

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PAINÉIS SANDUÍCHE FABRICADOS COM NÚCLEO TERMOPLÁSTICO E FACES LAMINADAS

Mateus Silva Sant'Ana

Pedro Henrique dos Santos Alves

Tiago Rodrigues dos Santos

Manuel Dias Nascimento Barcelos Junior

Universidade de Brasília - Área Especial de Indústria Projecção A, DF-480 - CEP 72444-240 – Gama – DF – Brasil

mateus.s.santana.1@gmail.com

pedrohenriquedf11@gmail.com

tiagorsantos97@gmail.com

manuelbarcelos@unb.br

Resumo. Estruturas Aeroespaciais são solicitadas mecanicamente com altos níveis de tensões. Essas estruturas devem resistir a fadiga, flexão, vibração, variações de temperatura entre outras. As estruturas de satélite, asas de avião e nacele de motor aeronáutico são geralmente feitas de painéis sanduíche tipo colmeia ou honeycomb, por serem leves e de alta resistência à flexão. Este trabalho tem por finalidade modelar e analisar painéis sanduíche do tipo colmeia feitos a partir de manufatura aditiva – fusão e deposição de material termoplástico – utilizando o Ácido Polilático (PLA) para o núcleo hexagonal e materiais compósitos para a laminação das faces. A modelagem numérica objetiva tecer comparativos com os resultados experimentais para que seja possível entender e aferir as correlações e a influência entre si para região elástica. Desta forma, foram feitos três tipos de painéis, todos impressos em PLA, em que se variou o material das faces entre alumínio, compósito de fibra de vidro e compósito de fibra de carbono que foram submetidos ao ensaio mecânico de flexão regido pela norma americana ASTM C393.

Palavras chave: Pannel Sanduíche. Manufatura Aditiva. Material compósito. Modelagem numérica.

1. INTRODUÇÃO

Painel sanduíche tipo colmeia, também conhecido por painel *honeycomb*, é constituído por duas faces intercaladas por um núcleo hexagonal e um material adesivo que une as partes (Gagliardo, 2005). A geometria hexagonal do núcleo atribui ao *honeycomb* propriedades tais como alta absorção de energia (Greca, 2017), bem como o torna bom isolante acústico (Costa, 2018), além da baixa massa específica e alta resistência mecânica. A resistência mecânica desse tipo de estrutura está atrelada ao tamanho da célula dos hexágonos, espessura dos hexágonos assim como o material empregado. As faces do painel sanduíche o confere resistência às tensões normais e tensões de cisalhamento (Bitzer, 1997).

A configuração dessa estrutura, de forma geral, tem as faces mais resistentes à flexão que o núcleo, mesmo que, a espessura maior do núcleo contribua para maior momento de inércia consequentemente maior rigidez à flexão (Beer, 1989). Desta forma, para que se tenha maior eficiência dos painéis sanduíche do tipo colmeia a razão de massas entre face e núcleo deve ser 1. Outro fator que influi diretamente no desempenho estrutural dos sanduíches *honeycombs* é a aderência entre a interface núcleo e face. O material adesivo é responsável por transferir as solicitações mecânicas sofrida pela estrutura entre seus constituintes além de suportar tanto esforços cortantes quanto esforços normais (Divyathej et al, 2016).

Materiais de engenharia comumente empregado para este tipo de aplicação são as ligas de alumínio. Contudo, materiais não convencionais veem surgindo em aplicações tanto no âmbito da academia quanto na indústria, sobre tudo materiais termoplásticos os quais são passíveis de fabricarem estruturas através da manufatura aditiva (Costa, 2018). Tal processo de fabricação possibilita criação de protótipos e elementos estruturais cujas geometrias são complexas em tempo reduzido e com menor custo (Canevarolo, 2011). Elementos fabricados a partir desse processo podem ser utilizados como produto final aplicado à indústria e como molde para outros processos de fabricação (Callister, 2002).

A manufatura aditiva, que também é conhecida como impressão tridimensional (3D) é uma tecnologia de modelagem por deposição de material em camadas consecutivas, sendo que dentro desse método de produção existem várias técnicas diferentes, sendo a modelagem por deposição de material fundido que do inglês é *Fused Deposition Modeling* (FDM) uma das mais utilizadas (Muller, 2012). O FDM é uma tecnologia que consiste na modelagem por deposição de termoplásticos fundido em camadas consecutivas (Gibson, 2015), essa técnica ficou bastante difundida no meio acadêmico, principalmente entre engenheiros, por possibilitar a criação de estruturas complexas em apenas um processo de fabricação e com pouca perda de material (Brett et al, 2014).

Essas vantagens possibilitam, para os painéis sanduíche, fabricar tamanhos diversos de espessura de parede de célula, espessura das faces e tamanho de células hexagonais. Essa facilidade de *design* permite conceber configurações de *honeycombs* a fim de se ter maior resistência mecânica e baixa massa específica, uma vez que, a resistência mecânica está atrelada diretamente com a geometria dos hexágonos (Brett et al,2014).

Este trabalho tem por finalidade modelar numericamente através do método dos elementos finitos a curva de força por deflexão de painéis sanduíche tipo colmeia sujeito a flexão e compará-lo com a curva experimental de forma a validar a modelagem numérica e o processo de fabricação envolvido. Os painéis são divididos em três grupos em que se tem o núcleo hexagonal feito a partir de manufatura aditiva de material termoplástico com faces laminadas em fibra de vidro, fibra de carbono e alumínio. De forma a garantir confiabilidade nos resultados obtidos tais *honeycombs* são comparados com um grupo de controle de painéis fabricados por uma empresa especializada neste tipo de estrutura sanduíche. O material do grupo de controle é feito de liga de alumínio tanto para o núcleo quanto para a face. A fim de simplificar a modelagem e as análises envolvidas apenas é considerado a região elástica das estruturas.

Os resultados obtidos evidenciam que o processo de fabricação influencia no desempenho das estruturas em análise que consequentemente leva a divergências entre numérico e experimental. O método de simulação empregado se mostrou eficiente para o comportamento em região elástica uma vez que a adesão entre núcleo e face esteja adequada. Os dados experimentais, isoladamente, fornecem dados qualitativos a respeito do processo de fabricação empregado, visto que o modo de falha e propagação de trinca está diretamente atrelado a qualidade de fabricação das estruturas.

2. METODOLOGIA

2.1. Processo de fabricação

Os espécimes são feitos a partir de material termoplástico para o núcleo e faces laminadas em material compósito. O painel sanduíche é composto por núcleo feito de ácido polilático (PLA) e faces laminadas em fibra de vidro, fibra de carbono e alumínio. Os três grupamentos possuem espessura da face de $0,6 \pm 0,1$, espessura hexagonal da célula de $0,45 \pm 0,1$ mm, comprimento de $180 \pm 0,1$ mm; largura de $60 \pm 0,1$ mm, conforme Fig. 1 (Carvalho, 2019).

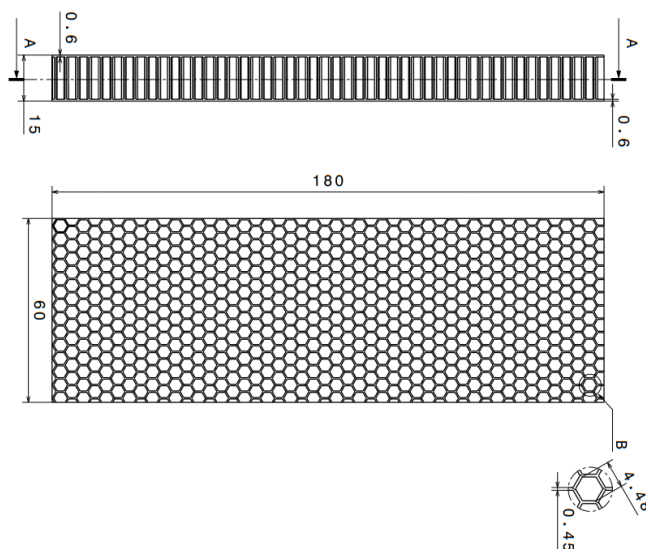


Figura 1. Dimensões do painel sanduíche.

Os painéis sanduíches foram fabricados no laboratório estruturas aeroespacial (LEA) da Universidade de Brasília, para confecção dos painéis sanduíches através da manufatura aditiva, foi necessário desenvolver o desenho assistido por computador (DAC), para que posteriormente seja feito o processo de pré-processamento de impressão do DAC, de modo que a impressora 3D consiga imprimir a peça. Na etapa de pré-processamento das peças são inseridos todos os dados pertinentes referentes à configuração de impressão e ao material utilizado, o fatiamento foi feito através do software Simplify3D (Brett et al,2014).

Os núcleos foram fabricados utilizando-se uma impressora 3D FDM, de área de impressão de comprimento de 300 mm, largura de 300 mm e altura de 300 mm, com os parâmetros de impressão, temperatura do bico extrusor a 200 °C, temperatura de mesa a 60 °C com velocidade de deposição de material por camada de 80 mm/s, diâmetro do bico de 0,4 mm, altura de camada de 0,200mm e preenchimento de 100%. O filamento utilizado para confecção dos espécimes foi o PLA natural da fabricante 3DLab. As configurações de impressão descritas resultam em tempo médio de produção de cada núcleo em 8 horas. A laminação é feita em uma bancada com controle de temperatura e pressão.

A laminação em fibra de vidro foi feita com resina epóxi e fibra de vidro de gramatura de 1200 g/m² em que se foi utilizada uma camada da manta. O mesmo processo foi adotado para a laminação com alumínio 1100. A laminação em fibra de carbono foi feita com resina epóxi com fibra de carbono de gramatura de 200 g/m² em que se foi utilizada 8 camadas disposta 0° e 90° a fim de se atingir a espessura de 0,6 mm (Carvalho, 2019).

O processo de laminação das faces junto ao núcleo impresso é feito em uma bancada desenvolvida em que se tem o controle de temperatura e pressão de vácuo durante o procedimento (Sant'Ana, 2019). A temperatura tem por finalidade homogeneizar o processo de cura do material, bem como ser um catalisador da resina e reduzir o tempo de cura. O vácuo atua no processo removendo bolhas e bolsões de ar internos oriundo do processo de cura do compósito (Strong, 2008). Os três materiais utilizados para manufaturar a face foram laminados a temperatura de 30 °C e pressão de vácuo de 11 kPa com exposição de 6 horas. Em sua totalidade cada espécime tem o tempo de manufatura de 14 horas cada. Deste modo, foram feitos cinco painéis sanduíche do tipo colmeia para cada configuração de material para face.

2.2. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é feito segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM). O ensaio é feito segundo a norma ASTM C393 a qual é a norma técnica para método de teste padrão para determinar propriedades de cisalhamento de núcleo de construções sanduíche por flexão de viga. Esse ensaio tem como objetivo determinar as propriedades de cisalhamento dos painéis sanduíches quando submetido à flexão de tal forma que os momentos aplicados produzam curvatura no plano da superfície dos espécimes e provoque pequenos deslocamentos (Callister, 2002).

O procedimento adotado foi o método de ensaio de flexão de três pontos. Este método consiste em sapatadas equidistantes à 150 mm a fim de suportar os painéis sanduíche. No ponto médio entre as sapatadas é localizado o ponto a ser aplicada a carga compressiva sobre a estrutura *honeycomb*, conforme a Fig. 2. A norma especifica que a velocidade do ensaio deve ser tal que a ruptura ocorra entre três minutos e seis minutos após o início do ensaio. Por conseguinte, a velocidade média de descida da força foi de 0,5 mm/s, determinada empiricamente conforme norma ASTM C393.

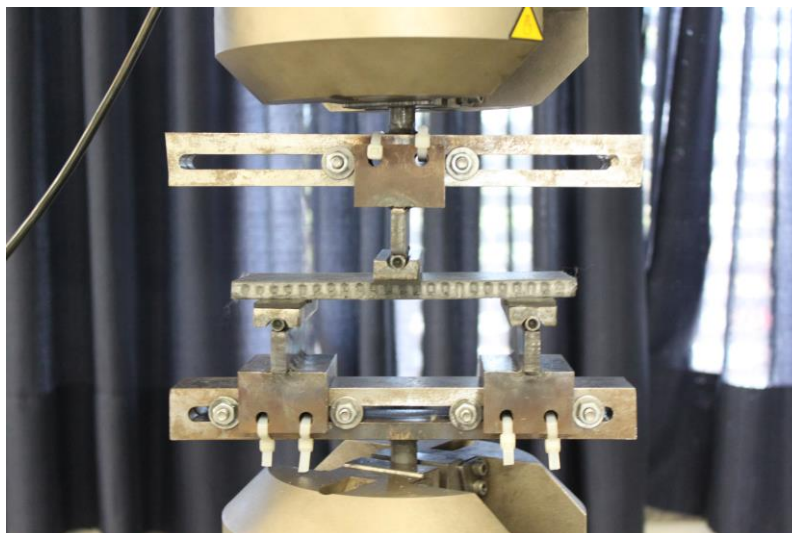


Figura 2. Painel sanduíche fabricado em fibra de carbono posicionado para o ensaio de flexão.

2.3. Modelagem numérica

A modelagem numérica objetiva construir a curva de força compressiva por flecha para que seja comparada com a mesma curva experimental. Desta forma, é possível validar a modelagem desenvolvida bem como o processo de fabricação apresentado por Carvalho em 2019. Para tal modelagem, é analisada a região elástica da curva a fim de se ter o comportamento linear do material e simplificar a simulação. Como hipótese simplificadora os materiais são modelados como isotrópicos (Ribeiro, 2019) a partir de dados experimentais conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados (Adaptado de Carvalho, 2019).

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Poisson
Ácido Polilácteo (PLA)	2,85	0,3

Fibra de Vidro	16,068	0,3
Fibra de Carbono	48,225	0,33
Alumínio 1100	69	0,3

O processo de modelagem consiste em obter os dados experimentais das estruturas ensaiadas e tratar os dados de formar a obter a curva média linearizada da região elástica do painel. Deste modo, é feito o modelo digital do painel sanduiche segundo as dimensões especificadas anteriormente, e então, é feita a modelagem dos materiais. Ao fim desta etapa o painel sanduiche está modelado conforme o modelo ensaiado. Consequente é modelado as condições de contorno do problema a fim emular o ensaio de flexão realizado, deste modo, para se obter a curva descrita é parametrizada carga compressiva e computado os resultados correspondentes de flecha. Ao término desta etapa é feito o comparativo entre as curvas experimentais e numéricas. A Fig. 3 esquematiza o processo de simulação.

A solução deste processo numérico requer a discretização da estrutura e a criação de uma malha, uma vez que, o método de elementos finitos resolve equações diferenciais para cada nó do sistema discreto (Zienkiewicz et al, 2013). Esse procedimento resulta em diversos sistemas lineares a serem solucionados e computados. Para esta aplicação foi feita uma malha estruturada com elementos sólidos retangulares. A fim de verificar os resultados obtidos é feita uma análise de convergência de malha em que se varia o número de nós até que atinja a convergência do valor de flecha.

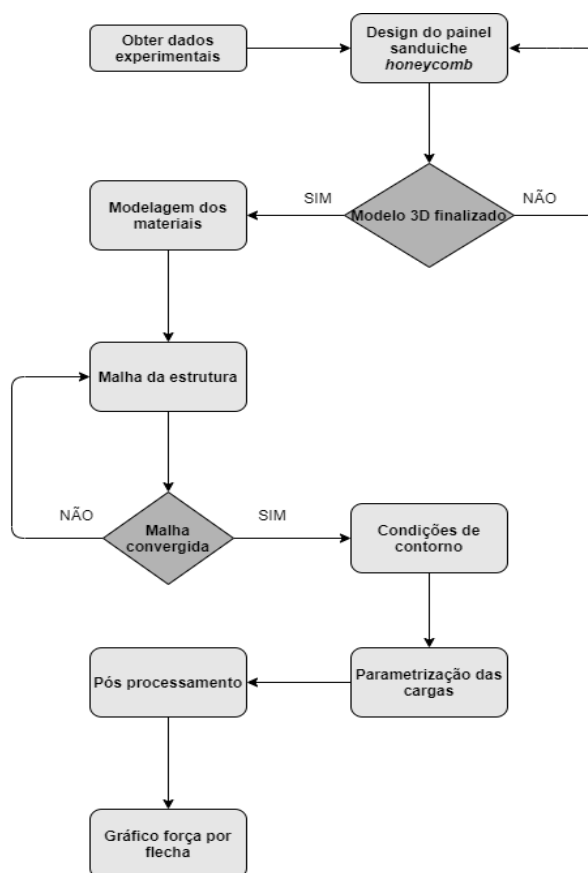


Figura 3: Processo de modelagem numérica (Adaptado de Wernke, 2019).

A fim de garantir a confiabilidade nos resultados obtidos a partir do modelo numérico o processo é aplicado para estrutura sanduiche tradicionais fabricadas por métodos convencionais de fabricação deste tipo de estrutura e feitas de ligas de alumínio isotrópicas. Estes espécimes atuam como amostras de controle para que sejam comparados os resultados numéricos obtidos. Os espécimes em questão têm dimensões de $0,3 \pm 0,1$ mm de espessura de face, $6,35 \pm 0,1$ mm de tamanho de célula hexagonal com $0,0254 \pm 0,1$ mm de espessura, $200 \pm 0,1$ mm de comprimento, $40 \pm 0,1$ mm de largura e $10 \pm 0,1$ mm de altura. Os materiais de fabricação do núcleo é a liga de alumínio 5056 H191 e o material de fabricação da face é a liga de alumínio 2024 T3.

3. RESULTADOS

O ensaio de flexão provê resultados significativos para análise. Dentre eles o modo de falha da estrutura ou o modo e origem da propagação de trinca do material fornecem dados indispensáveis para análise dos resultados numéricos e

experimentais, bem como do processo de fabricação envolvido. Para esse tipo de estrutura sujeita a carga de cisalhamento espera-se que ocorra falha do núcleo, por ter material menos resistente no núcleo, ou ter fratura com origem no núcleo que se propaga até a face do painel sanduiche (Bitzer, 1997).

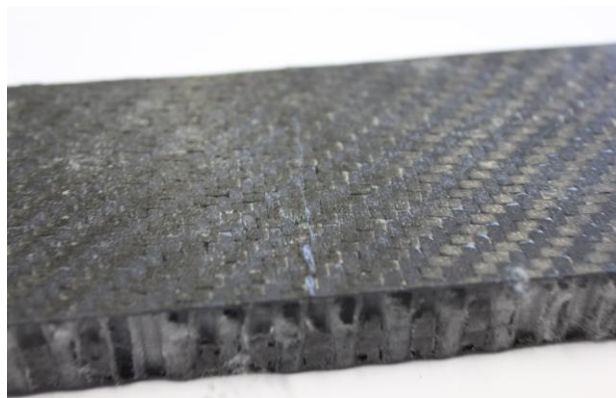
O modo de falha apresentada nas amostras de controle foi por fratura do núcleo e nas amostras de face laminada em fibra de vidro ocorreu fratura do núcleo com propagação da trinca para as faces (Daniel et al, 2002). As amostras de fibra de carbono tiveram falhas na face e propagação de trinca para o núcleo em algumas amostras. Esta falha ocorre devido à má aderência entre camadas de laminação ou por má aderência entre o material adesivo e o núcleo do *honeycomb*. Nas amostras de alumínio ocorreu falha por delaminação, ou seja, a face descolou do núcleo. Este tipo de falha ocorre quando há falha no material adesivo antes de ocorrer a fratura do núcleo ou fratura da face (Daniel et al, 2002). A Tabela 2. e Fig. 4. ilustram os modos de falhas mapeados dos painéis sanduiche.

Tabela 2. Modos de falha dos painéis sanduiches ensaiados.

Espécime	Modo de falha
Amostra de controle	Fratura do núcleo
Face laminada em fibra de vidro	Fratura do núcleo
Face laminada em fibra de carbono	Fratura da face
Face laminada em alumínio	Delaminação da face



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. (a) Delaminação na amostra de alumínio. (b) Fratura de face na amostra de fibra de carbono. (c) Fratura de núcleo na amostra de fibra de vidro. (d) Fratura de núcleo nas amostras de controle.

A modelagem numérica se mostra adequada para o comportamento restrito de comportamento elástico do material, isso deve-se ao fato de o método dos elementos finitos empregado resulta em sistemas lineares (Logan, 2011). As amostras de controle apresentaram erro inferior a 5% entre os resultados numérico e experimental. A curva vista na Fig. 5.a. evidencia os resultados obtidos, contudo, ressalta-se que o erro pode ser atenuado com ensaio de mais espécimes, uma vez que, foram ensaiadas três amostras de controle devido aos recursos disponíveis. As amostras de fibra de vidro,

vista na Fig. 5.b. evidenciam que a modelagem numérica adotada é suficiente para o objetivo deste trabalho e condições descritas, pois apresenta erro inferior a 5%. As amostras de fibra de carbono e alumínio apresentam erros superiores a 5% conforme mostra a Fig. 5.c e Fig. 5.d. respectivamente.

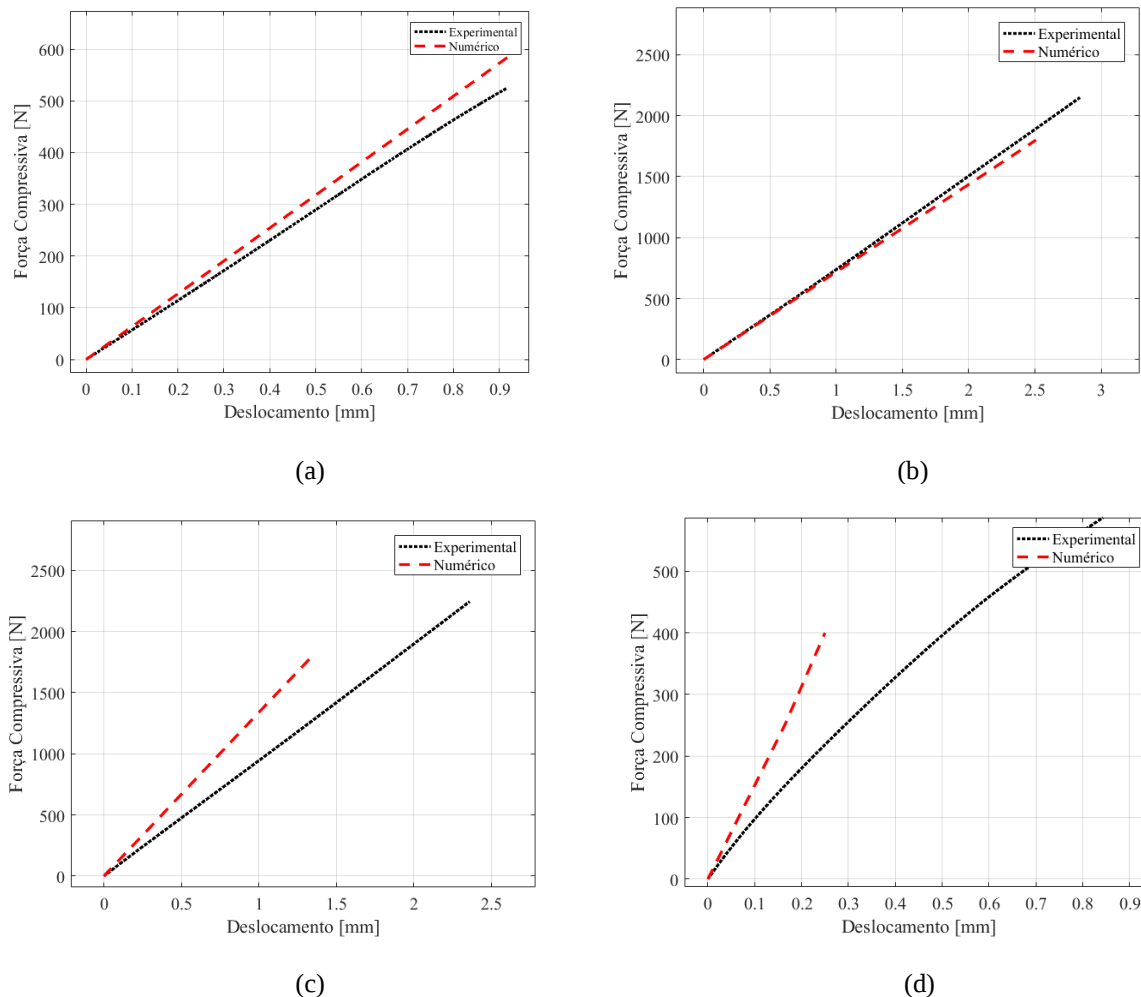


Figura 5. Curva numérico e experimental (a) Amostras de controle. (b) Amostras laminadas em fibra de vidro. (c) Amostras laminadas em fibra de carbono. (d) Amostras laminadas em alumínio.

A partir das curvas comparativas é possível inferir que o modo de falha influi diretamente no erro entre a curva numérica e experimental. Este fato deve-se aos modos de falha apresentados pelas estruturas sanduíche laminadas em fibra de carbono e alumínio, uma vez que, estas falhas estão relacionadas a adesão entre face e núcleo e o material adesivo utilizado. As falhas correlatas ao material adesivo apontam que o painel *honeycomb* não apresenta sua máxima capacidade resistiva à flexão, uma vez que, o material adesivo atua como junção entre face e núcleo, como também, um meio de transferir as cargas ou solicitações da face do painel para o núcleo. Ao ocorrer falha neste material a máxima transferência de cargas é prejudicada e devido a isto o comportamento elástico da estrutura é inferior ao numérico. Essa comparação corrobora para identificar falhas no processo de fabricação adotado, como também, nos materiais empregados para manufatura dos painéis sanduíche.

4. CONCLUSÃO

A metodologia de modelagem numérica adotada para replicar o comportamento sob flexão de placas *honeycombs* cujas faces são laminadas em material compósito e núcleo manufaturado por deposição de material fundido termoplástico se mostra eficiente para análises em região elástica desde que haja máxima aderência entre as interfaces do painel sanduíche. Esta inferência se faz possível devido a correlação feita entre os modos de falhas mapeados e a comparação entre força compressiva por flecha numérica e experimental. Tal inferência corrobora e indica que o processo de fabricação empregado não se mostra adequado para laminação em fibra de carbono e alumínio. Contudo,

esse fator deve ser investigado para que seja possível propor um ajuste do processo de fabricação bem como do material adesivo.

5. REFERÊNCIAS

- ASTM, 2016, International. *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions*.
- Beer, F.P. e Johnston, E.R., 1989, *Resistência dos Materiais*. McGraw-Hill, São Paulo, 2ª edição.
- Bitzer, T., 1997, *Honeycomb Technology*. Springer, Dublin, 1ª edição.
- Brett. P. Conner, et al. "Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Addit. Manuf.*", vol. 1, pp. 64–76, (2014).
- Callister D, W. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. Rio de Janeiro, 5 edition, (2002).
- Canevarolo S. V. Jr., "Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros". 2nd edition Artliber Editora: São Paulo, (2006).
- Carvalho, L.R., 2019, "Fabricação e caracterização de estruturas sanduíche tipo colmeia com núcleo impresso por fusão e deposição de material termoplástico". Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Costa, R., 2018, "Estudo experimental da resistência térmica de contato na interface entre equipamentos e painéis estruturais de satélites". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.
- Daniel, I.M, E. E. Gdoutos, K. A. Wang and J. L. Abot, 2002, "Failure Modes of Composite Sandwich Beams". *International Journal of Damage Mechanics*, Volume 11, Edição 4, (2002).
- Divyathej M. V., and M. Varun and P. Rajeev "Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments". *International Journal Of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 3, (2016).
- Gagliardo, D.P. e Mascia, N.T., 2010, "Análise de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto". *Ambiente Construído*, Vol. 10, n. 4, p. 247-258.
- Gibson, I., 2015, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, New York, 2ª edição.
- Greca, L.D.G. e Mendes, M.B., 2017, "Análise de estruturas tipo *honeycomb* submetidas à carga de impacto". Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Logan, D.L., 2011, *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning, Chicago, 5ª Edição.
- Mueller, B., 2012, "Additive manufacturing technologies-rapid prototyping to direct digital manufacturing". *Assembly Automation*, Vol. 32.
- Ribeiro, G.P., 2019, "Caracterização Mecânica de Estruturas Manufaturadas por Adição de Material Termoplástico com diferentes níveis e formas de preenchimento". Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Sant'Ana, M., 2019, "Analysis of the influence of the cure and post-cure processes on fiberglass composites". *COBEM*, Uberlândia, Brasil.
- Strong, A.B., 2008. *Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods, and Applications*. Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 2nd edition.
- Wernke, A.P , 2019 "caracterização e avaliação da preditibilidade de modelos isotropico e ortotrópicos para materiais impressos com foco em otimização topológica" trabalho de conclusao de curso, Universidade de Brasília, Brasília.
- Zienkiewicz, O. C., et al., 2013, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. McGraw-Hill, Londres.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

Numerical and Experimental Analysis of Sandwich Panels Manufactured With Thermoplastic Core and Laminated Face Sheets

Mateus Silva Sant'Ana

Pedro Henrique dos Santos Alves

Tiago Rodrigues dos Santos

Manuel Dias Nascimento Barcelos Junior

University of Brasília - Área Especial de Indústria Projecção A, DF-480 - CEP 72444-240 – Gama – DF – Brasil

mateus.santana.1@gmail.com

pedrohenriquedf11@gmail.com

tiagorsantos97@gmail.com

manuelbarcelos@unb.br

Abstract. *Aerospace Structures are subject to high levels of mechanical stresses. These structures must resist fatigue, bending, vibration, temperature variations and others. The structures of satellites, airplane wings and aircraft engine nacelles are usually made of honeycomb sandwich panels, which are lightweight and highly resistant to bending. This work aims to model and analyze honeycomb sandwich panels made from additive manufacturing - melting and deposition of thermoplastic materials - using Polylactic Acid (PLA) for the hexagonal core and composite materials for laminating the faces. The numerical modeling aims to make comparisons between the experimental results, so, it is possible to understand and assess the correlations and the influence for the elastic region. In this way, three types of panels were made, all of them printed in PLA, in which the material of the faces varied between aluminum, fiberglass composite, and carbon fiber composite, which were submitted to the mechanical bending test according to ASTM C393.*

Keywords: *Sandwich Panels, Additive Manufacturing, Composite Material, Numerical Modelling.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.