

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE
MATERIAIS

DANIEL FRANCISCO BRISTOT

PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE *HONEYCOMB* TUBULAR TERMOPLÁSTICO E
FACES COMPÓSITAS SUBMETIDOS À FLEXÃO: ABORDAGEM NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL

Porto Alegre

2022

DANIEL FRANCISCO BRISTOT

PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE *HONEYCOMB* TUBULAR TERMOPLÁSTICO E
FACES COMPÓSITAS SUBMETIDOS À FLEXÃO: ABORDAGEM NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-
graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica
e de Materiais da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Engenharia, modalidade
Acadêmica

Orientador: Prof. Ph.D Sandro Campos Amico (UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Maikson Luiz Passaia Tonatto (UFSM)

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitor: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-coordenadora: Andréa Moura Bernardes

CIP - Catalogação na Publicação

Bristot, Daniel Francisco
Painel sanduíche com núcleo de honeycomb tubular termoplástico e faces compósitas submetidos à flexão: abordagem numérica e experimental / Daniel Francisco Bristot. -- 2022.
70 f.
Orientador: Sandro Campos Amico.

Coorientador: Maikson Luiz Passaia Tonatto.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Painéis sanduíches. 2. Análise numérica. 3. Honeycomb. 4. Flexão em três pontos. I. Campos Amico, Sandro, orient. II. Passaia Tonatto, Maikson Luiz, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DANIEL FRANCISCO BRISTOT

PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE *HONEYCOMB* TUBULAR TERMOPLÁSTICO E
FACES COMPÓSITAS SUBMETIDOS À FLEXÃO: ABORDAGEM NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL

Esta dissertação foi analisada e julgada para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia,
modalidade Acadêmica e aprovado em sua forma
final pelo Orientador e pela Banca Examinadora
designada pelo Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Ph.D Sandro Campos Amico (UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Maikson Luiz Passaia Tonatto (UFSM)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rene Quispe Rodríguez (UFSM)

Prof. Dr. Marco Antonio Luersen (UTFPR)

Prof. Dr. Tulio Hallak Panzera (UFSJ)

Porto Alegre, 30 de setembro de 2022.

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, à minha família, colegas e amigos que me apoiaram nesta grandiosa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M/UFRGS pela oportunidade de realização de meu mestrado nesta prestigiada instituição.

Ao meu orientador, prof. Ph.D Sandro Campos Amico, e coorientador, Prof. Dr. Maikson Luiz Passaia Tonatto, por toda paciência e conhecimentos a mim transmitidos durante estes anos, que possibilitaram a concretização deste sonho. Aos amigos e colegas do Grupo de Compósitos (GCOMP), em especial à Thais Dias, Amanda Albertin Xavier da Silva, Joziel Aparecido da Cruz, Andrey Pereira Acosta, Rafael Quintana pelo auxílio nas atividades realizadas e ensinamentos transmitidos.

A minha família, em especial minha mãe Marta Lúcia Bristot e meu pai João Carlos Bristot, pelo apoio em cada momento de dificuldades e de alegrias.

À Prefeitura de Caxias do Sul e aos meus amigos que nela trabalham, em especial à Gerência de Frota e Diretoria de Oficinas, que me auxiliaram com dicas, revisões e apoio em todos os momentos.

RESUMO

Os setores aeroespacial, naval e automotivo, aos poucos vêm incorporando em seus produtos e soluções estruturas compostas por painéis sanduíches, principalmente quando há necessidade de elevada rigidez e resistência mecânica, estabilidade térmica e isolamento acústico. De fato, estruturas compostas por faces finas de laminados de fibra de vidro/resina poliéster e um núcleo do tipo celular *honeycomb* de polipropileno estão sendo amplamente empregadas na indústria automotiva e de implementos rodoviários. O material das faces propicia elevada resistência a cargas de tração e compressão, enquanto o núcleo *honeycomb* polimérico aumenta o momento de inércia de área, sem aumentar consideravelmente a massa da estrutura, com elevada resistência à flexão e ao cisalhamento. Apesar dos benefícios já elencados este tipo de estrutura ainda é pouco compreendido no que tange a rigidez, cargas e modos de falha. Por este motivo, a realização de ensaios experimentais, em especial de compressão do núcleo e de flexão dos painéis sanduíches, e a elaboração de modelos numéricos são interessantes para melhor compreender o comportamento dos painéis sanduíches, assim aumentando o amparo técnico para sua maior utilização. Diante disso, esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver modelos numéricos de painéis sanduíches, constituídos de faces de tecido bidirecional de fibra de vidro do tipo E e resina poliéster e núcleo *honeycomb* de células circulares de polipropileno, a fim de se conhecer o comportamento deste material estrutural de grande aplicabilidade na indústria. Comparou-se os resultados numéricos com os experimentais para estes painéis sanduíches e verificou-se que os modelos gerados, tanto para compressão como para flexão em três pontos, mostraram-se eficazes em prever o comportamento dos materiais, esta última apresentou maior influência na diferença entre as curvas experimentais e numéricas. Outra constatação foi que ao aumentar a distância entre apoios em um ensaio de flexão a carga tende a reduzir em até 42 %, além de apresentar comportamento majoritariamente elastoplástica.

Palavras-chave: Painéis sanduíches, análise numérica, *honeycomb*, flexão em três pontos.

ABSTRACT

The aerospace, naval and automotive sectors are gradually incorporating structures composed of sandwich panels into their products and solutions, especially when there is a need for high rigidity and mechanical resistance, thermal stability and acoustic insulation. In fact, structures composed of thin faces of fiberglass/polyester resin laminates and a cellular honeycomb polypropylene core are being widely used in the automotive and road implement industry. The material of the faces provides high resistance to tensile and compressive loads, while the polymeric honeycomb core increases the area's moment of inertia, without considerably increasing the structure's mass, with high flexural and shear strength. Despite the benefits already listed, this type of structure is still poorly understood in terms of stiffness, loads and failure modes. For this reason, conducting experimental tests, in particular core compression and bending of sandwich panels, and the elaboration of numerical models are interesting to better understand the behavior of sandwich panels, thus increasing the technical support for their greater use. Therefore, this dissertation has as main objective to develop numerical models of sandwich panels, consisting of bidirectional fabric faces of E-type glass fiber and polyester resin and honeycomb core of circular polypropylene cells, in order to know the behavior of this material. structure of great applicability in the industry. The numerical results were compared with the experimental ones for these sandwich panels and it was verified that the generated models, both for compression and for bending at three points, were effective in predicting the behavior of the materials, the latter having greater influence on the difference between experimental and numerical curves. Another finding was that when increasing the distance between supports in a bending test, the load tends to reduce by up to 42%, in addition to presenting mostly elastoplastic behavior.

Keywords: Sandwich panels, numerical analysis, honeycomb, 3-point bending

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de painel sanduíche (Adaptado de S. Chen et al., 2020).....	14
Figura 2 - Representação de células Honeycomb: (a) Circular, (b) hexagonal (Adaptado de YAP; YEONG, 2015).....	18
Figura 3 - Empacotamento das células de honeycomb circular: (a) cúbico, (b) hexagonal, (c) ortotrópico (adaptado de GATO, 2020).	19
Figura 4 - Principais tipos de tecidos para compósitos (adaptado de Barbero. 2011): (a) plano, (b) Twill, (c) cetim, (d) triaxial, (e) costurado e (f) basket.	21
Figura 5 - Falhas típicas em painéis sanduíche (BITZER, 1997): (a) falha por tração, (b) falha por cisalhamento, (c) falha por flexão, (d) indentação, (e) flambagem generalizada, (f) cisalhamento com ondulação, (g) wrinkling e (h) dimpling	22
Figura 6 - Estágios da falha por flambagem do núcleo do tipo honeycomb (Adaptado de LEE et al., 2002).....	23
Figura 7- Comparação dos esforços da viga de perfil I (a) com um painel sanduíche (b) (Adaptado de Gato, 2020 e Bitzer, 1997).....	24
Figura 8 - Considerações para a formulação do cálculo de painéis sanduíche (Adaptado BITZER, 1997).....	24
Figura 9 - Deflexão em painéis sanduíche (Adaptado BITZER, 1997).....	26
Figura 10 - Proposta de modelo de elementos finitos (Adaptado de DAS et al., 2005).	31
Figura 11 - Fluxograma da metodologia empregada neste trabalho	33
Figura 12 - Disposição dos principais componentes para infusão a vácuo.	36
Figura 13 - Amostras e ensaio de tração dos laminados da face conforme ASTM D3039.....	38
Figura 14 – Corpos de prova para ensaio de compressão do núcleo e foto do ensaio.	38
Figura 15 – Principais dimensões e apresentação do ensaio de flexão 3 pontos.	39
Figura 16 – Ensaio de flexão 3 pontos com: (a) span 150 e (b) span 400 mm.	40
Figura 17 – Curva tensão vs. deformação do polipropileno em tração (GATO, 2020).	41
Figura 18 - Condições de contorno para simular a compressão do núcleo.....	43
Figura 19 - Condições de contorno utilizadas, baseado em GAO et al. (2020).....	44
Figura 20 - Estudo de convergência da malha.	45
Figura 21- Condições de contorno e malha para simulação da flexão do sanduíche.	46

Figura 22 - Resultado da inspeção ultrassônica por C-Scan.....	47
Figura 23 - Curvas de força vs. deslocamento (a) e tensão vs. deformação (b) em tração do laminado das faces.....	49
Figura 24 - Núcleos (a) não-deformados e (b) deformados em ensaio de compressão.	51
Figura 25 - Curvas de compressão flatwise para: (a) núcleo com espessura de 10 mm, e (b) núcleo com espessura de 25 mm.	51
Figura 26– Curva tensão vs. deformação de compressão do núcleo.....	52
Figura 27 - Curvas comparativas entre compressão experimental e numérico para: (a) núcleo 10 mm, e (b) núcleo 25 mm.	53
Figura 28- Comparação numérica do modelo com os resultados de Gao et al. (2020).	54
Figura 29 - Comparação dos resultados obtidos com núcleo teórico a partir dos dados de Gato (2020) e experimental: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.	55
Figura 30 - Curvas força vs. deslocamento em flexão para span curto: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.....	56
Figura 31 – Aspecto post-mortem das amostras após o ensaio de flexão com span curto: (a) falha na face superior do laminado código “F, A e T” ASTM C393 (2020), (b) deformação plástica do núcleo código “O, V e V” ASTM C393 (2020) e (c) falha nas faces do sanduíche “F, A e F” ASTM C393 (2020).	57
Figura 32 - Curvas força vs. deslocamento em flexão para painel sanduíche de span longo.	58
Figura 33 – Falhas apresentadas no ensaio de flexão com span longo conforme ASTM D7250 (2012).	59
Figura 34 – Comparação FEA vs. Experimental para span curto e núcleo de 10 mm.	60
Figura 35 - Comparação FEA vs. Experimental para span curto e núcleo de 25 mm.	61
Figura 36 - Comparativo entre resultados numérico e experimental para corpos de prova com span longo: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre resistência à flexão e rigidez específica de painéis estruturais.....	17
Tabela 2 - Principais propriedades da resina poliéster ortoftálica utilizada.	34
Tabela 3 - Principais propriedades mecânicas do núcleo <i>honeycomb</i> de polipropileno.	34
Tabela 4 – Relação de corpos de prova e normas para flexão (ASTM C393/C393M, 2020; D7250/D7250M, 2010).	40
Tabela 5 – Propriedades das faces utilizadas no software de elementos finitos.....	42
Tabela 6 - Resultados de teor dos constituintes conforme ASTM D3171 (2022) e densidade do laminado das faces.	48
Tabela 7 - Constantes elásticas e resistência do laminado.....	50

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1. PAINÉIS SANDUÍCHE	16
3.2. FALHAS EM PAINÉIS SANDUÍCHE	21
3.3. MODELO ANALÍTICO DE PAINÉIS SANDUÍCHE	23
3.4. CRITÉRIOS DE FALHA PARA MATERIAIS ANISOTRÓPICOS.....	27
3.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO A PAINEL SANDUÍCHE	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1. MATERIAIS	33
4.2. FABRICAÇÃO DAS FACES E DOS SANDUÍCHES	35
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS FACES E DO NÚCLEO.....	36
4.4. ENSAIOS DE FLEXÃO DO PAINEL SANDUÍCHE	39
4.5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	41
4.5.1. Calibração do modelo constitutivo do núcleo	42
4.5.2. Análise numérica: Flexão do sanduíche.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1. PROPRIEDADES DAS FACES.....	47
5.2. PROPRIEDADES E CALIBRAÇÃO NUMÉRICA DO NÚCLEO	50
5.3. ANÁLISES DOS PAINÉIS SANDUÍCHE	54
5.3.1. Estudo de caso: Comparação do modelo com a literatura	54
5.3.2. Comportamento experimental da viga em flexão	55
5.3.3. Comparação numérico-experimental para flexão com <i>span</i> curto.....	59
5.3.4. Comparação numérico-experimental para flexão com <i>span</i> longo.....	61
6. CONCLUSÕES	63
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
8. REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais e processos de fabricação mais eficientes vem demandando muita inovação na indústria, seja na redução de custos ou no aprimoramento das propriedades mecânicas, físicas, químicas etc. Recentemente, a busca por soluções de materiais que apresentem elevada resistência mecânica e rigidez com a menor massa possível, fizeram aumentar a utilização de painéis sanduíche consideravelmente, principalmente em componentes e estruturas para a indústria aeroespacial, automobilística, implementos rodoviários, naval e civil (CHEN *et al.*, 2020; GAO *et al.*, 2020; RICCIO *et al.*, 2016).

A indústria de implementos rodoviários, por exemplo, vem aplicando cada vez mais painéis sanduíche para obter produtos de menor massa e com uma abordagem mais sustentável. A Europa é líder na aplicação de painéis sanduíche tanto no piso como nas portas de carrocerias, onde por exemplo a empresa Hexcel conseguiu reduzir a massa de um furgão rodoviário com 40 pés ou 12,2 metros de comprimento utilizando painéis sanduíche com núcleo de alumínio em até 1361 kg (uma redução de cerca de 37,5 %). Já a empresa alemã ThermHex, vislumbrando o mundo sustentável através de seus furgões fabricados em material totalmente reciclável, busca, além da redução de massa, a redução de emissão de CO₂, tal solução vem sendo amplamente utilizada na indústria contando com diversas empresas ao redor do mundo (BITZER, 1997, THERMEX WABEN'S, 2022).

Em suma, painéis sanduíche tradicionalmente consistem em duas faces finas, fabricadas normalmente em material compósito ou metálico, e um núcleo (em espumas ou *honeycomb*), como pode ser visto na Figura 1, sendo normalmente adotados em aplicações visando uma redução de massa, com conseqüente aumento da carga útil. As diferentes propriedades mecânicas obtidas através da adoção de painéis sanduíche estão diretamente relacionadas aos materiais constitutivos selecionados para as suas partes (SEZGIN *et al.*, 2010; XIA *et al.*, 2022).

Os painéis sanduíche, graças a sua característica construtiva, suportam elevadas cargas de flexão, pois a espessura do núcleo entre as faces propicia um aumento do momento de inércia. Deste modo, sua aplicação não se restringe a componentes de *design*, mas também a partes que exigem elevada absorção de energia quando submetidas a cargas mecânicas (SEZGIN *et al.*, 2010). Além disso, ao se utilizar núcleos do tipo *honeycomb* alveolar, também denominadas “favos de mel”, obtém-se maiores resistências a cargas normais e de cisalhamento (LEE *et al.*, 2002).

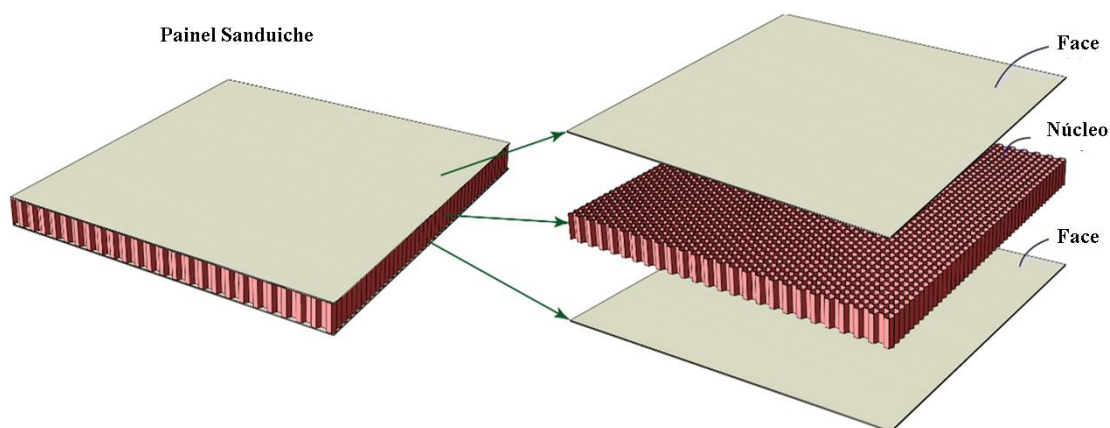


Figura 1 - Exemplo de painel sanduíche (Adaptado de S. Chen et al., 2020).

Considerando que as propriedades finais dos painéis sanduíche são diretamente dependentes dos diferentes materiais utilizados como face e núcleo, para sua adequada avaliação faz-se necessário recorrer-se a métodos numéricos, em especial ao Método de Elementos Finitos (MEF ou do inglês FEM), além de métodos experimentais para sua caracterização (GAO *et al.*, 2020).

Assim a combinação de um material de baixa densidade como é o caso do núcleo de polipropileno e as faces em material compósito de fibra de vidro propiciam uma elevada estabilidade estrutura e isolamento acústico, características que permitem a sua ampla utilização em aplicações rodoviárias, aeronáuticas e navais. Justificando os estudos que vem sendo conduzidos para a compreensão do comportamento mecânico desta combinação.

A utilização de ferramentas numéricas mostra-se grandes aliadas no desenvolvimento de aplicações com painéis sanduíche, isto porque os custos de fabricação destes painéis ainda representam uma grande dificuldade no momento de desenvolver protótipos. Assim o desenvolvimento de modelos em elementos finitos que possuam fácil interface com os programas de modelagem 3D representam um grande divisor na contenção de custos de prototipagem para as empresas e instituições de pesquisa e desenvolvimento.

Diante do exposto, a modelagem numérica do comportamento em flexão de painéis sanduíche com núcleo *honeycomb* em polipropileno faz-se necessária, considerando condições de vigas curtas e longas a fim de entender as diferentes cargas e modos de falha, visando o desenvolvimento e compreensão do comportamento destes elementos estruturais.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL:

Desenvolver um modelo numérico pelo método de elementos finitos (MEF) não-linear para avaliação de painéis sanduíche com faces em compósito e núcleo do tipo *honeycomb* circular em polipropileno, submetidos a carregamento de flexão.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar as faces a partir de ensaios mecânicos para obtenção das propriedades e identificação de parâmetros para o modelo numérico.
- Caracterizar o núcleo do tipo *honeycomb* pelo ensaio de compressão e realizar validação do comportamento constitutivo deste material no modelo numérico, para posterior implementação no modelo do painel sanduíche.
- Determinar a resistência à flexão e obter as curvas força versus deslocamento dos painéis submetidos ao ensaio de flexão em três pontos e as constantes elásticas dos laminados das faces, ambos produzidos por moldagem por infusão a vácuo e obter placas para retirada de corpos de prova.
- Avaliar as potencialidades e limites do modelo numérico em relação aos resultados experimentais.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas a fundamentação teórica utilizada como embasamento para a delimitação do escopo de trabalho. A revisão mostrou-se fundamental para a avaliação da metodologia a ser seguida e para fomentar as conclusões.

3.1. PAINÉIS SANDUÍCHE

As industriais aeroespacial, naval, civil e automobilístico, a partir da necessidade de se desenvolver materiais que proporcionem elevada resistência mecânica com baixa massa, os chamados materiais leves do inglês *Lightweight*, vêm cada vez mais utilizando painéis sanduíches.

O início da utilização de painéis sanduíche em aplicações industriais com relativo sucesso remete aos aviões Mosquito na Segunda Guerra Mundial, posteriormente sendo empregados no programa Apollo, onde utilizou-se de painéis sanduíche com faces de aço e núcleo do tipo *honeycomb* de alumínio. A partir de então, estas estruturas vêm sendo utilizadas nas mais variadas aplicações na busca por diversas propriedades físico-mecânicas (DAVIES, 2004).

Os painéis sanduíche, em geral, são constituídos por duas faces, normalmente de baixa espessura e elevada resistência mecânica, e um núcleo de baixa densidade, que tende a aumentar o momento de inércia do painel, análogo a uma viga do tipo I (AMIR; OTHMAN; AKIL, 2013; GAO *et al.*, 2020; MANALO *et al.*, 2010; RICCIO *et al.*, 2016). As faces podem ser constituídas de laminados de material compósito, chapas metálicas, madeira ou concreto. O núcleo pode ser uma estrutura alveolar, também chamada de *honeycomb*, ou espumas rígidas (e em alguns casos madeiras). As muitas possibilidades de combinação dos materiais das faces e do núcleo propiciam *designs* otimizados de modo a se obter características distintas para cada tipo de aplicação, onde as propriedades individuais positivas de cada material podem ser amplificadas e as negativas eliminadas (DAVIES, 2004).

A interface entre as faces e o núcleo, ou seja, a camada adesiva entre eles, normalmente advém de um processo de colagem ou soldagem dos laminados já prontos no núcleo, podendo ser utilizado diversos processos como o *vacuum bag* ou por compressão. Para reduzir custos de moldagem, pode-se também realizar a impregnação da resina nas fibras do tecido juntamente com a colagem ao núcleo, principalmente pelo processo RTM ou *vacuum infusion* (LEI *et al.*, 2016; PLASCORE, 2021).

Considerando que um painel sanduíche esteja submetido a uma carga de flexão pura, as faces estarão submetidas a esforços de tração e compressão, deste modo se utilizado laminado, é preferível que a direção das fibras do compósito seja alinhada a fim de resistir aos carregamentos, ou então utilizar de tecidos de fibras bidirecionais onde as resistências no sentido transversal e longitudinal tendem a ser similares. O núcleo, por outro lado, deve resistir a carregamentos transversais e suportar possível falha por flambagem, portanto, estabilizando as faces superiores e inferiores (SEZGIN et al., 2010).

Painéis sanduíche possuem grande aplicação na substituição de estruturas com vigas. Outro argumento que auxilia a verificar esta necessidade de mercado pode ser visualizado através da Tabela 1, onde são apresentados alguns dos mais comuns materiais estruturais (incluindo painéis sanduíche) submetidos a carregamentos de flexão. Esta tabela estabelece uma pontuação percentual quanto à resistência mecânica específica, isto é, levando em consideração a massa do painel, e quanto à rigidez em flexão específica, também em razão da massa. Verifica-se que os painéis com núcleo de *honeycomb* possuem uma elevada resistência mecânica e rigidez, bastante superior a madeira de compensado naval ou sanduíches com espuma (BITZER, 1997).

Tabela 1 - Comparativo entre resistência à flexão e rigidez específica de painéis estruturais.

Tipo de painel estrutural	Resistência à flexão específica (%)	Rigidez à flexão específica (%)
Sanduíche de <i>honeycomb</i>	100	100
Sanduíche de espuma	26	68
Perfil estrutural	62	99
Chapa e reforço	64	86
Compensado naval	3	17

Fonte: BITZER, 1997.

Núcleos do tipo *honeycomb*, também conhecido como alveolar ou favos de mel, vem sendo amplamente utilizados pela indústria aeroespacial e automotiva, principalmente por apresentarem alta integridade estrutural, baixa condutividade térmica, alta resistência a cargas aerodinâmicas e elevada capacidade de isolamento acústico (LEE et al., 2002). Os principais materiais utilizados na fabricação desses núcleos são: metais, papéis de aramida e

matrizes poliméricas, sendo as mais utilizadas o polipropileno, poliuretano e o policarbonato. Das matrizes poliméricas, o polipropileno apresenta um elevado custo-benefício para aplicações na área automotiva e isolamento acústico, já que podem trazer um lado mais sustentável, seja nos métodos de fabricação dos painéis, onde as empresas buscam cada vez mais um selo verde, seja na redução de massa ou no componente final utilizando-se de materiais recicláveis (NOLAN, 2020; YAP; YEONG, 2015).

Os núcleos do tipo *honeycomb*, assim como Robert Hooke visualizou em 1660 ao analisar em seu microscópio uma estrutura biológica, tem como seu elemento fundamental as células, sendo que a geometria da célula irá definir diretamente o comportamento do restante do núcleo. As geometrias comumente encontradas em escala industrial são às hexagonais, circulares, triangulares e retangulares, contudo, as duas primeiras tendem a absorver a maior fatia de mercado por apresentar melhor relação entre as propriedades físico-mecânicas e o custo de fabricação do núcleo além de permitir uma menor massa ao núcleo sanduiche por apresentar uma geometria vazada (KRISHNA et al., 2022; LAKES, 1989). Na Figura 2a-b são apresentados exemplos de núcleos com células do tipo circular e hexagonal, bem como seu padrão ao longo das direções longitudinais e transversais. A dimensão “c” apresentada em cada célula representa o tamanho, informação fundamental para adquirir placas de *honeycomb*, e a letra t representa a espessura de parede (YAP; YEONG, 2015).

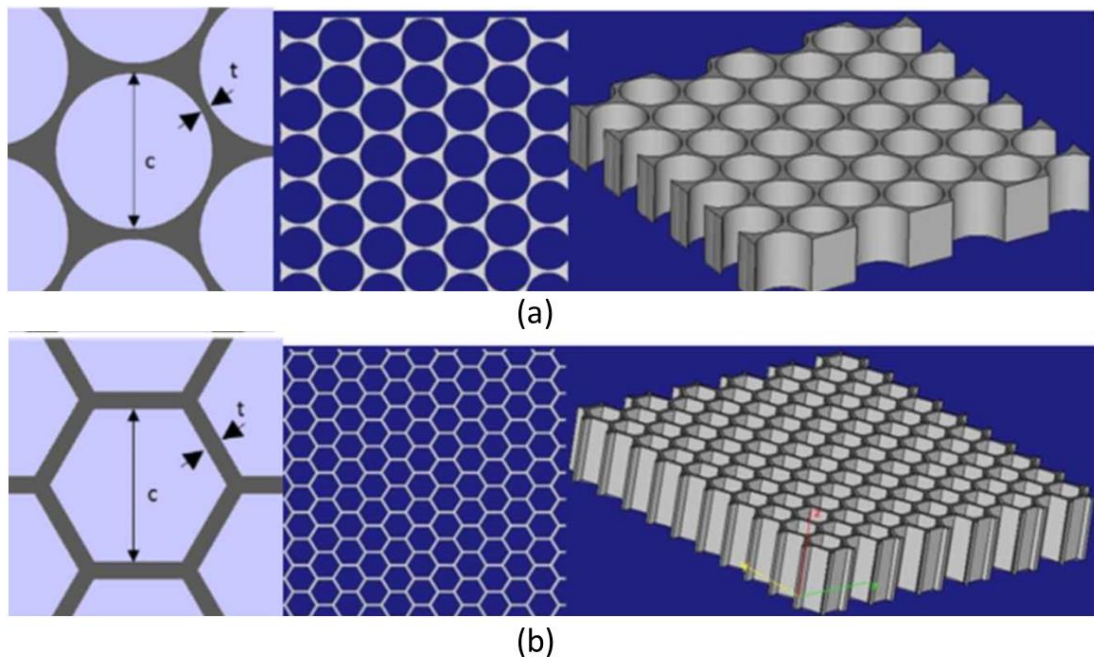


Figura 2 - Representação de células Honeycomb: (a) Circular, (b) hexagonal (Adaptado de YAP; YEONG, 2015).

Atualmente, a geometria mais utilizada na fabricação de núcleos são do tipo hexagonal, contudo, os núcleos das células com geometria circular aos poucos vem sendo utilizados, principalmente na fabricação de núcleos poliméricos. O seu grande diferencial em relação ao *honeycomb* com células hexagonais é a maior rigidez, causada pelas restrições adicionais de deformação da estrutura, e resistência mecânica. Existem três sistemas de empacotamento, disposição das células no painel, para *honeycomb* com células circular: cúbico (Figura 3a), hexagonal (Figura 3b) e ortotrópico (Figura 3c). A diferença entre estes núcleos é o ângulo adjacentes que conectam os centros das células vizinhas representado pela letra grega θ (GATO, 2020).

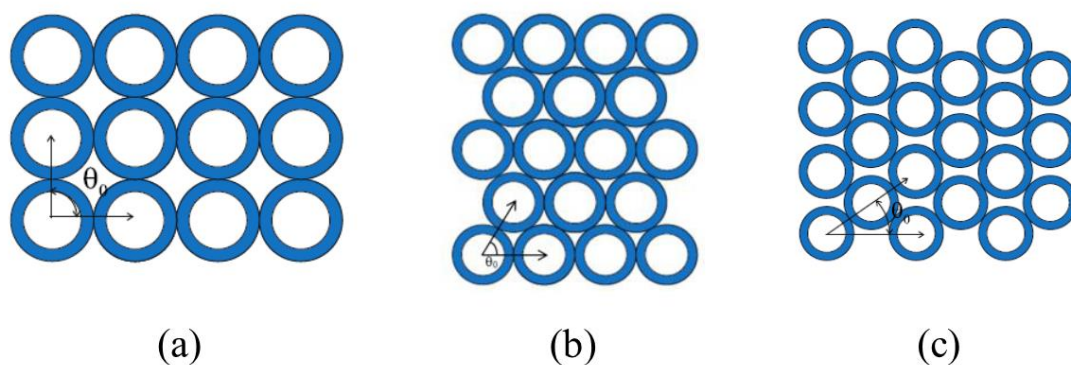


Figura 3 - Empacotamento das células de *honeycomb* circular: (a) cúbico, (b) hexagonal, (c) ortotrópico (adaptado de GATO, 2020).

No que tange a sua utilização, a função primária dos núcleos de *honeycomb* é direcionar a tensão normal e de cisalhamento na superfície tanto em direção ao eixo dos prismas circulares ou hexagonais, quanto na direção radial das células. Por este motivo, em critérios de cálculos e na caracterização destes materiais pode-se considerar que estes núcleos são anisotrópicos. Entretanto, para fins de simplificação de cálculos computacionais de núcleos fabricados em materiais poliméricos, como o polipropileno, pode-se considerá-los isotrópicos (LEE *et al.*, 2002).

As faces dos sanduíches, como já mencionado, são placas de materiais constituintes com maior resistência mecânica se comparado com o material do núcleo, devendo estes materiais resistirem a cargas de tração e compressão, bem como absorver primariamente impactos (SEZGIN *et al.*, 2010). Estudos apresentam materiais metálicos e poliméricos como painéis aplicados em materiais sanduíches, contudo, a utilização de materiais compósitos,

tais como laminados de fibra de vidro, fibra de carbono e aramida, estão sendo cada vez mais estudados substituindo os materiais ditos tradicionais. De fato, os materiais compósitos poliméricos tendem a apresentar maior rigidez e resistência específicas (GAO *et al.*, 2020).

Os materiais compósitos podem ser classificados de diversas maneiras, contudo, as principais seguem os seguintes critérios: (a) Reforço: fibras longas, curtas e partículas (*whiskers*); (b) Configuração do laminado: lâmina (*ply*), laminado e compósitos volumétricos; (c) Estrutura híbrida: diferentes materiais em uma lâmina ou diferentes reforços em um laminado (BARBERO, 2011). Dentre as diversas combinações os materiais compósitos mais utilizados são os reforçados com fibra em uma matriz polimérica, devido a maior resistência da fibra por volume, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, baixa expansão térmica e isolamento acústico.

Para favorecer as propriedades mecânicas em diversas direções, utiliza-se lâminas com fibras unidirecionais ou bidirecionais (tecido) empilhadas formando laminados (BARBERO, 2011), os quais podem ser aplicados como faces em sanduíches. Os tecidos podem ser apresentadas de diversas formas como *roving* direto, tecidos costurados (*fabric*), tecidos tramados (*woven roving*), mantas de fibras picadas, fibras picadas e fio têxtil. O tecido costurado é normalmente produzido e enrolado em bobinas, tendo como principal vantagem fornecer reforços em diferentes direções. Para sua adequada seleção, faz-se necessário selecionar gramatura, direção das fibras em cada camada e o *sizing*. Os tecidos tramados são fabricados em teares, onde são tramados os fios de urdume (longitudinal) com os fios de trama (transversais). O número de fios, comprimento, densidade linear, arquitetura e os *sizing* definem o tecido. Na Figura 4 são apresentados os principais tipos de tecidos (RATTAN; BIJWE; FAHIM, 2008, Garbin,2017).

Considerando a matriz do compósito ela pode ser metálica, cerâmica, carbonosa ou polimérica. Contudo, atualmente as matrizes mais usadas são as poliméricas, que podem ser classificadas como termofixas/termorrígidas (epóxi, fenólica, poliéster insaturada, etc.) ou termoplásticas (polisulfona, poli-éter-éter-cetona – PEEK, etc.) (GATO, 2020). Para grande parte das aplicações, matrizes à base de poliéster insaturada são utilizadas, pois possuem grande versatilidade. Conforme sua composição específica, podem apresentar diferentes propriedades, como o tempo de gel¹, apresentando em suma uma boa razão resistência/preço. A resina poliéster utilizada em geral para aplicações que não envolvem grandes esforços mecânicos, é do tipo ortoftálica. Para outras aplicações, como em

¹ Tempo de gel é o tempo de endurecimento, ou seja, o início do processo cura (BARBERO, 2011)

compósitos poliméricos submetidos a ambientes corrosivos e que necessitem resistência térmica, resinas bisfenólicas devem ser consideradas.

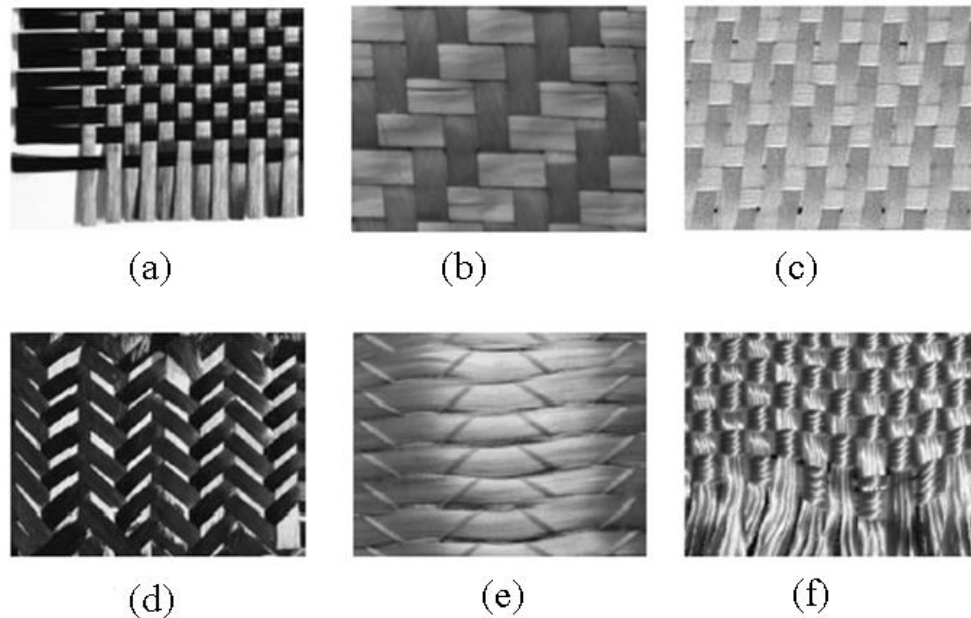


Figura 4 - Principais tipos de tecidos para compósitos (adaptado de Barbero. 2011): (a) plano, (b) *Twill*, (c) cetim, (d) triaxial, (e) costurado e (f) *basket*.

3.2. FALHAS EM PAINÉIS SANDUÍCHE

Na Figura 5 são apresentados os principais modos de falha em painéis sanduíches. Na Figura 5a é apresentada uma falha que ocorre na face, por tensões de tração ou de compressão, causadas principalmente pela baixa resistência mecânica do material da face ou espessura não condizente com a aplicação. A falha apresentada na Figura 5b é do tipo transversal por cisalhamento, devido à baixa resistência do material do núcleo ao cisalhamento. A falha na Figura 5c representa o esmagamento do núcleo sob flexão, que geralmente ocorre quando o núcleo possui baixa resistência à compressão ou quando há deformação excessiva do painel. O modo de falha apresentado na Figura 5d é caracterizado por uma indentação e ocorre por cargas pontuais, havendo um esmagamento local do núcleo causado, principalmente, por uma baixa resistência à compressão do mesmo. A flambagem generalizada é apresentada na Figura 5e, ocasionada pela elevada espessura do painel e por baixa rigidez ao cisalhamento do núcleo. O mecanismo apresentado na Figura 5f é denominado cisalhamento com ondulação, decorrente da flambagem devido ao baixo módulo de cisalhamento do núcleo e baixa resistência ao cisalhamento do adesivo na interface. Outro

mecanismo de falha é denominado de *wrinkling*, ou seja, enrugamento da face, *vide* Figura 5g, onde é apresentado a dobra da face que pode ocorrer tanto para dentro como para fora do núcleo. O último modo de falha apresentado (Figura 5h), denominado de *dimpling*, é um tipo de falha que ocorre principalmente em faces de baixa espessura e núcleos com células grandes.

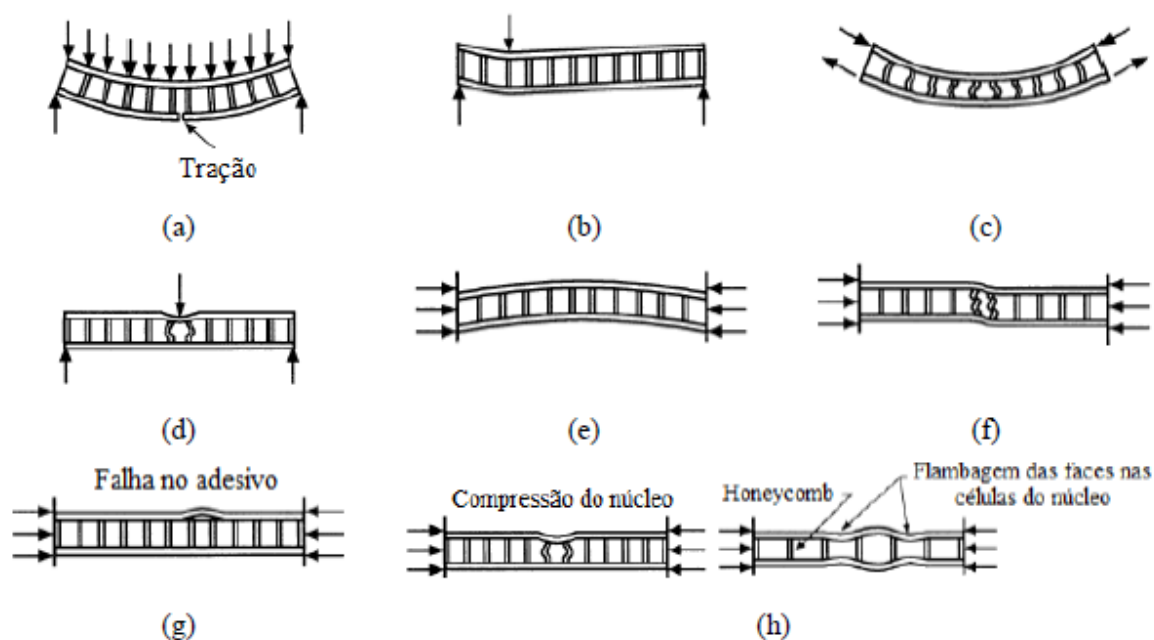


Figura 5 - Falhas típicas em painéis sanduíche (BITZER, 1997): (a) falha por tração, (b) falha por cisalhamento, (c) falha por flexão, (d) indentação, (e) flambagem generalizada, (f) cisalhamento com ondulação, (g) *wrinkling* e (h) *dimpling*

A falha por flambagem é evidenciada em núcleos *honeycomb* sob carregamentos compressivos em aplicações convencionais de painéis sanduíches, que pode ser constatada em uma curva tensão-deformação apresentando três regiões distintas (regiões I, II e III), onde cada uma apresentará um comportamento e deformação específico. Na Figura 6 é possível visualizar tal comportamento na curva tensão-deformação bem como na célula. Inicialmente, verifica-se que a tensão aumenta de maneira linear em relação à deformação, sendo denominada Região I, onde há a flambagem elástica das paredes. Contudo, quando as paredes de uma célula possuem uma restrição a deformação e aumentando o carregamento é possível visualizar o fenômeno do descolamento das faces de contato das células, uma brusca queda na tensão de compressão é observada na curva, caracterizando a Região II, com deformação plástica das paredes das células e início da fratura das faces coladas. Por fim, na Região III, representada por um platô, já há fraturas nas paredes das células e

flambagem generalizada do painel de *honeycomb*. Esta caracterização mecânica em compressão é fundamental para o dimensionamento das cargas de projeto bem como de operação dos painéis, pois os danos no painel sanduíche poderão ser ocasionado pela combinação das falhas elasto-plásticas e de flambagem (LEE *et al.*, 2002).

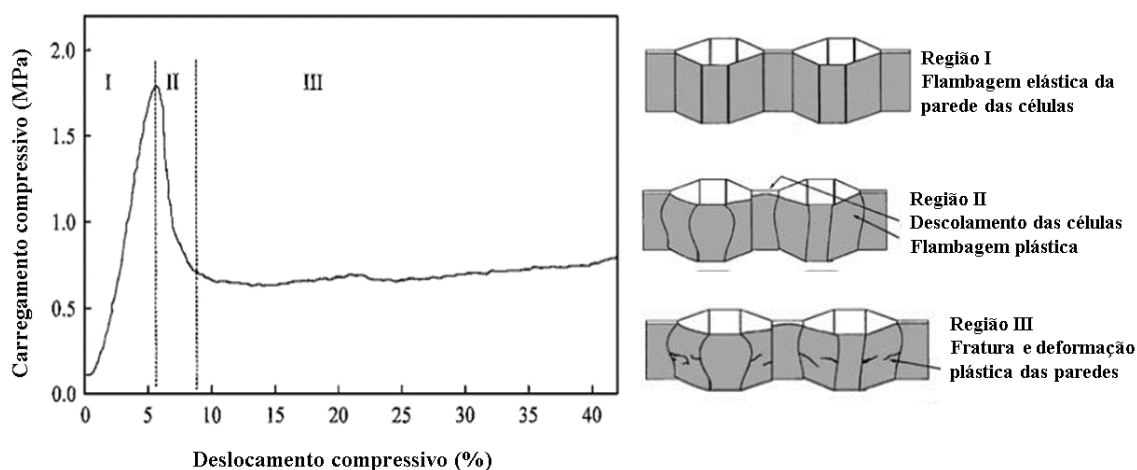
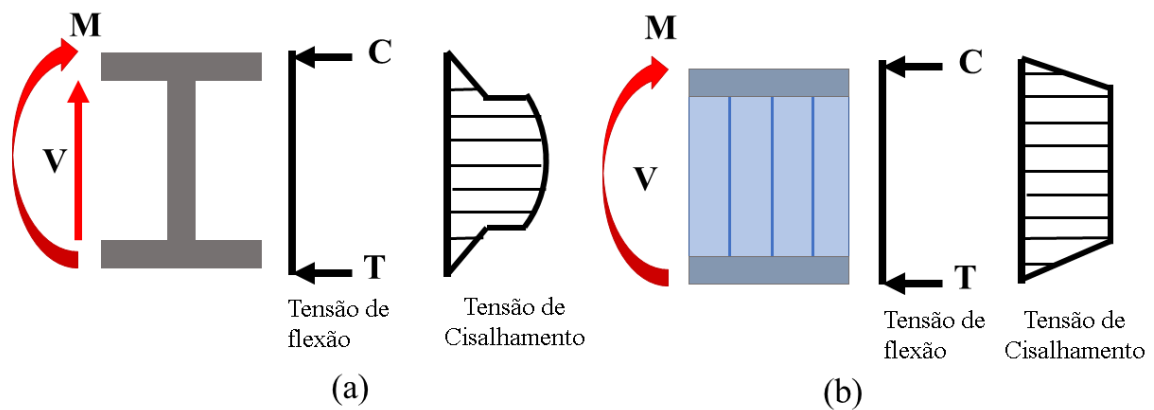


Figura 6 - Estágios da falha por flambagem do núcleo do tipo honeycomb (Adaptado de LEE *et al.*, 2002).

3.3. MODELO ANALÍTICO DE PAINÉIS SANDUÍCHE

Neste tópico são apresentados os principais pontos de uma abordagem analítica dos painéis sanduíche, enfatizando a formulação para as condições de compressão no núcleo e flexão pura do painel, estudo do presente trabalho.

Conforme já apresentado, os painéis sanduíche podem ser comparados a vigas de perfil do tipo I, principalmente quando submetidos a cargas de flexão, onde duas seções inteiriças suportam os carregamentos compressivos ou de tração, enquanto a porção intermediária, ou alma, é responsável por suportar o carregamento de cisalhamento, conforme Gato (2020) e Bitzer (1997), como apresentado na Figura 7. Todavia, salienta-se que a redução de massa da alma da viga ocasionaria o colapso da mesma pelo carregamento apresentado no diagrama de corpo livre na Figura 7a. Em um painel sanduíche, as faces do compósito são apoiadas no núcleo de baixa densidade, o qual permite a otimização de sua massa de acordo com o carregamento de projeto, mantendo assim a estabilidade estrutural do painel sanduíche, situação apresentada na Figura 7b.



Onde:

M – Momento fletor

V – esforço cortante

C – Compressão

T – Tração

Figura 7- Comparação dos esforços da viga de perfil I (a) com um painel sanduíche (b) (Adaptado de Gato, 2020 e Bitzer, 1997).

Ao se dimensionar painéis estruturais, principalmente do tipo sanduíche, submetidos a carregamentos de flexão, deve-se adotar alguns critérios, nomenclaturas e em alguns casos simplificações utilizando-se do conceito de linha neutra oriunda da mecânica dos sólidos. Primeiramente, para se obter uma solução exata, deve-se assumir as seguintes condições apresentadas na Figura 8.

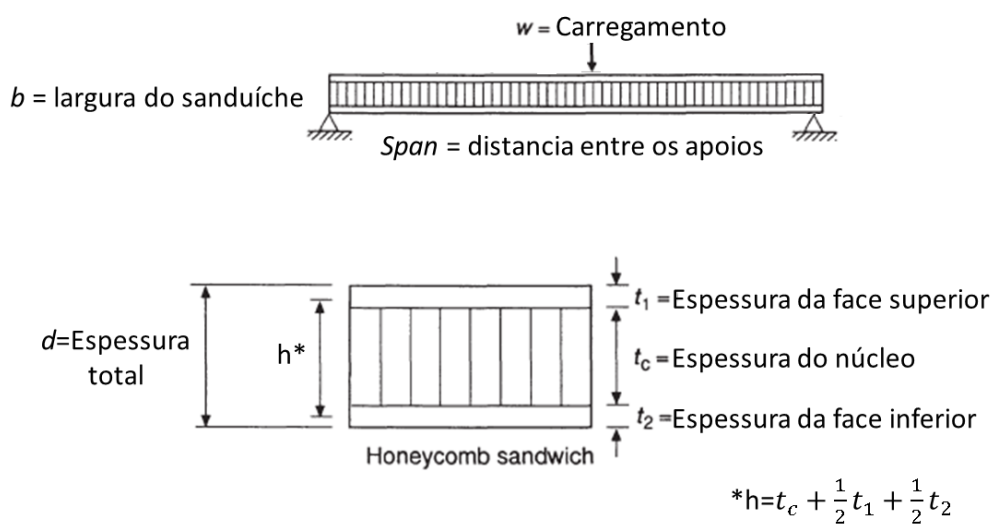


Figura 8 - Considerações para a formulação do cálculo de painéis sanduíche (Adaptado BITZER, 1997).

Primeiramente, calcula-se a carga total, o máximo esforço cortante e o máximo momento gerado utilizando as Equações (1)-(3):

$$P_{total} = w l, \quad (1)$$

onde, P_{total} é a máxima carga, w o carregamento distribuído e l o *span*.

$$V_{max} = \frac{P_{total}}{2}, \quad (2)$$

onde, V_{max} é o máximo esforço cortante.

$$M_{max} = \frac{P_{total} l}{4}, \quad (3)$$

onde, M_{max} é o máximo momento fletor.

A máxima tensão de cisalhamento no núcleo (τ_c) pode ser calculada pela razão entre o esforço cortante e o produto entre h e b , Equação (4):

$$\tau_c = \frac{3 V}{2 h b}, \quad (4)$$

A tensão média na face (σ_f) pode ser calculada pela razão entre o momento máximo e o produto entre t_f , h e b , Equação (5):

$$\sigma_f = \frac{M_{max}}{t_f h b}, \quad (5)$$

onde, t_f é a espessura da face e b é a largura do painel.

Para a obtenção da deflexão total de um painel sanduíche faz-se necessário determinar a deflexão oriunda da flexão e, no caso de haver carregamentos de cisalhamento, a deflexão por esta carga. Deste modo, o carregamento combinado poderá determinar o resultado, como pode ser visualizado na Figura 9.

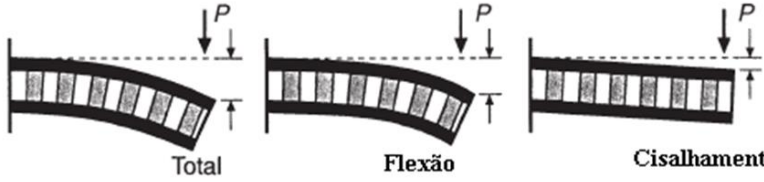
Outro conjunto de formulações está presente na norma ASTM C393 (2020), que trata especificamente dos procedimentos para realização de ensaio de flexão em painéis sanduíche. Nesta, é possível obter a tensão de cisalhamento máxima no núcleo e a tensão nas faces, conforme as Equações (6) e (7), respectivamente (ASTM C393/C393M, 2020; GATO, 2020):

$$F_S^{ult} = \frac{P_{max}}{(d + c)b}, \quad (6)$$

$$\sigma_{fl} = \frac{P_{max}Span}{2t_f(d+c)b'} \quad (7)$$

onde, P_{max} é a carga máxima encontrada durante o ensaio; S é distância entre os apoios, do inglês *span*; b é a largura do corpo de prova; d é a espessura do corpo de prova; e c é a espessura do núcleo.

Deflexão Total = Deflexão pela flexão + Deflexão pelo cisalhamento



$\Delta_{max} = K_b \frac{PL^3}{D} + K_s \frac{PL}{hG_c}$

Onde,
 K_b é a constante fletora
 K_s é a constante cisalhante

Figura 9 - Deflexão em painéis sanduíche (Adaptado BITZER, 1997).

Segundo Latour et al (2021), a formulação para a obtenção da carga máxima e mínima de flexão para painéis sanduíche pode ser calculado conforme as equações (8) e (9) (LATOUR et al., 2021)

$$M_{y,Fv} = \frac{f_{yFv}I_g}{t_f + \frac{c}{2}} \quad (8)$$

$$M_{y,f} = \frac{f_b I_g}{n \frac{c}{2}} \quad (9)$$

onde, $M_{y,Fv}$ é a carga de flexão associada a face de do painel sanduíche; f_{yFv} é resistência ao escoamento associada a face; I_g o momento de inercia; $M_{y,f}$ é a carga de flexão associada ao núcleo do painel sanduíche; f_b é o limite de escoamento do núcleo e n é a razão entre o módulo de elasticidade da face e do núcleo.

3.4. CRITÉRIOS DE FALHA PARA MATERIAIS ANISOTRÓPICOS

Compósitos de matriz poliméricas são bastante utilizados em laminados sanduíches, e muitas teorias tratam da falha destes materiais, cabendo aos projetistas dos componentes delimitar em seus cálculos qual critério de falha será utilizado como regramento para o dimensionamento dos materiais das faces. O Critério de iniciação de falha de Hashin é descrito aqui uma vez que foi utilizado para previsão da falha dos laminados utilizados nas faces do sanduíche.

O critério de falha de Hashin, proposto em 1973, apresenta respostas muito precisas em análises de falha no reforço ou na matriz polimérica e continua sendo bastante utilizado. Este critério considera quatro diferentes mecanismos de iniciação da falha, descritas nas Equações (10)-(13) (BARBERO *et al.*, 2013; HASHIN; ROTEM, 1973).

Falha de tração na fibra ($\sigma_1 > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}}\right)^2 = 1, \quad (10)$$

Falha de compressão na fibra ($\sigma_1 < 0$):

$$\frac{\sigma_1}{(\sigma_1^C)_{ult}} = 1, \quad (11)$$

Falha de tração na matriz ($\sigma_2 > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}}\right)^2 = 1, \quad (12)$$

Falha de compressão na matriz ($\sigma_2 < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_2}{2(\tau_{23})_{ult}}\right)^2 + \left[\left(\frac{(\sigma_2^C)_{ult}}{2(\tau_{23})_{ult}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{(\sigma_2^C)_{ult}} + \left(\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}}\right)^2 = 1, \quad (13)$$

onde, σ_1 e σ_2 são elementos da diagonal do tensor de Cauchy σ_i , $(\sigma_i^T)_{ult}$ é a máxima resistência à tração na longitudinal, τ_{12} elementos de cisalhamento do tensor de tensões de Cauchy, $(\tau_{12})_{ult}$ é o máximo carregamento cisalhante, $(\sigma_i^C)_{ult}$ é a máxima resistência à compressão.

3.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO A PAINEL SANDUÍCHE

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos que fundamentam os métodos numéricos utilizados para a caracterização de painéis sanduíche, em especial o MEF. Grande parte dos métodos numéricos fundamentam-se nas três equações de equilíbrio em um ponto qualquer de um corpo. Como apresentado pela Equação (14), verifica-se que a mesma é apresentada na notação indicial (BARBERO, 2013a):

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0, \quad (14)$$

onde, f_i representa as forças de corpo por unidade de volume e $\sigma_{ij,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$.

Quando as forças de corpo são desprezíveis, a forma expandida da equação de equilíbrio para um painel sanduíche ou laminado nas coordenadas x, y, z pode ser descrita conforme a Equação (15), onde são considerados apenas o tensor (BARBERO, 2013a).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Um método inicial alternativo às equações de momento é o Princípio dos Trabalhos Virtuais, o qual para uma formulação de elementos finitos, pode considerar a Equação (16), com as forças de superfície:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_S t_i \delta u_i dS - \int_V f_i \delta u_i dV = 0. \quad (16)$$

onde, u_i é a função de deslocamento virtual.

O sinal negativo representa que trabalho está sendo aplicado por uma força externa no corpo. Deste modo, o primeiro termo da sentença refere-se às tensões internas no corpo, justificando o sinal positivo, e os dois termos seguintes às forças externas. Este método irá resultar na obtenção da forma fraca, isto é, uma solução aproximada baseada no princípio dos trabalhos virtuais, assim necessitante obrigatoriamente da definição de uma quantidade virtual (BARBERO, 2013a).

Este princípio está atrelado às considerações da mecânica clássica, como a Teoria Clássica das Placas, nas quais estão inseridas o comportamento de pequenos e grandes deslocamentos. A mecânica clássica e a análise macromecânica de compósitos avaliam o

comportamento mecânico do empilhamento de diversas lâminas que, no caso de um sanduíche, consideram o núcleo uma lâmina entre duas faces.

Utilizando-se as teorias descritas acima o MEF vem sendo amplamente utilizado para a obtenção de uma solução aproximada para um problema cuja solução exata é de difícil obtenção. Tal formulação requer a integração da equação por um domínio complexo (de volume V), obtendo-se um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i), como pode ser visualizado na Equação (17), que corresponde à integral de volume de uma função f (PINA, 1976).

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV, \text{ onde } n = 1, 2 \dots \quad (17)$$

Diante do que foi apresentado, pode-se considerar o problema sobre um domínio que pode ser composto por um somatório de pequenos subdomínios de volume delimitado. Considerando que cada problema encontra-se espacialmente delimitado, através dos graus de liberdade em cada região ou ponto de interesse (condições de contorno) e das cargas aplicadas, pode-se, após uma série de transformações e deduções matemáticas, delimitar que a relação de deslocamentos dos pontos delimitados através dos elementos finitos obedecem a matriz de rigidez e a matriz de esforços (FISH; BELYTCHKO, 2008).

Modelos simples de elementos finitos que possuem apenas os graus de liberdade nodais geométricos básicos (ex. translações em planos médios) podem ser analisados por elementos 3D. Contudo, modelos com graus de liberdade adicionais, como por exemplo, curvaturas ou derivadas de alta ordem de deslocamento ou deformação cisalhantes, são melhores discretizados como chapas ou casca. Outra consideração acerca da modelagem de painéis sanduíche é que, desde que as tensões cisalhantes interlaminares sejam constantes entre as lâminas, elas não devem ser avaliadas considerando a simplificação de constantes elásticas de uma única lâmina, mas sim através de métodos de alta ordem (HA, 1990).

Com base no exposto referente a análises numéricas de painéis sanduíche, pode-se considerar que os seus elementos constituintes, faces e núcleo, podem ser modelados através da Teoria de placas de Primeira Ordem de Mindlin (FSDT – *First-Order Shear Deformation Theory*), onde assume-se que uma linha reta traçada através da espessura da casca na configuração não deformada, pode rotacionar, mas deverá permanecer reta quando a casca vir a deformar-se (BARBERO, 2013b). Este método nem sempre é o mais indicado para painéis sanduíche, uma vez que são estruturas de espessura considerável.

Com base nestes princípios que Gao *et al.* (2020) desenvolvem seu trabalho, modelando painéis sanduíche em elementos finitos, com faces de fibra de vidro combinado

com polipropileno em formato de *prepreg* com núcleo *honeycomb* de polipropileno. Utilizam o *software* Simulia Abaqus e os conceitos de elementos finitos como etapa fundamental no desenvolvimento de uma rotina de otimização onde buscou-se otimizar a energia até a falha em detrimento de uma menor massa. Já o trabalho desenvolvido por Gato (2020) utilizou-se dos conceitos e do *software* de elementos finitos Simulia Abaqus para a modelagem de placas sanduíche sob flexão, o qual utilizava faces de fibra de vidro e resina epóxi e núcleo de tampas de frascos em polipropileno, além de utilizar ensaios experimentais e análise de variáveis-resposta para encontrar as melhores variáveis para o seu painel.

Contudo, novos métodos para a obtenção de soluções aproximadas de problemas que envolvem painéis sanduíche estão sendo amplamente utilizados considerando teorias de alta ordem, ou teorias híbridas de energia, como ilustrado na Figura 10. O plano médio do elemento triangular proposto coincide com o plano (xy). A origem do elemento está localizada no nó sobre um vetor paralelo ao eixo x. No modelo proposto, as faces e o núcleo foram caracterizados por materiais homogêneos, elásticos e ortotrópicos, mudando apenas suas equações constitutivas. Assim, reduz-se a quantidade de constantes elásticas necessárias como dados de entrada (DAS *et al.*, 2005).

Neste caso, as cargas distribuídas normais às superfícies superiores ou inferiores são representadas pela letra q , podendo posteriormente serem atribuídas às mesmas condições de contorno cinéticas. Outra consideração importante é que o elemento proposto possui 13 graus de liberdade em cada nó, dois deslocamentos (u, v), duas rotações (θ_x, θ_y), três deslocamentos transversais (w, w_1, w_2) e suas derivadas ($w_{,x}, w_{,y}, w_{1,x}, w_{1,y}, w_{2,x}, w_{2,y}$) (DAS *et al.*, 2005).

O modelo a ser utilizado afetará diretamente o comportamento da análise, além do custo computacional. Entretanto, outros aspectos afetam diretamente a solução dos problemas, como por exemplo, as relações constitutivas dos materiais empregados na face e no núcleo. Os materiais poderão ser caracterizados como isotrópicos, ortotrópicos, anisotrópicos etc., afetando diretamente a simplificação dos problemas mediante a adoção de constantes as quais relacionam dois tensores (tensor tensão de Cauchy e tensor deformação).

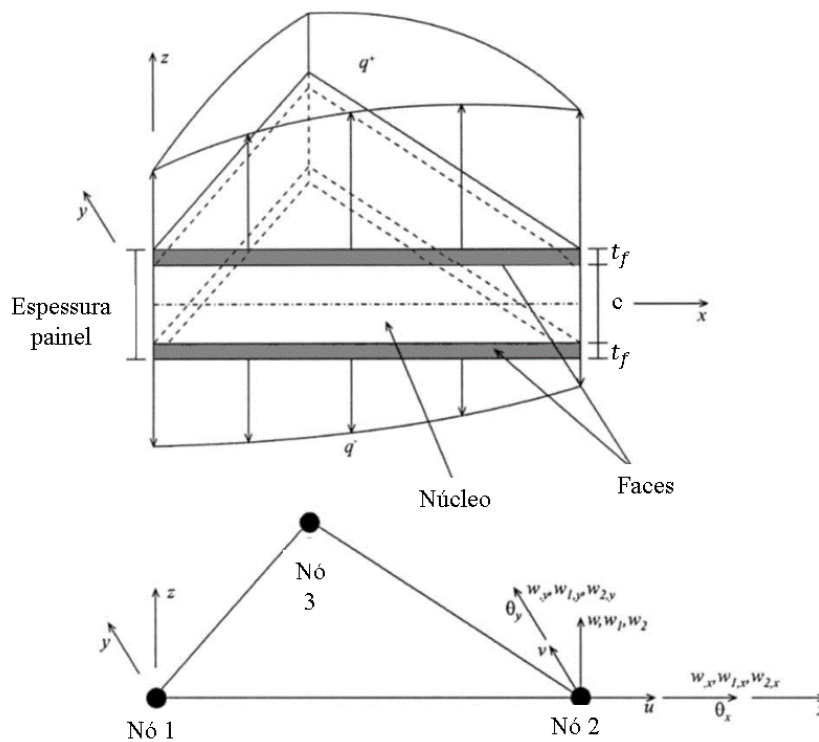


Figura 10 - Proposta de modelo de elementos finitos (Adaptado de DAS et al., 2005).

Normalmente as análises de painéis sanduíche, por apresentarem materiais diferentes nas faces, núcleo e elemento coesivo, são modeladas como não-lineares. Cita-se (MANALO et al., 2010), que considerou as faces como materiais elásticos ortotrópicos (como o caso de laminados de fibra de vidro) e o núcleo foi modelado com uma relação constitutiva do tipo bilinear entre o tensor tensão e o tensor deformação. Já Gao et al. (2020) consideram as faces como laminados fabricados com prepreg de fibra de vidro e resina termoplástica com comportamento elástico ortotrópico e o núcleo com um comportamento elastoplástico. Em alguns estudos, o núcleo do tipo *honeycomb* de polipropileno tem sido modelado utilizando o modelo elastoplástico devido ao comportamento não-linear deste material. Esta definição implica que, ao submeter o núcleo a um carregamento, ele apresentará um comportamento inicial elástico, que ainda pode ser reversível para qualquer deslocamento/deformação até que seja alcançado o limite de escoamento. Mantendo-se a imposição de um carregamento, ocorrerá então um comportamento plástico, com deformação irreversível até o limite de ruptura do material (GAO et al., 2020).

Um modelo semelhante ao proposto por Gao et al. (2020) foi proposto por ZHANG et al. (2022), que realizou análises numéricas por elementos finitos de modo a replicar os danos encontrados no ensaio de flexão por três pontos de painéis sanduíches com núcleo do tipo *honeycomb* de alumínio e faces de fibra de vidro e alumínio. Os autores mostraram que,

variando as espessuras e a sequência de empilhamento, pode-se obter diferentes resultados como o aumento da energia necessária para a deformação plástica dos painéis e aumento da máxima carga de flexão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho pode ser visualizada no fluxograma apresentado na Figura 11. É possível identificar que as primeiras etapas estão relacionadas aos materiais utilizados e aos processos de fabricação dos painéis sanduíche e do laminado da face isolada dos sanduíches. Posteriormente, encontram-se as caracterizações dos constituintes do painel sanduíche, com os ensaios físico-mecânicos do laminado da face e o ensaio de compressão do núcleo. Por fim, foram realizados os ensaios de flexão dos painéis sanduíche, havendo, portanto, todos os dados para a modelagem numérica.

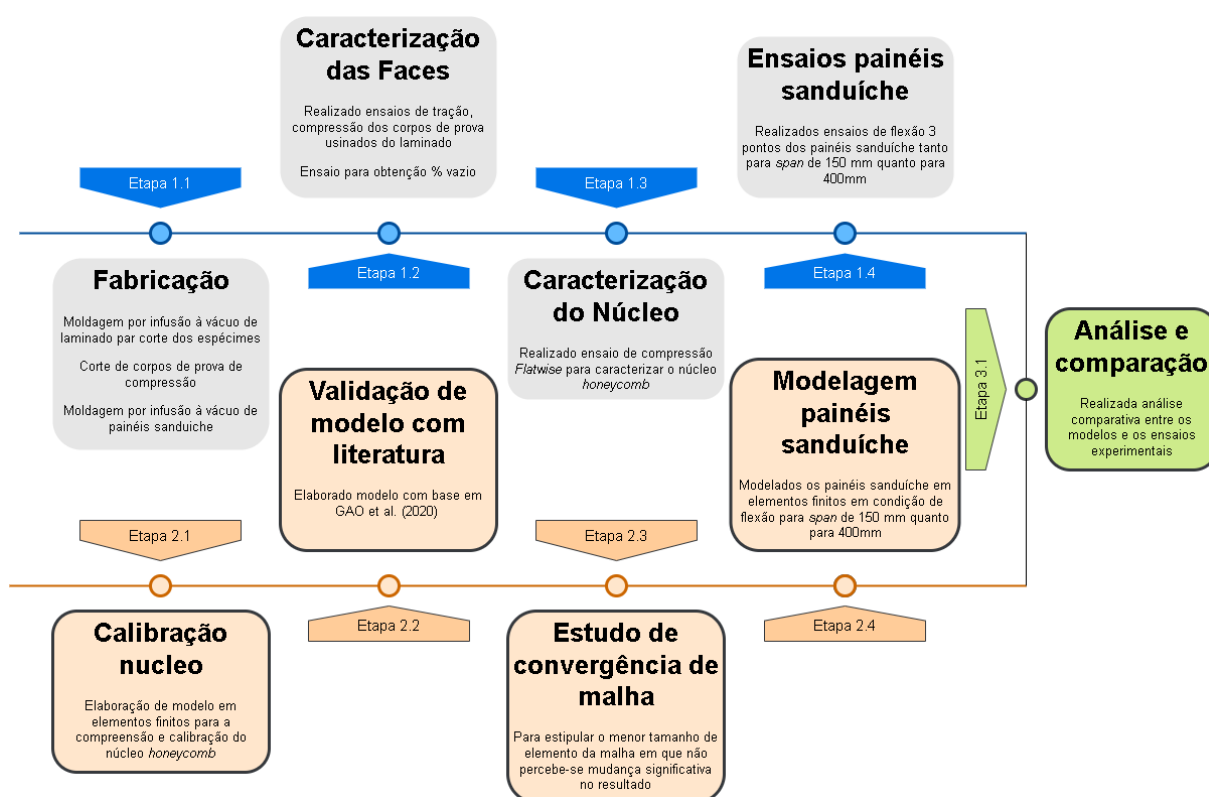


Figura 11 - Fluxograma da metodologia empregada neste trabalho

4.1. MATERIAIS

O reforço utilizado no presente trabalho foi um tecido bidirecional do tipo plano (*plain-weave*)² de fibra de vidro do tipo E, com gramatura de 450 g/m², material comumente utilizado

² Tecidos com fibras que se entrelaçam alternadamente de maneira simples

para a fabricação de itens que necessitem de resistência mecânica, porém, com elevada relação custo-benefício se comparada a outras fibras de maior custo.

No que tange à matriz polimérica, decidiu-se utilizar uma resina poliéster ortoftálica da empresa Embrapol®, marca Alpha 163, a qual apresenta baixa reatividade, baixa exotermia, baixa viscosidade e elevada molhabilidade em tecidos de fibra de vidro, propriedades de grande interesse para a fabricação de painéis sanduíche. Utilizou-se um iniciador Butanox M-50, na proporção de 1 g para cada 100 g de resina, sendo necessário a agitação mecânica de ambas por 3 min. As principais propriedades da resina utilizada estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais propriedades da resina poliéster ortoftálica utilizada.

Propriedades	Valor
Viscosidade Brookfield a 25 °C (cP)	140-190
Tempo de gel a 25 °C (min)	55-65
Intervalo simples (min)	30-50
Pico exotérmico (°C)	120-140

Fonte: EMBRAPOL (2021).

Os núcleos *honeycomb* foram adquiridos da empresa e-Composites, distribuidora oficial da Barracuda Advanced Composites, em duas espessuras: 10 mm e 25 mm. Os painéis apresentam células de perfil circular, empacotamento hexagonal, com diâmetro de 8 mm, espessura média da parede de 0,2 mm, densidade de 80 kg/m³, com uma pele de poliéster na superfície superior e inferior. As propriedades mecânicas informadas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais propriedades mecânicas do núcleo *honeycomb* de polipropileno.

Propriedades	Norma	Mínimo	Máximo
Resistência à tração (MPa)	ASTM C297 (2017)	0,84	0,89
Resistência à compressão (MPa)	ASTM C365 (2016)	1,55	1,89
Módulo de compressão (MPa)	ASTM C365 (2016)	65,4	79,2
Resistência ao cisalhamento (MPa)	ASTM C273 (2020)	0,52	0,58
Módulo de cisalhamento (MPa)	ASTM C273 (2020)	11,7	15,2

Fonte: E-COMPOSITES (2021).

4.2. FABRICAÇÃO DAS FACES E DOS SANDUÍCHES

Nesta dissertação, foi utilizado o processo de infusão a vácuo para a moldagem dos laminados de fibra de vidro/poliéster, utilizados para confecção de corpos de prova de tração e compressão das faces, e dos painéis sanduíches. Este é um processo de fabricação derivado do RTM (*resin transfer molding*), contudo não apresenta duas partes rígidas, e sim uma parte rígida e uma flexível (o saco de vácuo). Apresenta um baixo custo ferramental e menor complexidade de processamento comparado à moldagem por compressão, possibilitando a fabricação de laminados com volumes de fibra entre 50-65%, dependendo dos materiais utilizados, e possibilita a redução do número de peças finais, uma vez que haverá a consolidação em uma única peça moldada, assim não requerendo uma etapa extra de colagem das faces no núcleo.

A Figura 12 ilustra o sistema de moldagem por infusão a vácuo utilizado no laboratório de moldagem do LAPOL/UFRGS. Primeiramente, depositou-se uma pré-forma seca sobre um molde rígido com uma malha de fluxo cobrindo a superfície de reforço para auxiliar na distribuição e aceleração do fluxo da resina. Aplicou-se sobre a pré-forma um tecido chamado de *peel ply*, que tem por objetivo facilitar a desmoldagem após curada a peça. Por fim, para a aplicação do vácuo, a força motriz utilizada para a impregnação da resina no tecido de fibra de vidro, utilizou-se um saco de vácuo.

Para a fabricação do laminado utilizado para o corte dos corpos de prova de tração e compressão das faces, utilizou-se 3 camadas de tecido de fibra de vidro tipo E, plano e balanceado, isto é, possui o mesmo número de feixes na direção longitudinal (0°) e transversal (90°), de dimensões 300 mm x 300 mm, que resultou após a moldagem em um laminado com $\approx 1,15$ mm de espessura. Salienta-se que o número de tecidos empilhados foi a mesma das faces dos painéis sanduíche. Assim, a sequência de empilhamento do laminado foi $[0_i]_{3T}$, sendo 0° a direção do urdume, f pois se trata de um tecido e 3 por ser três camadas.

Para fabricar os painéis sanduíches de modo a avaliar a influência da espessura do núcleo no comportamento à flexão, foram adotadas duas espessuras de núcleo de *honeycomb* de polipropileno, 10 mm e 25 mm. Já a espessura das faces foi mantida constante em ambos os casos. Assim a sequência de empilhamento para a moldagem consistiu em três lâminas de tecido de fibra de vidro formando um laminado $[0_i]_3$ (face inferior), o núcleo *honeycomb*, e mais três lâminas de fibra de vidro formando um laminado $[0_i]_3$ (face superior). A direção do urdume foi sempre orientada no sentido longitudinal do painel sanduíche. Na Figura 12 é possível visualizar a sequência de empilhamento, e a configuração completa para

moldagem dos painéis sanduíche. É importante salientar que o laminado e os painéis sanduíche após a infusão foram submetidos a um processo de cura por 24 horas à temperatura ambiente seguido da pós-cura em forno a 60 °C por 3 h.

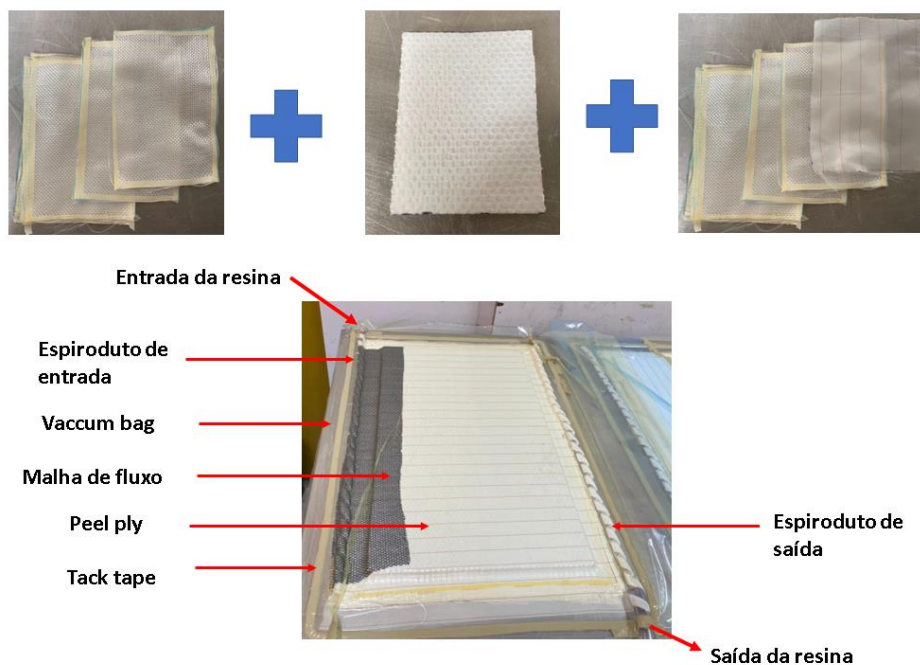


Figura 12 - Disposição dos principais componentes para infusão a vácuo.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS FACES E DO NÚCLEO

De modo a caracterizar as faces do sanduíche, foi realizada inspeção por ultrassom do tipo C-Scan para identificação de vazios no laminado e da distribuição de resina ao longo da placa. Neste tipo de inspeção, é obtida uma vista planificada gerada pela associação da amplitude em um determinado percurso sônico e uma escala de cores, geralmente definida pela porcentagem do sinal em relação à altura da tela.

Posteriormente, foi retirada uma pequena amostra para verificar a porcentagem mássica de fibra e resina, conforme a norma ASTM D3171-11 (ASTM D3171, 2022). Este ensaio consistiu em submeter amostras do laminado a um ciclo térmico atingindo a temperatura necessária para degradar a resina do laminado assim restando apenas a fibra de vidro. Para obter os valores de teor mássico dos constituintes, foi mensurado a massa da amostra antes e depois do ciclo térmico. Também foi realizado experimento para obtenção da densidade volumétrica experimental utilizando o Método de Arquimedes, conforme ASTM D792-10 (2020), utilizando-se água destilada (ASTM D792-20, 2020).

De posse dos valores de massa e densidade, utilizando-se da formulação apresentada na norma ASTM D2734-16 (2016), foi calculada a densidade teórica de modo a posteriormente estimar o volume de vazios presentes no laminado da face. Foi calculada a massa específica teórica do laminado (T) conforme a Equação (18):

$$T = \frac{100}{\frac{R}{D} + \frac{r}{d}}, \quad (18)$$

onde, R é a porcentagem mássica da resina, r a porcentagem mássica da fibra, D a massa específica da resina e d a massa específica da fibra (ASTM D2734, 2016).

O volume de vazios no laminado (V) pode então ser calculado pela Equação (19):

$$V = \frac{100(T_d - M_d)}{T_d}, \quad (19)$$

onde, T_d é massa específica teórica calculada pela Equação (19) e M_d a massa específica experimental do laminado.

Foram também obtidos por corte do laminado, o corte fora realizado em fresadora CNC (Controle numérico por computador) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia/UFRGS, corpos de prova para ensaios de tração descritos na norma ASTM D3039-17(2017). Foram confeccionados 7 corpos de prova com 250 mm (comprimento) × 25 mm (largura) × 1,15 mm (espessura) (ASTM D3039/D3039M, 2014). Este ensaio foi necessário para obter os módulos elásticos do laminado e a resistência à tração para utilização do critério de falha por Hashin nas simulações numéricas do sanduíche. Para se obter os valores de deformação, foi utilizado extensômetro do tipo *clip-on*. Na Figura 13 é possível visualizar as amostras utilizadas e o ensaio de tração com a máquina de ensaio universal Instron 3382, velocidade do ensaio 2 mm/min e célula de carga da marca Instron identificação 525-171.

Também foi realizado ensaio de compressão CLC, do inglês *Combined Loading Compression*, do laminado das faces do sanduíche conforme ASTM D6641-16 (2016). Foram confeccionados 7 corpos de prova retangulares com dimensões: 140 mm (comprimento) × 13 mm (largura) × 1,15 mm (espessura) e realizados ensaios na mesma máquina universal Instron acima descrita (ASTM D6641, 2016).

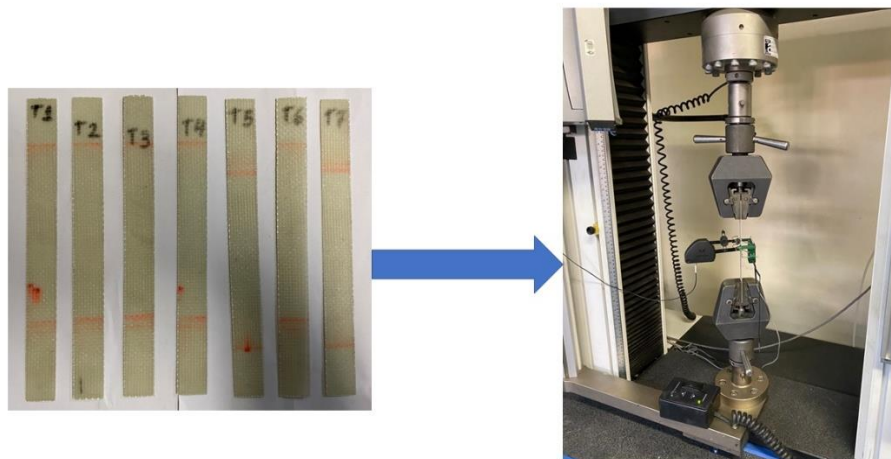


Figura 13 - Amostras e ensaio de tração dos laminados da face conforme ASTM D3039.

A caracterização experimental do núcleo do tipo *honeycomb* de polipropileno foi realizada por ensaio de compressão do tipo *Flatwise*, *i.e.*, quando a carga compressiva é aplicada paralelamente ao eixo dos tubos que compõem o núcleo, de acordo com a norma ASTM C365-16 (2016). Este ensaio teve como objetivo obter o módulo elástico do núcleo, o coeficiente de Poisson e as curvas força vs. deslocamento utilizados nas simulações numéricas do sanduíche. Para tal, corpos de prova foram cortados em serra fita, com comprimento médio de 69,3 mm e largura média de 68,8 mm. O ensaio ocorreu na mesma máquina de ensaios universal Instron, apresentado na Figura 14. A velocidade de ensaio utilizado foi de 10 mm/min para ambas as espessuras de núcleo e célula de carga da marca Instron identificação 525-171.

Neste trabalho os resultados serão apresentados através da nomenclatura HC 10-0X, onde X identifica o sequencial do corpo de prova para espessura de 10 mm, e HC 25-0X, para corpos de prova de espessura de 25 mm.

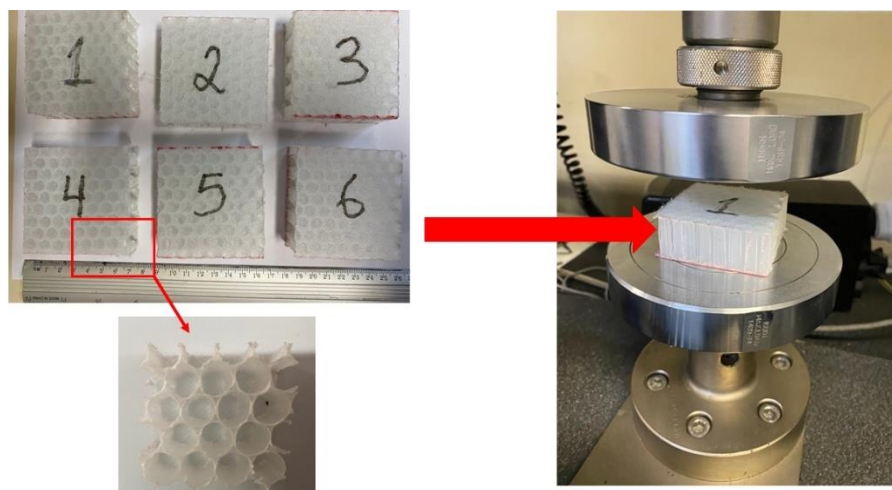


Figura 14 – Corpos de prova para ensaio de compressão do núcleo e foto do ensaio.

4.4. ENSAIOS DE FLEXÃO DO PAINEL SANDUÍCHE

De modo a caracterizar os painéis sanduíche em condição de flexão, foram confeccionados painéis com duas espessuras de núcleo *honeycomb* diferentes. Após, foram usinados em serra fita corpos-de-prova com o dimensional apresentado na Tabela 4, seguindo as recomendações das referidas normas. Os ensaios, apresentados de forma esquemática na Figura 15, foram realizados na mesma máquina de ensaios citada com velocidade do ensaio de 6 mm/min e célula de carga da marca Instron identificação 525-171.

As diferentes condições selecionadas, aumentando-se a área da seção transversal do sanduíche e conseqüente o momento de inércia, bem como a distância entre a aplicação da carga e o apoio sobre flexão, têm por objetivo estudar o comportamento do sanduíche e principalmente as falhas em cada caso. Na Figura 16 são apresentadas imagens das condições de ensaio realizadas com diferentes *span* (150 mm e 400 mm) para as duas espessuras diferentes de núcleo em cada *span*.

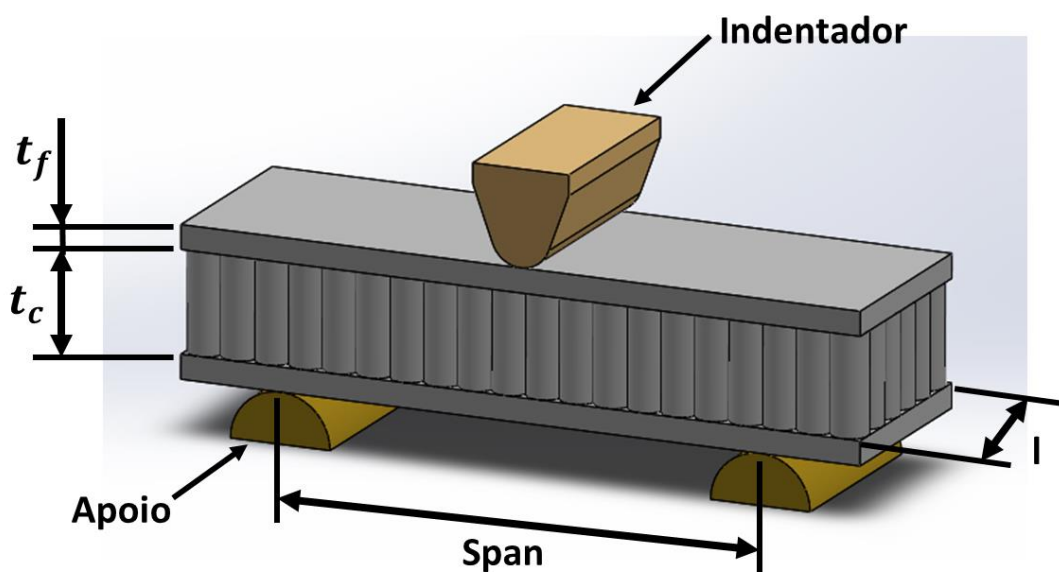


Figura 15 – Principais dimensões e apresentação do ensaio de flexão 3 pontos.

Tabela 4 – Relação de corpos de prova e normas para flexão (ASTM C393/C393M, 2020; D7250/D7250M, 2010).

Caso Família	Norma	Largura l (mm)	Espessura do núcleo t_c (mm)	Espessura da face t_f (mm)	Span (mm)
Flexão Curto Sd10-1C	ASTM C393-20	50	10	1,15	150
Flexão Longo Sd10-1L	ASTM D7250-20	50	10	1,15	400
Flexão Curto Sd25-1C	ASTM C393-20	50	25	1,15	150
Flexão Longo Sd25-1L	ASTM D7250-20	50	25	1,15	400



(a)



(b)

Figura 16 – Ensaio de flexão 3 pontos com: (a) span 150 e (b) span 400 mm.

4.5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com os dados obtidos com os ensaios experimentais de compressão e de flexão, foram modelados os respectivos ensaios no software de elementos finitos *Simulia Abaqus*TM como será descrito a seguir.

Uma definição comum nas análises, ao menos em um primeiro momento, foi o modelo de material das faces e do núcleo. Os núcleos de *honeycomb* de polipropileno foram modelados com um material isotrópico e elastoplástico, com módulo de elasticidade de 550 MPa e coeficiente de Poisson de 0,35, já o comportamento elastoplástico do material foi modelado seguindo a curva da Figura 17 sendo todos os dados obtidos por Gato (2020).

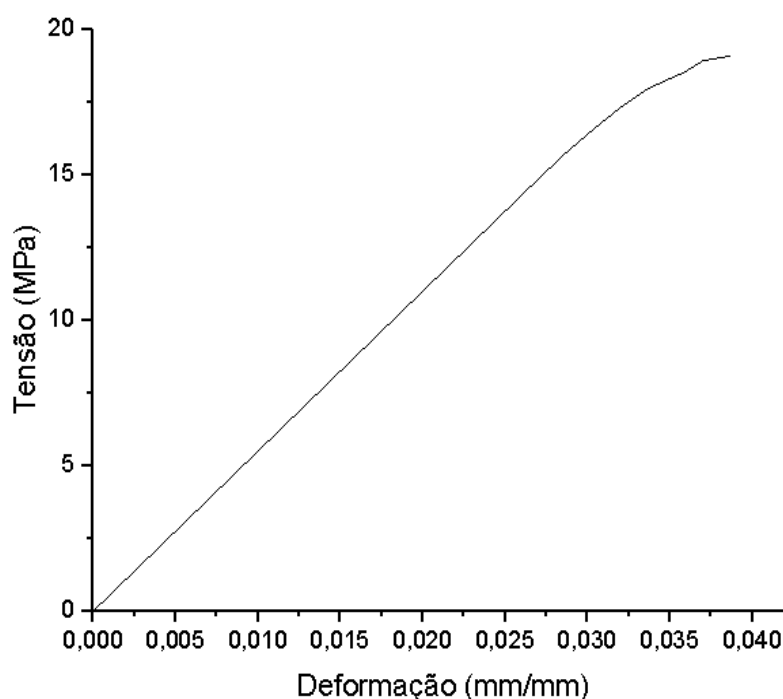


Figura 17 – Curva tensão vs. deformação do polipropileno em tração (GATO, 2020).

As faces foram modeladas como um laminado com 3 lâminas, semelhante ao fabricado, sendo considerado transversalmente isotrópico. O modo de falha considerado foi de Hashin. As propriedades utilizadas no *software* de elementos finitos podem ser visualizadas na Tabela 5, onde são apresentados os dados obtidos por ensaio ou pela micromecânica utilizando-se o *software* da UFRGS *Mech-Gcomp*.

Tabela 5 – Propriedades das faces utilizadas no *software* de elementos finitos.

Propriedades	Símbolo	Média ± DP (CoV)	Fonte
Módulo elástico longitudinal (MPa)	E_{11}	17401 ± 667 (3,8%)	Ensaiado
Módulo elástico transversal (MPa)	E_{22}	17401	= E_{11}
Coefficiente de Poisson	ν_{12}	0,25 ± 0,02 (8,0%)	Ensaiado
Modulo de cisalhamento no plano 1-2 (MPa)	G_{12}	1710	Calculado
Modulo de cisalhamento no plano 1-3 (MPa)	G_{13}	1650	Calculado
Modulo de cisalhamento no plano 2-3 (MPa)	G_{23}	1650	Calculado
Resistência à tração longitudinal (MPa)	S_{11}^t	370 ± 11 (3,0%)	Ensaiado
Resistência à tração transversal (MPa)	S_{22}^t	370	= S_{11}^t
Resistência à compressão longitudinal (MPa)	S_{11}^c	119,76 ± 11,6 (9,7%)	Ensaiado
Resistência à compressão transversal (MPa)	S_{22}^c	119,76	= S_{11}^c
Resistência ao cisalhamento (MPa)	S_{12}	16,48	Calculado

4.5.1. Calibração do modelo constitutivo do núcleo

A análise numérica realizada para a calibração do modelo constitutivo do núcleo foi referente ao ensaio de compressão. De modo a entender o comportamento obtido no ensaio utilizou-se três tipos análise: 1) linear quase-estática (Abaqus/Standard); 2) flambagem linear (Abaqus/Standard) e 3) não-linear em paralelo com análise explícita dinâmica (Abaqus/Explicit). Foram desenvolvidos estas análises devido à complexidade em se obter o comportamento numérico das células do honeycomb polimérico quando submetidas a cargas de compressão, pois uma análise linear quase-estática poderia não representar adequadamente o comportamento observado no ensaio experimental e isso estende-se para as análises de flambagem linear e não-linear, sendo, portanto, necessário desenvolver os três tipos. Para calibrar o modelo de flambagem não-linear foi implementado uma imperfeição para obtenção dos modos de flambagem no valor de 1,2. No que tange a modelagem dinâmica, afim de caracteriza-la como quase-estática optou-se um *time step* alto, assim o carregamento

dinâmico foi aplicado em um tempo necessário para a caracterização da queda após obtenção da máxima carga.

Em todas as simulações o modelo do núcleo foi *conventional shell*, com espessura de 0,3 mm. Para simular os pratos da máquina do ensaio de compressão, foi modelado nas faces superior e inferior elementos retangulares 3D do tipo *Discrete rigid*. Para redução do custo computacional, optou-se por um modelo de $\frac{1}{4}$ de simetria como pode ser observado na Figura 18. No contato entre o núcleo e as superfícies rígidas, foi considerado um coeficiente de fricção de 0,3, e comportamento normal (*normal behavior*) descrito como um contato rígido, ou *hard contact*.

A malha em todas as partes do ensaio de compressão foi descrita com elementos de casca S4R, de quatro nós, com interpolação de primeira ordem ou linear e com deformação finita de membrana e integração reduzida. Após a convergência de malha, foram utilizados 6392 elementos, sendo que o tamanho máximo de cada elemento foi de 1,5 mm.

Na Figura 18 também são apresentadas as condições de contorno do modelo. Na superfície rígida inferior ele está completamente engastado ($U_1=U_2=U_3=0$ e $UR_1=UR_2=UR_3=0$), enquanto na superfície superior é aplicado um deslocamento na direção U_3 e os demais deslocamentos e momentos são iguais a zero ($U_1=U_2=0$ e $UR_1=UR_2=UR_3=0$), simulando assim as condições aplicadas no ensaio. Para a extração dos resultados, foram monitorados os dados de força de reação e deslocamento no mesmo ponto de referência (RP) onde foi aplicado o deslocamento.

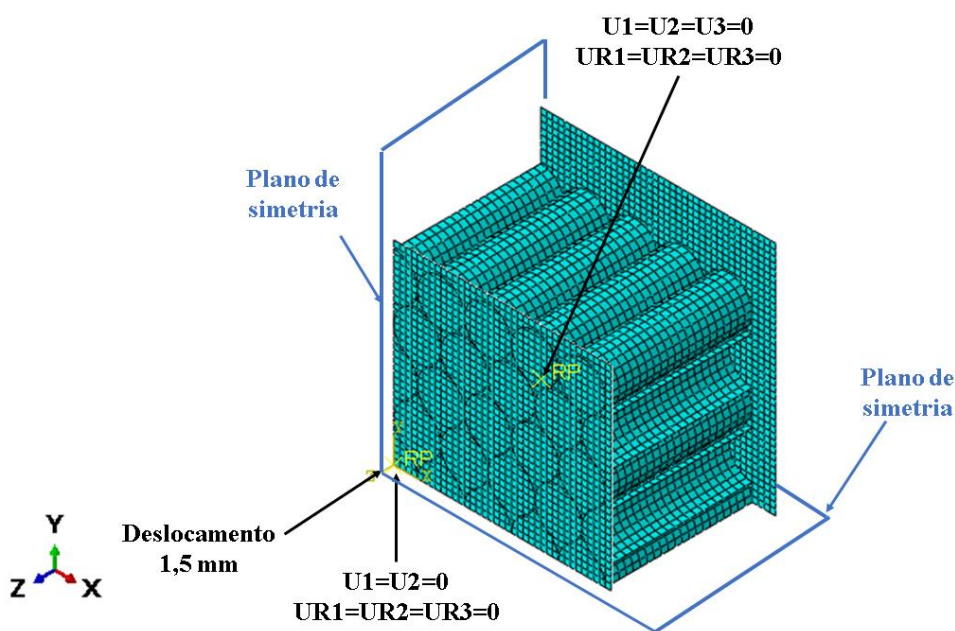


Figura 18 - Condições de contorno para simular a compressão do núcleo.

4.5.2. Análise numérica: Flexão do sanduíche

A fim de tornar o resultado da simulação numérica mais confiável, primeiramente realizou-se a comparação do modelo numérico com os resultados apresentados por GAO *et al.* (2020). Para esta comparação, obteve-se as condições geométricas e condições de contorno descritas na Figura 19, lembrando que conforme a referência consultada, permitindo a comparação dos resultados.

Após, realizou-se a comparação com os ensaios experimentais propostos no trabalho. Foram modelados numericamente as 4 condições descritas na Tabela 4, vide metodologia experimental. Os modelos foram implementados em elementos finitos de modo a prever o comportamento em flexão de 3 pontos.

Todos os modelos de flexão e de compressão foram calculados pelo Abaqus/Explicit e, para redução de custos computacionais, foram implementados com $\frac{1}{4}$ de simetria. O núcleo de *honeycomb* e as duas faces de material compósito foram modelados como *conventional shell* com parede de 0,3 mm para o núcleo e 1,15 mm para as faces. Já o indentador e o apoio foram modelados como superfícies analíticas rígidas (*Analytical rigid*).

No contato entre as faces e as superfícies analíticas rígidas foi considerado um coeficiente de fricção de 0,3, e comportamento normal (*normal behavior*) descrito como um contato rígido, ou *hard contact*. Já a simulação da adesão entre o núcleo e as faces foi modelada através de elementos de amarração do tipo *Tie*. A malha para o núcleo e as faces é do tipo S4R com um total de 4514 elementos quadriláteros lineares.

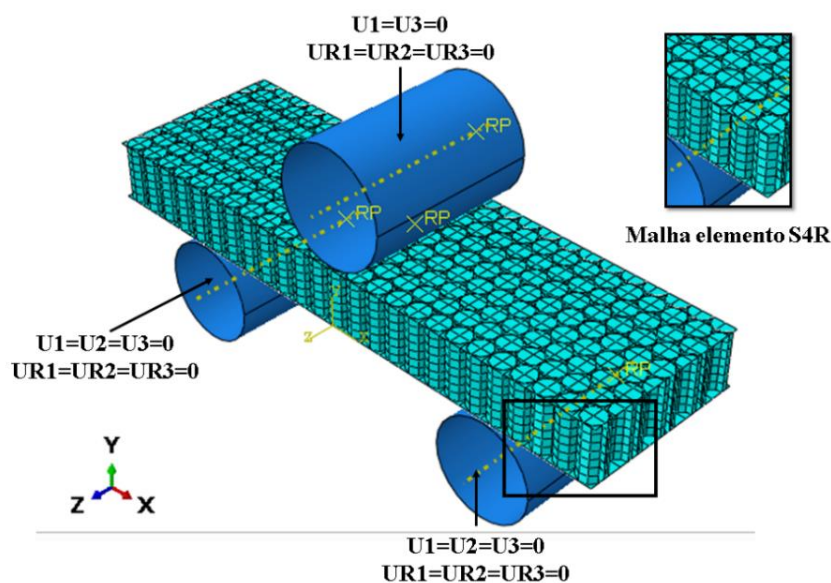


Figura 19 - Condições de contorno utilizadas, baseado em GAO *et al.* (2020).

Para determinar o tamanho mínimo de elemento em que não é observado grandes variações nos resultados, desenvolveu-se um estudo de convergência da malha. Este estudo tem por objetivo determinar o menor elemento que não gera modificações significativas no resultado da simulação, podendo-se obter ganhos computacionais, fundamental ao submeter uma condição de carregamento único em diversas simulações.

Para iniciar, deve-se encontrar um tamanho padrão de elemento inicial, e os demais ensaios serão simulados com variação no tamanho máximo de célula, o que tende a afastar o resultado até um ponto onde o tamanho da malha não interfere mais na resolução do problema, como pode ser visto na Figura 20. Ou seja, consegue-se praticamente a mesma resposta, porém com um elemento de 1,5 mm (melhor balanço entre custo computacional e acurácia).

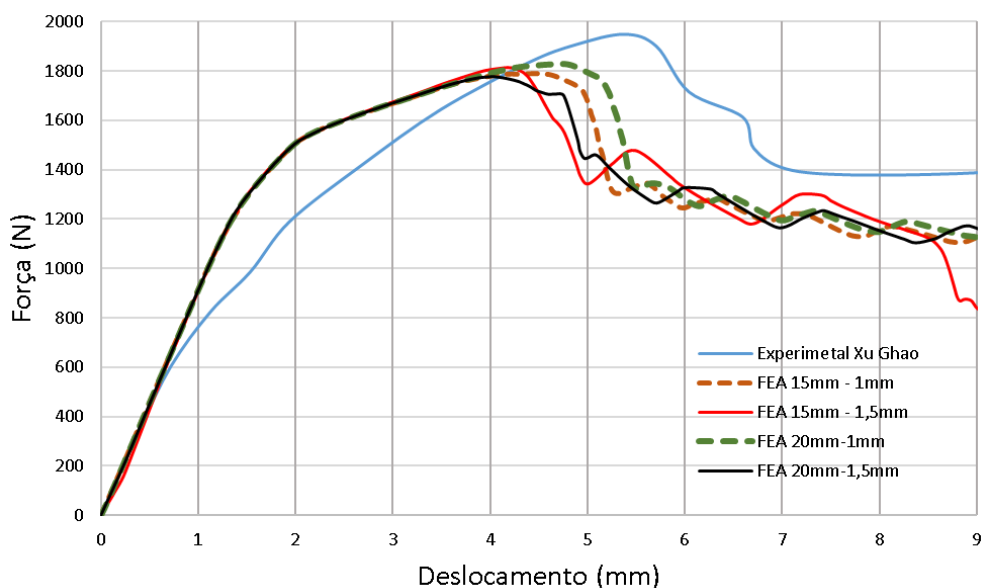


Figura 20 - Estudo de convergência da malha.

As condições de contorno, bem como a geometria dos modelos, podem ser visualizados na Figura 21. Vê-se que, no indentador, é aplicado um deslocamento em U2, e que o apoio se encontra fixo. Tratando-se de uma análise com $\frac{1}{4}$ de simetria, mais condições de contorno tiveram que ser implementadas nas duas faces onde há simetria. Vê-se ainda as duas condições de *span* e de espessura estudadas.

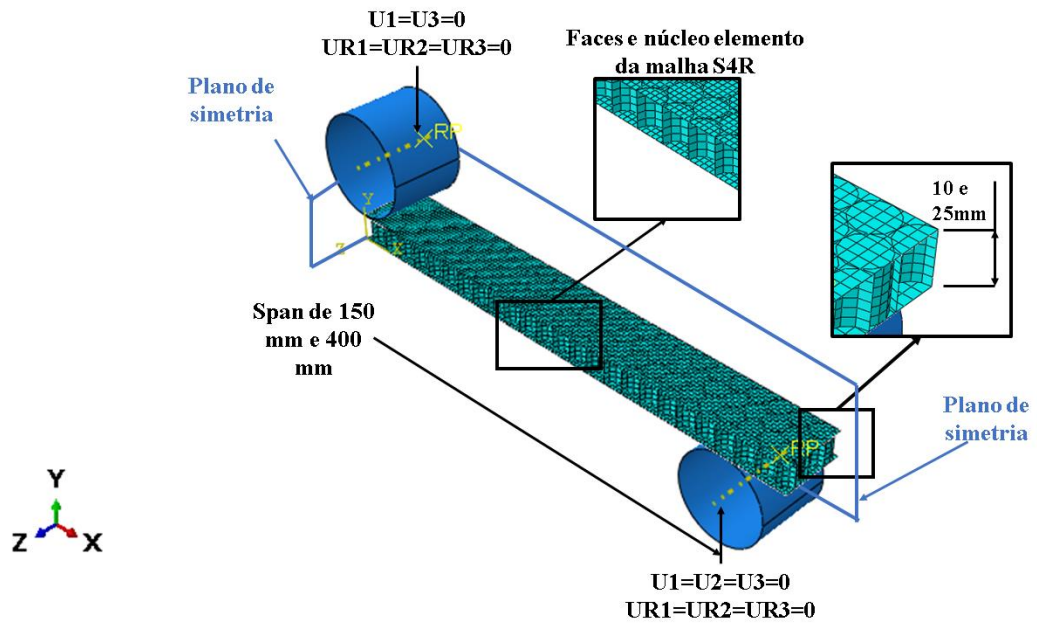


Figura 21- Condições de contorno e malha para simulação da flexão do sanduíche.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as respectivas discussões em consonância com os objetivos estipulados e as atividades propostas na metodologia, iniciando pela caracterização dos materiais até os resultados das simulações numéricas.

5.1. PROPRIEDADES DAS FACES

Primeiramente, para caracterizar o laminado do tecido de fibra de vidro tipo E e resina poliéster foi realizado o ensaio não-destrutivo da placa produzida por ultrassom do tipo C-Scan a fim de verificar a uniformidade distribuição da resina no compósito. A atenuação das ondas ultrassônicas no laminado ocorre através da perda de sinal no interior do material proveniente da reflexão e dispersão nas interfaces internas e da absorção das ondas pelo material, ou seja, quanto maior o valor da escala de amplitude maior será o teor de resina, e quanto menor for o teor da escala de amplitude maior o teor de fibras e vazios (NUNES, 2018).

A Figura 22 mostra os resultados da análise. Observa-se que a placa apresentou uma uniforme distribuição de resina pela cor mais azulada da placa e pela inexistência de poros que apareceriam como espaços em branco. o que representa uma boa homogeneidade de reforço e matriz nas faces.

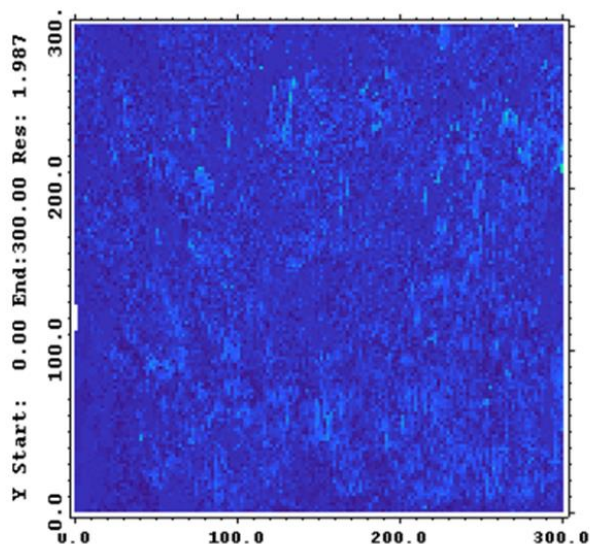


Figura 22 - Resultado da inspeção ultrassônica por C-Scan.

Para obtenção da porcentagem mássica e volumétrica dos constituintes do laminado utilizou-se o procedimento de degradação descrito na ASTM D3171 (2022). Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos deste processo. As amostras foram obtidas pelo processo

de corte em fresa CNC dos corpos de prova de tração e compressão, o que gerou amostras com massa não uniforme. Mesmo assim, ao se obter os dados de percentual mássico, as amostras apresentam COV's (Coeficiente de variação) de até 5,3%.

Tabela 6 - Resultados de teor dos constituintes conforme ASTM D3171 (2022) e densidade do laminado das faces.

Propriedades	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
%Mássico resina	30,78	1,632	5,3
%Mássico fibra	69,22		2,4
Densidade experimental (g/cm ³)	1,74	0,042	2,4
Densidade teórica (g/cm ³)	1,91	0,025	1,3
%Volumétrico resina	39,65	1,632	4,1
% Volumétrico fibra	51,12		3,2
%Volume de vazio (ASTM D2734)	9,23	1,190	12,9

Para obter a densidade volumétrica experimental pelo Método de Arquimedes, foram utilizadas 4 amostras que apresentaram um valor médio de 1,736 g/cm³, como apresentado na tabela. De posse desses dados, é possível calcular os percentuais volumétricos dos constituintes do laminado da face, lembrando que a mesma placa foi utilizada em todos os ensaios, garantindo que as propriedades levantadas sejam mais fidedignas aos laminados moldados no sanduíche.

Na Tabela 6 são apresentadas as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação encontrados de %volumétrica dos constituintes. Nota-se pela avaliação do coeficiente de variação que tanto para os valores de %volumétrica como para densidade, que há uma uniformidade razoável nas amostras e a % volumétrica de vazios encontra-se dentro dos limites definidos na literatura (HAGSTRAND; BONJOUR; MÅNSON, 2005). Todavia, o mesmo não ocorreu com o percentual volumétrico de vazios, indicando uma maior não-uniformidade na distribuição dos vazios no laminado fabricado. Uma justificativa para tal é que a resina já poderia estar se aproximando do fim de vida, já que os laminados foram moldados em torno de 3 meses após sua chegada no laboratório. Porém, este pequeno desvio no teor de vazios não inviabiliza o uso do laminado.

Em seguida, obteve-se as propriedades mecânicas da face. O primeiro ensaio realizado foi o de tração do laminado de forma a obter as constantes elásticas e resistência mecânica, dados que foram utilizados nas análises numéricas. Ao todo foram ensaiados 7 corpos de prova, denominados como CP1 ao CP7, contudo dois romperam na região de fixação da garra durante o ensaio, deste modo invalidando os seus resultados.

As curvas força vs. deslocamento do ensaio podem ser vistas na Figura 23a. Vê-se ao analisar as curvas uma variação na rigidez nas mesmas, justificado pela pequena espessura dos corpos e a dificuldade de fixação nos dispositivos da máquina de ensaio. Para obtenção das constantes elásticas, utilizou-se a curva tensão vs. deformação apresentadas na Figura 23b.

Os valores obtidos de resistência e de constantes elásticas a serem inseridas no modelo numérico estão compilados na Tabela 7, sendo apresentados o valor médio, o desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CoV). Considerando que o tecido de fibra de vidro utilizado é bidirecional, assumiu-se que os valores das constantes elásticas são as mesmas nestas direções.

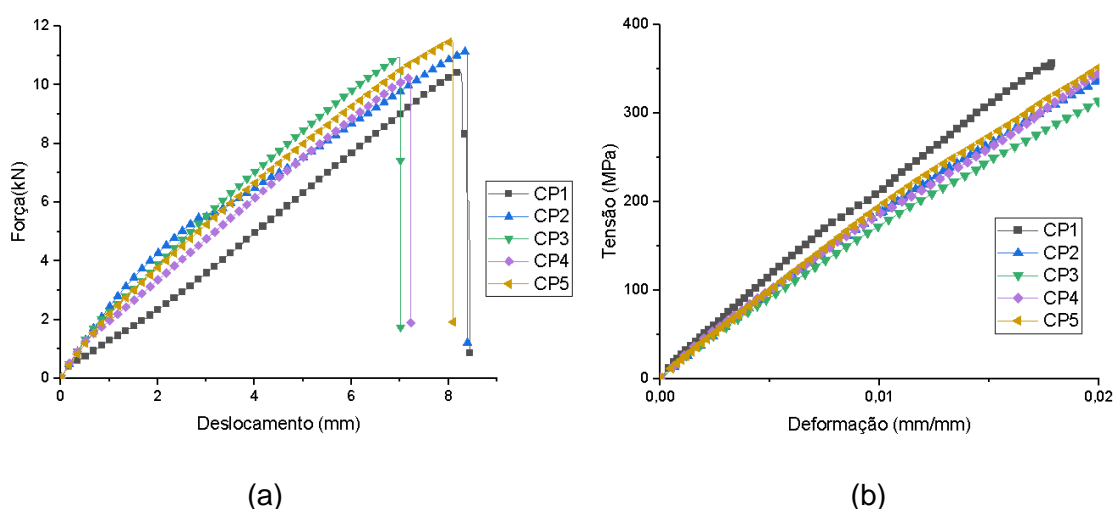


Figura 23 - Curvas de força vs. deslocamento (a) e tensão vs. deformação (b) em tração do laminado das faces.

A partir do ensaio de compressão CLC, foi possível obter o resultado para a resistência à compressão, também utilizada para análise numérica, sendo apresentado o valor médio, o DP e CoV na Tabela 7. Verifica-se que a resistência à compressão mostrou-se $\approx 67\%$ menor que a resistência à tração, portanto, o tipo de carregamento irá influir diretamente na máxima resistência do laminado e conseqüentemente na performance do painel sanduíche.

Tabela 7 - Constantes elásticas e resistência do laminado.

Propriedades	Símbolo	Média ± DP (CoV)	Condição
Módulo elástico longitudinal (MPa)	E_{11}	17401 ± 667 (3,8%)	Ensaiado
Módulo elástico transversal (MPa)	E_{22}	17401	Calculado
Coefficiente de Poisson	ν_{12}	0,25 ± 0,02 (8,0%)	Ensaiado
Modulo de cisalhamento no plano 1-2	G_{11}	1710	Calculado
Resistência à tração longitudinal (MPa)	S_{11}^t	370 ± 11 (3,0%)	Ensaiado
Resistência à tração transversal (MPa)	S_{22}^t	370	Calculado
Resistência à compressão longitudinal (MPa)	S_{11}^c	119,76 ± 11,6 (9,7%)	Ensaiado
Resistência à compressão transversal (MPa)	S_{22}^c	119,76	Calculado
Resistência ao cisalhamento (MPa)	S_{12}	16,48	Calculado

5.2. PROPRIEDADES E CALIBRAÇÃO NUMÉRICA DO NÚCLEO

A caracterização do núcleo *honeycomb* foi realizada através de ensaio de compressão do tipo *Flatwise*. Foi possível avaliar o comportamento da compressão do corpo de prova retangular em condição semelhante ao empregado em sanduíches em piso ou partes, cuja estrutura do *honeycomb* deve resistir.

O ensaio de compressão, como descrito na metodologia, atendeu a ASTM C365 (2016) e os corpos de prova na sua condição anterior e posterior ao ensaio podem ser vistos na Figura 24. Como é possível verificar, observa-se regiões danificadas em diversas regiões do núcleo. Apesar dos modos de falha serem complexos, é possível inferir algumas características específicas de flambagem nas paredes dos tubos que estabilizam o *honeycomb*. Assim, um dos principais modos de falha para estas amostras foi de flambagem, característico de cargas compressivas em paredes delgadas, como as estruturas tubulares do *honeycomb*. Tal comportamento está de acordo com LEE *et al.*, (2002) e ASTM INTERNATIONAL (2003b).



Figura 24 - Núcleos (a) não-deformados e (b) deformados em ensaio de compressão.

De modo a visualizar tal comportamento são apresentadas na Figura 25a as curvas do ensaio de compressão *Flatwise* para núcleo com espessura de 10 mm e na Figura 25b para núcleo de 25 mm. Os corpos de prova de 10 mm são representados por HC 10-01 a 10-06, enquanto os de 25 mm são representados por HC 25-01 a HC 25-06. É possível comprovar o comportamento em flambagem e seus três estágios, isto é, flambagem elástica (I), flambagem plástica (II) e dano generalizado (III), como relatado anteriormente por LEE *et al.* (2002).

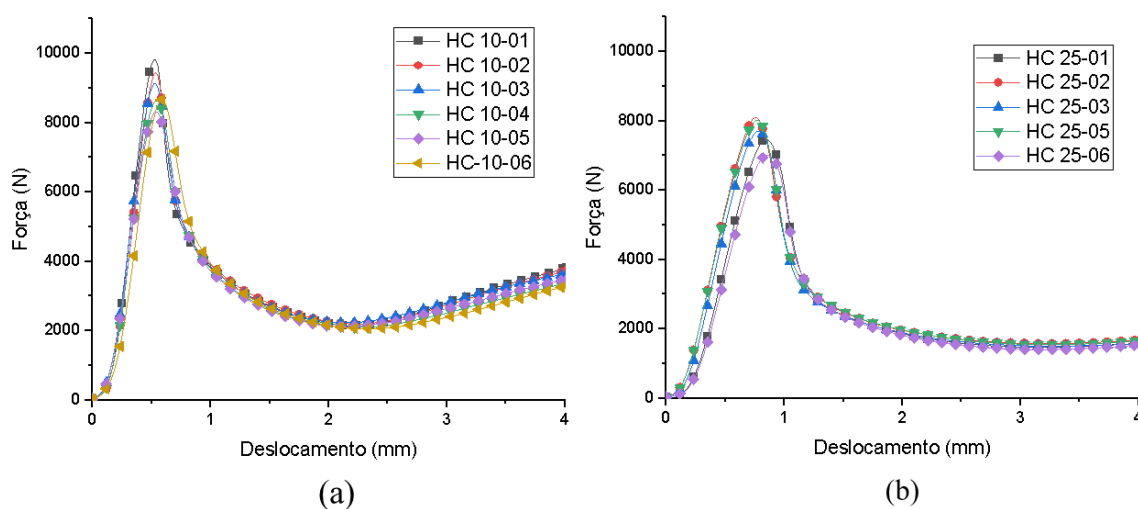


Figura 25 - Curvas de compressão flatwise para: (a) núcleo com espessura de 10 mm, e (b) núcleo com espessura de 25 mm.

Para que os resultados do ensaio de compressão pudessem ser comparados adequadamente, considerando as geometrias dos corpos de prova, converteu-se as curvas força vs. deslocamento em tensão vs. deformação onde a tensão foi obtida pela força de compressão sobre a área útil do corpo de prova (desprezando-se os vazios). Apresenta-se uma curva média para o núcleo de 10 mm e outra para o núcleo de 25 mm na Figura 26, onde o último suportou uma tensão máxima de 16,2 MPa, e o primeiro suportou 19,1 MPa, ou seja, uma diferença de 18%, condizente com o esperado para uma falha por flambagem, já que o núcleo de 25 mm por possuir uma altura maior possui uma tendência maior de sofrer este efeito.

Vê-se nas duas curvas também uma pequena diferença no módulo de compressão, *i.e.*, da inclinação no regime elástico de ambas as curvas, onde o núcleo de 10 mm apresentou um módulo de 72 MPa e o núcleo de 25 mm apresentou 63 MPa, o que representa uma pequena diferença de rigidez na região elástica.

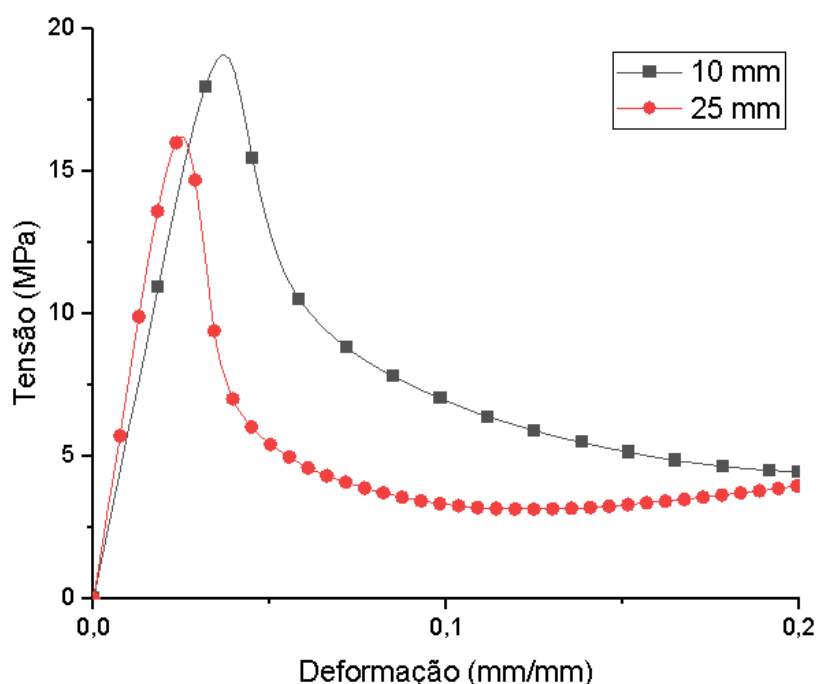


Figura 26– Curva tensão vs. deformação de compressão do núcleo.

Posteriormente, foi simulada a condição do ensaio de compressão no modelo numérico, que serviu como calibração para as análises com o sanduíche. Por se considerar que a falha apresentada nos ensaios experimentais se trata de uma combinação de comportamento elastoplástico com falha por flambagem, a calibração das curvas e

consequente apresentação dos resultados abrangem uma parte linear e outra não-linear até o ponto de máxima carga, porém não foi possível analisar e comparar a queda de carga após o ponto máximo, apresentada nos resultados experimentais, pois não foi implementado modelo de dano nas análises numéricas.

Na Figura 27 são apresentadas as curvas que resultaram da calibração em comparação com a curva média experimental. Na Figura 27(a), apresenta-se a condição para um núcleo com espessura de 10 mm, para a qual o modelo não-linear modelado com $\frac{1}{4}$ de simetria apresentou um comportamento elástico muito próximo ao experimental, principalmente em relação às cargas máximas (9453 N para o experimental e 9326 N para o numérico), enquanto o comportamento plástico mostrou-se menos concordante, o que pode ser atribuído às próprias limitações do modelo não-linear de flambagem.

Na Figura 27(b) são apresentadas as curvas para o núcleo de 25 mm, onde novamente o comportamento elástico foi similar, com o modelo apresentando uma inclinação levemente inferior ao experimental, mas as cargas máximas apresentaram uma maior diferença relativa que para o núcleo menos espesso, sendo 8112 N para o experimental e 8659 N para o numérico. Esta diferença é compatível com a formulação do modelo de flambagem já que, em um núcleo de maior espessura, a não-linearidade tende a ter uma influência maior. Mesmo assim, ressalta-se que o modelo foi considerado calibrado uma vez que foi capaz de prever com boa acurácia a carga máxima, não sendo prioridade o comportamento da curva após essa carga.

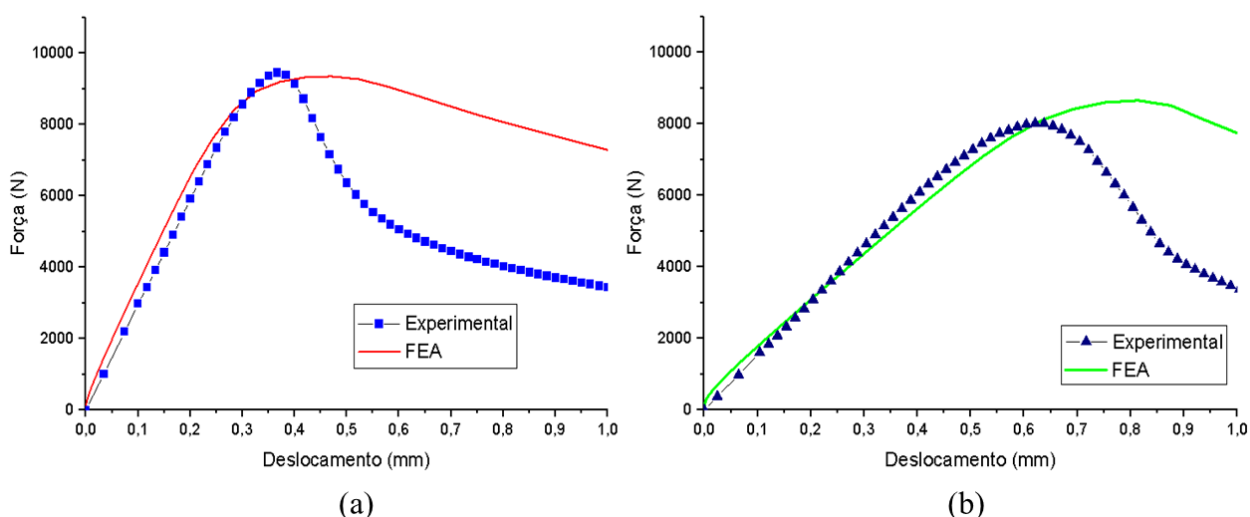


Figura 27 - Curvas comparativas entre compressão experimental e numérico para: (a) núcleo 10 mm, e (b) núcleo 25 mm.

5.3. ANÁLISES DOS PAINÉIS SANDUÍCHE

5.3.1. Estudo de caso: Comparação do modelo com a literatura

Ressalta-se que, no estudo das referências, a primeira abordagem efetuada foi a avaliação e aplicação do método desenvolvido por Gao *et al.* (2020). Verificou-se a partir deste a possibilidade de aprofundar o estudo dos painéis sanduíches. Este estudo preliminar permitiu obter informações fundamentais para o desenvolvimento dos modelos.

Como pode ser visualizado na Figura 28, a solução implícita com base nos dados possíveis de serem obtidos do trabalho de Gao *et al.* (2020) apresenta boa correlação com os resultados relatados pelos autores, principalmente considerando o comportamento elastoplástico deste modelo, além da falha por Hashin no material das faces. Assim, considerou-se possível dar continuidade a este trabalho.

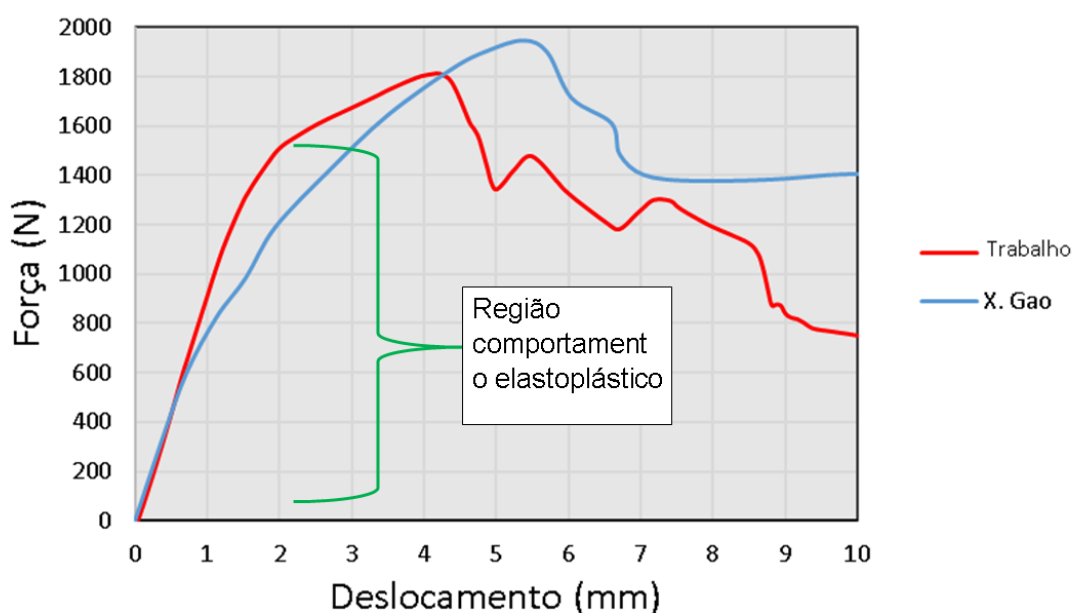


Figura 28- Comparação numérica do modelo com os resultados de Gao et al. (2020).

Inicialmente, os modelos gerados neste estudo utilizaram os parâmetros descritos por diferentes autores como GAO et al. e GATO (2020), para criar um modelo único. Para os ensaios de flexão em 3 pontos, os núcleos foram todos implementados com o modelo elastoplástico descrito por Gato (2020). Deste modo, obteve-se curvas para os sanduíches tanto com núcleo de 10 mm como de 25 mm, ambos utilizando a ferramenta explícita, que possui uma sensibilidade maior a respostas não-lineares devido ao seu comportamento dinâmico.

Também foram realizadas simulações com os dados do núcleo oriundos do ensaio de compressão. As curvas de comparação entre os modelos produzidos com o material da literatura e com o material real caracterizado neste trabalho em ensaios de compressão (sufixo EXP) estão na Figura 29 para os núcleos de 10 mm e 25 mm. Como para os modelos de flexão, não foi possível implementar o comportamento do dano de flambagem nos núcleos, há uma diferença entre os resultados dos modelos teóricos e experimental, onde o modelo teórico apresenta uma correção da flambagem pelos dados do modelo elastoplástico até o máximo.

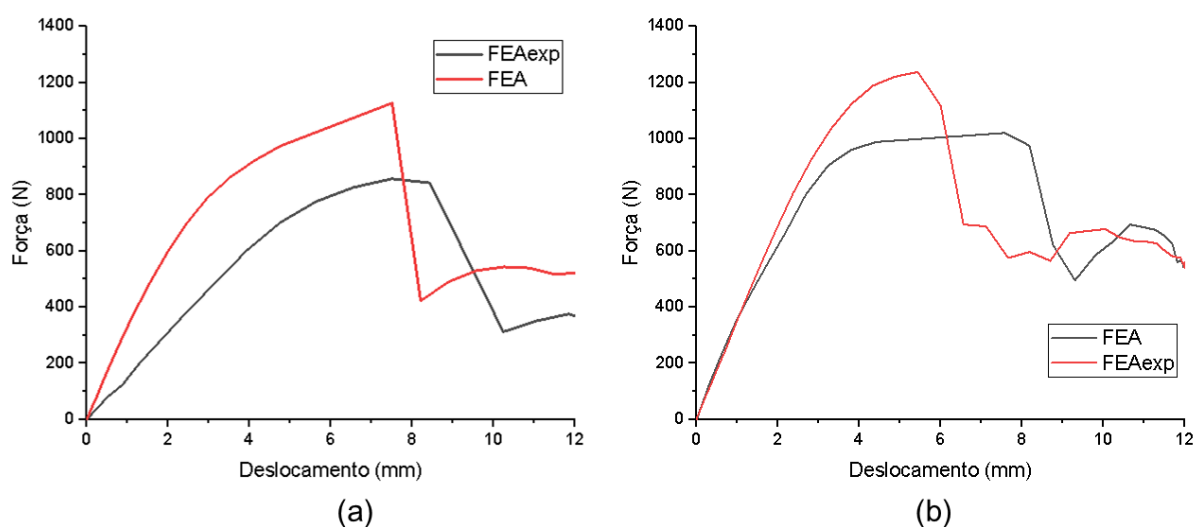


Figura 29 - Comparação dos resultados obtidos com núcleo teórico a partir dos dados de Gato (2020) e experimental: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.

5.3.2. Comportamento experimental da viga em flexão

Os gráficos oriundos dos ensaios segundo a ASTM C393 (2020) com *span* padrão de 150 mm e comprimento dos corpos de prova de 200 mm são apresentados nas Figura 30a-b, sendo os corpos de prova com núcleo de 10 mm representados por Sd10-01 a 03 e os corpos de prova com núcleo de 25 mm representados por Sd25-01 a 03. Na Figura 30a, para núcleo de 10 mm de espessura, praticamente todos os corpos de prova apresentam um comportamento não-linear desde a partir de 1 mm de deslocamento, o que se configura uma deformação plástica uma vez que nos ensaios de vigas curtas ocorre as tensões são maiores no núcleo, diferentemente do ensaio de viga longa onde espera-se que os esforços sejam mais concentrados nas faces. Este comportamento também pode ser atribuído à não-linearidade geométrica associada a grandes deformações devido ao formato curvo que a viga apresenta após o carregamento. Após um certo deslocamento ocorre uma falha catastrófica, onde a carga máxima média foi de 1112,3 N (desvio padrão de 112,7 N).

Considerando a norma ASTM C393 (2020), a tensão de cisalhamento no núcleo foi de 0,80 MPa e a máxima tensão nas faces foi de 53,11 MPa, portanto pela norma houve cisalhamento no núcleo. Baseado no equacionamento de (BITZER, 1997), a tensão de cisalhamento no núcleo pela distribuição dos esforços foi de 0,795 MPa e máxima tensão nas faces foi de 225 MPa, valores próximos ao informado pelo *datasheet* do núcleo.

Na Figura 30b são apresentados os resultados para um núcleo de 25 mm, onde vê-se curvas com um comportamento diferente do núcleo de 10 mm. Para uma espessura maior, há uma região com uma inclinação mais acentuada até que se atinge uma carga limite média de 968,47 N (desvio padrão de 29,9 N), onde ocorre uma espécie de platô até a falha final. Para estes corpos de prova considerando a norma ASTM C393 (2020), a tensão de cisalhamento no núcleo foi de 0,18 MPa e a máxima tensão nas faces foi de 32,3 MPa. Baseado em Bitzer (1997), a tensão de cisalhamento no núcleo foi de 0,345 MPa e máxima tensão na face de 96,11 MPa.

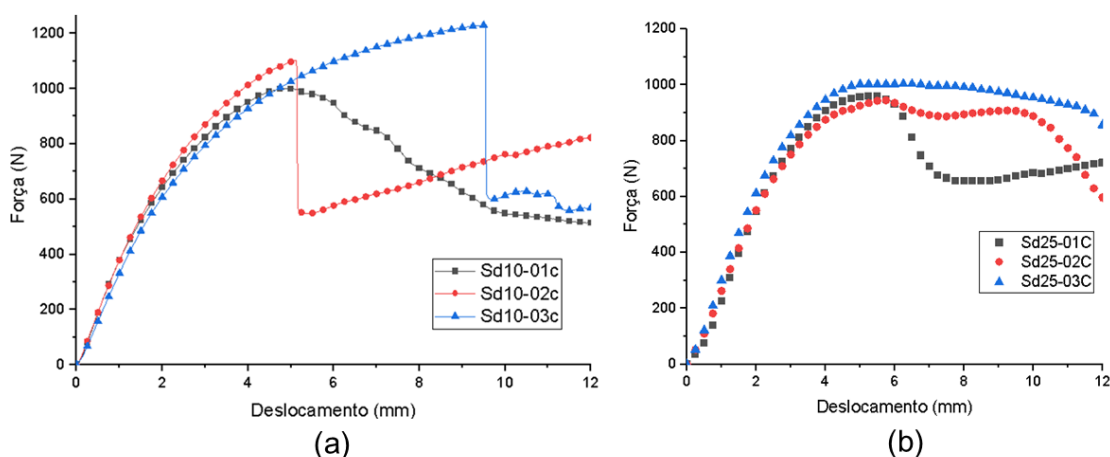


Figura 30 - Curvas força vs. deslocamento em flexão para span curto: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.

Nas condições de ensaio deste trabalho, para os corpos de prova com maior espessura (núcleo de 25 mm) o laminado da face que teria o papel de evitar que a carga de compressão se causa a flambagem das células não evitou este tipo de falha, já nos corpos de prova de menor espessura entende-se que maior parte do mecanismo de falha seja elastoplástico.

A análise *post-mortem* das amostras após o ensaio de flexão mostrou-se complexa. Na Figura 31(a) e (c) é possível verificar que os danos nos laminados das faces (superior e inferior) são características de painéis submetidos ao carregamento de flexão. Já na Figura

31(b) verifica-se a presença de falhas na interface, lembrando que a adesão entre as faces e o núcleo foi realizada no próprio processo de infusão a vácuo da resina de poliéster. Este comportamento é amplamente explicado por Fujita e He (2008), onde o processo de infusão fora considerado o fator causador da baixa adesão entre o núcleo e as faces do laminado impactando diretamente no desempenho em flexão dos corpos de prova.

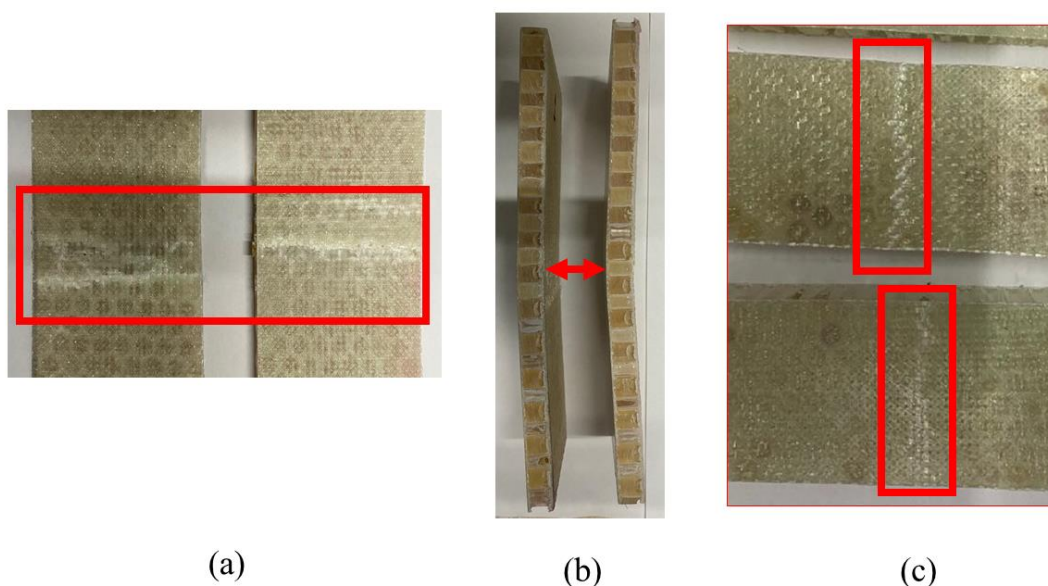


Figura 31 – Aspecto *post-mortem* das amostras após o ensaio de flexão com *span* curto: (a) falha na face superior do laminado código “F, A e T” ASTM C393 (2020), (b) deformação plástica do núcleo código “O, V e V” ASTM C393 (2020) e (c) falha nas faces do sanduíche “F, A e F” ASTM C393 (2020).

Além do ensaio considerando um *span* padrão da norma ASTM C393 (2020), foram confeccionados corpos de prova com um *span* mais longo, de 400 mm, para estudar melhor o comportamento em flexão do painel sanduíche. A apresenta os resultados do ensaio de flexão de viga longa conforme norma ASTM D7250 (2012) para dois corpos de prova, um com espessura de 10 mm (Sd10-1L) e outro com espessura de 25 mm (Sd25-L). Infelizmente não foi possível obter mais corpos-de-prova pois a resina, por estar apresentando um certo grau de cura no momento da moldagem (quando foi injetada pelo processo de infusão a vácuo), já não apresentava propriedades adequadas e o processo foi prejudicado, resultando em apenas dois corpos-de-prova úteis.

As curvas da Figura 32 geraram resultados coerentes. Para o núcleo *honeycomb* de 10 mm, a máxima carga de flexão foi de 192,7 N, a máxima tensão de flexão foi de 14,1 MPa e o módulo de flexão foi de 3353 MPa. Para o núcleo de 25 mm, a máxima carga de flexão foi de 521,1 N, a máxima tensão de flexão foi de 7,66 MPa e o módulo de flexão foi de 923,1

MPa. Também, considerando a norma ASTM C393 (2020), o valor da tensão de cisalhamento nos núcleos foram de 0,17 MPa e 0,20 MPa para os núcleos de 10 e 25 mm, respectivamente. Já a máxima tensão nas faces superior e inferior foi de 11,33 MPa e 34,8 MPa, respectivamente. Conforme Bitzer (1997), a carga de cisalhamento no núcleo foi de 0,01 e 0,03 MPa enquanto a máxima tensão na face foi de 620 e 265 MPa para os núcleos de 10 mm e 25 mm, respectivamente.

Ambas as curvas apresentaram um comportamento não-linear a partir da deflexão de aproximadamente 5 mm. A queda da carga após a carga máxima pode estar associada à falha da face superior ou da face inferior, ou com a interface núcleo/face. Todavia, ao comparar as curvas de flexão com *span* curto, os casos com *span* longo apresentaram um comportamento quase-linear para baixos carregamentos. Isso pode ser atribuído ao comportamento quase-linear até a falha do compósito das faces, uma vez que para o caso de viga longa há predominância do comportamento da face. Além disso, em ambos os casos a queda ocorreu de maneira abrupta em um primeiro momento e posteriormente gradativa, o que pode significar que, mesmo após a falha nas primeiras camadas do laminado da face superior, a face inferior e o núcleo ainda apresentam certa resistência.

Na Figura 33 são apresentadas imagens das falhas apresentadas nas amostras de *span* longo. Na Figura 33a é possível verificar na região demarcada o ponto de falha da face superior do corpo de prova, código “F, A e T” da norma ASTM C393 (2020), falha igual ao apresentado na Figura 33c. Na Figura 33b, a falha principal ocorreu na interface entre o laminado e a face do sanduíche, que pode ser oriunda da resina utilizada como matriz do compósito e adesivo entre os laminados e o núcleo, conforme código “D, A e T” da norma ASTM C393 (2020).

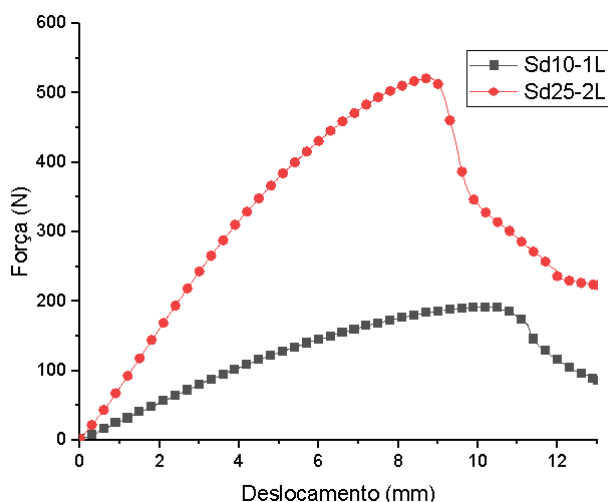


Figura 32 - Curvas força vs. deslocamento em flexão para painel sanduíche de *span* longo.

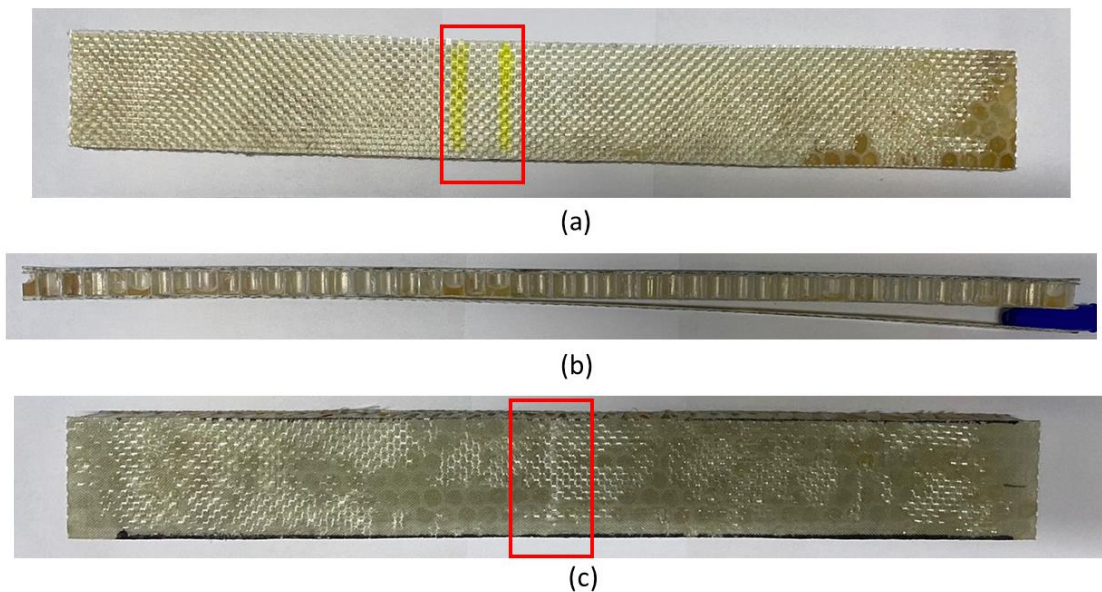


Figura 33 – Falhas apresentadas no ensaio de flexão com span longo conforme ASTM D7250 (2012).

5.3.3. Comparação numérico-experimental para flexão com *span* curto

O primeiro modelo numérico implementado para descrever o comportamento em flexão foi para simular o comportamento de painéis sanduíches em flexão de 3 pontos com distância entre apoios (*span*) padrão. A Figura 34 apresenta o resultado numérico para o painel com núcleo *honeycomb* de 10 mm e os resultados experimentais. Nota-se que o resultado numérico se aproxima das curvas obtidas dos ensaios experimentais para força vs. deslocamento do indentador.

Para a curva numérica (identificada por FEA), verifica-se que a força aumenta de maneira não-linear até 1166,8 N com o deslocamento do indentador de 7,5 mm. A análise numérica ajuda a entender o comportamento e os eventos da falha para este sanduíche com *span* curto. Em (I), há o início da deformação plástica do núcleo a 0,3 mm de deslocamento e 80,3 N, o que corrobora com a atribuição das falhas que acontece principalmente no núcleo nesta região. Em (II), há a falha do laminado superior pelo critério de Hashin por tensão e compressão da matriz. Por fim, a máxima força (III) ocorre por falha na face inferior. Considerando o valor de resistência ao cisalhamento (0,52 MPa) informado pelo fabricante do núcleo e que o valor calculado alcançou 0,523 MPa, entende-se que também ocorreu cisalhamento do núcleo *honeycomb*. Já pelo modelo analítico apresentado em Latour et al.

(2021), obtém-se um carregamento em flexão de 110 N a 655,8 N, deste modo as curvas obtidas nos experimentos mostram-se superiores aos cálculos analíticos.

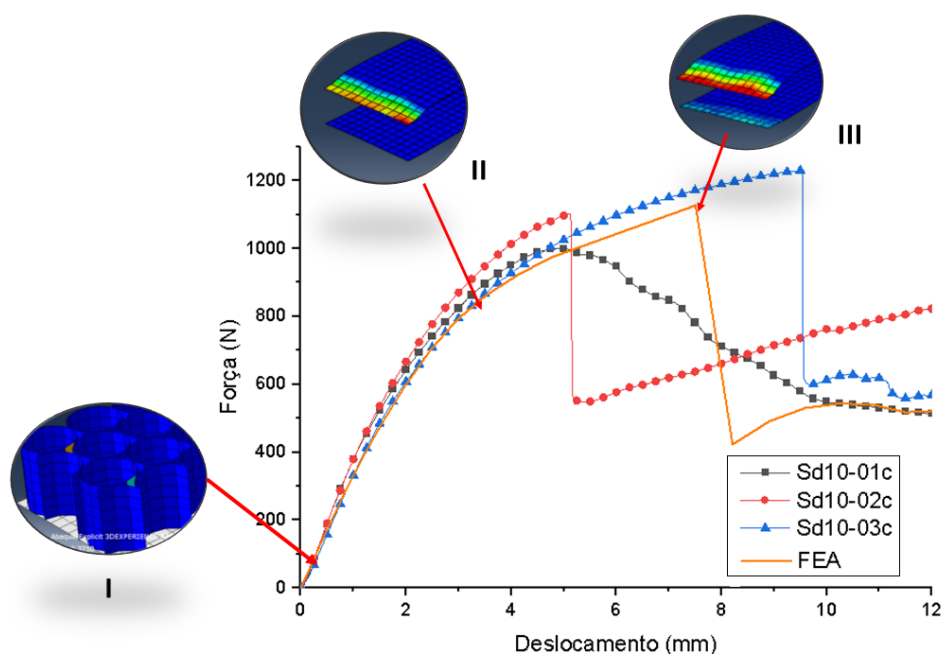


Figura 34 – Comparação FEA vs. Experimental para *span* curto e núcleo de 10 mm.

Na Figura 35, é possível visualizar os resultados para a análise numérica considerando a espessura do núcleo de 25 mm. O comportamento geral da curva numérica se assemelha às curvas experimentais. A carga máxima obtida foi de 1020,5 N, com deslocamento máximo no indentedor de 7,6 mm, valor muito próximo do corpo de prova Sd25-03C. A deformação plástica (I) se inicia para deslocamento de 1,73 mm e carga de 553 N. Em (II), é possível visualizar o início da falha do laminado superior, em específico falha na matriz, ao atingir a carga de 960,8 N e deslocamento de 3,8 mm. Em (III), ocorre falha no laminado inferior ao ser atingido a carga máxima da curva FEA. Após a queda da força, por se tratar de uma simulação explícita, ainda há uma oscilação no carregamento, todavia verifica-se que o material ainda resiste a um carregamento menor, o que também é coerente com as observações experimentais. Pelo modelo analítico apresentado em Latour et al. (2021), obtém-se um máximo carregamento de 260 N a 1554,8 N, portanto as curvas encontram-se dentro do valor analítico esperado.

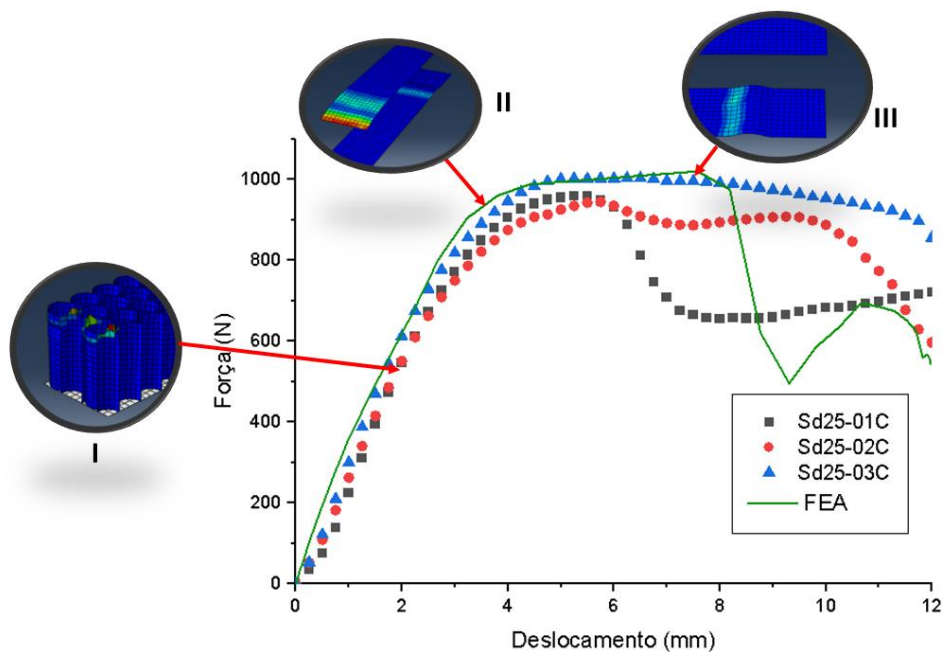


Figura 35 - Comparação FEA vs. Experimental para span curto e núcleo de 25 mm.

5.3.4. Comparação numérico-experimental para flexão com *span* longo

Ao realizar as análises em flexão com um *span* curto com dois núcleos *honeycomb* com espessuras diferentes, foi possível estudar a combinação de cargas atuantes. Com corpos de prova com *span* longo, a carga aplicada no indentador irá promover esforços de flexão maiores sem aumentar o esforço cortante quando comparado ao *span* curto.

As curvas obtidas para o núcleo com 10 mm e 25 mm são apresentadas na Figura 36. Na Figura 36a, pelo momento de inércia de área, a curva apresentou uma curvatura na região não-linear até a carga máxima de 216,8 N e deslocamento de 13 mm, ligeiramente superior ao experimental. A diferença percentual entre os picos de carregamento foi de 11,11%. A deformação plástica (I) no núcleo inicia-se com 92 N e deslocamento de 2,57 mm, já a falha no laminado ocorre acima dos 13 mm de deslocamento e próximo a 300 N. Já na Figura 36b, a curva obtida com a análise numérica em elementos finitos apresentou um valor próximo na força máxima, ou seja, uma diferença percentual de 3,9%, contudo, observou-se uma discrepância na região não-linear até que se atingisse a força máxima no indentador. No modelo, a deformação plástica do núcleo se inicia próximo a 55 N e deslocamento de 0,47 mm (I), já a primeira falha em uma das faces (II) ocorre por falha compressão na matriz, próximo a 454 N e deslocamento de 9,15 mm. Notou-se também que tanto o corpo de prova de 10 mm como o de 25 mm apresentaram um certo grau de deformação plástica no núcleo, mesmo sendo amplificados os esforços nas faces com o aumento do *span*.

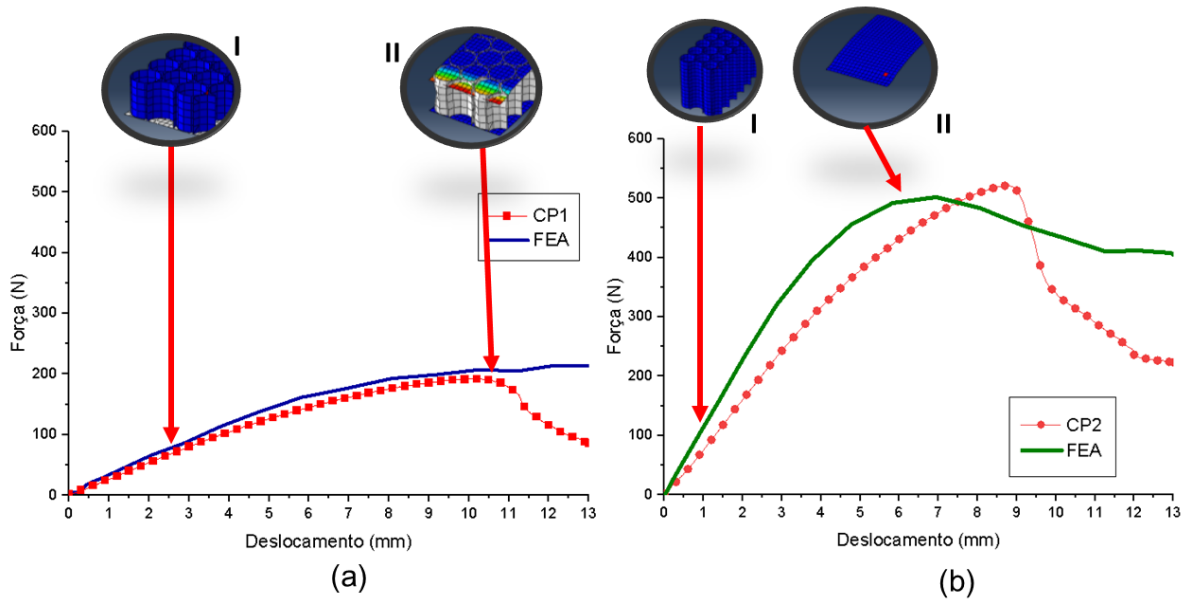


Figura 36 - Comparativo entre resultados numérico e experimental para corpos de prova com *span* longo: (a) núcleo de 10 mm e (b) núcleo de 25 mm.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo numérico de um painel sanduíche com faces de compósito de fibra de vidro tipo E combinada com resina poliéster e núcleo de *honeycomb* de estrutura de células circulares em polipropileno. Após a realização das atividades descritas na metodologia e diante dos resultados obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- A caracterização mecânica das faces foi realizada por ensaios mecânicos (tração e compressão), e foram realizadas análises de ultrassom e de teor volumétrico dos constituintes. O volume de vazios foi um de aproximadamente 9,23 %, mesmo assim o ultrassom indicou uma distribuição uniforme da resina pelo laminado.
- Verificou-se que a observância dos parâmetros durante o processo de fabricação dos do laminado das faces e dos painéis sanduíche e a capacitação do operador são fundamentais para se obter as propriedades satisfatórias para aplicação.
- Com o ensaio de compressão do *honeycomb* isolado, pode-se verificar a complexidade dos modos de falha apresentados. Inicialmente considerou-se que as células apresentariam apenas comportamento elastoplástico, contudo após o ensaio e primeiras interações no *software* de elementos finitos, viu-se que as células circulares possivelmente apresentam falha por flambagem, o que reduziu diretamente a capacidade do núcleo em cargas de compressão, especialmente o núcleo com espessura de 25 mm. Mesmo assim, conseguiu-se a partir de um modelo não-linear em elementos finitos obter uma curva com comportamento próximo ao experimental, sobretudo até a carga máxima de compressão (9453 N para o experimental de 10 mm, 9326 N para o numérico do núcleo de 10 mm, 8112 N para o experimental de 25 mm e 8659 N para o numérico do núcleo de 25 mm).
- No que tange aos ensaios realizados, eles foram de suma importância para a implementação dos modelos numéricos. A partir das observações experimentais, foi possível modelar em elementos finitos o comportamento de modo a se obter um modelo mais fidedigno. O ensaio de flexão com um *span* padrão apresentou cargas máximas maiores que o ensaio com *span* longo, cerca de 42% maiores, como esperado pela formulação teórica. Contudo, ao se analisar a grandeza das forças envolvidas nas quatro condições, percebe-se que os corpos de prova com maior espessura tiveram maior carga no indentador que os corpos de prova com 10 mm, e

que os corpos de prova com *span* longo podem ter sofrido menor interferência do fenômeno da flambagem.

- Por fim, foram criadas aos menos quatro condições, espessura de núcleo de 10 mm e 25 mm e *span* de 150 mm e 450 mm, com o modelo numérico que puderam, com certa precisão, descrever os fenômenos observados experimentalmente. Os modelos com as propriedades do núcleo oriundas da Gato (2020) acabaram tendo desempenho superior, já que a provável falha por flambagem não foi implementada no modelo de flexão pura e os valores utilizados, de certa maneira, compensaram as falhas por flambagem.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o trabalho realizado, pode-se elencar as seguintes sugestões para novos trabalhos:

- Estudo paramétrico da influência dos parâmetros geométricos dos painéis sanduíche no seu comportamento mecânico;
- Elaboração de rotinas de otimização para definição de parâmetros ideais em painéis sanduíches com núcleo *honeycomb* de polipropileno.
- Estudo detalhado dos diversos mecanismos de falha da estrutura celular de núcleos de *honeycomb* de polipropileno.
- Estudo comparativo de painéis sanduíche confeccionados por diferentes processos com vistas a maximizar a relação rigidez/custo para aplicações rodoviárias.

8. REFERÊNCIAS

AMIR, F. A.; OTHMAN, A. R.; AKIL, H. Md. Damage characterization of polypropylene honeycomb sandwich panels subjected to low-velocity impact. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 2013, n. 129864, p. 10, 2013. DOI: 10.1155/2013/129864.

ASTM C365/C365M. Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. **Annual Book of ASTM Standards**, [S. l.], v. i, p. 2–4, 2016. DOI: 10.1520/C0365.

ASTM C393/C393M. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. *In*: **ASTM Volume 15.03: Space Simulation; Aerospace And Aircraft; Composite Materials**. West Conshohocken. p. 8. DOI: 10.1520/C0393_C0393M-20.

ASTM D2734. Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. **Annual Book of ASTM Standards**, [S. l.], v. 08, n. Reapproved, p. 3–5, 2016. DOI: 10.1520/D2734-16.2.

ASTM D3039/D3039M. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. **Annual Book of ASTM Standards**, [S. l.], p. 1–13, 2014. DOI: 10.1520/D3039.

ASTM D3171. **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials****Annual Book of ASTM Standards**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1520/D3171-22.

ASTM D6641. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. **Annual Book of ASTM Standards**, [S. l.], v. i, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1520/D6641.

ASTM D792-20. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. **Annual Book of ASTM Standards**, [S. l.], p. 6, 2020. DOI: 10.1520/D0792-20.2.

BARBERO, E. J. **Introduction to Composite Materials Design 2nd Edition**. Boca Raton.

BARBERO, E. J. **Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS; Second Edition**. Segunda ed. Boca Raton.

BARBERO, E. J. **Finite element analysis of composite materials using Abaqus (2013)**. Boca Raton.

BARBERO, E. J.; COSSO, F. A.; ROMAN, R.; WEADON, T. L. Determination of material parameters for Abaqus progressive damage analysis of E-glass epoxy laminates. **Composites Part B: Engineering**, [S. l.], v. 46, p. 211–220, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.09.069. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.069>.

BITZER, T. **Honeycomb Technology**. First ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. DOI: 10.1007/978-94-011-5856-5. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-5856-5>.

CHEN, Y.; CHENG, X.; FU, K.; YE, L. International Journal of Mechanical Sciences Failure characteristics and multi-objective optimisation of CF / EP composite sandwich panels under edgewise crushing. *[S. l.]*, v. 183, n. May, 2020. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105829.

ASTM D7250/D7250M. Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness. **Annual Book of ASTM Standards**, *[S. l.]*, v. i, n. Reapproved, p. 1–8, 2010. DOI: 10.1520/D7250.

DAS, M.; BARUT, A.; MADENCI, E.; AMBUR, D. R. Complete stress field in sandwich panels with a new triangular finite element of single-layer theory. *[S. l.]*, v. 194, p. 2969–3005, 2005. DOI: 10.1016/j.cma.2004.07.033.

DAVIES, J. M. Lightweight Sandwich construction. **World**, *[S. l.]*, v. 3, n. February 2004, p. 279–305, 2004. Disponível em: [file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley Desktop/Edited by Edited by/World/\[Darren_Swanson\]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui\(BookSee.org\).pdf](file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley%20Desktop/Edited%20by%20Edited%20by/World/[Darren_Swanson]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui(BookSee.org).pdf).

E-COMPOSITES. **Catálogo núcleo Honeycomb em polipropileno**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.e-composites.com.br/>.

EMBRAPOL. **Catálogo resina poliéster Alpha 163 - Infusão**. Jandira-SP. Disponível em: <http://embrapol.com.br/website/>.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2008. v. 45 DOI: 10.5860/choice.45-3218.

GAO, X.; ZHANG, M.; HUANG, Y.; SANG, L.; HOU, W. Experimental and numerical investigation of thermoplastic honeycomb sandwich structures under bending loading. **Thin-Walled Structures**, *[S. l.]*, v. 155, n. June, p. 106961, 2020. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106961. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106961>.

GATO, L. B. L. ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PAINÉIS. **Dissertação para obtenção do título de mestre.**, *[S. l.]*, n. Universidade Federal de São João Del-Rei, 2020.

HA, K. H. Finite element analysis of sandwich an overview. **Computers & Structures**, *[S. l.]*, v. 37, n. 4, p. 397–403, 1990.

HAGSTRAND, P. O.; BONJOUR, F.; MÅNSON, J. A. E. The influence of void content on the

structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 705–714, 2005. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.03.007.

HASHIN, Z.; ROTEM, A. A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials. **Journal of Composite Materials**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 448–464, 1973. DOI: 10.1177/002199837300700404.

KRISHNA, P. S.; VEMULA, A. M.; AHAMED, P. U.; JANI, S. P. Bending analysis of honeycomb sandwich panels with metallic face sheets and GFRP core. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 60, p. 1537–1547, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.050.

LAKES, R. S. **Cellular solids**. **Journal of Biomechanics**, 1989. DOI: 10.1016/0021-9290(89)90056-0.

LATOUR, M.; D'ANIELLO, M.; LANDOLFO, R.; RIZZANO, G. Experimental and numerical study of double-skin aluminium foam sandwich panels in bending. **Thin-Walled Structures**, [S. l.], v. 164, n. January, p. 107894, 2021. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107894. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107894>.

LEE, H. S.; HONG, S. H.; LEE, J. R.; KIM, Y. K. Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperatures. **Journal of Materials Science**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 1265–1272, 2002. DOI: 10.1023/A:1014344228141.

LEI, Hongshuai; YAO, Kai; WEN, Weibin; ZHOU, Hao; FANG, Daining. Experimental and numerical investigation on the crushing behavior of sandwich composite under edgewise compression loading. **Composites Part B**, [S. l.], v. 94, p. 34–44, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.049. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.049>.

MANALO, A. C.; ARAVINTHAN, T.; KARUNASENA, W.; ISLAM, M. M. Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions. **Composite Structures**, [S. l.], v. 92, n. 4, p. 984–995, 2010. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.09.046>.

NOLAN, Grace. ThermHex launches new honeycomb core for “Class A” surface quality. **Interplast Insights**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://interplasinsights.com/plastics-materials/thermhex-launches-new-honeycomb-core-for-“class-a”-surface-q/>.

NUNES, S. G. **PROCESSAMENTO POR INFUSÃO A VÁCUO DE COMPÓSITOS ESPESSOS ARAMIDA/EPÓXI E ANÁLISE DO DESEMPENHO SOB IMPACTO**. 2018.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/180659>.

PINA, Heitor Lobato Girao. O Metodo Dos Elementos Finitos. **Tecnica (Lisbon)**, [S. l.], v. 51, n. 437, p. 241–248, 1976.

PLASCORE. PP honeycomb. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: http://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_core_documentation/PP_Honeycomb.pdf.

RATTAN, R.; BIJWE, J.; FAHIM, M. Optimization of weave of carbon fabric for best combination of strength and tribo-performance of polyetherimide composites in adhesive wear mode. **Wear**, [S. l.], v. 264, n. 1–2, p. 96–105, 2008. DOI: 10.1016/j.wear.2007.02.001.

RICCIO, A.; RAIMONDO, A.; SELBITTO, A.; ACANFORA, V.; ZARRELLI, M. Multifunctional Polypropylene Core for Aerospace Sandwich Composite Panels. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 167, p. 64–70, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.670.

SEZGIN, F. E.; TANOGLU, M.; EGILMEZ, O. O.; DONMEZ, C. Mechanical Behavior of Polypropylene-based Honeycomb-Core Composite Sandwich Structures. [S. l.], v. 29, n. 10, p. 1569–1579, 2010. DOI: 10.1177/0731684409341674.

XIA, F.; DURANDET, Y.; TAN, P. J.; RUAN, D. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores. **Thin-Walled Structures**, [S. l.], v. 179, n. June, 2022. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109723.

YAP, Y. L.; YEONG, W. Y. Shape recovery effect of 3D printed polymeric honeycomb: This paper studies the elastic behaviour of different honeycomb structures produced by PolyJet technology. **Virtual and Physical Prototyping**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 91–99, 2015. DOI: 10.1080/17452759.2015.1060350.

ZHANG, J.; ZHU, Y.; YUAN, H.; HUANG, W. Thin-Walled Structures Failure behavior of sandwich beams with glass fiber-reinforced epoxy / aluminum laminates face-sheets and aluminum honeycomb core under three-point bending. **Thin-Walled Structures**, [S. l.], v. 177, n. May, p. 109476, 2022. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109476. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109476>.