

SELEÇÃO DE MATERIAL E FABRICAÇÃO DE COMPONENTE MECÂNICO AUXILIADOS POR MEF E MA: UM ESTUDO DE CASO

Sergio Gomes Machado Filho

João Fiore Parreira Lovo

Carlos Alberto Fortulan

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos, SP, Brasil

sergio.gmf@outlook.com

joao.lovo@gmail.com

fortulan@usp.br

Resumo. Ferramentas computacionais baseadas em métodos de elementos finitos (MEF) e a manufatura aditiva (MA) têm mudado a maneira como componentes de máquinas e de dispositivos mecânicos modernos são fabricados. Dimensões restritas, formato complexo, fabricação ágil, econômica, acessível e com altas resistências são as demandas modernas e futuras. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar materiais e métodos de fabricação para um componente de máquina (estudo de caso) baseado na elasticidade e na resistência mecânica necessárias em serviço. O componente foi simulado em MEF onde foram verificadas a deformação elástica requerida e a distribuição de tensão. Em seguida, corpos de prova em diferentes formulações de polímeros e compósitos foram fabricados por MA diretamente ou por réplica em moldagem. Os resultados experimentais das formulações propostas apresentaram propriedades mecânicas que podem atender à solicitação previamente simulada. Em destaque a fabricação por réplica em molde com o emprego de uma resina epóxi de alta resistência, aditivada de plastificante (tensão e deformação de escoamento de 50,27 MPa e 3,3 %, respectivamente). O estudo de caso aplicado validou a conveniência no uso de MEF e MA no auxílio para seleção de materiais e fabricação de componentes mecânicos.

Palavras chave: Métodos de Elementos Finitos. Manufatura Aditiva. Moldagem. Compósitos de epóxi.

1. INTRODUÇÃO

No contexto atual da indústria mundial, com a busca pela eficiência econômica em projetos de pesquisa e desenvolvimento, a solução dos mais variados problemas de engenharia faz uso cada vez mais frequentes da simulação e otimização com o emprego de métodos de elementos finitos (MEF) (Zeng *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020) e de fabricação por manufatura aditiva (MA), principalmente, em peças complexas (Fayazfar *et al.*, 2018). A MA permite a fabricação ágil, econômica, acessível e com adequadas resistências mecânicas de componentes com dimensões restritas e formatos complexos (Calignano *et al.*, 2019; Goh *et al.*, 2019). Dentre os princípios de MA, merece destaque o de extrusão de material que, devido ao possível baixo investimento necessário para aquisição de equipamentos, de insumos e com baixos custos operacionais, foi o responsável por popularizar este método de fabricação (Gibson *et al.*, 2015; Gordelier *et al.*, 2019). Entretanto, esse princípio de MA produz peças com características anisotrópicas nas quais as propriedades mecânicas dependem diretamente das direções dos esforços e da orientação e sentido das camadas depositadas (Somireddy *et al.*, 2017). Quando a seleção da disposição e orientação das camadas não forem suficientes para suportar esforços multiaxiais aplicados na peça em serviço, então, poderá ser necessário a busca por outros métodos complementares de fabricação como, por exemplo, a replicação por moldagem (Purquerio *et al.*, 2018), que permite a utilização de materiais compósitos isotrópicos ou mesmo a infiltração de resinas em peças feitas por MA (Lovo *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas é relatado que o desenvolvimento de novos materiais resultou no crescente uso de polímeros em elementos de máquinas (Dearn *et al.*, 2013) sendo que esta classe de materiais está em constante aperfeiçoamento com a introdução de aditivos modificadores físicos (plastificantes, surfactantes, cargas e outros) e químicos (estabilizadores térmicos, antioxidantes, retardantes de chama, e outros). Já com a introdução de agentes de reforço (complementar à matriz polimérica) se caracteriza a classe de materiais compósitos onde são utilizadas fibras (Goh *et al.*, 2019), bem como particulados, *whiskers* e outros que permitem o incremento de resistência física em até 5x e de sua rigidez em cerca de 10x comparados com a resina base (Engineered..., 2017).

Projetos sob demanda sempre envolvem desenhos personalizados onde a MA tem ocupado um espaço sem precedentes (Gibson *et al.*, 2015), quase que um resgate as práticas da metade do século passado, em que a fabricação horizontal customizava a fabricação de componentes sem a cobertura das normas técnicas e, de certo modo, agora foi acendida uma “luz de advertência” a essa fabricação independente, principalmente, relacionada aos aspectos de segurança e confiabilidade. Outra característica importante diz respeito ao fato de que a maioria dos processos de MA resultam em peças com um comportamento altamente anisotrópico em que são frequentes as baixas resistências entre as camadas

(Gibson *et al.*, 2015; Somireddy *et al.*, 2017). Muitos autores equacionam esta problemática com o otimizado posicionamento da peça a ser fabricado sobre a plataforma de impressão com relação a resistência *versus* o carregamento na peça, porém, somente técnicos e operadores com alto nível de discernimento poderiam tomar a decisão correta.

Adicionalmente, as simulações por MEF contribuem muito para o desenvolvimento deste conceito e minimizam os efeitos das decisões tomadas apenas pelo fator humano (Li *et al.*, 2020). O aceite de adoção de malhas padrão ou a imposição de malhas específicas no todo e refinadas em regiões de concentração de tensão (Zeng *et al.*, 2018), as reações vinculares, as direções e distribuição de carga são aspectos muito importantes para a assertividade dos esforços e predição de falhas de acordo com o critério de falha escolhido.

O presente trabalho objetiva avaliar materiais e métodos de fabricação para um componente de máquina baseado na elasticidade e resistência mecânica necessárias em serviço. Para este estudo, um suporte de rolete de transportador de correia foi elencado como estudo de caso e utilizado no desenvolvimento da metodologia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento foi feito com o estudo de um suporte de rolete de transportador de correia, apresentado em azul na Figura 1. A importância deste produto está relacionada com a confiabilidade necessária na aplicação e a elevada quantidade em equipamentos, que podem atingir dezenas de metros de comprimento e necessitar de centenas destes componentes. Compactação do conjunto, ajuste de montagem, manutenção, baixo custo das peças, aparência e facilidade de limpeza são aspectos adicionais considerados no projeto.

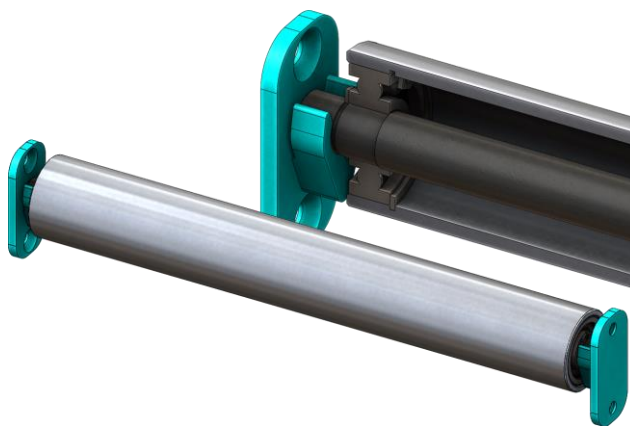


Figura 1. Representação esquemática do rolete de esteira apoiado no suporte (em azul)

A peça, desenho e carregamentos foram analisados pelo MEF utilizando o software Ansys 2020 R1. No equipamento para o qual foi desenvolvido, o componente recebe cargas de montagem (encaixe do eixo) e cargas de serviço não concomitantes, sendo assim, estas duas condições foram simuladas separadamente. O primeiro experimento foi dividido em três etapas: aproximação do eixo até a tangência com as faces da garra; encaixe do eixo na garra; desencaixe do eixo da garra. No segundo experimento o suporte deve resistir ao peso do rolete e à força de tração da esteira em movimento. Seguindo uma boa prática para reduzir o nível de processamento necessário na execução do MEF, o desenho da peça foi simplificado retirando elementos que não interferem na área de estudo e foi aplicado um plano de simetria. O material ABS foi modelado como ortotrópico linear elástico, com tensões máximas de tração e módulos de elasticidade de acordo com a disposição das camadas impressas (Somireddy *et al.*, 2017) e valores obtidos por Cantrell *et al.* (2016). O modelo linear elástico foi selecionado porque as tensões desenvolvidas nesta aplicação devem ter valores abaixo da máxima tensão elástica do material, considerando deformação plástica de 0,2%. Também, a face posterior à garra foi considerada fixa e o eixo considerado um corpo rígido com liberdade para deslocar-se apenas em Y. As malhas foram geradas automaticamente pelo software e refinadas manualmente nas regiões em que se esperam maiores esforços. A Figura 2 ilustra as malhas e as condições das simulações.

A primeira ação de fabricação foi a impressão dos suportes por MA respeitando os posicionamentos cartesianos principais como ilustrados pela Figura 3 e simulado pelas configurações de materiais do Ansys. A impressora aplicada foi a Dimension Elite de FDMTM da fabricante Stratasys® com o material ABS P430 da mesma fabricante, espessura de camada de 0,18 mm e preenchimento de 95% conforme caracterização feita por Cantrell *et al.* (2016).

Uma segunda proposta foi pela fabricação por réplica de moldagem, permitindo a utilização de diferentes polímeros e compósitos. Assim, foram propostas seis formulações utilizando o sistema epóxi para laminação a frio Araldite® LY 5052 (62% p/p) e AradurTM 5052 (38% p/p) da fabricante Huntsman, fibra de carbono de 3 mm de comprimento, óleo de rícino e óleo de rícino etoxilado (poliol) como aditivos em proporções de massa indicadas na Tabela 1. Gibson (2016) afirma que compósitos com fibras curtas descontínuas orientadas aleatoriamente são praticamente isotrópicos. As fibras curtas podem ser facilmente misturadas na resina líquida gerando materiais mais resistentes e ainda capazes de serem

injetados ou moldados em formas complexas. Serves (2007) mostrou que o uso de óleo de rícino ou poliol com cadeia longa e baixo número de hidroxila (1,8 - 3) em polímeros pode aumentar a flexibilidade do material.

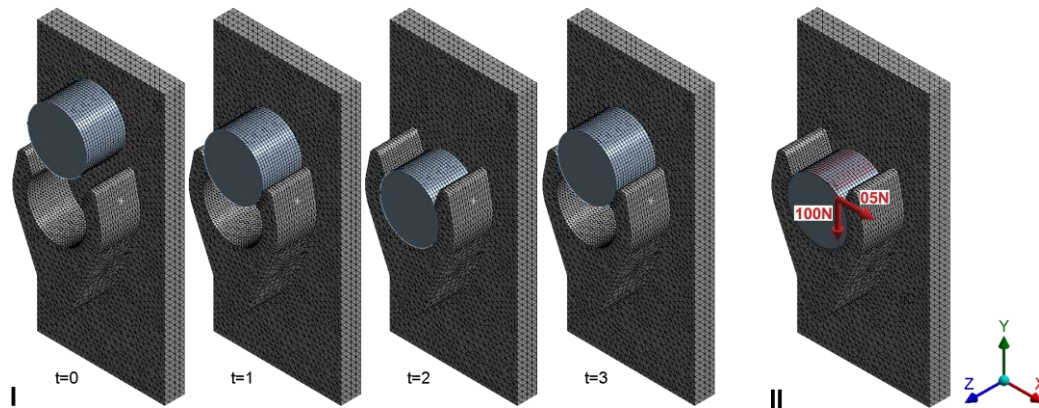


Figura 2. Malhas, deslocamento do eixo e forças nas simulações I e II

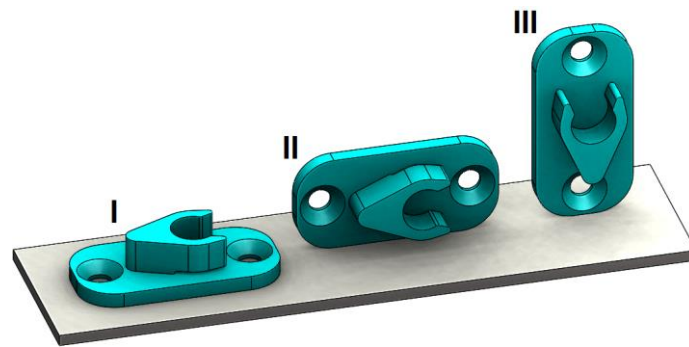


Figura 3. Posicionamento das peças para MA

Tabela 1. Proporções em massa das formulações propostas

Material	Resina	Fibra	Óleo de Rícino	Poliol
A	100%	0%	0%	0%
B	99%	1%	0%	0%
C	90%	0%	10%	0%
D	89%	1%	10%	0%
E	90%	0%	0%	10%
F	89%	1%	0%	10%

Para simulação no Ansys, os materiais propostos foram modelados como isotrópicos linear elásticos (Gibson, 2016) com coeficiente de Poisson 0,35 e módulos de elasticidade obtidos através de testes de tração. As malhas e configurações de simulação foram as mesmas utilizadas para as peças feitas em MA. Testes de tração para obtenção de propriedades mecânicas destes materiais foram realizados em uma máquina universal modelo Bionix, marca MTS®, com célula de carga de 15 kN, garra hidráulica com ajuste de prensa, precisão adequada aos esforços e tipo de material. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada formulação com geometria definida pela norma ASTM D 638 que também define os parâmetros utilizados nos testes.

Na confecção dos corpos de prova as formulações foram preparadas, colocadas em uma câmara de vácuo para eliminar possíveis bolhas de ar e moldadas com o auxílio de um molde de silicone. A cura foi feita em uma estufa a 40°C por 4 horas e, em seguida, 80°C por 4 horas a fim de garantir a totalidade das resistências bem como estabilidade dimensional das peças. A Figura 4 mostra etapas deste processo.

Fabricar componentes por réplica em moldagem exige a utilização de moldes e a MA se apresenta novamente como uma ferramenta para viabilizar a fabricação dos moldes com baixo custo e alta fidelidade para geometrias complexas. A

Figura 5 mostra as etapas de fabricação de um molde de silicone utilizando os suportes impressos em 3D como modelos. Este molde foi utilizado para réplica das peças com os materiais propostos, da mesma forma que os corpos de prova. Uma vez fabricados, os suportes foram colocados em uso nas condições reais de operação.

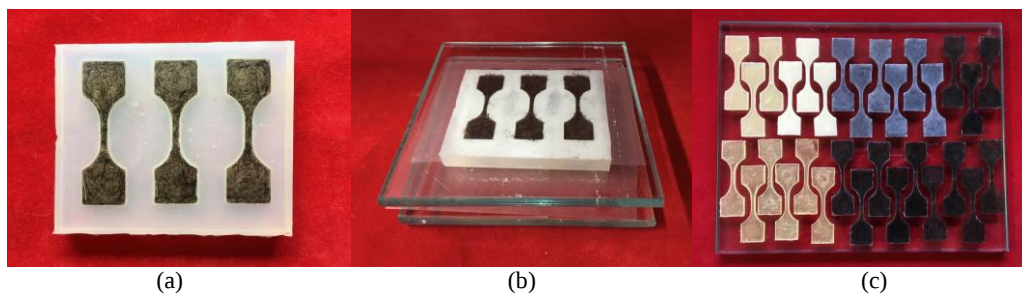


Figura 4. Etapas de moldagem dos corpos de prova: (a) moldagem em molde de silicone; (b) confinamento para cura inicial; (c) peças confinadas entre placas de vidro para cura final

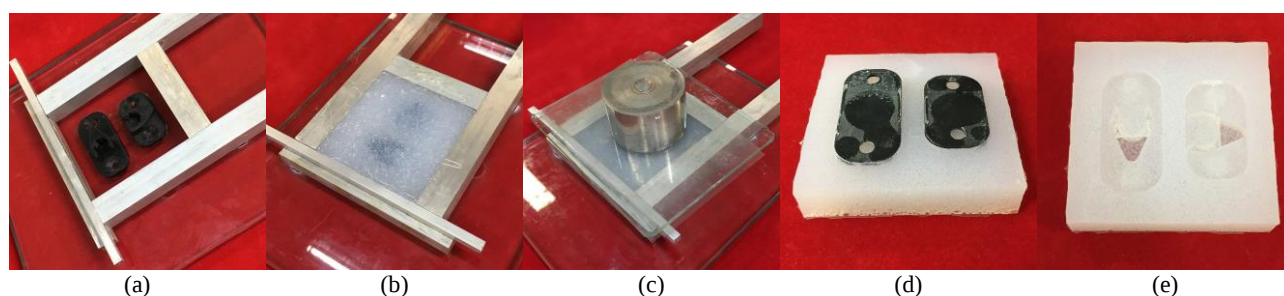


Figura 5. Etapas de fabricação do molde de silicone: (a) posicionamento dos modelos; (b) imersão em silicone líquido; (c) confinamento para cura do silicone; (d) remoção dos modelos; (e) molde pronto

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de tração do ABS P430 obtidos por Cantrell *et al.* (2016) confirmam a sua anisotropia quando utilizado para MA e demonstram que o seu comportamento pode ser frágil ou dúctil, dependendo da disposição das camadas de impressão em relação à força aplicada. Lovo *et al.* (2019) mostrou que o material A (somente resina epóxi) apresenta comportamento frágil, assim como o apresentado pelo material B (resina epóxi adicionada de fibra curta de carbono) nos ensaios realizados. Os materiais C, D, E e F, pautados pela adição de plastificantes, apresentaram comportamento dúctil. O gráfico da Figura 6 apresenta as curvas médias do comportamento sob tração dos materiais propostos para fabricação por réplica de moldagem.

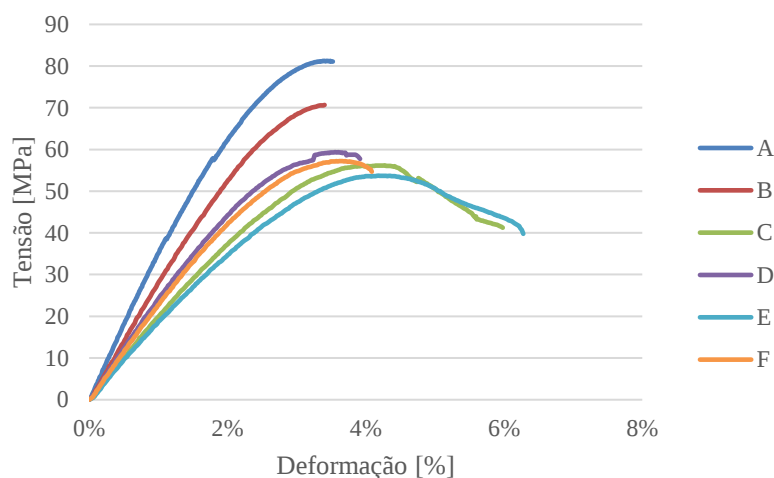


Figura 6. Resultados dos ensaios de tração

A adição de fibras curtas de carbono em baixa proporção à resina epóxi (material B) apresentou uma redução da resistência em relação à resina pura (material A). Este fato pode ser justificado por Ahmadi-Moghadam *et al.* (2015) que diz que, na classe de compósitos, agentes de reforço que podem requerer a funcionalização da superfície para conjugar as propriedades de processamento. Todavia, a utilização de plastificantes aumentou a elasticidade do epóxi e, por sua vez, o uso combinado com fibras curtas incrementou as respectivas resistências à tração.

As simulações realizadas indicaram que, durante a montagem do eixo no suporte, junto ao máximo deslocamento da garra (Figura 7a) aparecem as maiores tensões na peça, seja analisando a tensão principal (Figura 7b) ou a equivalente (Figura 7c), com valores variando até 108% dependendo do material analisado. Relativamente a operação de sustentação das cargas em serviço (Figura 7d e Figura 7e), quase nenhuma diferença nos valores de tensões foi identificado para os diferentes materiais. As regiões de maior solicitação podem ser observadas em vermelho na Figura 7. A Tabela 2 mostra um resumo das tensões e módulos de elasticidade (módulo de Young) obtidos nos ensaios de tração e as máximas tensões principais e equivalentes obtidas nas simulações por MEF.

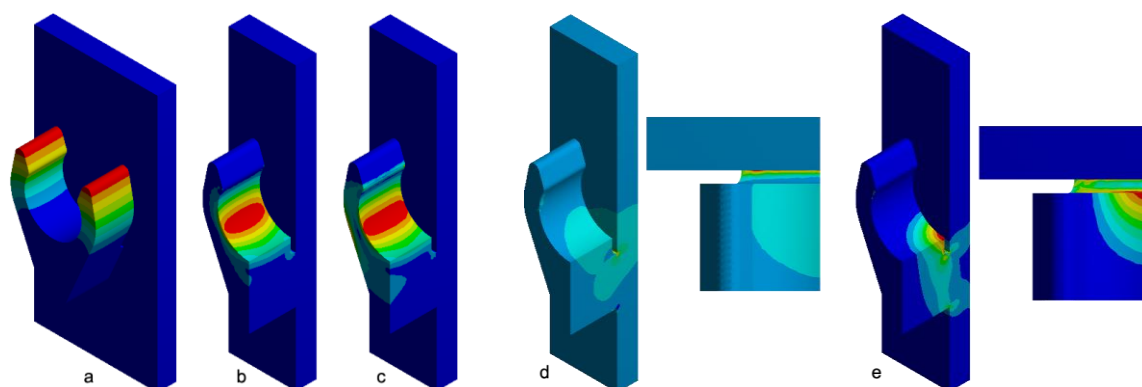


Figura 7. Simulação I: (a) máxima deformação; (b) máxima tensão principal; (c) máxima tensão equivalente. Simulação II: (d) máxima tensão principal; (e) máxima tensão equivalente

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração e simulações por MEF

Material	Ensaio de Tração		Simulação I		Simulação II	
	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Máxima Tensão Principal [MPa]	Máxima Tensão Equivalente [MPa]	Máxima Tensão Principal [MPa]	Máxima Tensão Equivalente [MPa]
ABS I	30,3 ± 0,6	1960	58,78	55,23	11,18	7,42
ABS II	30,0 ± 1,1	2020	57,65	54,03	11,19	7,47
ABS III	29,3 ± 0,8	2040	54,41	50,97	11,28	7,34
A	81,2 ± 2,9	3253	93,72	88,02	11,14	7,36
B	70,7 ± 5,4	2396	69,03	64,83	11,14	7,35
C	56,2 ± 2,1	1786	51,45	48,33	11,14	7,35
D	59,4 ± 2,3	2195	63,24	59,39	11,14	7,35
E	53,7 ± 1,3	1564	45,06	42,32	11,14	7,36
F	57,2 ± 3,0	1973	56,84	53,39	11,14	7,35

A avaliação das tensões e deformações no regime estático pode ser feita pela comparação entre os valores simulados com os das propriedades do material. Entretanto, não basta apenas calcular essas grandezas, sendo necessário confrontar os valores encontrados com limites pré-estabelecidos para verificar o estado em que o material se encontra após as solicitações que veio a sofrer e identificar se houve falha ou não. Não existe uma resposta única para esta questão. Por isso, diversos critérios estão descritos na literatura e, para cada tipo de material, um critério pode ser considerado mais adequado que outros (Cury, 2015). No critério de falha da Máxima Tensão Normal, indicado para analisar a confiabilidade de materiais frágeis, a falha ocorre quando a tensão principal máxima no material atinge a tensão normal máxima que o material pode suportar em um teste de tração uniaxial (Beer *et al.*, 2011). Para materiais dúcteis, o critério de falha de von Mises leva em consideração os conceitos de energia de distorção de um elemento e diz que a falha ocorre quando a energia associada à mudança de forma de um corpo (tensão equivalente de von Mises) ultrapassa a energia de distorção de um

corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração (Beer *et al.*, 2011). Assim, utilizando estes critérios para analisar a Tabela 2, podemos indicar que apenas os suportes fabricados com os materiais C, E e F, considerando os desvios padrões, não irão falhar nas condições simuladas. Ainda, como na aplicação estudada os suportes devem trabalhar dentro do regime elástico dos materiais, apenas os materiais C e E são indicados para o uso.

Como previsto pela análise dos critérios de falha, os materiais ABS e B falharam nos pontos de maior solicitação indicados nas simulações (Figura 7b e Figura 7c) quando foram submetidos às condições reais de operação, as Figura 8d e Figura 8e mostra estes suportes após a falha. A Figura 8f mostra uma clássica falha em uma peça fabricada por FDM™ enquanto o suporte apoiava o peso do rolete evidenciando a anisotropia pelo descolamento de camadas. O material E, que tem maior margem de segurança que o material C, foi selecionado para a aplicação final e mostrou-se confiável trabalhando em condições reais de operação como mostrado na Figura 8g.



Figura 8. Suportes fabricados nos materiais: (a) ABS; (b) C; (c) F; (d) ABS; (e) B; (f) ABS; (g) E

4. CONCLUSÕES

Apesar da evolução e popularização da tecnologia, a anisotropia de materiais oriundos da MA pode inviabilizar a utilização deste processo na fabricação de componentes de máquinas submetidos a carregamentos multiaxiais. A simulação através de MEF permite investigar e avaliar materiais e processos para a fabricação de peças que demandam alta confiabilidade.

A adição de reforços e/ou plastificantes em resinas altera as suas propriedades mecânicas e permite a adequação de sua resistência mecânica e elasticidade para valores desejados.

Os resultados obtidos neste trabalho, através da utilização de uma metodologia para avaliação de peças que demandam características ímpares para um bom funcionamento, mostram a importância de investigar as condições de trabalho, propriedades mecânicas e processos de fabricação na seleção do material que será utilizado na sua fabricação. O estudo de caso aplicado validou a conveniência no uso de simulações computacionais e MA no auxílio para seleção de materiais e fabricação de componentes mecânicos.

5. REFERÊNCIAS

- AHMADI-MOGHADAM, B. et al. Effect of functionalization of graphene nanoplatelets on the mechanical response of graphene/epoxy composites. *Materials & Design* (1980-2015), v. 66, p. 142–149, fev. 2015.
- BEER, F. P. et al. *Mechanics of Materials*. 6th. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- CALIGNANO, F. et al. Design of Additively Manufactured Structures for Biomedical Applications: A Review of the Additive Manufacturing Processes Applied to the Biomedical Sector. *Journal of Healthcare Engineering*, v. 2019, p. 1–6, 12 mar. 2019.
- CANTRELL, J. et al. *Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts*. Society for Experimental Mechanics Series. Anais...Springer, Cham, 2016.
- CURY, Alexandre. Critérios de Falha. 2015. Juiz de Fora. 29 p. Notas de aula. Disponível em: <https://www.ufjf.br/mac003/files/2015/01/8-criterios.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- DEARN, K. D. et al. Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear*, v. 298–299, p. 99–108, fev. 2013.
- ENGINEERED PLASTICS WORKSHOP, 2017, Westborough. Notas... Disponível em: https://www.rtpcompany.com/wp-content/uploads/Boston-Westborough_Workbook_Fall2017.pdf. Acesso em: 21 jan. 2021.
- FAYAZFAR, H. et al. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, v. 144, p. 98–128, abr. 2018.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.

- GIBSON, R. F. Principles of Composite Material Mechanics. 4th. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- GOH, G. D. et al. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. Advanced Materials Technologies, v. 4, n. 1, p. 1800271, jan. 2019.
- GORDELIER, T. J. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. Rapid Prototyping Journal, v. 25, n. 6, p. 953–971, 8 jul. 2019.
- LI, Q.; XIE, L. Analysis and Optimization of Tooth Surface Contact Stress of Gears with Tooth Profile Deviations, Meshing Errors and Lead Crowning Modifications Based on Finite Element Method and Taguchi Method. Metals, v. 10, n. 10, p. 1370, 14 out. 2020.
- LOVO, J. F. P. et al. Mechanical structural design based on additive manufacturing and internal reinforcement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 234, n. 2, p. 417–426, 25 jan. 2019.
- PURQUERIO, B. DE M. et al. Processo para a fabricação de moldes de silicone, moldes de silicone, e uso dos moldes de silicone Brasil, 2018.
- SERVES, V. Espumas Flexíveis de Poliuretano a Base de Polióis de Óleo de Mamona Etoxilado. [s.l.] Universidade de Campinas, 2007.
- SOMIREDDY, M.; CZEKANSKI, A. Mechanical Characterization of Additively Manufactured Parts by FE Modeling of Mesostructure. Journal of Manufacturing and Materials Processing, v. 1, n. 2, p. 18, 13 nov. 2017.
- ZENG, W.; LIU, G. R. Smoothed Finite Element Methods (S-FEM): An Overview and Recent Developments. Archives of Computational Methods in Engineering, v. 25, n. 2, p. 397–435, 21 abr. 2018.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MATERIAL SELECTION AND MECHANICAL COMPONENT MANUFACTURING ASSISTED BY FEM AND AM: A CASE STUDY

Sergio Gomes Machado Filho

João Fiore Parreira Lovo

Carlos Alberto Fortulan

University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Mechanical Engineering Department, Laboratory of Tribology and Composites, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos, SP, Brasil

sergio.gmf@outlook.com

joao.lovo@gmail.com

fortulan@usp.br

Abstract. Computational tools based on FEM (Finite Element Methods) and Additive Manufacturing (AM) have changed the way to manufacture components of modern machines and mechanical devices. Restricted dimensions, complex shape, agile, economical, accessible manufacturing and with high resistance are the modern and future demands. In this sense, the objective of the present work was to evaluate materials and manufacturing methods for a machine component (case study) based on the elasticity and mechanical resistance required in service. Simulation of the component in FEM verified the required elastic deformation and stress distribution. Then, parts in different formulations of polymers and composites were manufactured by AM directly or by molding replication. The experimental results of the proposed formulations showed mechanical properties that can match the previously simulated request. Highlighting the manufacture by molding replication with the use of a high resistance epoxy resin, added with plasticizer (yield stress and deformation of 50.27 MPa and 3.3%, respectively). The applied case study validated the convenience of using FEM and AM to assist in the selection of materials and the manufacture of mechanical components.

Keywords: Finite Element Method. Additive Manufacturing. Molding. Epoxy Composites.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.