

POSICIONAMENTO DE UM COMPONENTE PARA FABRICAÇÃO POR FDM BASEADO EM OTIMIZAÇÃO

João Fiore Parreira Lovo, joao.lovo@gmail.com¹

Marcos Paulo Gonçalves Pedroso, marcos.paulo.pedroso@usp.br¹

Maíra Martins da Silva, mairams@sc.usp.br¹

Carlos Alberto Fortulan, cfortula@sc.usp.br¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Av. Trabalhador Sancarlense, 400, São Carlos-SP.

Resumo: A manufatura aditiva do tipo Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling – FDM) é o processo mais difundido na produção de peças em impressoras 3D, não só na confecção de protótipos, mas em fabricação direta de produtos. A deposição direcional das camadas de impressão acarreta forte anisotropia e isso impõe limites de resistência do corpo manufaturado, de modo que o posicionamento otimizado da peça no volume de fabricação é fundamental para o bom desempenho do produto impresso. O presente trabalho objetiva definir a melhor posição de fabricação, em relação às camadas de deposição por FDM, para um produto sujeito à forças trativas em diferentes direções não todas coplanares. O problema físico foi descrito matematicamente, baseado na direção de deposição e direções dos esforços a serem suportados pela peça, e foi aplicada uma técnica de otimização multivariável, não linear com restrições. Na otimização, o plano representativo da direção mais adequada da camada de impressão foi encontrado através da minimização dos ângulos entre as camadas de fabricação e direções dos esforços de tração. Essa minimização está sujeita aos requisitos de projeto e do processo de fabricação. Os valores ótimos desse problema foram encontrados através da Programação Quadrática Sequencial (Sequential Quadratic Programming - SQP). Tal abordagem garantiu que nenhuma das hastes da peça, submetidas a esforços de tração, tenha angulação maior que 31° em relação ao plano de impressão, assegurando adequada resistência mecânica para o produto. Esses resultados demonstram ainda, a produtiva aplicabilidade de uma técnica de otimização para resolução de problemas referentes à manufatura aditiva tipo FDM.

Palavras-chave: manufatura aditiva, otimização multivariável, SQP, anisotropia

1. INTRODUÇÃO

É vigente o uso da manufatura aditiva (impressoras 3D) na fabricação direta de produtos comerciais, e isto é devido aos avanços e popularização de programas computacionais de desenho (CAD), bem como das impressoras 3D, em especial nos últimos dez anos (Bosqué, 2015). Várias são as técnicas de adição de material disponíveis na presente tecnologia. O princípio básico de funcionamento de uma impressora 3D parte de um desenho computacional tridimensional que é dividido em camadas por um *software*, em seguida a máquina adiciona material camada a camada até formar o produto equivalente ao desenho proposto (Ahn et al, 2002).

Os dispositivos de impressão 3D mais comuns e difundidos pelo mundo são os que utilizam a tecnologia Modelagem por Fusão e Deposição, conhecida pela sigla em inglês FDM. O processo tipicamente se inicia pela extrusão de filamentos de material, a partir de um cabeçote extrusor sobre uma plataforma de construção, formando a primeira camada do componente em fabricação. Após esse processo a plataforma é rebaixada na medida da espessura de camada da peça, então é depositada uma nova camada de material que se une com a anterior recém-depositada. O procedimento se repete até o fim da construção do produto (Almeida, 2007; Ziemian et al, 2015).

O processo FDM também pode utilizar um material de suporte que é depositado formando uma estrutura parcialmente aderida à peça, a fim de proporcionar maior apoio, estabilidade e precisão geométrica à construção (Lovo e Fortulan, 2016). A Figura (1) ilustra a fabricação por FDM.

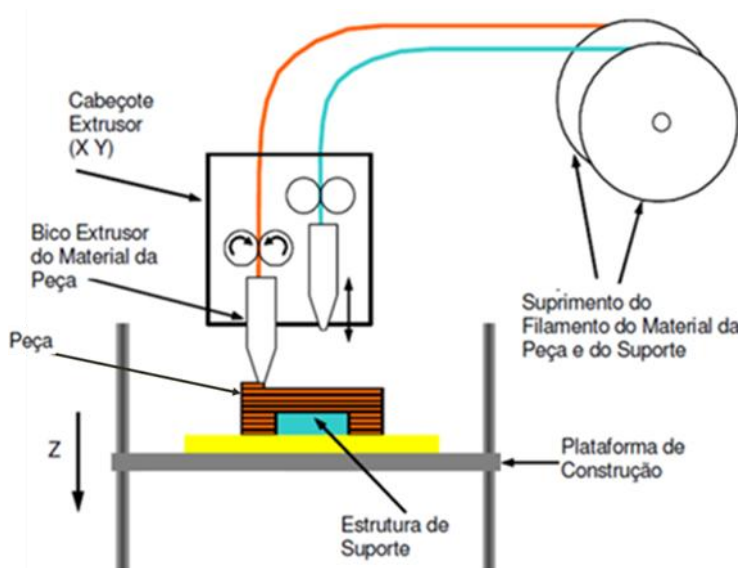


Figura 1. Princípio do processo FDM. Adaptado de Volpato (2007).

O processo de fabricação por camadas resulta em peças com comportamento anisotrópico, conforme mostrado por Ziemian et al (2015), e como discutido por Lovo e Fortulan (2016), o projeto e a fabricação de itens utilizando tal solução de manufatura devem levar em conta as direções de deposição de material de acordo com as direções dos esforços de trabalho recebidos pelo produto, buscando sempre alinhar as direções e planos de deposição dos filamentos de material às direções de maiores esforços na peça.

Dependendo da complexidade geométrica da peça e solicitações em serviço, é interessante se modelar matematicamente as direções de maiores esforços e se buscar alinhar tais direções com as direções de maior resistência baseado no processo de manufatura aditiva empregado. Ferramentas matemáticas de diversos softwares disponíveis no mercado podem auxiliar nessa tarefa de modelagem e otimização do posicionamento para impressão 3D por camadas.

No presente trabalho, foi definida a posição de fabricação de um dispositivo de fixação, que precisa resistir a esforços de tração em quatro direções concorrentes, utilizou-se técnicas de otimização, com auxílio computacional, de modo a minimizar os ângulos entre planos de deposição de material no processo FDM (direções de maior resistência à tração), e as direções de maiores esforços trativos na peça. Outros esforços poderiam ser considerados na peça em questão, devido a sua geometria e solicitações em serviço (como carregamentos fletores e de torção), porém, para o presente estudo foi escolhido abordar o esforço mais crítico, do ponto de vista das propriedades do material e parâmetros de projeto do dispositivo em questão, que é o esforço trativo nas hastes da peça.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O objeto a ser fabricado é um suporte de câmera digital que é acoplado a um *drone*. Devido à finalidade de uso, tal produto necessita ser leve, portanto é fundamental a redução tanto quando possível das espessuras da peça e, por conseguinte, da massa de matéria prima utilizada na manufatura.

A Figura (2) traz um esboço do produto foco desse trabalho, nas imagens (a) e (b) são observados os principais ângulos de interesse e na imagem (c) os locais de aplicação dos esforços de tração, suas direções e intensidades, conforme requisitos de projeto desse suporte de câmera digital.

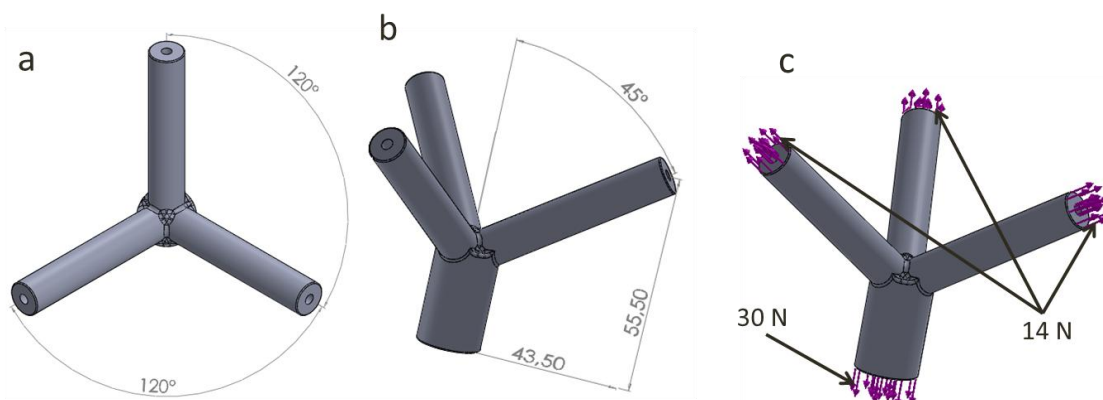


Figura 2. Esboço do produto. (a) Vista superior. (b) Vista auxiliar. (c) Forças normais atuantes.

Nota-se que as direções de aplicação das forças de tração na peça implicam em uma necessidade de resistência mecânica em quatro diferentes direções, não todas coplanares, gerando um problema não trivial para a melhor direção de fabricação da peça na plataforma da máquina de manufatura aditiva, levando-se em conta a anisotropia inerente ao processo de fabricação.

A impressora 3D utilizada é do modelo profissional Dimension Elite da fabricante Stratasys®, com material ABS P430, equipamento escolhido por ter câmara de impressão e plataforma de impressão com temperaturas controladas, atuador de deposição de material de alta precisão e utilizar material suporte, o que proporciona maior precisão dimensional do produto. O processo de trabalho da máquina é de tal forma que a direção de deposição dos filamentos de uma camada é sempre perpendicular à direção de deposição da camada seguinte, característica que também influencia na resistência mecânica e anisotropia da peça. O catálogo do fabricante do material, e testes que constam da literatura, informam a resistência à tração do material entre 29 e 32 MPa quando solicitado em direção paralela às camadas de deposição dos filamentos de impressão, e 15 MPa quando solicitado na direção perpendicular às camadas de impressão (Lovo e Fortulan, 2016).

A imagem da Figura (3) ilustra um posicionamento genérico da peça no volume de impressão da máquina de manufatura aditiva e um plano de camada de deposição dos filamentos de matéria prima.

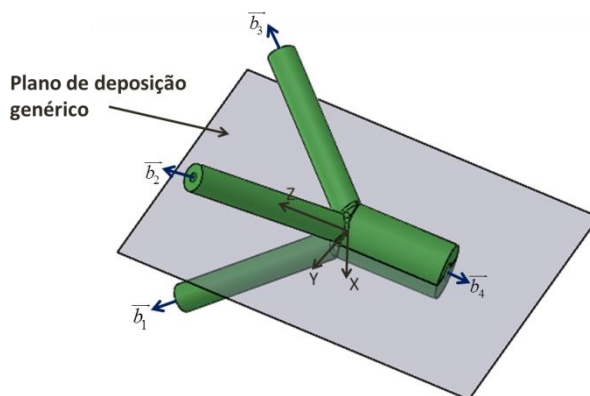


Figura 3. Posicionamento genérico da peça e direção de camada de impressão.

Baseado na geometria da peça, no algoritmo de deposição de material utilizado pela máquina, (cuja modificação está fora do escopo de trabalho), nas direções dos esforços trativos e na resistência à tração máxima e mínima de acordo com as direções de fabricação, buscou-se a melhor posição de confecção, utilizando ferramentas matemáticas de otimização. Outro aspecto levado em consideração foi que as três hastes mais finas ficassem com o mesmo diâmetro.

3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA OTIMIZAÇÃO

Na avaliação inicial do problema, optou-se por fixar a posição da peça no espaço e variar o plano de impressão que passa pelo ponto de conexão entre as direções das hastes da peça, rotacionando o mesmo nos três eixos cartesianos.

Fixada a posição, foram definidos os vetores $\vec{b}_1$, $\vec{b}_2$, $\vec{b}_3$ e $\vec{b}_4$, que definem as direções das hastes, conforme mostrado pelas Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4):

$$\vec{b}_1 = 1\vec{i} + 0\vec{j} + 1\vec{k} \quad (1)$$

$$\vec{b}_2 = -1\vec{i} + 1,732\vec{j} + 2\vec{k} \quad (2)$$

$$\vec{b}_3 = -1\vec{i} - 1,732\vec{j} + 2\vec{k} \quad (3)$$

$$\vec{b}_4 = 0\vec{i} + 0\vec{j} - 1\vec{k} \quad (4)$$

Ainda, definiu-se um vetor $\vec{n}$, normal ao plano de impressão, em função de variáveis “ a ”, “ b ” e “ c ”, conforme mostrado pela Eq. (5):

$$\vec{n} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} \quad (5)$$

Para a otimização, buscou-se garantir que a direção normal ao plano de impressão (que resulta na menor resistência mecânica), tivesse angulação o mais próximo possível de 90° com cada uma das direções das hastes da peça, assegurando a maior distância entre a direção de cada haste e a direção de menor resistência mecânica resultante do processo de fabricação.

Equacionando os produtos escalares $\vec{b}_1 \cdot \vec{n}$; $\vec{b}_2 \cdot \vec{n}$; $\vec{b}_3 \cdot \vec{n}$ e $\vec{b}_4 \cdot \vec{n}$, e isolando os ângulos, obtém-se as Eq. (6), Eq. (7), Eq.(8) e Eq. (9):

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{a+c}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}}\right) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{-a+1,732.b+2.c}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}}\right) \quad (7)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{-a-1,732.b+2.c}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}}\right) \quad (8)$$

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{-c}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}}\right) \quad (9)$$

Sendo θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 os ângulos entre cada uma das hastes da peça e a direção perpendicular ao plano de impressão (direção de $\vec{n}$). Assim, para que cada ângulo seja o mais próximo possível de 90°, o cosseno de cada um deles deve ser o mais próximo de zero, por conseguinte, define-se as funções “ f_1 ”, “ f_2 ”, “ f_3 ” e “ f_4 ”, (referentes aos cossenos dos ângulos θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4), conforme mostrado pelas Eq. (10), Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13):

$$f_1 = \frac{a+c}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{-a+1,732.b+2.c}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (11)$$

$$f_3 = \frac{-a-1,732.b+2.c}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (12)$$

$$f_4 = \frac{-c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (13)$$

Então, cada uma dessas funções deve ser minimizada para se otimizar a resistência à tração das hastes da peça.

4. METODOLOGIA

De posse das funções “ f_1 ”, “ f_2 ”, “ f_3 ” e “ f_4 ” e baseado nas restrições matemáticas decorrentes das características físicas do problema em questão, escolheu-se utilizar uma ferramenta de minimização de função com mais de uma variável e com restrições. Para tanto, foi necessário manipular as funções mostradas nas Eq. (10), Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13), elevando-as ao quadrado, de modo a obter “ f_α ”, “ f_β ”, “ f_γ ” e “ f_δ ”, conforme mostrado pelas Eq. (14), Eq. (15), Eq. (16) e Eq. (17):

$$f_\alpha = \frac{(a+c)^2}{2.(a^2 + b^2 + c^2)} \quad (14)$$

$$f_\beta = \frac{(-a+1,732.b+2.c)^2}{8.(a^2 + b^2 + c^2)} \quad (15)$$

$$f_\gamma = \frac{(-a-1,732.b+2.c)^2}{8.(a^2 + b^2 + c^2)} \quad (16)$$

$$f_\delta = \frac{(-c)^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (17)$$

Desse modo, ao minimizar cada uma das funções “ f_α ”, “ f_β ”, “ f_γ ” e “ f_δ ” (cujos mínimos valores possíveis são zero), está se aproximando, respectivamente, cada um dos ângulos θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 de 90°, como se busca.

As restrições matemáticas foram definidas tendo em vista os requisitos geométricos da peça e demais condições de contorno do problema.

A primeira restrição é mostrada pela Eq. (18):

$$a^2 + b^2 + c^2 - 0,1 \geq 0 \quad (18)$$

A Equação (18) garante que as variáveis “ a ”, “ b ” e “ c ” não sejam todas zero, (pois o vetor nulo não é uma solução de interesse), e tal restrição assegura ainda valores significativos para as variáveis.

A segunda e a terceira restrição (baseadas nas funções “ f_1 ”, “ f_2 ”, “ f_3 ”), foram determinadas a fim de garantir que os ângulos entre o plano de impressão e cada uma das 3 hastes mais finas sejam iguais, tendo em vista a restrição de projeto de que essas 3 hastes tenham o mesmo diâmetro, e ainda, tais restrições garantem que o plano de impressão que se busca passe por entre as 3 hastes de menor diâmetro da peça. Assim, a segunda e a terceira restrição são mostradas pelas Eq. (19) e Eq. (20):

$$\left(\frac{-a+1,732.b+2.c}{2.\sqrt{2}.\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) - \left(\frac{-a-1,732.b+2.c}{2.\sqrt{2}.\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) = 0 \quad (19)$$

$$\left(\frac{a+c}{\sqrt{2}.\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) + \left(\frac{-a+1,732.b+2.c}{2.\sqrt{2}.\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) = 0 \quad (20)$$

Para a minimização das funções “ f_α ”, “ f_β ”, “ f_γ ” e “ f_δ ” foi empregado o algoritmo SQP (*Sequential Quadratic Programming*), moderno método iterativo de otimização, com uma base teórica relacionada com a solução

de um conjunto de equações não lineares utilizando método de Newton e derivação simultânea de equações não lineares usando condições Kuhn-Tucker (Rao, 2009).

Os valores das variáveis “ a ”, “ b ” e “ c ” foram limitados entre “- 2” e “2”, valores plausíveis para o problema, e o valor inicial escolhido para as 3 variáveis foi “1” (outros valores iniciais foram testados, porém essa escolha se mostrou adequada para se chegar a mínimos globais).

Para cada uma das funções “ $f\alpha$ ”, “ $f\beta$ ”, “ $f\gamma$ ”, e “ $f\delta$ ”, foi aplicada a técnica de minimização, com as restrições e condições referidas e foram observados resultados coerentes dos valores para as variáveis “ a ”, “ b ” e “ c ” que minimizam as quatro funções objetivo do problema, bem como dos valores mínimos das funções, referentes aos ângulos entre as hastes da peça e o plano de impressão em estudo.

5. RESULTADOS

Da minimização das funções “ $f\alpha$ ”, “ $f\beta$ ”, “ $f\gamma$ ” e “ $f\delta$ ”, nas condições estabelecidas, obteve-se os seguintes valores para as variáveis a , b e c , mostrados pelas Eq. (21), Eq. (22) e Eq. (23):

$$a = 1,0 \quad (21)$$

$$b = 0,0 \quad (22)$$

$$c = -0,25 \quad (23)$$

Portanto, o plano normal ao vetor $\vec{n} = (1,0; 0,0; -0,25)$ é o plano otimizado para a camada de deposição de material no processo FDM de modo a conferir maior resistência mecânica à cada uma das hastes da peça final, de acordo com sua geometria e restrições de projeto.

Desse modo os ângulos entre as hastes de menor diâmetro e o plano otimizado são mostrados pela Eq.(24):

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 31^\circ \quad (24)$$

E o ângulo entre a haste de maior diâmetro e o plano é mostrado pela Eq. (25):

$$\theta_4 = 14^\circ \quad (25)$$

A Figura (4), na imagem (a) ilustra o plano otimizado em relação à peça no espaço, na imagem (b) é observada a peça impressa em 3D na posição de fabricação otimizada obtida.

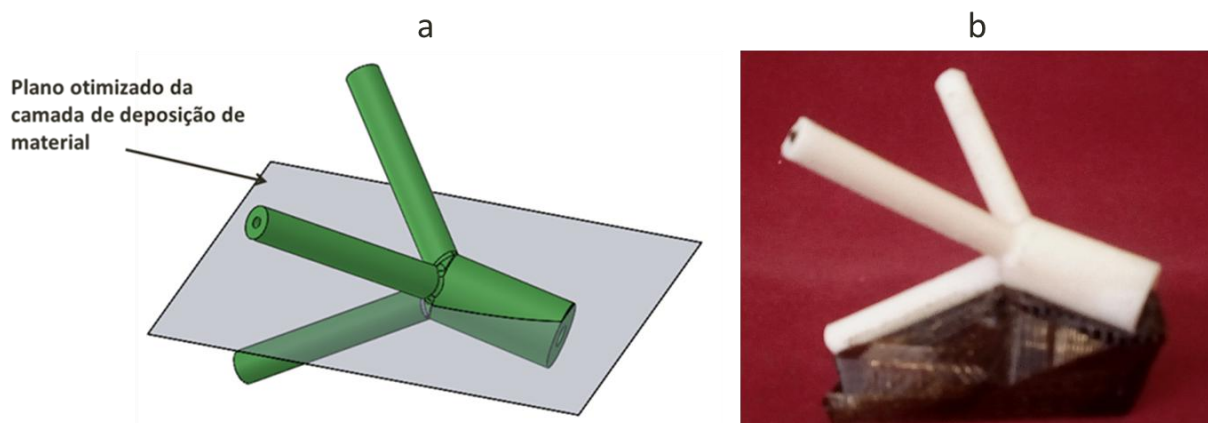


Figura 4. Posicionamento da peça. (a) direção de camada de impressão otimizada. (b) peça impressa na direção otimizada.

6. CONCLUSÃO

Do procedimento de otimização realizado, se conclui que o plano que representa a direção da camada de deposição de material mais adequada para atender às características requeridas da peça, fabricada por impressão 3D tipo FDM, e ainda, de modo a minimizar os diâmetros necessários das hastes da peça, tal plano otimizado é o normal ao vetor $\vec{n} = (1,0; 0,0; -0,25)$. Observou-se também que seria possível maximizar a resistência das hastes aos pares (fazendo-as coplanares à camada de impressão), porém, em detrimento das resistências das demais hastes da peça. Outras inúmeras opções de angulação seriam possível, entretanto, a solução mais adequada para satisfazer as condições do problema é o plano normal ao vetor $\vec{n}$.

O procedimento de otimização, com as ferramentas computacionais empregadas se mostrou confiável e rápido ao apresentar a solução matemática do problema de fabricação de um produto por manufatura aditiva com a tecnologia FDM.

Conclui-se ainda do presente trabalho, que uma peça genérica fabricada por manufatura aditiva por camadas (por exemplo FDM), pode ter sua resistência otimizada em relação aos esforços em serviço, após um processo de modelagem matemática das direções de maiores esforços a serem suportados, e minimização da angulação entre tais esforços e as direções de maior resistência mecânica resultantes da técnica de impressão 3D. A modelagem matemática e minimização podem ser auxiliadas por ferramentas computacionais, e esse processo de otimização se mostra útil na decisão do posicionamento de uma peça para impressão 3D em camadas.

7. REFERÊNCIAS

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P.K., 2012, “Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 248-257.
- Almeida, W. J., 2015, “Otimização Estrutural de Protótipos Fabricados pela Tecnologia FDM Utilizando o Método dos Elementos finitos”, Dissertação de Mestrado. São Carlos: EESC-USP, 2007.
- Bosqué, C. 2015, “What Are You Printing? Ambivalent Emancipation by 3D Printing”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, No. 5, pp. 572-581.
- Lovo, J. F. P.; Fortulan C. A. 2016, “Estudo de Propriedades Mecânicas e Anisotropia em Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva Tipo FDM”, 1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. São Carlos.
- Rao, S. S, 2009 “Engineering Optimization: Theory and Practice”, Hoboken: John Wiley & Sons, 813 p.
- Volpato, N. 2007, “Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações”, São Paulo: Edgard Blucher, 244 p.
- Ziemian, C. W., Cipoletti, D. E., Ziemian, S. N., Okwara, M. N., Haile, K.V. 2015, “Computer Aided Decision Support for Fused Deposition Modeling”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 138-147.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

POSITIONING OF A COMPONENT FOR FDM MANUFACTURING BASED ON OPTIMIZATION

João Fiore Parreira Lovo, joao.lovo@gmail.com¹

Marcos Paulo Gonçalves Pedroso, marcos.paulo.pedroso@usp.br¹

Maíra Martins da Silva, mairams@sc.usp.br¹

Carlos Alberto Fortulan, cfortula@sc.usp.br¹

¹University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, Brazil,

Abstract: *Fused Deposition Modeling (FDM) is the most disseminated process in 3D printing parts production, not only in prototypes manufacturing but also in the direct manufacture of products. The directional deposition of printing layers entails strong anisotropy and this imposes resistance limits of the manufactured body, so that the optimized positioning of the part in the manufacture volume is fundamental for printed product good performance. The present work aims to define the best manufacturing position relative to different directions not all coplanar. The physical problem was described mathematically, based on the direction of deposition and directions of the efforts supported by the part, and a non-linear and constrained multivariable optimization technique was applied. For the optimization, the representative plane of the most suitable direction of the printing layer was found by minimizing the angles between the manufacturing layers and directions of the tensile stresses. This minimization is subject to design requirements and the manufacturing process. The optimal values of this problem were found by Sequential Quadratic Programming (SQP). Such an approach ensured that none of the workpiece bars subjected to tensile stress have an angulation greater than 31° to the printing plane, ensuring adequate mechanical strength for the product. These results also demonstrate the productive applicability of an optimization technique for solving problems related to additive manufacturing by FDM.*

Keywords: *additive manufacturing, multivariable optimization, SQP, anisotropy*