

Caracterização experimental e numérica de painéis sanduíche *honeycomb* manufaturados a partir de materiais termoplásticos.

Pedro Henrique dos Santos Alves, Tiago Rodrigues do Santos, Mateus Silva Sant'Ana, Guilherme Portilho Ribeiro e Manuel Dias Nascimento Barcelos Junior.

Palavras-chaves: Honeycomb; manufatura aditiva; Engenharia Aeroespacial; Modelagem numérica; Caracterização.

Introdução

Os avanços tecnológicos nas técnicas de manufatura de polímeros através da prototipagem rápida (impressão 3D), uma tecnologia de fabricação aditiva onde um modelo tridimensional é criado através de sucessivas camadas de polímeros depositadas, têm se tornado atrativas para serem empregadas em projetos de engenharia uma vez que é uma ferramenta capaz de criar produtos finais de geometria complexas e com características únicas em apenas um processo de fabricação[1].

O processo de prototipagem rápida mais difundido é a *Fused Deposition Modeling* (FDM), nesse processo um material termoplástico é aquecido em um bocal até uma temperatura que permita sua extrusão através de um bico. O material é depositado camada por camada para a formação da peça final. As máquinas utilizadas para FDM possuem o preço mais baixo dentre todo o processo de manufatura aditiva. A matéria-prima para fabricação é acessível e possibilita ser utilizada com diferentes materiais na impressão da mesma peça e acabamento final de alta qualidade[2][3].

Os termoplásticos mais utilizados atualmente na produção de protótipos e produtos finais através da impressão 3D do tipo FDM são: Poliláctico (PLA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) e Nylon, sendo o PETG pertencente à mesma família do PET e PTT. Dentre os termoplásticos mais utilizados, os que são considerados materiais flexíveis são os elastômero termoplástico (TPE), poliuretano termoplástico (TPU) e policarbonato (PC) [2]. Dentre os termoplásticos existe uma família que é bastante utilizada no meio acadêmico, principalmente por engenheiros aeronáuticos e aeroespaciais, que são considerados polímeros de engenharia, são os Poli(éter-éter-cetona) (PEEK), polieterimida (PEI), poliéster éter-cetona (PEAK) [3].

Dentre esse leque de termoplásticos, alguns deles são mais utilizados devido às suas características e aplicações diversas. O PLA é um polímero produzido a partir de moléculas de ácido láctico, um ácido orgânico que é obtido de recursos renováveis, e devido a isto, é considerado um biopolímero biocompatível, bem como bioativo e biorreabsorvível. Esse tipo de material apresenta características que possibilitam diversas aplicações no setor biomédico [4]. Medeiros (p.78, 2018) concluiu que o PLA apresenta propriedades que possibilitam suas aplicações na área de liberação de fármacos e implantes, mas acredita também seja necessário um estudo mais profundo sobre o assunto [5][7][8][9].

As estruturas sanduíche estão presentes em diversos campos da engenharia, por possuir baixa massa específica e alta resistência mecânica, esse tipo de material se torna atrativo para o setor aeroespacial. O alumínio é um material utilizado de modo majoritário na indústria, todavia, materiais termoplásticos possuem capacidade de aplicação graças a sua relação entre resistência e massa [10][11][17].

O trabalho tem por objetivo caracterizar esses materiais e analisar quais são as melhores configurações de painel sanduíche. Foram ensaiados 3 polímeros de uso comum em prototipagem rápida, o Ácido Polilático (PLA), o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Politereftalato de Etileno Glicol (PETG). Para atingir os objetivos do trabalho foram realizados ensaios de tração segundo a ASTM D638 e ensaios de flexão nos painéis honeycombs segundo a norma ASTM C393 [12] [13]. O ensaio de tração tem por finalidade determinar as propriedades mecânicas dos materiais. Os ensaios de flexão com estruturas impressas com diferentes porcentagens de preenchimento de padrão hexagonal para o núcleo do painel sanduíche do tipo colméia. Utilizou-se o software *Ansys* para a modelagem numérica dos painéis a fim de comparar os resultados [12][14][15].

Metodologia

O trabalho tem como objetivo a caracterização mecânica do PLA, ABS E PETG, para isso fez-se uso de ensaios mecânicos destrutivos de tração, baseando-se na norma ASTM D638. O ensaio de tração tinha como objetivo fundamentar o conhecimento sobre os materiais, de modo a ser possível a modelagem numérica dos painéis estruturais sanduíche *honeycomb*, utilizando o software *Ansys*. Gerando dados para uma análise comparativa entre os resultados da simulação e os dados experimentais dos ensaios de flexão.

Os corpos de provas foram fabricados utilizando uma impressora 3D modelo Graber i3 modificado. A impressora foi disponibilizada pelo Laboratório de Estruturas Aeroespaciais (LEA) da Universidade de Brasília campus Gama. Todos os corpos de provas foram fabricados com direção de impressão horizontal. Os filamentos usados para produção dos corpos de provas (CPS), são da fabricante 3Dlab, o mesmo recomenda os parâmetros de impressão da tabela 1, para utilização dos filamento de PLA, ABS e PETG.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão recomendados para o filamento da 3D Lab segundo o fornecedor.

Parâmetros de Impressão Recomendados			
Material	Temperatura de impressão [°C]	Temperatura da Mesa [°C]	Velocidade de Impressão [mm/s]
PLA	200- 220	<70	até 150
ABS	200 - 240	100-120	até 150
PETG	230 - 255	<85	até 120

A confecção dos corpos de prova de tração no formato osso, seguiu as determinações da norma ASTM D638. Na Tabela 2 encontram-se as medidas utilizadas para fabricação dos corpos de prova de tração [12].

Tabela 2- Dimensões fornecidas pela norma ASTM D638 do corpo de prova de tração.

W [mm]	Wo [mm]	Lo [mm]	L [mm]	d [mm]	t [mm]
13.00±0.50	19.00±0.75	165.00±6.50	57.00±2.25	115.00±4.50	3.20±0.40

Legenda: w- Largura da seção estreita; Wo-Largura total; Lo - Comprimento total; L - Comprimento da seção estreita; d- Distância entre pegadas; t - espessura.

O teste de tração foi realizado em uma máquina de ensaio universal Instron 8801. Em conjunto à máquina foi utilizado o extensômetro para medir a deformação específica do corpo de prova, a velocidade de ensaio foi de 1 mm/min, valores estipulados pela norma ASTM D638[12][14].

As dimensões do corpo de prova para o ensaio de flexão seguiu a determinação da norma ASTM C393, devido às limitações da mesa de impressão utilizada o comprimento do corpo de prova utilizado foi de 180mm e as demais dimensões foram determinadas a partir dessa limitação. A densidade de preenchimento do núcleo foi variada em 3 valores: 10%, 15% e 20%. Enquanto a espessura do núcleo do painel foi variada em 2 valores: 8.8mm e 13.8mm. A espessura das faces do painel se manteve constante em todos os corpos de prova, foi utilizado o valor de 0.6mm. Os corpos de prova resultantes possuem as geometrias baseando-se na norma ASTM C393[21][22]. Na Tabela 3 é possível encontrar a correlação entre a porcentagem de preenchimento e as dimensões das parede do núcleo.

Tabela 3 - Geometria das células do núcleo *honeycomb*.

Preenchimento [%]	Espessura da parede [mm]	Distância entre parede [mm]	Espessura do núcleo para o painel de 10 mm [mm]	Espessura do núcleo para o painel de 15 mm [mm]
10	0.5	7.4	8.8	13.8
15	0.5	5.0	8.8	13.8
20	0.5	3.4	8.8	13.8

A análise numérica foi realizada com o software *Ansys*, a geometria foi desenhada no programa de modelagem 3D (do inglês *computer aided design* - *CAD*) e exportada para que fosse simulada. Para o corpo sendo simulado foram aplicados, tanto nas faces como no núcleo, o valor do módulo de elasticidade obtido experimentalmente. Em relação ao carregamento, foram analisados os gráficos Força por Deflexão dos experimentos e então selecionada uma carga que correspondesse à uma flecha dentro da zona elástica do material.

Resultados

Os resultados obtido através do ensaio de tração para ABS e PETG, foi condizente com os resultados encontrados na bibliografia [15]. Já o módulo de elasticidade encontrado para o PLA foi ligeiramente inferior, ao encontrado nas bibliografia, em que apresenta o valor entre 3 GPa e 4 GPa. Essa diferença deve-se por possíveis inconsistências (presença de vazios e problemas de adesão entre camadas) no processo de manufatura aditiva e variações de qualidade do filamento [16]. As propriedades mecânicas gerada através do ensaio de tração encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas para os materiais.

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Poison
PLA	2.86±0.23	43.10±2,06	0.30±0,05

ABS	2.055±0.22	30.15±0.77	0.27±0.08
PETG	1.497 ±0.26	26.50±0,50	0.26±0.08

O ABS foi o único material que não foi possível a fabricação de painéis sanduíches *honeycomb*. Essa impossibilidade deu-se por ser um material bastante suscetível a influência da variação de temperatura. Por limitações da impressora 3D utilizada, o mesmo sofria com o deslocamento das primeiras camadas de impressão que era causada por um gradiente de temperatura muito abrupto entre a camada que estava em contato com a mesa e a última camada que estava sendo gerada.

Na Tabela 5 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de flexão para os painéis sanduíche de PLA e PETG. Em ambos os material, os resultados para a carga máxima média utilizando painéis de espessura 10 mm apresentaram um aumento progressivo à medida que se aumentou o preenchimento do núcleo hexagonal, comportamento esperado uma vez que se espera uma maior rigidez à flexão, logo suportam maior carga. Contudo, o comportamento esperado para a configuração de 10 mm de espessura com 20% de preenchimento obteve menor força quando comparado com a mesma espessura e preenchimento de 15%, este fato deve-se há defeitos inerentes ao material utilizado, uma vez que o comportamento esperado é aumento da força máxima com o aumento da porcentagem de preenchimento.

Os resultados obtidos para os painéis de 15 mm apresentam comportamento conforme esperado. Maior densidade no núcleo implica em maior resistência mecânica, uma vez que, o aumento do grau de preenchimento, diminui o tamanho de célula conforme exposto na Tabela 3. Este fato implica em uma maior rigidez.

Tabela 5 – Resultados Experimentais do Ensaio de Flexão.

PLA			PETG		
CONFIGURAÇÃO	FLECHA EXPERIMENTAL MÁXIMA MÉDIA [mm]	CARGA MÁXIMA MÉDIA [N]	CONFIGURAÇÃO	FLECHA EXPERIMENTAL MÁXIMA MÉDIA [mm]	CARGA MÁXIMA MÉDIA [N]
10mm-10%	9.9840	375	10mm-10%	9.7402	320
10mm-15%	10.0889	475	10mm-15%	11.0942	340
10mm-20%	11.8255	465	10mm-20%	12.6087	400
15mm-10%	8.6278	620	15mm-10%	7.7007	450
15mm-15%	7.3349	835	15mm-15%	7.9643	685
15mm-20%	7.3961	1030	15mm-20%	9.8060	700

A modelagem numérica foi realizada de modo a comparar a flecha experimental e a flecha simulada. O valor de carga definido foi escolhido dentro de uma região determinada, que não estivesse logo no começo da curva pois o corpo de prova está sujeito a efeitos de escorregamento. Valores de forças elevadas próximos ao limite de falha do material estão em um região fora da zona

elástica. Para tanto, a partir das curvas mencionadas foram escolhidos os valores de 250 N para o PLA e 150 N para o ABS. Estas condições foram definidas para garantir que o material esteja em uma região elástica. A Tabela 6 apresenta o resultado da simulação feita para o *honeycomb* cuja configuração é 10 mm de altura e 20% de preenchimento.

Tabela 6 - Comparativo flecha simulada e experimental.

MATERIAL	CONFIGURAÇÃO	FORÇA [N]	FLECHA EXPERIMENTAL [mm]	FLECHA SIMULADA [mm]	ERRO %
PLA	10mm 20%	300	3.8490	3.8618	0.33
PETG	10mm 20%	150	2.2620	2.2262	1.58

A Tabela 7 apresenta a análise de convergência da malha, onde é possível perceber que o valor da flecha aumenta com o refino da malha e tende a uma assíntota. É importante salientar que existem erros associados à simulação devido a incertezas de medição das propriedades e valores experimentais.

Tabela 7 - Análise de convergência de Malha

TAMANHO DE CADA ELEMENTO DA MALHA [mm]	FLECHA [mm]
PLA	
3.0	3.4724
2.0	3.7699
1.5	3.8115
1.0	3,8618
PETG	
3.0	2.0299
2.0	2.1650
1.5	2.2247
1.0	2,2262

Conclusão

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração para todos os materiais estudados nesta pesquisa estão de acordo com o referencial bibliográfico. Os resultados para a flecha dentro da região linear mostram que de fato o aumento da espessura e da densidade de preenchimento tornam os painéis mais rígidos para o mesmo carregamento.

O ABS é um material muito suscetível a gradientes de temperatura entre a mesa de deposição e o ambiente, o tamanho maior dos corpos de prova de flexão em relação aos corpos de prova de tração se mostrou um problema para se manter a temperatura durante toda a impressão dos corpos de prova, impressões estas que demoravam um tempo muito maior. A ocorrência de empenamento devido à temperatura e à dificuldade de deposição da face superior impossibilitou a utilização do ABS.

À partir dos dados da análise numérica, é possível perceber que a estrutura sanduíche pode ser simulada como um modelo isotrópico, apresentando resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente, mesmo com as incertezas de medições associadas às propriedades dos material.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, tanto dos ensaios mecânicos quanto das simulações, são relevantes para o avanço do conhecimento na manufatura aditiva. Este resultado abre portas para novas aplicações de peças feitas através da manufatura aditiva, principalmente os resultados das simulações, possibilitam entender um pouco mais do comportamento de estruturas mais complexas. Por consequência, o uso da manufatura aditiva não apenas em protótipos, mas também em produtos torna-se cada vez mais possível.

Referências

- [1] PAOLI, Marco-Aurelio de. Degradação e Estabilização de Polímeros. Chemkeys, Ed. 2º, versão online, 2008. Disponível em: <<http://www.chemkeys.com/blog/wp-content/uploads/2008/09/polimeros.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2020
- [2] BESKO, Marcos A ; BILYK, Claudio B ; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia. Vol.01 n.3, 2017. Disponível em: <<http://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2020
- [3] LIU, Zhichao; WANG, Gong; HUO, YU; ZHAO, WEI. Research on Precise Control of 3D Print Nozzle Temperature in PEEK Material. In: AIP Conference Proceedings. 1890, China. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5005278>>. Acesso em: 09 abr. 2020
- [4] AURAS, Rafael A; LIM, Loong-Tak; SELKE, Susan E.M; TSUJI, Hideto. Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications (Wiley Series on Polymer Engineering and Technology) Editora: Wiley, 2010. ISBN: 9780470649848
- [5] MEDEIROS, Camila Beatriz Souza de. Avaliação de peças de Poli(ácido láctico) (PLA) impressas para aplicações biomédicas. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- [6] BARBOSA, R.A; DOURADO, T.C; ROCHA, G.M; COSTA-FÉLIX, R.P.B. Aplicações da manufatura aditiva em apoio a laboratórios de metrologia e desenvolvimento industrial. Disponível em: <http://media.metrologia2019.org.br/static/media/uploads/s/rabarbosa@inmetro.gov.br_1569696194_364750.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2020
- [7] SILVA, Marcus Vinicius Barros da. Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial. 74 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Aeroespacial), Universidade de Brasília - Faculdade UnB Gama, 2017.

- [8] VILÁN, José Antonio Vilán; AGELET, Fernando Aguado; ESTÉVEZ, Miguel López; MUÑO, Alberto González. Flight results: Reliability and lifetime of the polymeric 3D-printed antenna deployment mechanism installed on Xatcobeo & Humsat-D. *Acta Astronautica*, volume 107, p. 290-300. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576514003828?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 abr. 2020
- [9] ARIFA, M.F; KUMARA, S; VARADARAJANB, K.M; CANTWELLD, W.J. Performance of Biocompatible PEEK Processed by Fused Deposition Additive Manufacturing. *Materials & Design*, doi:10.1016/j.matdes.2018.03.015, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127518301874?via%3Dihub>>. Acesso em: DATA:08 abr. 2020
- [10] ZHAO, Feng; LI, Dichen; JIN, Zhongmin. Preliminary Investigation of Poly-Ether-Ether-Ketone Based on Fused Deposition Modeling for Medical Applications. *Materials*, doi:10.3390/ma11020288, 2018
- [11] KALRA, Sahil; MUNJAL, B.S; SINGH, Vaibhav Raj; MAHAJAN, Milind; BHATTACHARYA, Bishakh. Investigations on the suitability of PEEK material under space environment conditions and its application in a parabolic space antenna. *Advances in Space Research*, volume 63, pages 4039-4045m 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719301851?via%3Dihub>>. Acesso em: DATA 12 abr. 2020
- [12] ASTM INTERNATIONAL - American Society for Testing and Materials International. Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment. Disponível em:
- [13] HARA, Débora Harumi Suzuki; FERREIRA, Diógenes Adriano; DEGASPERI, Francisco Tadeu. Cálculo e determinação Experimental da Taxa de Desgaseificação de Materiais Poliméricos em Vácuo. Disponível em:
- [14] ASTM. International. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. 2016.
- [15] T Bitzer. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science Business Media, 1997.
- [16] D Callister, W. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Rio de Janeiro, 5 edition, 2002.
- [17] H Composites. Hexwebtm honeycomb sandwich design technology. Hexcel Composites, 2000.
- [18] R Costa. Estudo experimental da resistência térmica de contato na interface entre equipamentos e painéis estruturais de satélites, 2018.
- [19] N Daniel, I. Failure Modes of Composite Sandwich Beams,. 2002.
- [20] Diabgroup. Diab sandwich handbook, 2016.
- [21] C Dias. Análise mecânica de estruturas sanduíche com diferentes núcleo. 2016.
- [22] F Gibbison, R. Principles of composite material mechanics. CRC press, 2016.
- [23] H G Magson, T. Aircraft Structures for engineering students. Elsevier, 5 edition.