

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI PARA ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS EM PLA OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

Breno Ferreira Lizardo, bflizardo@gmail.com¹

Luciano Machado Gomes Vieira, lucianomgv@ufmg.br¹

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br³

Paulo Eustáquio de Faria, paulofaria@ufmg.br¹

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br^{1,2}

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção – Escola de Engenharia UFMG

²Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia UFMG

³Graduação em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Antonio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte, MG – CEP: 31270-901

Resumo: Nos últimos anos, a Manufatura Aditiva (MA) ou Prototipagem Rápida por Deposição de Material, vem se transformando em uma tecnologia economicamente interessante para produção de pequenas séries de peças com geometrias complexas e em tempo reduzido. A demanda de novos produtos, juntamente com o desenvolvimento da engenharia cria um ambiente favorável para a evolução da tecnologia de MA. Diversas áreas de desenvolvimento demandam cada vez mais, protótipos funcionais em materiais adequados, com características mecânicas, térmicas e de compatibilidade, entre outros. A modelagem de fusão e deposição (FDM) é um processo de MA típico que pode fabricar protótipos de plástico como o polímero láctico (PLA), acrílico butadieno estireno (ABS), entre outros. O comportamento mecânico das peças FDM é dependente das propriedades da matéria prima e dos parâmetros de fabricação da MA. Este trabalho relaciona propriedades mecânicas de peças PLA fabricados pela impressora RapMan 3.1. Usando a abordagem de Taguchi como projeto de experimento (DOE), foram examinados os parâmetros do processo de FDM, como temperatura de extrusão, padrões de preenchimento, velocidade de extrusão e cor do PLA. Utilizando como base condições realistas para usuários padrão, três níveis dos fatores foram selecionados. Este estudo quantifica a resistência à tração e módulo de elasticidade de componentes impressos pela norma ASTM D638. Os resultados dos ensaios de tração mostram que o processo de fabricação FDM pode fornecer bons e reprodutíveis resultados em relação à resistência mecânica das peças impressas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, extrusão, PLA, Taguchi, tração

1. INTRODUÇÃO

O fim de uma série de patentes que protegiam a tecnologia de impressão 3D no ano de 2008 possibilitou que as impressoras de baixo custo chegassem ao mercado. Desde então, o número de usuários dessa tecnologia aumentou significativamente. Já é possível encontrar algumas dessas máquinas com preços próximos a 500 euros, enquanto máquinas FDM industriais têm preços a partir de 15.000 euros (Minetola *et al.* 2016). As impressoras 3D de baixo custo baseadas no processo FDM são vendidas muitas vezes como peças separadas para serem montadas pelo próprio usuário e podem ser utilizadas em um ambiente doméstico ou de escritório. O crescente interesse do público, vinculado à ideia de “faça você mesmo”, provocou uma variação expressiva nas finalidades para as quais essas máquinas são utilizadas. O que antes era restrito à área de fabricação de protótipos, culminou na fabricação de objetos diversos (brinquedos, presentes) e também peças funcionais para aplicações de baixa responsabilidade. Peças fabricadas com a tecnologia FDM tem entre 65% e 72% da resistência à tração das mesmas peças produzidas por injeção em moldes, com custo de fabricação significativamente menor, justificando o rápido aumento de sua utilização no mercado (Rosas, 2013).

Outro ponto importante dentro do processo FDM são os materiais utilizados para a construção das peças. Geralmente são usados polímeros, devido às suas baixas temperaturas de transição vítrea (ponto em que o material deixa de ser rígido e se torna pastoso). O PLA (Ácido Polilático) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) são os materiais mais utilizados.

O ABS e o PLA tem pontos de operação com temperaturas mais baixas. Isso permite que eles sejam extrudados fora de um ambiente industrial dedicado a esse processo. O ABS foi o material usado inicialmente, mas a fabricação de peças com ABS sem um equipamento que possua mesa aquecida é uma tarefa extremamente difícil, pois grandes distorções surgem devido ao alto coeficiente de retração térmica do material. Outro problema do ABS é a liberação de gases de forte odor, possivelmente tóxicos durante o processo de fabricação, que limita o uso em equipamentos projetados para áreas fechadas ou escritórios. (Wittbrodt e Pearce, 2015). A utilização do PLA como material de fabricação permite que o processo ocorra sem o auxílio de uma mesa aquecida e elimina o problema dos odores durante a impressão. Por apresentar uma menor temperatura de operação que o ABS, esse material consome menos energia no processo de fabricação. (Torres *et al.* 2015). Apesar da crescente utilização do PLA, ainda há uma falta de estudos que nos permitam prever o comportamento das peças fabricadas com esse material quando submetido a esforços e isso limita significativamente sua utilização.

Com o intuito de avaliar a influência de parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração de peças fabricadas em PLA utilizando a manufatura aditiva, este trabalho selecionou três cores de PLA, três temperaturas de impressão, três geometrias de preenchimento e por fim, três velocidades de impressão. Desse modo, O método estatístico para projeto de experimento de Taguchi foi utilizado para identificar qual desses parâmetros apresentam maior influência no módulo de elasticidade, na resistência à tração e na deformação máxima.

1.1. Processo FDM

Segundo Liou (2007), o processo de manufatura aditiva FDM (Fused Deposition Modeling) foi inicialmente desenvolvido pelo Advanced Ceramics Research (ACR) e posteriormente aprimorado pela empresa Stratasys Inc. No FDM, um carretel de filamento de material termoplástico é alimentado a uma cabeça de impressão por meio de um sistema de roletes. O filamento passa por um aquecedor onde atinge uma temperatura de trabalho e é forçado através de um bico extrusor. A cabeça de impressão se movimenta no plano XY depositando o material extrudado no local adequado para formar uma camada da geometria desejada. A mesa então se desloca no eixo Z e o processo é repetido até que o processo termine. A Figura 1 ilustra o esquema de funcionamento descrito acima.

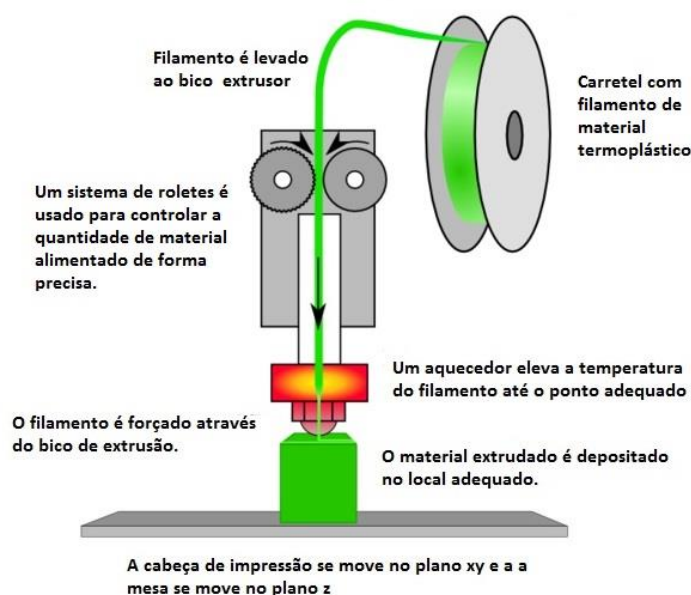


Figura 1. Esquema de funcionamento do processo FDM.

Ainda segundo Liou (2007), a plataforma em que o material é depositado tem de ser mantida a uma temperatura adequada, garantindo que o material termoplástico depositado enrijeça em um tempo por volta de 0,1 segundos. A temperatura deve também garantir que o material não resfrie rápido demais, o que pode levar a distorções na geometria final da peça. Os filamentos usados normalmente vêm em duas espessuras padrão, 1,75 e 3mm. Os bicos de extrusão podem aquecer o filamento termoplástico até por volta de 280°C e o material extrudado sai com diâmetros de variam entre 0,10 e 0,70mm. Os parâmetros de fabricação em geral, podem ser ajustados manualmente. O processo pode contar também com um bico de extrusão auxiliar, que tem por finalidade a deposição de material de suporte. O material de suporte pode ser necessário para a manufatura de objetos com geometrias complexas ou que não possam ser apoiados nas camadas anteriores. Na escolha do material de suporte, deve-se levar em conta a necessidade posterior de remoção. O uso de materiais menos resistentes que o de modelagem ou solúveis em água à altas temperaturas é conveniente. A afinidade entre os materiais de suporte e modelagem deve ser pequena (Minetola *et al.* 2016).

O processo FDM é o segundo mais utilizado dentre as técnicas de manufatura aditiva (Leite *et al.* 2011). As principais vantagens do processo são: ótimo custo-benefício, menor tempo de fabricação, eliminação de ferramentas de alto valor

agregado e flexibilidade. Apesar disso, a precisão dimensional não é muito elevada e a baixa diversidade de materiais é um fator limitante para o uso dessa tecnologia. Uma das possíveis soluções para esse problema é o desenvolvimento de novos materiais. No entanto, isso requer um conhecimento profundo sobre as características dos materiais em diferentes condições de operação. Outra forma de lidar com o problema é realizando um ajuste dos parâmetros do processo durante o estágio de fabricação, melhorando assim as propriedades finais do material (Panda *et al.* 2014).

No processo FDM, o material é depositado camada por camada, inicialmente no contorno da geometria e depois em seu interior. A deposição de material no interior da camada é denominada preenchimento. Várias estratégias de preenchimento podem ser empregadas. As mais utilizadas no processo são as estratégias Raster, Contour ou uma combinação das duas. Muitas vezes o preenchimento Raster é alternado nas camadas para conseguir maior resistência. A Figura 2 (a;b;c) ilustra as formas de preenchimento citadas.

Os principais parâmetros que podem ser controlados em um processo FDM são: a espessura da camada, a espessura do filamento no preenchimento e no contorno, fresta (gap) entre os filamentos depositados e o ângulo de Raster. Esses parâmetros são controlados ajustando a temperatura do bico extrusor, a velocidade de alimentação do filamento termoplástico, a velocidade de deslocamento do cabeçote e seu movimento (Volpato, 2007). A Figura 2 (d) ilustra esses parâmetros de preenchimento. Segundo Magalhães *et al.* (2010), dois parâmetros se mostraram primordiais para a qualidade estrutural das peças produzidas pelo processo FDM: os valores de gap e a orientação da disposição do preenchimento. Menores valores de gap reduzem os vazios estruturais resultando em melhores propriedades mecânicas. Devido à forma de fabricação, as propriedades mecânicas são diferentes em diferentes direções (anisotrópicas). Alternando então a disposição do preenchimento, favorece-se uma direção ou outra.

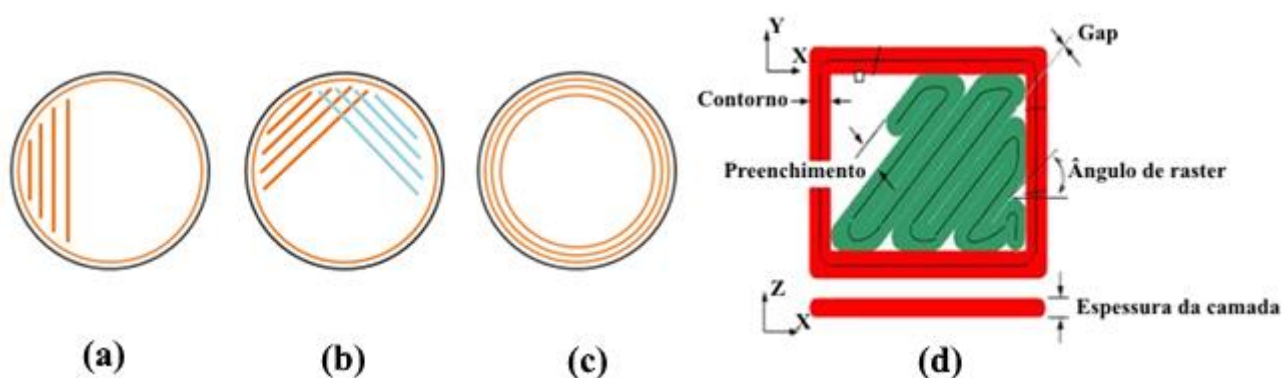


Figura 2. (a) Raster (b) Raster Alternado (c) Contour (Adaptado de CATER, 2014); (d) Camada e seu preenchimento.

1.2. PLA

O PLA (Ácido Polilático) é um dos materiais mais utilizados nas impressoras 3D de baixo custo disponíveis no mercado. Sendo biodegradável e permitindo a reciclagem ou compostagem, o PLA é o material preferido de usuários de impressoras 3D FDM. (Torres *et al.* 2015). Além disso, o PLA é um material biocompatível que não apresenta risco ao ser usado em um ambiente doméstico ou de escritório. Uma das desvantagens deste material é ao atingir a temperatura próxima de 60°C o material perde a sua rigidez, impedindo que as peças fabricadas operem em temperaturas elevadas.

Em seu estudo, Tymrak *et al.* (2014), variando uma série de parâmetros como espessura da camada e orientação do preenchimento, acharam para peças fabricadas com PLA, um limite de resistência à tração por volta de 55 Mpa e um módulo de elasticidade 3365 MPa com desvios de até 12%. Já no estudo de Wittbrodt e Pearce (2015), variando a cor do PLA utilizado na fabricação, chegou-se a um limite de resistência médio de 53,7 MPa, com desvios de até 6%. Ambos os estudos usaram um preenchimento de 100% na fabricação do corpo de prova.

1.3. Método de Taguchi

Segundo Almeida e Toledo (1989), Taguchi define custo como a perda imposta à sociedade antes que o produto seja distribuído aos consumidores e qualidade como a perda que um produto causa à sociedade depois de ser distribuído. Dessa forma, entende-se que qualquer variação em uma característica de desempenho do produto, implica em uma perda para o consumidor e consequente menor qualidade do produto. O método de Taguchi, também chamado de Método do Projeto Robusto, busca desenvolver um produto ou processo em que os parâmetros especificados durante a fase de projeto sejam minimamente afetados pelos efeitos que possam causar variabilidade em seu desempenho.

Segundo Lizardo (2010), um processo de engenharia que funciona de forma ideal, é aquele em que toda a energia fornecida ao sistema é usada para desempenhar sua função. Quando a eficiência é menor que 100%, parte dessa energia é transformada em outra forma de energia indesejada responsável por problemas como: vibrações, trincas, desgastes, e

outros. Essa parte não utilizada da energia é considerada como perda. Um sistema ou processo pode ser modelado conforme ilustra a Fig. 3.

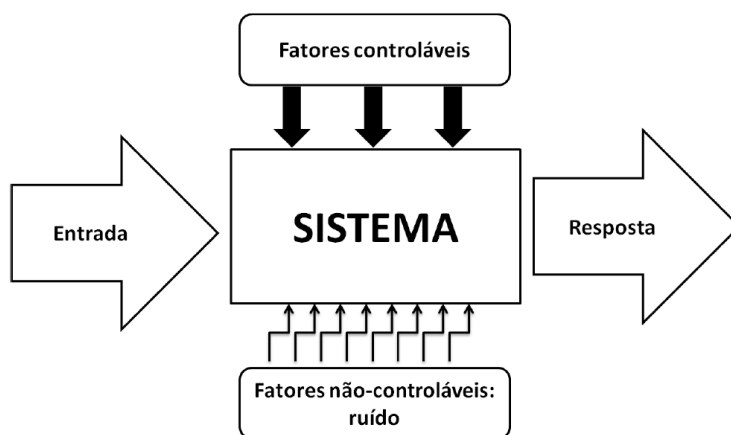


Figura 3. Modelo geral de um sistema ou processo.

Conforme ilustrado, a resposta de um sistema a um determinado estímulo depende de fatores controláveis e fatores não controláveis (ruídos). Para analisar qual a resposta dada pelo sistema, pode-se adotar duas posturas distintas: a primeira consiste em variar um parâmetro por vez e a segunda variar vários parâmetros de uma só vez. O primeiro tem mais chances de levar a um resultado correto mas exige uma grande quantidade de experimentos para analisar vários parâmetros, que pode torná-lo inviável em termos de custo e tempo. O segundo tem maior chance de levar a um resultado errôneo. (Lizardo, 2010)

O método de Taguchi propõe a utilização de uma razão Sinal/Ruído (S/N) para identificar quais são os fatores de estímulo para os quais a variabilidade dos níveis de fatores de ruídos seja mínima. Maximizar essa relação sinal ruído equivale a minimizar a perda da qualidade. A forma ideal de comportamento da resposta afeta a forma como a razão S/N é analisada. As seguintes formas de análise podem ser utilizadas: “Maior é melhor”, “Menor é melhor” e “Nominal é melhor.”. (Almeida e Toledo, 1989)

Para experimentos envolvendo elevado número de fatores de controle e ruído, Taguchi propôs o uso de experimento fatorial fracionado, que ele chama de Arranjo Ortogonal. De acordo com o método, uma série de arranjos podem ser utilizados no planejamento de experimentos com diferentes números de fatores e níveis, variações desses fatores. Uma tabela é utilizada para escolher o arranjo adequado ao experimento em questão (Lizardo, 2010).

1.4. Ensaio de Tração

Através do ensaio de tração é possível determinar características como limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, limite de escoamento, deformação máxima e coeficiente de Poison.

A partir das propriedades mecânicas citadas, pode-se prever como um material irá se comportar quando submetido a uma estímulo mecânico. O limite de resistência à tração é o ponto de máxima tensão que o corpo suporta antes de seu rompimento. O alongamento é a quantidade que esse material se deforma até que a falha ocorra. Com essas duas propriedades é possível determinar a qual carga um corpo pode estar submetido sem que venha a falhar. O Módulo de elasticidade é a razão entre a tensão aplicada e a deformação dentro da região elástica do material (região em que as tensões aplicadas não resultam em deformação permanente). Como um material tem volume constante, se há uma deformação em um dos eixos necessariamente haverá contração em alguma das outras duas dimensões. Essa relação não é linear mas é uma característica do material, e o coeficiente de Poison permite prever qual é a relação entre as deformações em diferentes eixos de análise (Callister, 2002).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este experimento possui 4 fatores com 3 níveis cada. Estes níveis foram selecionados utilizando o valor nominal do processo FDM para PLA e um nível acima e outro abaixo.

Para aplicar o método de Taguchi com os fatores de controle e níveis propostos, o método propõe um arranjo ortogonal L_9 , conforme a Tabela 1. Desse modo o experimento se resume a nove ensaios. Com três replicadas para cada ensaio, foram utilizados os dados de vinte e sete corpos de prova ensaiados para analisar os resultados.

Tabela 1. Arranjo ortogonal L₉.

Ensaio	Cor	Temperatura (°C)	Preenchimento	Velocidade (%)
1	Branco	190	Linha	70
2	Branco	200	Octogonal	100
3	Branco	210	Circular	130
4	Amarelo	190	Octogonal	130
5	Amarelo	200	Circular	70
6	Amarelo	210	Linha	100
7	Cinza	190	Circular	100
8	Cinza	200	Linha	130
9	Cinza	210	Octogonal	70

2.1. Fabricação dos corpos de prova

As dimensões dos corpos de prova seguiu a norma ASTM D638–14 tipo I o qual padroniza a metodologia de testes de tração em plásticos. Modelou-se no software Solidworks 2013 o corpo de prova o qual foi gerado o arquivo da peça tridimensional no formato STL.

O software de fatiamento do arquivo STL e geração da trajetória da máquina foi utilizado o software KISSlicer versão 1.1.0.14. Este software foi escolhido por ser de fonte aberta, permitir um controle de mais parâmetros de impressão que o do fabricante da máquina e gerar diretamente o arquivo com a extensão BFB que é compatível com a impressora selecionada para este experimento.

A impressora 3D utilizada para a confecção dos corpos de prova baseada no processo FDM foi a Rapman 3.1 da BFB-Bits From Bytes. Ela possui um extrusor com temperatura máxima de 280°C e uma área de impressão de 270 x 205 x 210 mm. Possui uma resolução no eixo-Z de 0,125mm e uma tolerância de impressão no eixo Z de metade da resolução processada em Z, e nos eixos X e Y cerca de 1% da dimensão do objeto ou 0,2mm, a que for maior. A Figura 4 mostra o formato do corpo de prova, o software de geração de trajetória e a impressora 3D utilizadas neste experimento.

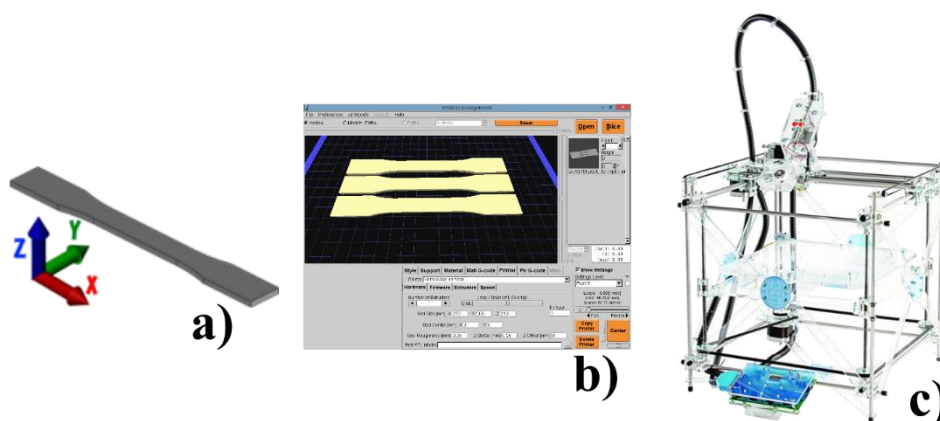


Figura 4. a) Corpo de prova baseado a norma ASTM D638–14 Tipo I. b) Software KISSlicer. c) Impressora 3D Raman 3.1.

2.2. Ensaio de tração

Os corpos de prova de PLA foram preparados conforme a norma ASTM D638 (2014) para realização dos ensaios de tração com velocidade de ensaio de 1mm/min, conforme mostra a Fig. 5. O ensaio foi realizado no Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos (CITeC) da UFSJ, utilizando-se uma máquina universal de ensaios da Shimadzu, modelo AG-X Plus, com capacidade de 100 kN. Foram preparadas três amostras para cada condição, conforme apresentada na Tab.2, obtendo assim 27 corpos de prova.



Figura 5. Corpo de prova preparado na máquina para ensaio mecânico de tração.

3. RESULTADOS

Os dados obtidos no experimento através do arranjo estatístico de Taguchi são apresentados a seguir na Tabela 2, onde: E é o módulo de elasticidade, σ_t é a resistência à tração e ε é a deformação. Utilizou-se o programa estatístico Minitab®, versão 17.1.0.0, para calcular e ordenar o grau de influência de cada fator de controle deste experimento. A categoria utilizada na razão sinal-ruído (S/N) foi quanto maior é melhor.

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

Ensaio	Cor	Temperatura (°C)	Preenchimento	Velocidade (%)	E (GPa)	σ_t (MPa)	ε
1	Branco	190	Linha	70	1,61	24,11	2,81
2	Branco	200	Octogonal	100	1,89	25,93	2,78
3	Branco	210	Circular	130	2,14	30,52	2,83
4	Amarelo	190	Octogonal	130	1,91	29,51	2,30
5	Amarelo	200	Circular	70	1,56	25,07	2,40
6	Amarelo	210	Linha	100	1,69	26,97	2,04
7	Cinza	190	Circular	100	1,62	27,09	2,86
8	Cinza	200	Linha	130	1,85	27,34	2,75
9	Cinza	210	Octogonal	70	1,62	25,93	2,55

A Figura 6 pode-se observar o comportamento típico da tensão/deformação para ensaios de tração 3 e 7, onde o primeiro possui o maior módulo de elasticidade e maior resistência à tração, enquanto o segundo possui a maior deformação máxima.

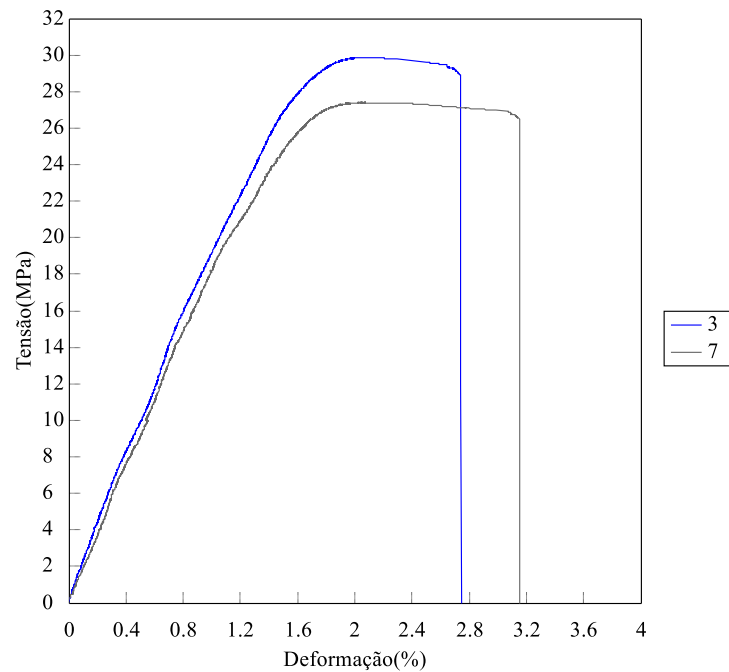


Figura 6. Curvas Tensão deformação típica do maior módulo/resistência (3) e da maior deformação (7).

A Tabela 3 e a Figura 7 mostram os dados de saída do programa estatístico para o módulo de elasticidade.

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

Nível	Cores	Temperaturas	Preenchimento	Velocidade
1	4,686	4,656	4,883	4,055
2	5,418	4,906	4,677	4,776
3	4,581	5,123	5,125	5,855
Delta	0,837	0,467	0,448	1,800
Influência	2	3	4	1

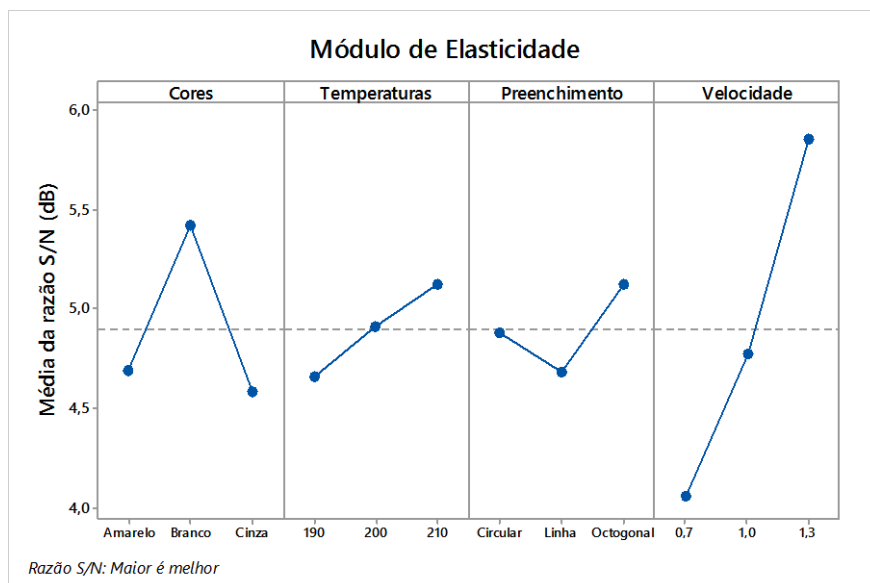


Figura 7. Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, do módulo de elasticidade.

A velocidade de fabricação é o fator que mais influenciou no módulo de elasticidade, seguido pela cor, depois pela temperatura de extrusão e o fator que menos influenciou foi o tipo de preenchimento. A velocidade de fabricação influencia no resfriamento da peça que está sendo fabricada. O material é depositado na temperatura do bico extrusor e

começa a resfriar. Quanto mais rápido uma camada for fabricada a deposição da camada seguinte encontra a temperatura da camada anterior mais elevada que se utilizada uma velocidade reduzida. Este modo de resfriamento pode causar maior influência no módulo de elasticidade. De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram: velocidade mais elevada, PLA na cor branca, temperatura mais elevada e preenchimento octogonal.

A Tabela 4 e a Figura 8 mostram os dados de saída do programa estatístico para a resistência à tração.

Tabela 4. Tabela resposta da razão sinal-ruído, maior é melhor, da Resistência à Tração.

Nível	Cores	Temperaturas	Preenchimento	Velocidade
1	28,670	28,570	28,780	27,970
2	28,540	28,330	28,330	28,520
3	28,560	28,860	28,650	29,280
Delta	0,130	0,530	0,440	1,310
Influência	4	2	3	1

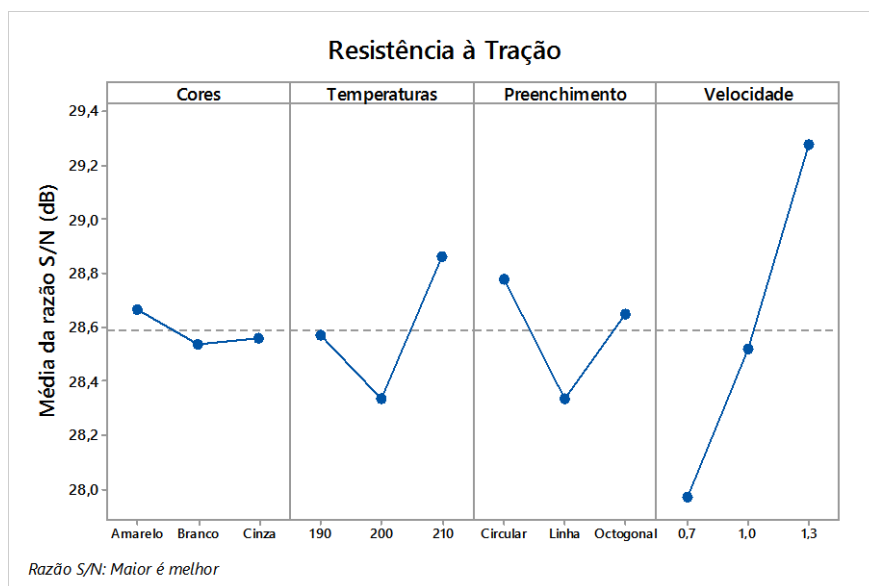


Figura 8. Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, da resistência à tração.

A resistência à tração também foi mais influenciada pela velocidade de fabricação, seguido pela temperatura de extrusão, depois pelo tipo de preenchimento e o fator que menos influenciou na resistência foi a cor do material. A velocidade de fabricação, mais uma vez foi o principal fator de influência na resposta em estudo. Uma hipótese é que quando o material é impresso mais rapidamente, a adesão entre os filamentos que constituem o preenchimento é melhor devido o material ter menos tempo pra se resfriar em cada passagem. De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram: velocidade mais elevada, temperatura mais elevada, preenchimento circular e PLA amarelo.

A Tabela 5 e a

Figura 9 mostram os dados de saída do programa estatístico para a resistência à tração.

Tabela 5. Tabela resposta da razão sinal-ruído, maior é melhor, da Deformação máxima.

Nível	Cores	Temperaturas	Preenchimento	Velocidade
1	7,01	8,448	8,592	8,239
2	8,958	8,423	7,971	8,062
3	8,688	7,785	8,093	8,355
Delta	1,948	0,663	0,621	0,293
Influência	1	2	3	4

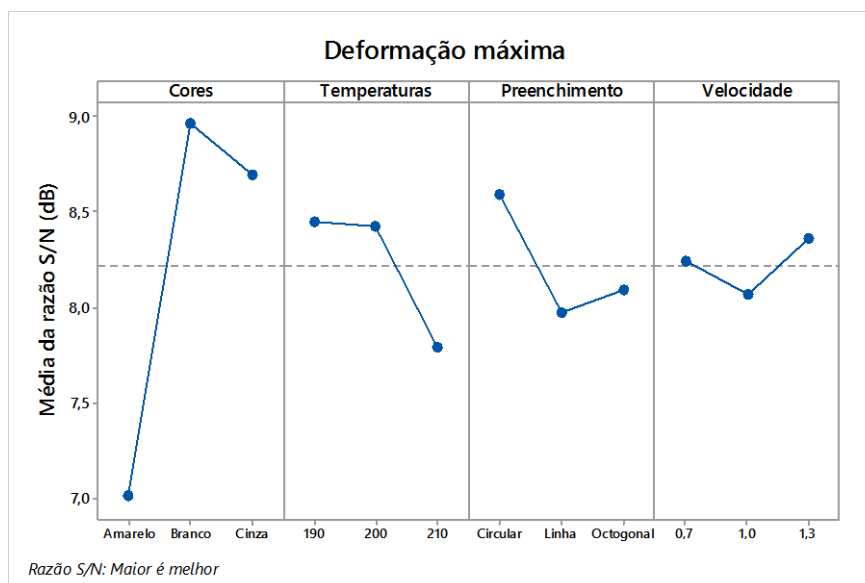


Figura 9. Gráfico da razão sinal-ruído, maior é melhor, da deformação máxima.

A deformação máxima foi mais influenciada pela cor do material, seguido pela temperatura de extrusão, depois pelo tipo de preenchimento e o fator que menos influenciou na deformação foi a velocidade de fabricação. Dessa vez a velocidade de fabricação não foi o principal fator de influência na resposta em estudo. Segundo Wittbrodt e Pearce (2015) o PLA colorido é um fator que causa influência nas propriedades mecânicas de peças impressas. Eles ressaltam que para cada cor do material há um diferente e específico percentagem de cristalinidade. Os autores não ensaiaram o PLA na cor amarela, mas chegaram a um resultado de deformação máxima do PLA branco superior ao PLA cinza, que também foi exibido resultado semelhante neste trabalho. De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram: PLA na cor branca, temperatura de extrusão mais baixa, preenchimento circular e velocidade mais elevada.

4. CONCLUSÃO

Sintetizando os resultados encontrados com relação a cada resposta mensurada, que são o módulo de elasticidade, a resistência à tração e deformação máxima, podemos concluir que:

- A velocidade de fabricação foi o fator de controle mais significativo tanto para o módulo de elasticidade quanto para a resistência à tração.
- A temperatura de extrusão foi o segundo fator mais influente na resistência a tração e na deformação máxima.
- A cor do PLA foi o fator mais influente na deformação máxima e o segundo mais influente no módulo de elasticidade.
- O tipo de preenchimento foi o terceiro fator mais influente na resistência à tração e deformação máxima.
- A maior velocidade de fabricação trouxe uma melhor resposta em todas as análises, mostrando ser um fator significativo nestas condições experimentadas.

5. AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio na realização do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, H., Toledo, J., 1989, "Método Taguchi: qualidade voltada para o projeto do produto e do processo.", Revista de Administração da Universidade de São Paulo 24.4.
- Callister, F. D., 2002, "Ciência e engenharia dos materiais." 5ª Edição, LTC Editora, São Paulo-SP.
- Cater, M., 2014, "Permeability and Porosity Reduction of Fused Deposition Modeling Parts via Internal Epoxy Injection Methods." Diss. The Ohio State University.
- Leite, Cruz, Resende, Rubio, 2011, Prototipagem rápida por deposição de material fundido - uma aplicação acadêmica, XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte.
- Liou, F. W., 2007, "Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development." CRC Press.
- Lizardo, B.F., 2010, "Estudo Sobre a Influência de Parâmetros de Usinagem na Furação dos Polímeros Uhmw, Pom e Ptfé". Belo Horizonte.

- Magalhães, Volpato, Luersen, 2010, "A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas Pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)." Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba.
- Minetola; Iuliano.; Marchiandi, 2016, "Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades." Procedia CIRP, v. 41, p. 1027-1032.
- Rosas, L.F.V., 2013, "Characterization of Parametric Internal Structures for Components Built by Fused Deposition Modeling". Electronic Theses and Dissertations. Paper 4763.
- Panda, Bahubalendruni, Biswal, 2014, "Comparative evaluation of optimization algorithms at training of genetic programming for tensile strength prediction of FDM processed part." Procedia Materials Science 5: 2250-2257.
- Torres, Cotel, Karl, Gordon, 2015, "Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives.", JOM 67.5: 1183-1193.
- Tymrak Kreiger, Pierce, 2014, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions." Materials & Design 58 (2014): 242-246.
- Volpato, 2007, "Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações." Edgard Blücher.
- Wittbrodt, Pearce, 2015, "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components." Additive Manufacturing 8 : 110-116.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

A USE OF TAGUCHI METHOD TO THE STUDY THE INFLUENCE OF THE FABRICATION PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTS IN PLA OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Breno Ferreira Lizardo, bflizardo@gmail.com¹
Luciano Machado Gomes Vieira, lucianomgv@ufmg.br¹
Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br²
Paulo Eustáquio de Faria, paulofaria@ufmg.br¹
Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br^{1 2}

¹Department of Production Engineering, UFMG

²Department of Mechanical Engineering, UFMG

Federal University of Minas Gerais, Avenida Antonio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte, MG – CEP: 31270-901 – Brazil.

Abstract. In recent years, the Additive Manufacturing (AM) or Rapid Prototyping for material deposition, is turning into an economically technology interesting for manufacturing small series with complex geometries and reduced time. The demand for new products, along with the development of engineering creates a favorable environment for the development of the AM technology. Several fields require the development of increasingly functional prototypes, suitable material, with mechanical characteristics, and thermal compatibility, among others. The fused deposition modeling (FDM) is a typical AM process that can manufacture plastic prototypes as polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), among others. The mechanical behavior of FDM parts is dependent on the properties of the raw materials and manufacturing parameters of the AM. This work relates mechanical properties of PLA parts manufactured by printer Rapman 3.1. Using Taguchi approach to design of experiment (DOE), the parameters were examined the FDM process, such as extrusion temperature, fill patterns, extrusion speed and color of PLA. Using as a basis realistic conditions for standard users, three levels of the factors were selected. This study measures the tensile strength and modulus of elasticity of printed components according ASTM D638. The results of the tensile test show that the FDM manufacturing process can provide good and reproducible results with respect to mechanical resistance of the printed parts.

Keywords: additive manufacturing, extrusion, PLA, Taguchi, tensile