, tem um mecanismo de elevação que movimenta no eixo Z a quantidade correspondente da espessura de uma camada que deposita-se e repete-se o processo até que a peça fique pronta (Volpato,2007). A Figura 1 mostra o esquema de funcionamento desta tecnologia. Os termoplásticos adequados neste processo incluem poliéster, polipropileno, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e elastômero.

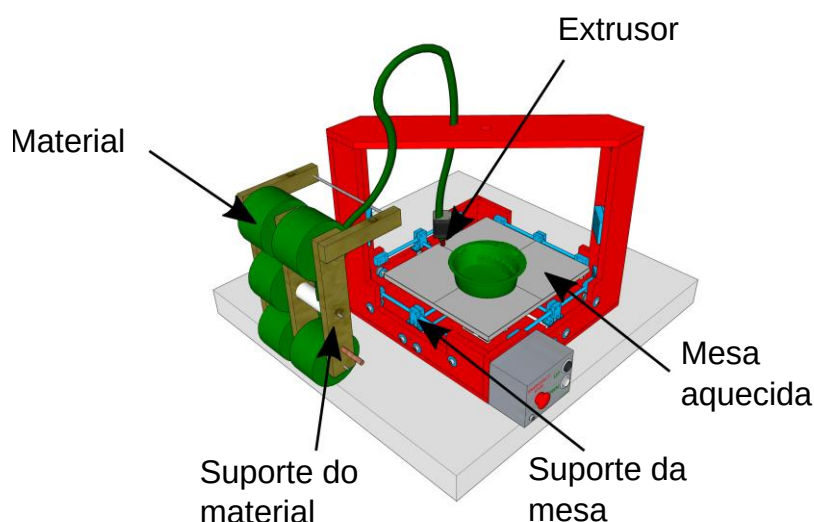


Figura 1. Representação gráfica do processo de Modelagem por Deposição de Fundido (FDM)

1.2 Método de Taguchi

O método de Taguchi foi desenvolvido pelo engenheiro e estadístico Genichi Taguchi e seu objetivo é controlar a qualidade dos produtos e processos, levando em conta uma maior produtividade e redução de custos. Taguchi descreve um processo que inicia sua transformação desde o material de entrada até o produto terminado. No processo, tem variáveis que são controláveis e outras variáveis não controláveis. Um propósito fundamental de controle de qualidade é minimizar tais variações. Taguchi denomina as variações como fatores de ruído. Um fator de ruído é uma fonte de variação que não é possível controlar e afeta as características funcionais do produto (Montgomery, 2004).

No projeto robusto, o funcionamento e desempenho do processo são relativamente insensíveis às variações do projeto e os parâmetros de manufatura. Contudo, em um projeto robusto espera-se que o produto não seja muito afetado pelos fatores de ruído (Rezende, 2016).

Taguchi foca-se em três importantes etapas no desenvolvimento de processos e produtos: projeto de sistemas, projeto de parâmetros e projeto da tolerância. Para o primeiro caso é o desenvolvimento de conceitos, ideias e novos métodos para proporcionar produtos inovadores e melhorados. No segundo caso, os níveis dos fatores elegem-se para minimizar a interrupção das características do produto. Por último, a terceira etapa realiza-se a redução na variação da característica obtida com os parâmetros do projeto. Este passo é a busca de melhoria da qualidade com custo mínimo. Para a determinação do nível ótimo da característica e, assim, atender as especificações do produto ou atingir a robustez de um processo, o método Taguchi utiliza a relação sinal-ruído (S/N ou η), que apresenta três condições: Menor é melhor, Maior é melhor e nominal é melhor (Rezende, 2016).

1.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração é a prova mais utilizada para determinar as propriedades mecânicas da maioria dos materiais. No ensaio de tração, um corpo de provas com formas e dimensões padronizadas somete-se a uma força de tração uniaxial que tende deformar a peça. A cabeça da amostra fixa-se nas pinças de uma máquina de ensaio que aplica cada vez maiores tensões em sua direção axial. Durante a prova, mede-se a força e a deformação correspondente. Em geral, a prova é realizada até romper a amostra. A Figura 2 mostra uma máquina de ensaio de tração (Padilha, 2000).



Figura 2. Ensaio de tração

2. Métodos e materiais

O método Taguchi se utilizou visando conhecer a influência dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas mediante provas de tração das peças feitas em ABS. Para a análise deste método, utilizou-se a matriz ortogonal L9, a qual é a matriz usada na abordagem de Taguchi para a análise de 9 corpos de prova e um máximo de 4 fatores. Gera-se pelo software MINITAB versão 17, os dados utilizados para calcular a relação sinal-ruído (S/N) maior é melhor, conforme a Tabela 1. Assim o experimento se reduz a nove (9) ensaios. Com três testes para cada ensaio, se utilizaram os dados de vinte e sete (27) amostras para analisar os resultados, conforme a Figura 3.

Ensaio	Cor	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Preenchimento
1	Preto	240	10	Linha
2	Preto	250	20	Circular
3	Preto	260	30	Octogonal
4	Vermelho	240	20	Octogonal
5	Vermelho	250	30	Linha
6	Vermelho	260	10	Circular
7	Azul	240	30	Circular
8	Azul	250	10	Octogonal
9	Azul	260	20	Linha

Tabela 1. Arranjo ortogonal L_9



Figura 3 - Corpos de provas impressos

3. Resultados

As mostras de ABS prepararam-se de acordo com a norma ASTM D638 (2014). Os ensaios de tração realizaram-se com uma velocidade de 2 mm/s, um valor adequado para plásticos semirrígidos. As provas foram feitas utilizando uma máquina de ensaio universal Shimadzu modelo AG-X Plus, com uma capacidade de 100 KN. Os dados obtidos no experimento, através da disposição estatística de Taguchi, estão representadas na Tabela 2, onde: “E” é o módulo de elasticidade, “ σ_t ” é a resistência à tração e “ ϵ ” é a deformação. Os dados são os valores médios das três amostras de cada ensaio.

Ensaio	Cor	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Preenchimento	E (Gpa)	σ_t (Mpa)	ϵ
1	Preto	240	10	Linha	1,03	18,38	2,23
2	Preto	250	20	Circular	1,04	17,71	2,17
3	Preto	260	30	Octogonal	1,10	17,15	2,10
4	Vermelho	240	20	Octogonal	0,91	15,22	2,64
5	Vermelho	250	30	Linha	1,02	16,72	2,15
6	Vermelho	260	10	Circular	1,38	16,67	2,28
7	Azul	240	30	Circular	1,54	16,56	2,42
8	Azul	250	10	Octogonal	1,03	16,73	2,33
9	Azul	260	20	Linha	1,00	15,36	2,17

Tabela 2. Resultados dos experimentos para o arranjo ortogonal L_9 de Taguchi

Foi usado o programa estatístico Minitab, versão 17.1.0.0, para calcular e ordenar o grau de influência de cada fator de controle para obter o um melhor desempenho a respeito dos quatro parâmetros: Módulo de elasticidade, força máxima, resistência à tração e deformação máxima. A categoria utilizada na relação sinal-ruído (S/N) foi: maior é melhor.

3.1 Módulo de elasticidade

Para obter um melhor desempenho no módulo de elasticidade, também chamado módulo de Young, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela 3, onde pode-se apreciar o nível de influência dos fatores, classificados de 1 a 4, onde o menor valor indica maior influência. Assim, o preenchimento é o parâmetro de mais importância e a cor o parâmetro de menor importância, quando o objetivo é obter um melhor módulo de elasticidade.

Nível	Cor	Temperatura	Velocidade	Preenchimento
1	0,5223	1,1185	1,1467	0,1790
2	0,7475	0,3004	-0,1249	2,3260
3	1,3765	1,2275	1,6245	0,1414
Delta	0,8541	0,9270	1,7494	2,1846
Influência	4	3	2	1

Tabela 3. Resposta da razão sinal-ruído, maior é melhor, do Módulo de Elasticidade

A Figura 4 mostra os dados de saída da Tabela 3 graficamente, onde se pode apreciar a influência de cada característica de cada fator. O gráfico mostra os valores da média da relação sinal ruído, onde os valores maiores representam o melhor parâmetro. Assim, se pode apreciar que os parâmetros que resultam em um melhor módulo de elasticidade são: preenchimento circular, velocidade de 30mm/s, temperatura de 260°C e a cor azul.

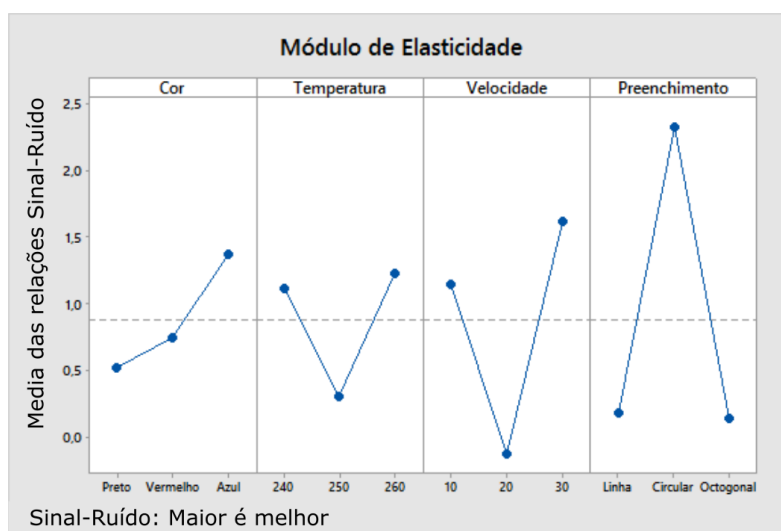
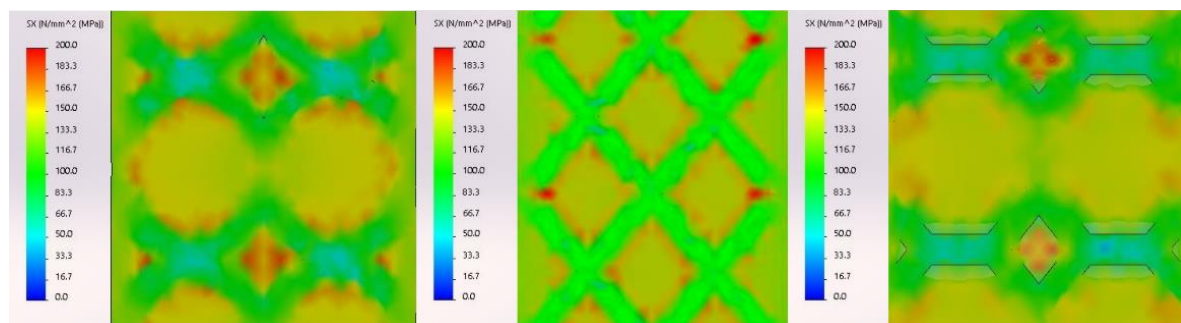


Figura 4. Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade está relacionado com a deformação máxima da peça tal que ela consiga voltar a sua forma inicial. Esta propriedade foi influenciada principalmente pela geometria de preenchimento. Porém, o preenchimento circular apresentou melhor desempenho.

A Figura 5 mostra os resultados de uma simulação de elementos finitos, onde pode-se apreciar a distribuição do esforço interno de uma peça sometida a uma tração para três geometrias de preenchimento diferentes. Quando o preenchimento é octogonal, a distribuição do esforço é

concentrado somente em algumas zonas, gerando, assim, que algumas partes da peça sofram um esforço maior. Quando o preenchimento é linha, o esforço é concentrado nas quinas. Finalmente, quando o preenchimento é circular, se observa uma distribuição mais uniforme. Isto, explica porque este preenchimento apresenta um melhor desempenho, pois, uma melhor distribuição se traduz em um esforço uniforme em cada parte da peça.



a. Circular

b. Linha

c. Octogonal

Figura 5 - Simulação mecânica para peças com três geometrias de preenchimento: a. Circular b. Linha c. Octogonal

3.2 Resistência à tração

A Tabela 4 e a Figura 6 mostram os dados de saída do programa estatístico para a resistência à tração. Para esta propriedade, o parâmetro de maior influência foi a cor, seguido da velocidade, a temperatura e o preenchimento.

Nível	Cor	Temperatura	Velocidade	Preenchimento
1	24,98	24,44	24,73	24,50
2	24,19	24,63	24,12	24,60
3	24,20	24,29	24,51	24,27
Delta	0,80	0,35	0,62	0,33
Influência	1	3	2	4

Tabela 4 - Resposta da razão sinal-ruído, maior é melhor, da resistência à tração

Assim, quando se precisa de obter melhor desempenho respeito à resistência à tração, os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram: cor preta, velocidade 10mm/s, temperatura 250°C e preenchimento circular.

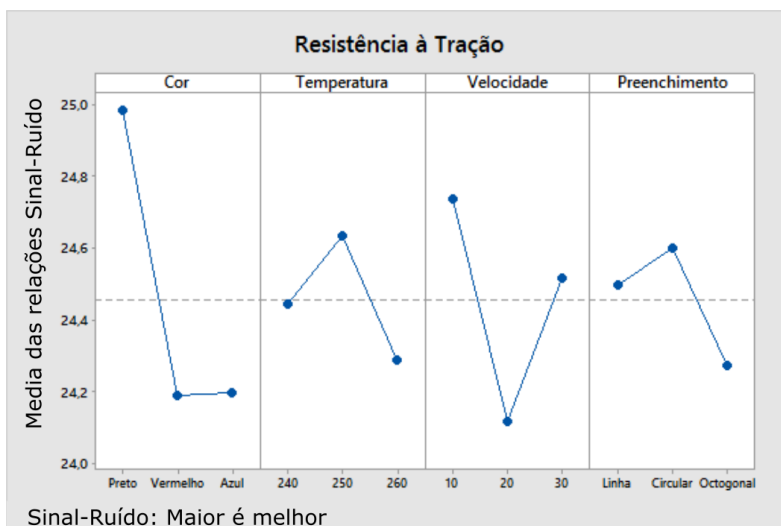


Figura 6 - Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, da resistência à tração

A cor dos ABS usados em estes experimentos, apresentaram características diferentes. Os corpos de provas impressos em ABS de cores pretos, apresentaram melhores desempenhos em termos de máxima resistência ao quebra, seguidos de uma velocidade de impressão baixa. Imprimir a baixas velocidades permitem obter uma peça de melhor acabado a expensas de precisar um tempo maior.

3.4 Deformação máxima

A Tabela 5 e a Figura 7 mostram os dados de saída do programa estatístico para a Deformação máxima. Para esta propriedade, o parâmetro de maior influência foi a temperatura, seguido da cor, preenchimento e a velocidade.

Nível	Cor	Temperatura	Velocidade	Preenchimento
1	6,734	7,713	7,191	6,801
2	7,442	6,928	7,310	7,202
3	7,266	6,800	6,941	7,439
Delta	0,708	0,913	0,370	0,638
Influência	2	1	4	3

Tabela 5 - Resposta da razão sinal-ruído, maior é melhor, da deformação máxima

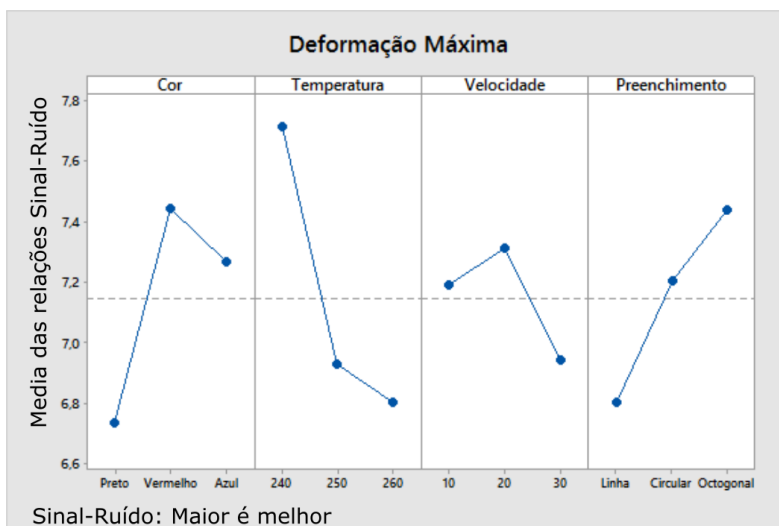


Figura 7 - Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, da deformação máxima

Assim, quando se precisa de obter melhor desempenho respeito à Deformação máxima, os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram: temperatura 240°C cor vermelho, preenchimento octogonal, velocidade 20mm/s.

A deformação máxima, faz referência à máxima distancia que pode se estirar a peça antes de quebrar-se. Esta propriedade física está relacionada com a cristalização e nucleação do polímero. Estes processos são afetados pela temperatura de impressão e tempo de resfriamento entre camadas.

4. Conclusões

Foram apresentados os resultados experimentais dos ensaios de tração em corpos de provas impressos em ABS. Mediante a metodologia do Taguchi foram selecionados os parâmetros mais relevantes para obter uma peça com melhores propriedades mecânicas.

A ordem de influência dos fatores de controle para o módulo de elasticidade foram: geometria de preenchimento circular, velocidade de 30 mm/s, temperatura de 260°C e cor ABS azul.

Mecanicamente os melhores resultados foram obtidos pela geometria de preenchimento circular, apresentando um maior módulo de Young, menores pontos críticos de concentração de esforços, melhor distribuição das cargas; em termos de rigidez, seria o melhor candidato para fabricação de elementos de suporte e partes fixas.

A ordem de influência dos fatores de controle para a resistência à tração: cor ABS preto, velocidade de 10 mm/s, temperatura de 250 °C e geometria de preenchimento circular.

A ordem de influência dos fatores de controle a deformação máxima: temperatura de 240 °C, cor ABS vermelho, geometria de preenchimento octogonal, velocidade de 20 mm/s.

Referências

- ALBURQUERQUE, ALBERTO, J.** Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas. Universidad Carlos III de Madrid. España, 2014.
- ALCÁNTARA, V.** De la impresión 3D a la manufactura aditiva. Tecnología del plástico. www.plastico.com. 2015
- CUELLAR ROJAS, A.** Impresoras 3D y la medicina. Convención Internacional de Salud Pública. Cuba. 2015
- COLARES MAGALHÃES, L.** A influência dos parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas pela técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Curitiba. 2010.
- FELGUEIRAS ANTAS, A. F.** Utilização das Tecnologias de Prototipagem Rápida na Área Médica. mestre em Design Industrial. Universidade do Porto. Porto. 2007.
- LIZARDO, B.** Utilização do método de taguchi para estudo da influência dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas de peças em PLA obtidas por manufatura aditiva. Congresso nacional de engenharia mecânica. Fortaleza, Ceará, Brasil. 2016.
- LOAIZA BERNAL, JAIR L.** Diseño y simulación de un prototipo de prótesis de mano bioinspirada con cinco grados de libertad. Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2012.
- MOLINA OSEJOS, JAIME VINICIO.** Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PL semi-rígidos impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes. Tesis de maestría. Escuela politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2016.
- MONTGOMERY, DOUGLAS C.** Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 4 ed. Rio de Janeiro, Brasil. LTC. 2004.
- PADILHA, ANGELO F.** Materiais de engenharia microestrutura e propriedades. Hemus livraria. Curitiba, Brasil. 2000
- REZENDE, BRUNA A.** Estudo da furação de um material compósito tipo sanduíche. Teses Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2016.
- TORRES, J; COTELO, J; KARL, J & GORDON, A.** Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives. Revista the minerals, metals & materials society, JOM 67.5:1183-1193. 2015
- VOLPATO, N.** Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. Edgard Blücher. 2007.
- WITTBRODT, B., PEARCE, J.M.** The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. Additive Manufacturing 8: 110-116. 2015