

Artigo

Avaliação e seleção de painel sanduíche para o assoalho de um protótipo baja SAE

João Matias Viana de Araújo Lucena^[1], Zoroastro Torres Vilar^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Aluno; joaom.exec@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Orientador; zoroastro@ufersa.edu.br

Data da defesa: 28/03/2025;

Resumo: Com a crescente demanda por projetos mais eficientes, os compósitos sanduíche se destacam por sua baixa densidade e alta resistência mecânica, resultado de seu design construtivo, com núcleos leves entre faces rígidas fortemente unidos por adesivos especiais. Uma aplicação relevante é no assoalho dos veículos Baja SAE, onde a redução de massa é imprescindível para minimizar os efeitos das limitações do regulamento que as equipes devem seguir, melhorando o desempenho do veículo. Este trabalho busca caracterizar as propriedades mecânicas de diferentes estruturas sanduíche e selecionar a que suporte o piloto, apresente a menor massa e a melhor eficiência estrutural. Para isso, foram testadas seis configurações com núcleo de espuma de PET, reforçadas com fibra de vidro e carbono, por meio de ensaios de flexão em três pontos. Os principais modos de falha identificados foram o cisalhamento e a compressão local do núcleo. O aumento das camadas de reforço, especialmente nas amostras reforçadas com fibra de carbono melhorou as propriedades mecânicas, no entanto, a configuração 5, além suportar o piloto, obteve a melhor eficiência estrutural, superando, inclusive o aço ASTM A36, fazendo dela a escolhida para a fabricação do assoalho.

Palavras-chave: painéis sanduíches 1; ensaio de flexão em três pontos 2; baja SAE 3.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais multifásicos, como madeira, tijolos de argila reforçada por palha, conchas marinhas e as ligas metálicas já são conhecidos há milênios, porém o uso do termo compósito como uma classe de materiais distinta dos metais, polímeros e cerâmicos só ocorreu na metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos, como os polímeros reforçados com fibra de vidro [1].

Os compósitos são formados por dois ou mais materiais (fases) que juntos resultam em uma combinação de propriedades que não pode ser obtida em cada uma das partes que o compõe se analisadas individualmente. Dentre essas propriedades destacam-se: rigidez, resistência mecânica, baixo peso, desempenho em altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza e condutividade [2].

A indústria aeroespacial tem dominado grande parte do desenvolvimento dos sistemas compósitos mais sofisticados. Esses materiais tecnológicos estão sendo usados em aplicações civis, como em pontes com melhores relações resistência-peso e automóveis para o aumento da eficiência do uso de combustível [3].

Um tipo de material composto muito utilizado é o painel sanduíche apresentado na Figura 1, que é obtido da combinação de dois ou mais materiais. Essas estruturas, normalmente, possuem duas faces laminadas formadas por um material mais rígido. As faces fornecem resistência a cargas normais e de cisalhamento no plano que a contém quando um carregamento de flexão é aplicado à estrutura. Os adesivos possuem, geralmente, a menor espessura dentre os três componentes da estrutura sanduíche. Também devem promover forte aderência entre o núcleo e as faces laminadas, pois precisam resistir às elevadas tensões de cisalhamento que são submetidos e, para isto, devem possuir uma excelente compatibilidade química. O núcleo, comumente, apresenta uma densidade específica bem menor em comparação com as faces laminadas e espessura bem maior que o adesivo e as faces laminadas. O núcleo também deve ter resistência suficiente para evitar seu esmagamento precoce, sendo preferidos para sua composição os materiais celulares, como estruturas em forma

de colmeia (*honeycomb*), espumas de polímeros expandidos e madeiras. A combinação desses três elementos visa, principalmente, a redução de custo e de peso [4].

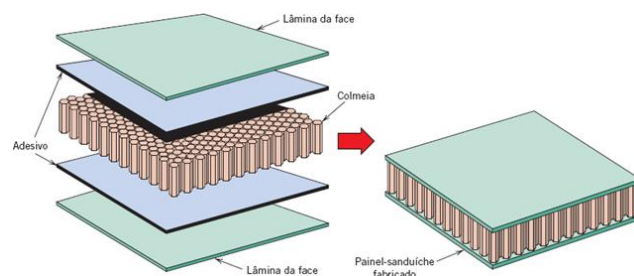


FIGURA 1. Esquema de um painel sanduíche com núcleo do tipo “colmeia” [1].

Os painéis sanduíches são indicados quando a redução de peso é crítica, como em projetos modernos de aeronaves, trens, caminhões, carros, estruturas portáteis e equipamentos esportivos [5]. Uma aplicação interessante desses materiais está na construção do assoalho dos veículos baja SAE, uma vez que o regulamento administrativo e técnico baja SAE Brasil (RATBSB) [6], que todas as equipes devem seguir, limita o projeto e construção do veículo em muitos aspectos, que se estendem desde a seleção e configuração dos componentes do trem de força até a geometria do chassi do veículo. O uso desses materiais, não somente no assoalho, mas também em outras partes, pode reduzir o peso do veículo, o que influi no seu desempenho. Além disso, deve garantir a segurança do piloto, evitando, no caso do assoalho, sua ruptura no momento das provas dinâmicas e nos testes realizados na prova de segurança.

De acordo com o regulamento [6], o veículo deve ser projetado para acomodar condutores do percentil 1% feminino ao percentil 99% masculino, conforme a norma ABNT NBR 6068 [7]. Assim, o assoalho deve suportar uma carga de até 109 kg. Neste estudo, considera-se a situação em que o piloto está apoiado em um único pé, posicionado no centro do assoalho, como referência para a análise de tensão máxima na placa de assoalho.

O objetivo deste trabalho é fazer a caracterização de algumas propriedades mecânicas e físicas de diferentes configurações de compósitos de estrutura sanduíche, selecionar aquela que atenda a condição crítica, apresente a menor massa e a melhor relação entre resistência e peso para a fabricação do assoalho de um protótipo baja SAE.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Na fabricação dos painéis sanduíches foram usados: a espuma de PET (Armacell) GR80 DCI de 80 Kg/m³ e 6 mm de espessura da E-Composites para o núcleo; os tecidos de fibra de carbono e de vidro biaxiais da marca PGTEX de 300 e 500 g/m², respectivamente, para as faces; e a resina EPIKOTE Resin MGS RIMR035c da marca Hexion e o endurecedor Aradur 943 da marca Huntsman, para o adesivo. Os materiais das faces e do adesivo foram fornecidos pela *Aeris Energy*.

Para realizar o processo de cura a vácuo (*vacuum bagging*), utilizou-se plástico PVC transparente de 0,15 mm, mangueira de PVC de 3/8”, fita dupla face, tecido de poliamida desmoldante (*peel ply*), manta acrílica de fibra siliconada (*breather*) e uma bomba de vácuo Quimis Q-355B.

Para este trabalho os seguintes materiais e equipamentos também foram usados: estufa digital 280L Solidsteel, máquina de ensaio EMIC DL 30000, esmerilhadeira angular de 4.1/2”, balança digital com precisão de 0,01 g, paquímetro com precisão de 0,05 mm, micrômetro com precisão de 0,01 mm, esquadro, régua milimetrada, marcador permanente, copo plástico, rolo tira bolhas, espátula de silicone, álcool etílico hidratado 70° e cera desmoldante a base de carnaúba.

Os EPI’S utilizados foram: macacão de segurança, luvas, máscara facial com filtro, óculos transparentes e calçado fechado.

2.2. Métodos

2.2.1. Configurações dos painéis

Para este estudo foram analisadas seis configurações de materiais compósitos sanduíche de matriz polimérica, variando o material do reforço, a quantidade de camadas em cada face e a ordem delas (do núcleo para a camada mais externa), conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1. Configurações dos painéis sanduíches

Configuração	Material da face	Nº de camadas por face
C1	Fibra de vidro biaxial 500g/m ²	2
C2	Fibra de vidro biaxial 500g/m ²	3
C3	Fibra de carbono biaxial 300 g/m ² Fibra de vidro biaxial 500g/m ²	1 (próxima do núcleo) 1 (externa)
C4	Fibra de vidro biaxial 500g/m ² Fibra de carbono biaxial 300 g/m ²	1 (próxima do núcleo) 1 (externa)
C5	Fibra de carbono biaxial 300 g/m ²	2
C6	Fibra de carbono biaxial 300 g/m ²	3

A escolha das configurações se baseou nos materiais disponíveis para a fabricação, visando o estudo do maior número de combinações possíveis para uma única placa do núcleo.

2.2.2. Fabricação

Todas as configurações foram fabricadas em um único painel usando os métodos *hand lay-up* e *vacuum baggin*. No primeiro método, foi feita, inicialmente, a limpeza da superfície com álcool etílico e aplicada algumas camadas de cera desmoldante. Em seguida, os tecidos de fibra de vidro, fibra de carbono e o *peel ply* foram cortados de modo a obter as seis configurações dos painéis sanduíches, além de garantir que o núcleo fosse totalmente coberto pelos tecidos. Na preparação para o processo *vacuum baggin*, o plástico transparente foi recortado no tamanho ainda maior que a área a ser coberta pelos tecidos e colada a fita dupla face sobre a mesa, contornando toda a região da laminação. A resina e o endurecedor foram misturados na proporção 5:1 enquanto o tecido *peel ply* foi posicionado sobre o filme de cera desmoldante, observando para que não houvesse nenhuma dobra ou vinco.

Uma porção da mistura resina – endurecedor foi derramada sobre o tecido, espalhada adequadamente com o auxílio de uma espátula de silicone e o tecido molhado foi posicionado sobre o *peel ply*. O processo seguiu para cada uma das camadas de tecido seguintes, para o núcleo e para a camada final do tecido desmoldante, observando sempre se todas as áreas estavam bem impregnadas e não continham excessos de adesivo. A fim de absorver o excesso de resina da laminação foi posicionado um pedaço de manta acrílica de fibra siliconada (*breather*) na frente do painel e na extremidade da mangueira. Na sequência, o plástico de vácuo foi colocado sobre o painel com as bordas coladas na fita dupla face, deixando um espaço para a mangueira, mostrada na área destacada na Figura 2 (a).

A bomba de vácuo foi ligada para que todo o perímetro de contato entre o plástico de PVC e a fita dupla face fosse inspecionado, garantindo que não houvesse nenhum vazamento. A bomba foi mantida ligada por 6 horas com a pressão de vácuo de 700 mmHg, como mostrado na Figura 2 (b). Após isso o plástico foi removido e o painel foi desmoldado e levado para a pós cura, permanecendo na estufa a 80 °C por 4 horas.



(a)



(b)

FIGURA 2. Fabricação do compósito sanduíche: (a) Painel no processo de cura a vácuo; (b) Bomba de vácuo com a pressão estabilizada em -700 mmHg.

2.2.3. Preparação das amostras

Após a cura, o painel sanduíche foi cortado em seis placas correspondendo a cada uma das configurações, como mostra na Figura 3 (a). Dessas placas, foram retiradas as rebarbas e foi removido, aproximadamente, 10 mm de suas arestas para garantir que os corpos prova cortados não possuísem tecidos de outra configuração. Foram feitas marcações com 150 mm de comprimento e 40mm de largura e cortados sete corpos de prova em cada placa, exceto na placa de configuração 5, que foram obtidas seis amostras, Figura 3 (b). A espessura d (mm), a largura b (mm), o comprimento L (mm) e a massa m (Kg) das amostras cortadas foram medidos novamente antes do ensaio de flexão, já que durante o corte e no processo de acabamento das amostras as dimensões podem ter sido modificadas.



FIGURA 3. Preparação das amostras: (a) Corte destacando as seis configurações; (b) Corpos de prova finalizados.

Os corpos de prova foram rotulados com a marcação CPxy, onde x é o número que indica a configuração a qual ele pertence conforme apresentado na Tabela 1 e y é o número do corpo de prova.

2.2.4. Ensaio de flexão

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos na Universidade Federal do Ceará, sendo utilizada a máquina de ensaios mecânicos EMIC DL-30000 com a célula de carga de 2 kN e os acessórios de flexão em três pontos, mostrados na Figura 4.

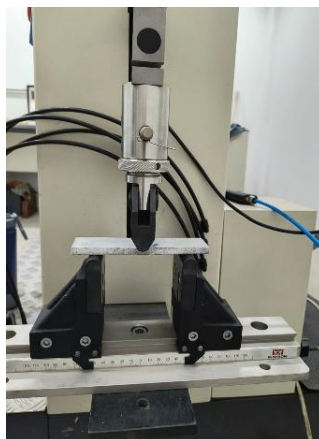


FIGURA 4. Ensaio de flexão em três pontos sendo conduzido em uma das amostras reforçadas com fibra de vidro.

A distância entre os apoios foi mantida em 100 mm e a velocidade de aplicação da carga foi configurada para 1 mm/min. O ensaio foi conduzido até que houvesse uma queda significativa na força aplicada ou até que o deslocamento do cutelo superasse a espessura do corpo de prova.

2.2.5. Tratamento e obtenção dos dados

Para o cálculo da massa específica ρ (g/cm³) dos corpos de prova foi usada a Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{d \cdot b \cdot L} \quad (1)$$

sendo: m massa (g), d a espessura (mm), b a largura (mm) e L o comprimento (mm) das amostras.

Os dados de tempo, força e deslocamento, junto com as dimensões das amostras foram usados para plotar as curvas força versus deflexão e obter as propriedades mecânicas usando o software *Microsoft Excel*.

O cálculo da tensão de flexão máxima na face σ_1 (Mpa) e da tensão de cisalhamento máxima do núcleo F_S^{ult} (Mpa) foram realizados usando as Equações 2 e 3, obtidas da norma ASTM C 393 [8]:

$$\sigma_1 = \frac{P_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (2)$$

$$F_S^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \quad (3)$$

onde P_{max} é a carga máxima antes da falha (N), S é a distância entre os apoios (mm), t é a espessura de cada face (mm), d é espessura total do corpo de prova (mm), c é a espessura do núcleo (mm) e b é largura do corpo de prova (mm).

As Equações 4 e 5, obtidas da norma ASTM D790 [9] foram usadas para obter a tensão de flexão máxima do painel σ_2 (MPa) e a deformação de flexão ε (mm/mm):

$$\sigma_2 = \frac{3PS}{2bd^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta d}{S^2} \quad (5)$$

sendo, P a carga aplicada no centro do vão entre os apoios (N) e δ (mm) a deflexão máxima no centro do vão (mm).

O módulo de elasticidade E_B (MPa) foi obtido através da inclinação da linha tangente a região mais inclinada do início da curva força-deflexão, usando a Equação 6:

$$E_B = \frac{S^3 \Delta_P}{4\Delta_\delta b d^3} \quad (6)$$

em que a razão (Δ_P/Δ_δ) é a inclinação da linha tangente, sendo Δ_P e Δ_δ a diferença de força aplicada e da deflexão entre dois pontos da linha tangente, respectivamente.

A rigidez D (N.m²) foi obtida usando a Equação 7:

$$D = \frac{PS^3}{48\delta} \quad (7)$$

2.2.6. Condição crítica

A força máxima aplicada no assoalho é o próprio peso do piloto P_p que é obtido pela Equação 8:

$$P_p = m_p g \quad (8)$$

sendo m_p a massa do piloto (109 Kg) e g a aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Para encontrar a tensão de flexão máxima causada pelo pé do piloto no centro da placa de assoalho, considera-se o carregamento parcial em uma placa retangular simplesmente apoiada como mostrado na Figura 5 [10]. Sendo a , b , u e v , as larguras e os comprimentos do assoalho e da região de aplicação da carga, respectivamente.

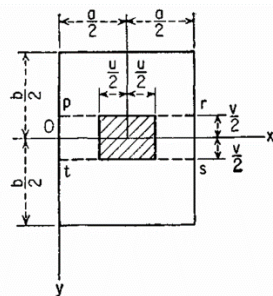


FIGURA 5: Dimensões da placa (a e b) e dimensões área de aplicação da carga [10].

A tensão de flexão máxima σ (MPa) é calculada a partir do momento fletor máximo e da espessura total da placa d (mm), aplicados na Equação 9:

$$\sigma = \frac{6 M_{max}}{d^2} \quad (9)$$

Já a expressão para o momento fletor máximo M_{max} , obtida pela Equação 10, depende do peso do piloto P_p e do coeficiente β , que varia com as dimensões a , b , u e v mostrados na Figura 5.

$$M_{max} = \beta P_p \quad (10)$$

São consideradas as seguintes dimensões para o assoalho e para o retângulo que representa o pé do piloto, com base na Figura 5: $a = 300$ mm; $b = 420$ mm; $u = 240$ mm e $v = 90$ mm;

Interpolando v/a para 0,3 na Tabela 2 [10], obtêm-se 0,12 para o valor aproximado de β .

TABELA 2. Coeficientes β e β_1 para $(M_x)_{max} = \beta P$ e $(M_y)_{max} = \beta_1 P$ em placas retangulares parcialmente carregadas com $b = 1,4a$ adaptado de [10].

u/a=	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
v/a	Coeficientes β na expressão $(M_x)_{max} = \beta P$						Coeficientes β_1 na expressão $(M_y)_{max} = \beta_1 P$					
0	∞	0.289	0.22	0.175	0.144	0.118	∞	0.294	0.225	0.179	0.148	0.122
0.2	0.347	0.252	0.199	0.163	0.135	0.111	0.242	0.203	0.17	0.143	0.12	0.099
0.4	0.275	0.221	0.181	0.15	0.125	0.103	0.172	0.152	0.133	0.114	0.097	0.081
0.6	0.233	0.195	0.164	0.138	0.115	0.095	0.133	0.12	0.106	0.093	0.079	0.066
0.8	0.203	0.174	0.148	0.126	0.106	0.088	0.107	0.097	0.087	0.076	0.065	0.054
1.0	0.179	0.155	0.134	0.115	0.097	0.08	0.089	0.081	0.073	0.064	0.055	0.046
1.2	0.161	0.141	0.122	0.105	0.089	0.074	0.074	0.068	0.061	0.054	0.046	0.039
1.4	0.144	0.127	0.111	0.096	0.081	0.068	0.064	0.058	0.052	0.046	0.04	0.033
1.6	0.13	0.115	0.101	0.087	0.074	0.062	0.056	0.051	0.046	0.04	0.035	0.029
1.8	0.118	0.104	0.091	0.079	0.067	0.056	0.049	0.045	0.041	0.036	0.031	0.026
2.0	0.107	0.094	0.083	0.072	0.061	0.051	0.044	0.041	0.037	0.032	0.028	0.023

3. RESULTADOS

3.1. Massa específica

As dimensões e as massas de cada amostra foram substituídas na Equação 1 e os valores das massas específicas foram obtidos.

TABELA 3. Massa específica média de cada configuração.

Configuração	Massa específica (g/cm ³)	Desvio padrão (%)
C1	0,434	1,2
C2	0,528	2,1
C3	0,405	1,3
C4	0,405	1,4
C5	0,380	1,0
C6	0,464	1,6

Pela Tabela 3, a configuração 5 possui o menor valor de massa específica, o que já era esperado, pois foi construído com apenas duas camadas de reforço do material mais leve usado neste trabalho, o tecido de fibra de carbono.

3.2. Ensaio de flexão em três pontos

A Figura 6 mostra as curvas força – deflexão geradas para todas as amostras das 6 configurações. Em todas as configurações a maioria dos gráficos obtidos mostraram um comportamento muito parecido, sobretudo

na região inicial, onde a carga é pequena e o conjunto de pontos plotados no gráfico apresenta uma resposta aproximadamente linear, o que facilitou a obtenção do módulo de elasticidade e da rigidez. Todavia, as curvas das amostras CP11, CP12, CP16 na Figura 6 (a); CP41, CP46 e CP47 na Figura 6 (d) e CP63 na Figura 6 (f) apresentaram um comportamento diferente das demais, pois não tiveram uma queda brusca da força mesmo após grandes valores de deflexão, exceto na amostra CP31 na Figura 6 (c), tendo uma diminuição na força somente após ultrapassar a deflexão média das outras amostras em 50%.

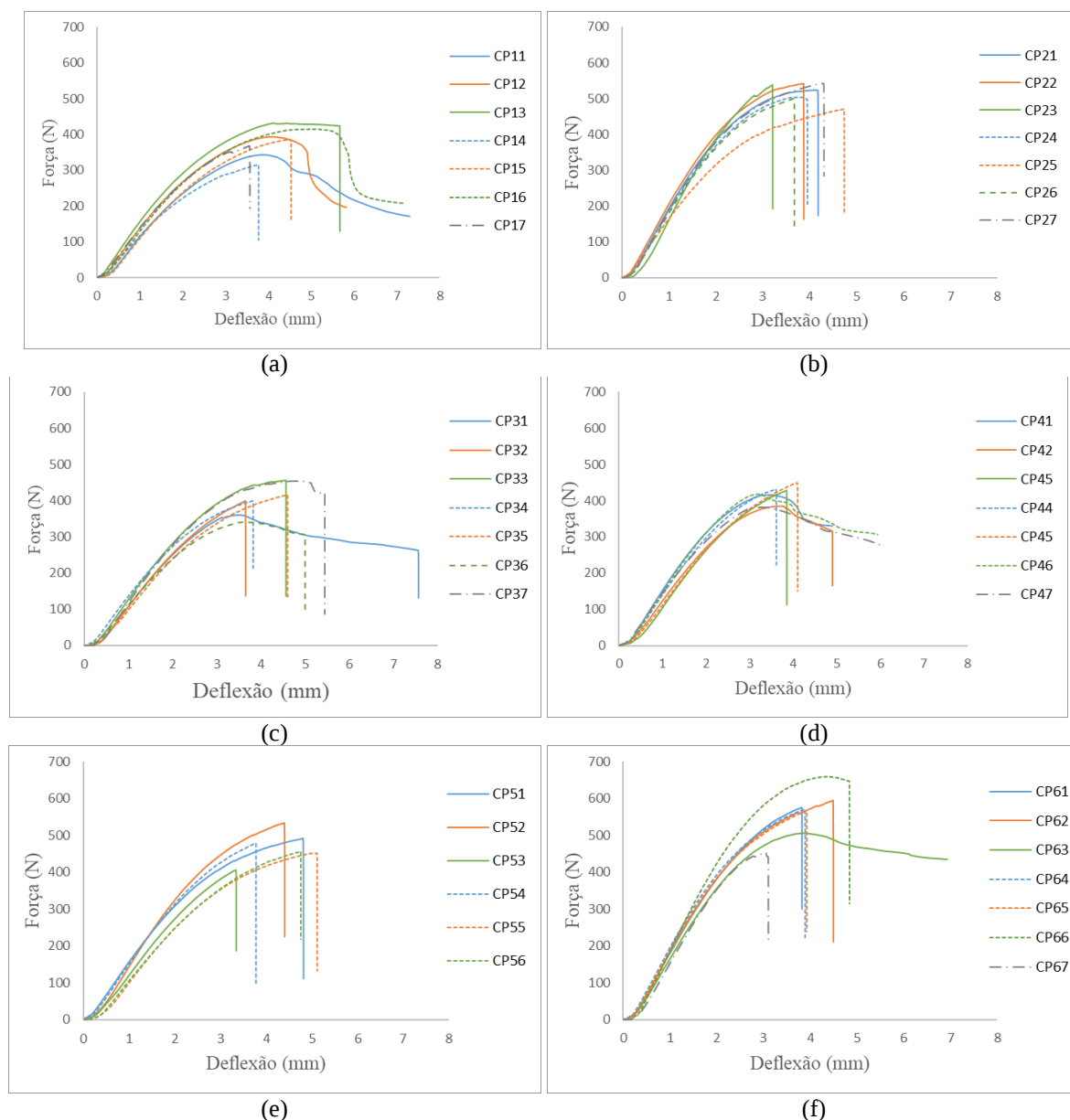


FIGURA 6. Gráficos de força versus deflexão obtida dos ensaios de flexão em três pontos: (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3; (d) Configuração 4; (e) Configuração 5; (f) Configuração 6.

Analisando as amostras após os ensaios percebeu-se que CP11, CP12 e CP16 tiveram as faces superiores fraturadas na linha de aplicação da carga conforme mostrado na Figura 7 (a). As amostras CP41, CP46, CP47 e CP63 sofreram esmagamento local do núcleo, ilustrado na Figura 7 (d). Na amostra CP31 foi observado: compressão local do núcleo abaixo do ponto de aplicação da carga, cisalhamento do núcleo circulado em vermelho e delaminação da face superior mostrados na Figura 8 (b) e fratura da face superior, na Figura 7 (c). Em todas as outras amostras houveram falhas por cisalhamento do núcleo, conforme observado na Figura 7 (e).

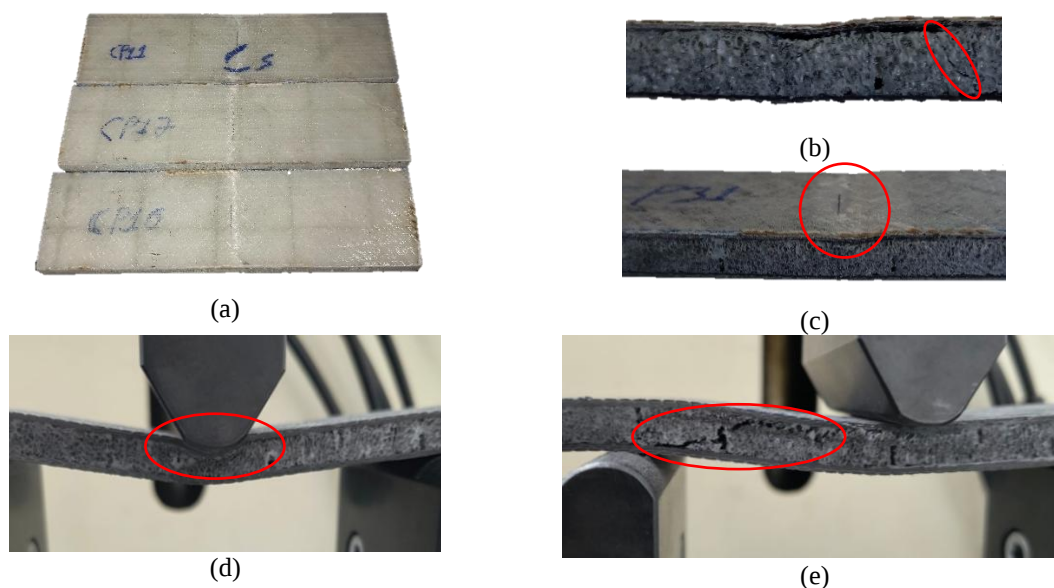


FIGURA 7. Falhas nas amostras: (a) rompimento da face; (b) esmagamento local do núcleo, delaminação e cisalhamento do núcleo; (c) rompimento da face; (d) esmagamento local do núcleo; (e) cisalhamento do núcleo.

Comparando os modos de falha com os gráficos de força versus deflexão dos painéis sanduíche, foi possível associá-los da seguinte forma: a queda brusca na força indica cisalhamento do núcleo; a queda gradual e lenta no valor força, após esta atingir seu valor máximo, sugere que houve compressão local do núcleo, o que também foi observado em outros trabalhos [11,12]; enquanto que uma diminuição gradual da força até grandes valores de deflexão, seguida da queda brusca da carga, pode indicar a ocorrência de outros modos de falha antes da ruptura do núcleo.

3.3. Propriedades mecânicas

Na Tabela 4, observa-se que o valor de todas as propriedades aumentaram com o número de camadas de reforço, exceto a tensão de flexão na face σ_1 , que obteve o comportamento inverso, também observado em [11] Isso se deve ao fato de σ_1 desconsiderar a contribuição do núcleo para a resistência à flexão do painel, sendo que os esforços de tração e compressão são sentidos pelas faces superiores e inferiores, respectivamente, assim, faces com maior espessura devem distribuir melhor os esforços e apresentar valores inferiores na tensão calculada em comparação com faces mais finas empregadas no mesmo *design* de fabricação.

TABELA 4. Valores médios das propriedades mecânicas obtidas dos painéis.

Configuração	Tensão de flexão σ_1 (MPa) – ASTM C393	Tensão de cisalhamento do núcleo F_S^{ult} (MPa)	Tensão de flexão σ_2 (MPa) - ASTM D790	Módulo de elasticidade E_B (GPa)	Rigidez D (N.m ²)
C1	36,29	0,68	22,85	2,00	3,27
C2	33,59	0,88	25,89	2,24	4,59
C3	37,12	0,72	23,71	2,04	3,44
C4	35,09	0,74	23,80	2,08	3,70
C5	39,92	0,80	26,00	2,08	3,66
C6	31,00	0,93	26,68	1,99	5,05

Pela Tabela 4, se também percebe que a configuração C6 apresenta os melhores valores tensão de flexão máxima (pela norma ASTM D790), tensão de cisalhamento do núcleo e rigidez. Por outro lado, esse arranjo apresentou o menor valor do módulo de elasticidade, embora os valores médios em cada um dos seis conjuntos de amostras testadas tenham sido muito próximos. Além disso, o uso da fibra de carbono nas faces externas nas amostras C4 surtiu um leve aumento da sua resistência mecânicas em relação às amostras C3, que usaram fibra de vidro nas faces externas.

Outros autores [11,13,14] obtiveram valores semelhantes para a tensão de flexão máxima em painéis sanduíche com configurações similares com as que foram usadas neste trabalho, conforme mostrado na Tabela 5 mostra.

TABELA 5. Valores de tensão de flexão máxima obtidos por outros autores [11,13,14].

Autor	Material do reforço (em cada face)	Material do núcleo	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)
[11]	4 camadas de tecido de fibra de carbono biaxial 300 g/m ² + 1 camada de manta de fibra vidro somente na camada superior	PVC 80 Kg/m ³	30,16	-
[13]	2 camadas tecido de fibra de carbono biaxial 197 g/m ²	PET 80 Kg/m ³	25,27	-
[14]	1 camadas de tecido de fibra de vidro biaxial 330 g/m ³	PET 80 Kg/m ³	-	21,90

3.4. Seleção da placa para o assoalho

Ao aplicar peso do piloto P_p , a espessura dos painéis sanduíches d e o valor obtido dos coeficientes β nas Equações 8, 9 e 10, determinou-se a tensão de flexão máxima requerida para cada uma das configurações de painéis sanduíche, conforme mostrado na Tabela 6, para que suportem uma carga de 109 Kg aplicada em uma superfície medindo 90mm de largura e 250mm de comprimento, centro da placa de assoalho.

A Tabela 4 também apresenta os coeficientes de segurança (entre a tensão máxima obtida pela norma ASTM D790 e a tensão requerida), a densidade de área e a massa do assoalho usando cada uma das configurações. Assim, todas as configurações suportam o peso do piloto na condição crítica apresentada em 2.2.5, com coeficientes de segurança próximos ou acima de 2, garantindo, dessa forma, que qualquer uma das configurações permanecerá no regime elástico.

TABELA 6. Tensões requeridas, coeficientes de segurança e propriedades físicas para cada configuração

Configuração	Tensão requerida σ (MPa)	Coeficiente de segurança	Densidade de área Kg/m ²	Massa do assoalho (Kg)
C1	12,32	1,85	3,40	0,43
C2	10,37	2,50	4,56	0,57
C3	12,17	1,95	3,18	0,40
C4	11,60	2,05	3,26	0,41
C5	11,92	2,18	3,05	0,38
C6	9,43	2,83	4,15	0,52

Relacionando as tensões de flexão obtidas pelas Equações 2 e 4 com as massas específicas foi construído o gráfico mostrado na Figura 8. A partir desse gráfico observa-se que a configuração 5 apresenta a maior razão entre a tensão de flexão máxima (tanto pela norma ASTM C393 como pela norma ASTM D790) e a massa específica.

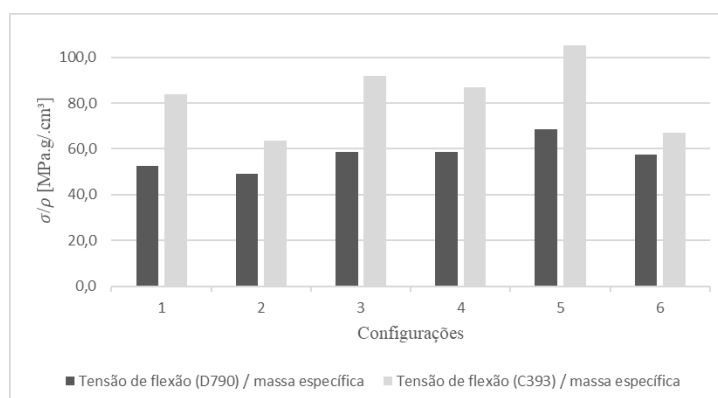


FIGURA 8. Relação resistência – massa específica dos materiais pelas normas ASTM C393 e ASTM D790.

Na Tabela 7 compara-se a configuração CP5 com o aço ASTM A36, comumente utilizado nesse tipo de aplicação. Em uma primeira análise, percebe-se que as propriedades mecânicas do metal são muito superiores, mas fazendo a relação entre a resistência e a massa específica obtém-se o valor aproximado de 32 MPa.g/cm³, o que ainda é inferior ao valor obtido em qualquer um dos compósitos testados.

TABELA 7. Comparação entre a configuração 5 e o aço ASTM A36.

<i>Material</i>	<i>Tensão admissível (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Massa específica (g/cm³)</i>	<i>Relação resistência - peso (MPa.g/cm³)</i>	<i>Massa do assoalho (Kg)</i>
C5	26	2,08	0,38	68	0,38
ASTM A36 [1]	250	200	7,85	32	2,92

Fixando o coeficiente de segurança em 2,18 (da configuração 5), obtém-se a tensão requerida de 115 MPa e para atingir esse valor seria necessária uma chapa de aço ASTM A36 de 2,56 mm que pesaria 2,92 Kg, sendo quase sete vezes mais pesado que o material da configuração 5. Dessa maneira, o painel sanduíche com núcleo de espuma de pet, reforçado com duas camadas de tecido de fibra de carbono biaxial em cada face é a melhor escolha para a construção do assoalho.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram analisadas diferentes configurações de painéis sanduíche para a construção do assoalho de um protótipo baja SAE. A comparação dos gráficos de força – deflexão com os respectivos modos de falha das amostras permitiu identificar o cisalhamento e a compressão local do núcleo pelo comportamento dos gráficos. Os painéis sanduíche que utilizaram somente tecidos de fibra de carbono em sua composição apresentaram as melhores propriedades mecânicas e menores valores de massa específica.

Além disso, observou-se que todos os conjuntos de estruturas sanduíche testados podem suportar, com segurança, o peso do piloto apoiado em um dos pés no centro da placa de assoalho. No entanto, mesmo possuindo menos camadas de reforço do que a configuração 6, os corpos de prova C5 foram os que obtiveram a menor massa para a placa de assoalho e a melhor relação entre tensão admissível e a massa específica, superando também o aço ASTM A36. Dessa forma, essa foi a configuração escolhida para a fabricação do assoalho do veículo.

Os resultados obtidos mostram a vantagem da utilização de painéis sanduíche pela sua alta eficiência estrutural, permitindo reduzir a massa total dos veículos baja SAE e melhorar seu desempenho. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar o comportamento desses painéis sob diferentes combinações para o material das faces e do núcleo, bem como avaliar sua resposta ao impacto e à fadiga.

5. REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER, Jr. William D.; Rethwisch, David G. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*, 10. ed.; LTC: Rio de Janeiro, Brasil, 2024;
- [2] ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. *Ciência e engenharia dos materiais*; Cengage Learning, 2013. p. 525.
- [3] SHACKELFORDX, James F. *Introdução à ciência dos materiais para engenheiros*; Pearson Prentice Hall: São Paulo, Brasil, 2008; p. 315.
- [4] CARLIRI, M. F. Jr. Modelos de material para espumas poliméricas aplicadas a estruturas aeronáuticas em material compósito sanduíche. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.
- [5] ASHBY, Michael F. *Seleção de materiais no projeto mecânico*, 5. ed.; Elsevier: Rio de Janeiro, Brasil, 2019; p. 439 - 450.
- [6] SAE BRASIL. RATBSB Emenda 6: Regulamento Administrativo e Técnico baja SAE Brasil. São Paulo: 2024. 154 p.
- [7] ABNT. NBR 6068: Dimensões antropométricas do corpo humano para projeto. Rio de Janeiro, 2004.

- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C393/C393M - 16: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. West Conshohocken, Pa: ASTM International, 2015.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D790 - 10: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [10] TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. 2. ed. McGraw-Hill: New York, 1959.
- [11] CAI, Y.; WANG, X.; OUYANG, F.; CHEN, Q.; ZHU, Z.; FAN, K.; DING, F. Study on the Mechanical Properties of a Carbon-Fiber/Glass-Fiber Hybrid Foam Sandwich Structure. *Materials* 2024, 17, 2023. [https://doi.org/ 10.3390/ma17092023](https://doi.org/10.3390/ma17092023).
- [12] CALDAS, B. G. S. Estrutura Sanduíche de Matriz Poliéster Reforçado Com Tecido de Sisal Conformado Por Infusão a Vácuo. Dissertação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.
- [13] MEDEIROS, M. A. Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas do Honeycomb e Divinycell® Aplicados em Compósitos Sanduíches. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.
- [14] GARAY, A. C.; SAMPERT, S.; MOREIRA, V.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Avaliação de Diferentes Núcleos e Faces em Materiais Compósitos Sanduíche para Aplicações Marítimas. In: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011, Campos do Jordão. Anais. São Paulo: 11º CBPol, 2011.