

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais
PPGEM

**EFEITO DO MATERIAL DA FACE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PAINÉIS SANDUÍCHE PARA APLICAÇÃO RODOVIÁRIA**

Daniel Fernando Garbin

Dissertação para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre

2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais
PPGEM

**EFEITO DO MATERIAL DA FACE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PAINÉIS SANDUÍCHE PARA APLICAÇÃO RODOVIÁRIA**

Daniel Fernando Garbin

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre

2017

DANIEL FERNANDO GARBIN

**EFEITO DO MATERIAL DA FACE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PAINÉIS SANDUÍCHE PARA APLICAÇÃO RODOVIÁRIA**

Dissertação para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gerson Marinucci

Prof. Dr. Heitor Luiz Ornaghi Junior

Prof. Dr. Marcos Daniel de Freitas Awruch

Porto Alegre, Fevereiro de 2017.

Dedico este trabalho à minha noiva, à minha família e aos meus amigos, pelo apoio e compreensão demonstrados durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM da UFRGS pela oportunidade de realizar meu mestrado em uma instituição consagrada e reconhecida nesta área.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Campos Amico, e aos amigos do GCOMP (Grupo de Compósitos), em especial à Fernanda Watte, Laís Vasconcelos, Maikson Tonatto e Rafael Trindade pelos ensinamentos, dedicação, paciência e confiança depositados na elaboração deste trabalho e pelo auxílio na confecção de corpos de prova e realização de ensaios.

À Randon SA e aos amigos que nela trabalham, em especial às áreas de Eng. de Produto, Eng. de Processos, Eng. de Protótipos e Laboratório da Qualidade, e que proporcionaram a confecção de corpos de prova e execução de ensaios.

“Empreender é como saltar de um penhasco e construir um avião durante a queda.”

Reid Hoffman

RESUMO

Painéis sanduíche são largamente utilizadas em diversas aplicações de engenharia e o estudo de suas propriedades é fundamental para a ampliação de sua utilização. Neste trabalho, foram estudados painéis sanduíche com núcleo de poliuretano e faces de fibra de vidro fabricados pelo processo de laminação contínua. Na primeira configuração, as faces do painel foram fabricadas com manta de fibra de vidro e resina poliéster, com 39% de teor de vidro em massa e espessura de 1,9 mm. Na segunda configuração, as faces do painel foram fabricadas com tecido de fibra de vidro e resina poliéster, com 54% de teor de vidro em massa e espessura de 1,2 mm. Realizou-se o cálculo das propriedades mecânicas de cada compósito no programa MECH-Gcomp. As propriedades do núcleo foram retiradas, inicialmente, da literatura. Então, foi possível realizar a avaliação dos painéis pelo método dos elementos finitos utilizando elementos sólidos, comparando o comportamento dos dois tipos de painéis em relação aos carregamentos de compressão de núcleo, de compressão longitudinal e de flexão. Foram realizados ensaios nas faces isoladas e também nos painéis sanduíche completos. Para as faces, os ensaios foram de teor mássico de fibra de vidro, tração, compressão e cisalhamento losipescu, conforme as normas ASTM D5630, D3039/D3039M, D6641/D6641M e D7078/D7078M, respectivamente. Já para os painéis sanduíche, foram realizados os ensaios de compressão de núcleo, compressão longitudinal (*edgewise*) e cisalhamento do núcleo utilizando flexão, conforme as normas ASTM C365/C365M, C364/C364M e C393/C393M, respectivamente. Após os ensaios, foram calibrados os modelos do MEF, permitindo que os mesmos possam calcular outras configurações similares de painel sanduíche. Foi utilizado o programa *Autodesk Simulation Composite Design* para realizar a validação do ensaio de cisalhamento do núcleo. Concluiu-se que a análise de elementos finitos foi confiável em representar de forma realista o comportamento dos painéis sanduíche e a redução na espessura das faces do painel pode ser compensada com o aumento da sua resistência mecânica e rigidez por meio do aumento no teor mássico de reforço e trabalhando com a orientação do mesmo.

Palavras-chave: Compósitos; painéis sanduíche; fibra de vidro; manta e tecido; resina poliéster; espuma de poliuretano.

ABSTRACT

Sandwich panels are widely used in a variety of engineering applications and the study of their properties is fundamental for the expansion of their use. In this work, we studied sandwich panels with polyurethane core and fiberglass faces manufactured by the continuous lamination process. In the first configuration, the panel faces were made of fiberglass and polyester resin, with 39% glass content by mass and 1.9 mm thickness. In the second configuration, the panel faces were fabricated from fiberglass fabric and polyester resin, with 54% glass content by mass and 1.2 mm thickness. The mechanical properties of each composite were calculated in the MECH-Gcomp software. The properties of the core were initially taken from the literature. Then, it was possible to evaluate the panels by the finite element method using solid elements, comparing the behavior of the two types of panels in relation to the core compression loads, edgewise compression and bending. Tests were performed on the faces and also on the complete sandwich panels. For the faces, the tests were fiberglass mass content, tensile, compression and Iosipescu shear, according to ASTM D5630, D3039/D3039M, D6641/D6641M and D7078/D7078M, respectively. For sandwich panels, core compression, edgewise compression and core shear using bending tests were performed according to ASTM C365/C365M, C364/C364M and C393/C393M, respectively. After the tests, the FEM models were calibrated, allowing them to calculate other similar sandwich panel configurations. It was used Autodesk Simulation Composite Design software to validate the core shear test. It was concluded that the analysis of finite elements was reliable in realistically representing the behavior of the sandwich panels and the reduction in the thickness of the panel faces can be compensated with the increase of its mechanical resistance and stiffness by increasing the mass content of reinforcement and working with the orientation of the same.

Keywords: Composites; sandwich panels; glass fiber; mat and fabric; polyester resin; polyurethane foam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos com relação ao tipo de reforço utilizado (adaptado de Ventura, 2009).	18
Figura 2 – Ilustração de alguns tipos de reforços utilizados em materiais compósitos (adaptado de Ventura, 2009).....	19
Figura 3 – Ilustração de tipos comuns de tecidos tramados para a utilização em compósitos (adaptado de Rattan <i>et al.</i> , 2008).....	22
Figura 4 – Classificação geral dos polímeros (adaptado de Barbero, 2010).....	23
Figura 5 – Aplicações diversas do poliuretano.	27
Figura 6 – Variação do módulo de elasticidade, de cisalhamento, resistência à tração e à compressão a 10% de deformação em relação a densidade do PU (adaptado de Torreira, 1980).....	29
Figura 7 – Principais tipos de núcleo utilizados em painéis sanduíche (adaptada de Davies,2001).	30
Figura 8 – Painel sanduíche completo e as faces isoladas (adaptada de: Vinson, 1999).	31
Figura 9 – Painel deformado devido à aplicação de carga vertical distribuída.	32
Figura 10 – Diagrama de esforço cortante (a) e de momento fletor (b) resultantes no painel.....	32
Figura 11 – Exemplo de análise pelo MEF da estrutura treliçada de um painel sanduíche (adaptado de Jiang <i>et al.</i> , 2016).	35
Figura 12 – Exemplo de análise de uma viga de um painel sanduíche utilizando o MEF (Ansari <i>et al.</i> , 2015).	35
Figura 13 – Elemento de estado plano de tensões triangular linear (a), retangular linear (b) e triangular parabólico (c) (adaptados de: Azevedo, 2003 e Bhavikatti, 2005). ...	36
Figura 14 – Exemplo de elemento de placa (Matthews, 2000).....	37
Figura 15 – Exemplos de elemento sólido tetraédrico linear (a), hexaédrico linear (b) e tetraédrico parabólico (c) (Adaptado de Fish, 2007).	38
Figura 16 – Carroceria termicamente isolada para transporte de alimentos perecíveis.	39
Figura 17 – Distribuição de carga em uma carroceria termicamente isolada.	40
Figura 18 – Processo de laminação contínua para compósito fabricado com manta.	41

Figura 19 – Equipamento utilizado para a montagem dos painéis utilizados para a confecção dos corpos de prova.....	42
Figura 20 – Equipamento utilizado para injeção de PU.....	43
Figura 21 – Amostras cortadas para ensaio.....	43
Figura 22 – Mufla utilizada para determinação do teor de reforço com relação a massa em compósitos (a) e vista das amostras (b).....	44
Figura 23 – Detalhe do corpo-de-prova utilizado em ensaio de tração (a) e fixação nas garras (b).....	45
Figura 24 – Amostra utilizada para ensaio de compressão (a) e de cisalhamento (b) dos compósitos das faces.	46
Figura 25 – Ensaio de compressão do núcleo dos painéis.	47
Figura 26 – Ensaio de compressão longitudinal (<i>edgewise</i>) (a) e de flexão (b) do painel sanduíche.....	47
Figura 27 – Modelo para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (<i>edgewise</i>) (c) dos painéis sanduíche.....	49
Figura 28 – Malha para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (<i>edgewise</i>) (c) dos painéis sanduíche.	50
Figura 29 – Refinamento da malha para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (<i>edgewise</i>) (c) dos painéis sanduíche.	51
Figura 30 – Resultado do ensaio de tração: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.	53
Figura 31 – Resultado do ensaio de compressão: (a) manta e (b) tecido bidirecional 0/90°.	56
Figura 32 – Resultado do ensaio de cisalhamento: a) manta 1,9 mm e b) tecido bidirecional 1,2 mm com orientação 0/90°.	58
Figura 33 – Resultado do ensaio de compressão de núcleo: a) manta 1,9 mm e b) tecido bidirecional 1,2 mm com orientação 0/90°.	60
Figura 34 – Resultado do ensaio de compressão longitudinal do painel com: (a) manta e (b) tecido bidirecional 0/90°.	62
Figura 35 – Resultado do ensaio de flexão com: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.	65
Figura 36 – Valores encontrados no Autodesk Simulate Composite Design: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.	69

Figura 37 – Teoria de Kirchhoff – Considerações básicas (adaptado de: Borst <i>et al.</i> , 2008).	79
Figura 38 – Forças, deformações e tensões resultantes em um elemento de painel sanduíche de faces finas (adaptado de Davies, 2001).....	83
Figura 39 – Painel simplesmente apoiado com carga distribuída uniforme (adaptado de: Davies, 2001).	86
Figura 40 – Painel simplesmente apoiado com carga concentrada (adaptado de: Davies, 2001).	87
Figura 41 – Procedimento para cálculo de um painel com três (a) ou quatro (b) apoios (adaptado de: Davies, 2001).	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de elementos e nós da malha para cada ensaio.	51
Tabela 2 – Teor mássico de fibras nos compósitos com manta e tecido.	52
Tabela 3 – Comparativo do ensaio de tração entre manta e tecido.	54
Tabela 4 – Comparativo entre o valor teórico e o resultado do ensaio de tração.	55
Tabela 5 – Comparativo do ensaio de compressão entre manta e tecido.	57
Tabela 6 – Comparativo do ensaio de cisalhamento entre manta e tecido.	59
Tabela 7 – Comparativo do ensaio de compressão de núcleo entre manta e tecido.	61
Tabela 8 – Comparativo dos resultados de compressão dos painéis sanduíche.	63
Tabela 9 – Comparativo do ensaio de flexão entre manta e tecido.	66
Tabela 10 – Comparativo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces entre manta e tecido.	67
Tabela 11 – Comparativo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces entre manta e tecido encontrados no ensaio e no Autodesk Simulate Composite Design.	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
3. REVISÃO	17
3.1. Materiais Compósitos Poliméricos	17
3.1.1. Reforços	18
3.1.2. Matrizes	23
3.2. Poliuretano	27
3.3. Painéis Sanduíche	29
3.4. Análise Estrutural	33
3.4.1. Método dos Elementos Finitos.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1. Experimental	41
4.1.1. Fabricação dos Painéis Sanduíche	41
4.1.2. Caracterização dos Painéis Sanduíche	44
4.2. Análise Estrutural dos Painéis Sanduíche.....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6. CONCLUSÕES	71
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
8. REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foca o desenvolvimento de painéis sanduíche para aplicação rodoviária em produtos cujo objetivo é prevenir a deterioração dos produtos alimentícios perecíveis, por meio da manutenção e conservação destes sob temperaturas controladas. Os painéis sanduíche são estruturas compostas por um núcleo espesso e faces finas, onde a espessura do núcleo aumenta a inércia do conjunto e potencializa as propriedades das faces.

Estas câmaras, estacionárias ou não, são fabricadas de painéis sanduíche com núcleos termicamente isolantes que permitem a conservação em temperaturas controladas devido às suas propriedades de isolamento térmico. A escolha dos materiais a serem utilizados deve levar em consideração a aplicação, os requisitos de desempenho, a compatibilidade química entre os materiais e o custo (Sandwichelemente für den Fahrzeugbau, 2006).

O núcleo é composto de materiais poliméricos, em especial PU. Os poliuretanos (PU) comerciais para isolamento térmico são produzidos por meio de uma reação de poliadição, onde são misturados os monômeros poliálcool e isocianato para formar macromoléculas sem nenhum componente de decomposição devido ao processo de polimerização em etapas. As principais características físico/químicas do PU são definidas pelo poliálcool, mas materiais auxiliares como agentes de expansão, catalizadores e aceleradores podem ser adicionados para controle da progressão da reação, resultando em características especiais na espuma de acordo com as necessidades de cada aplicação.

A densidade do poliuretano, seu padrão celular e de crescimento da espuma podem afetar as propriedades mecânicas e térmicas do material, tornando-o mais ou menos resistente e isolante dependendo de sua formulação e do seu processo produtivo. Estes parâmetros são controlados com a formulação do PU e controlando os parâmetros de processo (velocidade de injeção, temperatura do molde, temperatura ambiente, tempo de desmoldagem e etc.) durante o processo de injeção (TORREIRA, RAUL P., 1980).

As faces do painel sanduíche de interesse são feitas com materiais compósitos, que são obtidos de dois ou mais componentes quimicamente distintos entre si em

escala macroscópica com uma interface distinta separando os mesmos. A fase contínua, conhecida como matriz, tem um ou mais materiais incorporados, formando a matriz polimérica. A fase descontínua, conhecida como reforço, é normalmente fibrosa, mais rígida e resistente, suportando grande parte da carga. A matriz atua transferindo o carregamento para as fibras, mantendo-as na posição e orientação desejadas e protegendo-as de danos ambientais (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006); (ASTM D3878-16: Standard Terminology for Composite Materials, [s.d.]).

O núcleo de poliuretano de um painel sanduíche é normalmente fabricado pelo processo de injeção em câmara fechada, com as faces já posicionadas nas partes inferior e superior do molde. Este processo é muito utilizado pois elimina a necessidade de injeção em blocos ou placas, a preparação do PU para colagem nas faces e a própria colagem em si. Desta forma, é possível eliminar diversas etapas no processo produtivo e reduzir custo com componentes que precisam ser agregados quando o processo é realizado de forma separada. As faces de fibra de vidro podem ser produzidas pelo processo de laminação contínua, que é muito utilizado na indústria para escalas de produção elevadas, conferindo alta repetibilidade e confiabilidade no processo produtivo.

De forma geral, as propriedades de painéis sanduíche são avaliadas somente por ensaios físicos/mecânicos, tornando o desenvolvimento lento, oneroso e pouco assertivo. A validação do uso do método de elementos finitos (MEF) para o tipo de painel sanduíche proposto permite a variação dos materiais de face do sanduíche ou do núcleo de forma prática, tornando possível uma análise rápida de uma gama maior de opções de materiais e geometrias. O uso desse método ainda é pouco difundido para o estudo de painéis sanduíche, apresentando alguns desafios não encontrados quando se avaliam materiais isotrópicos, como aço e alumínio, entre eles a dificuldade de modelar o comportamento ortotrópico e a plasticidade dos compósitos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a avaliação da influência dos materiais de face em painéis sanduíche constituídos por um núcleo de poliuretano e com faces de reforço de fibra de vidro na forma de mantas ou de tecidos bidirecionais. Estas construções serão avaliadas por meio do método dos elementos finitos e validada por ensaios físicos/mecânicos de laboratório. Busca-se também investigar a confiabilidade desse método para a avaliação inicial de diferentes tipos de painéis.

A busca por conhecimento em uma área relativamente nova e pouco difundida dentro da indústria nacional motivou o estudo de métodos ágeis e de baixo custo para o desenvolvimento destes materiais. A necessidade de redução de peso e aumento de eficiência na indústria automotiva abre espaço para o desenvolvimento de novos compósitos, fazendo com que estes desenvolvimentos ocorram de forma cada vez mais rápida e assertiva. O aproveitamento destes espaços pode aumentar a demanda por materiais compósitos, acelerando seu desenvolvimento e reduzindo seu custo.

Neste estudo será feita a abordagem destes assuntos utilizando programas como o MECH-Gcomp, *Abaqus* e *Autodesk Simulate Composite Design* além de ensaios de laboratório para a validação dos valores encontrados.

3. REVISÃO

3.1. Materiais Compósitos Poliméricos

Materiais compósitos estão sendo utilizados em aplicações de alto desempenho desde o século XIX. Em 1867 foi fabricado o primeiro barco com material compósito, feito de papel pardo e cola e, apesar do que possa parecer, funcionou tão bem que a marinha norte americana comprou quatro destes barcos em 1868. Desde então, pesquisas e desenvolvimentos têm colaborado para o desenvolvimento acelerado dos materiais compósitos (LUBIN, 1982).

O grupo de materiais conhecidos como compósitos é amplo e sua definição depende das considerações feitas, podendo-se considerar um compósito qualquer material que seja uma combinação de dois ou mais constituintes. Esta definição inclui concreto, tijolos, madeira, ossos e materiais compósitos sintéticos modernos, como por exemplo, plásticos com reforço de fibra de vidro (PRFV), fibra de carbono, fibra de aramida entre outros. O uso destes materiais cresceu de forma significativa nos últimos 50 anos e são, atualmente, a primeira opção para a fabricação de estruturas que combinem baixo peso com alta rigidez (MATTHEWS, 2000).

Um material pode ser considerado compósito quando existe combinação macroscópica de dois ou mais materiais diferentes, sendo obrigatória a existência de uma interface reconhecível entre eles. A utilização de materiais compósitos não se faz somente pelas suas excelentes propriedades estruturais, mas também pelas propriedades térmicas, elétricas, tribológicas e em aplicações de caráter ambiental. Os materiais compósitos utilizados na atualidade são projetados para atingir um balanço de propriedades ideal para a aplicação desejada (MIRACLE *et al.*, 2001).

Segmentos como a indústria aeroespacial e de transporte de cargas têm utilizado amplamente materiais compósitos, visando obter alto desempenho estrutural e/ou térmico com baixo peso. O fator custo pode variar dependendo da aplicação e dos materiais utilizados no projeto do compósito. Existem compósitos com custo acessível, porém existem alguns materiais de custo elevado. A aplicação irá determinar qual material deve ser usado para atingir a melhor relação desempenho – peso – custo possível.

Os materiais compósitos podem ser classificados de diferentes formas. Primeiramente, se pode classificá-los quanto ao tipo de matriz que os constituem, podendo ser orgânica ou inorgânica, e subdivididas em vários materiais diferentes. Pode-se ainda dividir os reforços em orgânicos e inorgânicos ou em fibrosos e particulados, como proposto na Figura 1 (VENTURA, 2009). Estas características também apresentam algumas subdivisões.

Desta forma, a gama de compósitos que podem ser produzidos se torna ampla, permitindo obter propriedades que podem atender a praticamente qualquer necessidade técnica, dependendo da aplicação requerida e das premissas envolvidas no projeto.



Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos com relação ao tipo de reforço utilizado (adaptado de Ventura, 2009).

3.1.1. Reforços

Os materiais compósitos podem ter sua resistência melhorada por uma grande gama de reforços, desde partículas até tecidos fibrosos de alto desempenho. As partículas são pequenos pedaços de material, normalmente entre 1 e 10 μm de

diâmetro e entre 10 e 100 µm de comprimento. As mesmas podem ser utilizadas como carga, mas sua aplicação como reforço não é tão usual. A Figura 2 mostra alguns tipos de reforços de interesse.

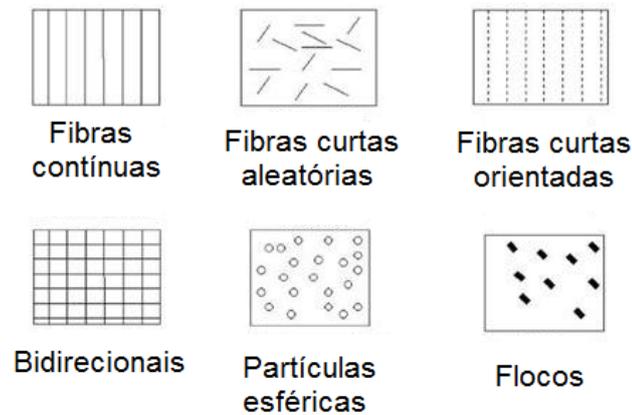


Figura 2 – Ilustração de alguns tipos de reforços utilizados em materiais compósitos (adaptado de Ventura, 2009).

Os materiais mais utilizados como reforço são fibras e tecidos, como de vidro, aramida ou carbono (BARBERO, 2010). Por muito tempo a humanidade teve ciência da moldagem de vidro em fios finos, que eram utilizados para fabricação e adorno de peças de vidro. No final do século 19, iniciou-se a produção de fios muito finos de fibra de vidro, que apesar de terem sido usados em roupas nos Estados Unidos e na França, seu consumo não se popularizou até a criação da Owens-Corning Fiberglass Corporation em 1939 (LUBIN, 1982).

Os principais componentes para a fabricação da fibra de vidro são sílica, calcário, ácido bórico, argila entre outros. Estas matérias-primas são misturadas a seco e depois derretidos em um forno de alta refração. A temperatura desta fusão, é normalmente em torno de 1260 °C, podendo variar conforme a formulação do vidro desejado.

As fibras de vidro podem ser produzidas por dois processos distintos. Fibras contínuas são produzidas pela introdução de vidro derretido dentro de um tanque, onde a gravidade alimenta uma série de pequenos orifícios na base do tanque. As gotas de vidro derretido de cada orifício são unidas, mecanicamente tratadas para atingir as propriedades desejadas, revestidas, recebem tratamento protetivo e

lubrificante em cada um dos filamentos. As fibras obtidas durante o processo devem garantir os padrões de qualidade do filamento e o controle pode ser realizado por meio da viscosidade e temperatura do vidro derretido, e pela velocidade de fluxo do processo produtivo (LUBIN, 1982). Já no processo de derretimento direto (*direct-melt process*), o vidro derretido é conduzido para uma máquina de marmorização e, após este processo, é derretido novamente e transformado em fibras. Atualmente, grande parte da fibra de vidro produzida é proveniente deste processo produtivo, sendo o mesmo muito importante para a indústria de compósitos (CHOUFFART; SIMON; TERRAPON, 2016).

As fibras são apresentadas nas mais diversas formas, como *roving* direto (*direct roving*), tecidos costurados (*fabric*), tecidos tramados (*woven roving*), *roving* de corte (*choppable roving*), manta de fibras picadas (*chopped strand mat*), manta de filamento contínuo (*continuous filament mat*), fibras picadas (*dry used chopped strands* - DUCS) e fio têxtil (*yarns*). Cada apresentação do reforço é indicada para determinados usos (MALLICK, 2008).

O *roving* direto de fibra de vidro é feito de um único cabo enrolado em uma bobina com altura padrão de 10", pesando entre 20 e 25 kg. O número de filamentos contidos no cabo, o *sizing* e a densidade linear ou título da fibra, expressa em tex (1 tex = 1 g/km), definem o produto comercialmente. De forma geral, o número de filamentos fica em 1000 para produtos de baixo tex (menor de 600 tex) e entre 2000 e 4000 para produtos de médio e alto tec. A densidade linear da fibra de vidro pode variar entre 100 e 4800 tex (MALLICK, 2008). O termo *sizing* se refere a qualquer proteção superficial aplicada ao reforço para que o mesmo não seja danificado durante seu processamento, mas normalmente atua como um agente de acoplamento entre a fibra e a matriz.

O *roving* de corte é feito da mesma forma que o *roving* direto, porém com um pente separador logo abaixo do aplicador de *sizing*, dividindo os filamentos da fieira em feixes com 150 filamentos, em média. Posteriormente, os feixes são montados e enrolados para formar um novo cabo. A apresentação, peso e características técnicas são similares ao *roving* direto, com a diferença de que este pode ser picado por máquina adequada. Normalmente o *roving* é picado com comprimentos entre 10 e 50 mm (MALLICK, 2008).

As fibras picadas são muito utilizadas como reforço para resinas termorrígidas e termoplásticas. Para a utilização com resinas termorrígidas, normalmente, as fibras são fabricadas pelo processo off-line, onde primeiro é produzido o *roving* direto e depois os feixes são picados. Este processo garante alto controle sobre a densidade linear dos feixes cortados. Já para a utilização com resinas termoplásticas, como o material irá passar pela extrusora, as fibras são fabricadas pelo processo *in-line*. Neste processo os filamentos são picados diretamente na saída da fieira. Este processo não possui controle sobre a densidade linear dos feixes, mas não é necessário, pois os mesmos serão desfeitos durante o processo de injeção juntamente com a resina (MALLICK, 2008).

As mantas de fibras picadas são produzidas processando o *roving* de corte, onde o mesmo é picado em uma esteira. Após, ligantes (*binders*) são aspergidos na superfície e distribuídos na espessura por meio de água e vibradores. Então, passa por uma estufa para secar a manta, amolecer e curar o ligante e, por fim, passa por rolos compactadores para unir definitivamente o ligante as fibras e aumentar a resistência da manta. Finalizado este processo, a manta é enrolada e está pronta para comercialização. Este tipo de material é muito utilizado para laminação manual (*hand lay-up*), devido à facilidade de moldagem e ampla gama de variações disponíveis (MALLICK, 2008).

As mantas de filamento contínuo são produzidas de modo sequencial à do *roving* direto, sendo impregnadas por um ligante à base de resina poliéster curado e insolúvel em estireno. Isto permite que a manta não se desmanche em contato com a resina ou não seja arrastada por ela durante a impregnação. Estas mantas são muito utilizadas para processos de molde fechado (compressão, infusão, RIM, RTM e RTM-light) e pultrusão. Para os processos de molde fechado, possuem ~2,5% de ligante e para pultrusão é necessário acima de 4% (BARBERO, 2010).

Por fim, os fios têxteis são obtidos quando filamentos contínuos são torcidos, buscando melhorar a integridade da mecha e sua processabilidade em teares, sua principal aplicação. A torção é expressa em número de voltas por metro (TPM) ou polegada (TPI) e do sentido da torção (S ou Z). Outra forma de fabricação deste material é por meio do agrupamento de fibras curtas (*spun yarns*), apresentando maior resistência ao desgaste quando comparado ao processo com filamento contínuo. No

entanto, este processo é pouco utilizado, pois possui alto custo. Os *sizings* utilizados para a produção dos fios têxteis são à base de amido e óleos minerais, para facilitar o processamento na tecelagem, mas devem ser queimados e o tecido silanizado para promover uma boa ancoragem com a resina (MALLICK, 2008).

Tecidos costurados são produzidos industrialmente e enrolados em uma bobina com largura de 3 m. Sua principal vantagem é fornecer reforços com direções diferentes em cada camada. A gramatura, a direção das fibras em cada camada e o *sizing* definem tecnicamente um tecido costurado. Os tipos mais comuns são unidirecionais (0° ou 90°), bi-axiais ($0^\circ/90^\circ$), double-bias ($\pm 45^\circ$) e quadri-axiais ($0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$). Alguns tecidos podem possuir um núcleo de espuma sintética, para facilitar o processo de infusão (BARBERO, 2010).

Os tecidos tramados são fabricados em teares, tramando os fios de urdume (longitudinais) com os fios de trama (transversais). Os fios são de *roving* direto, mas é usual incluir fios têxteis (*yarns*) para estabilizar o tecido. O número de fios por comprimento, a densidade linear e o *sizing* definem este tecido tecnicamente. Este tipo de tecido pode ser laminado intercalando com camadas de manta para aumentar a resistência intralaminar (RATTAN; BIJWE; FAHIM, 2008). A Figura 3 mostra os tipos de tecido tramado mais comuns.

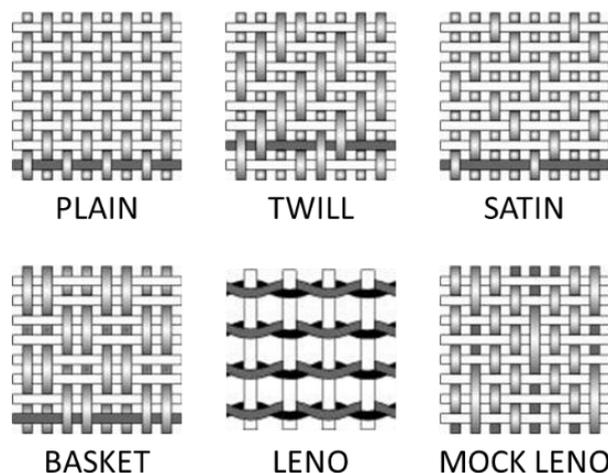


Figura 3 – Ilustração de tipos comuns de tecidos tramados para a utilização em compósitos (adaptado de Rattan *et al.*, 2008).

3.1.2. Matrizes

Existe uma gama muito ampla de polímeros que podem ser utilizados como matrizes em compósitos, com uma variedade ainda maior de propriedades físicas e químicas. Materiais poliméricos vêm sendo utilizados desde a antiguidade, na forma de resinas naturais, e evoluíram de forma significativa após a evolução da química orgânica a partir da segunda metade do século XIX, inicialmente pela modificação de resinas naturais e, mais recentemente levando a materiais cada vez mais sofisticados e de baixo custo (MALLICK, 2008). A Figura 4 mostra uma classificação geral dos polímeros.

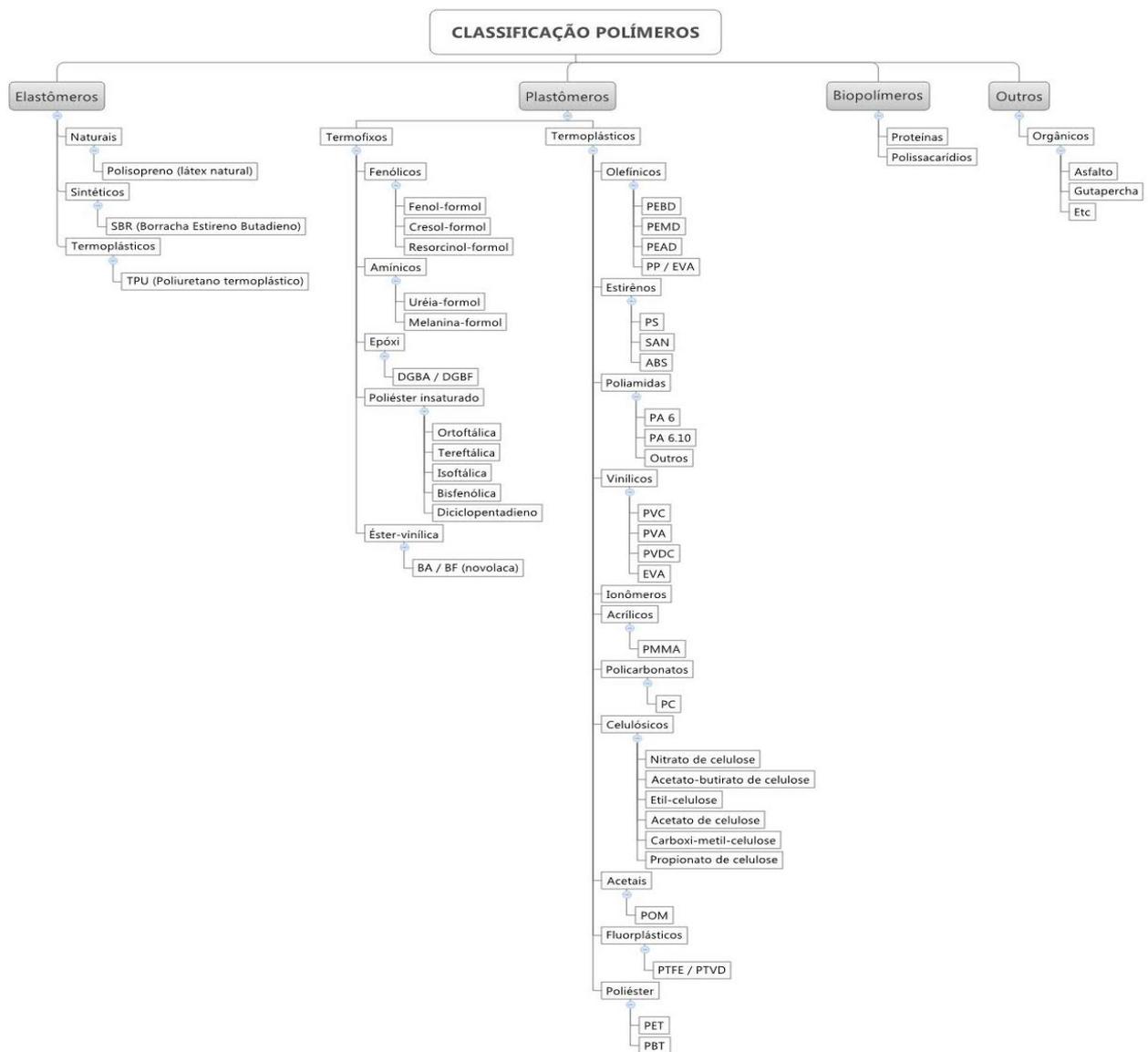


Figura 4 – Classificação geral dos polímeros (adaptado de Barbero, 2010).

A principal categoria dos polímeros é a dos plastômeros, com maior variação e aplicação na indústria. Dentro desta categoria, tem-se os termoplásticos e os termorrígidos. Os termoplásticos podem ser amolecidos por meio do aumento da temperatura e da pressão, voltando as características originais após o resfriamento. Este tipo de comportamento permite a aplicação em larga escala em processos como injeção, extrusão, moldagem a sopro, vácuo-formagem entre outros. Já os termorrígidos, após a sua produção, não amolecem com aumento de temperatura e pressão e não podem ser deformados ou reprocessados de forma direta. O aumento da temperatura leva então à degradação do material antes que ocorra mudanças significativas nas propriedades mecânicas.

Cada classe apresenta vantagens e desvantagens, que são consideradas no projeto de compósitos (JR, 2002). Neste trabalho, o foco são os polímeros termorrígidos, em especial a resina poliéster, mais utilizados para a fabricação de compósitos, sendo os mais comuns, poliéster insaturada, éster-vinílica, epóxi e fenólica. Cada tipo de resina possui características específicas, tornando-a ideal para um tipo de aplicação.

As resinas poliéster são as mais utilizadas mundialmente, estando disponíveis em várias formas. Estas resinas podem ser saturadas (ligações simples de carbono, C-C) ou insaturadas (ligações duplas de carbono, C=C) e são compostas de glicóis, ácidos (saturados e insaturados) e anidridos. As resinas saturadas não podem ser utilizadas para a fabricação de compósitos, pois suas cadeias já estão fechadas. Estas resinas são muito utilizadas para a fabricação de tecidos de poliéster. As resinas insaturadas são divididas em ortoftálica, tereftálica, isoftálica, dicitlopentadieno (DCPD), bisfenólica, auto extingüível e éster-vinílica (LIU, C. *et al.*, 2014).

A resina ortoftálica utiliza ácido modificador ftálico, o que resulta em propriedades químicas e mecânicas inferiores as demais resinas, sendo altamente sensível a ataques químicos. Já a resina tereftálica, usa em parte da sua composição ácido tereftálico, apresentando boa resistência a químicos, hidrólise e térmica (similar a isoftálica), porém com baixa resistência a UV apresentando rápido amarelamento. A resina isoftálica utiliza ácido isoftálico, possuindo boa resistência a químicos, hidrólise, térmica, UV e alta resistência mecânica. Este tipo de resina é indicado para locais onde o polímero vai estar exposto a água e intempéries (MALLICK, 2008).

A resina DCPD é obtida por meio da separação de carbonos da pirólise da gasolina, é incolor, de aspecto parafinoso, sólido ou líquido. Possui boas propriedades mecânicas, elevada estabilidade dimensional, baixa contração, alta rigidez dielétrica e baixa absorção de água. Este tipo de resina é muito utilizado para peças grandes, utilizadas em embarcações, trens, metrô, ônibus e etc. (PARK *et al.*, 2016). A resina bisfenólica utiliza a reação do bisfenol A propoxilado com o ácido insaturado, normalmente ácido fumárico, para sua obtenção. Este tipo de reação torna esta resina mais resistente química e termicamente, com alta dureza, porém bastante suscetível a hidrólise. Seu uso é recomendado para peças expostas a ataques químicos e altas temperaturas (MALLICK, 2008).

Para algumas aplicações, é necessário que a resina possua características auto extingüíveis. Este tipo de resina pode ser fabricado com a adição de componentes halogenados, que atuam capturando o oxigênio durante a combustão, ou com resinas com baixa velocidade de propagação de fogo e baixa emissão de fumaça. Existem normas internacionais que regulam o uso deste tipo de resina em transportes rodoviário, metroviário e ferroviário. Por fim, a resina éster-vinílica utiliza a reação do epóxi A ou F com ácido acrílico ou metacrílico. Este tipo de resina possui elevada resistência química e capacidade de absorver impactos (MALLICK, 2008).

Apesar das resinas poliéster possuírem uma grande variabilidade e aplicação na indústria, as resinas epóxi e fenólica também possuem aplicações importantes. A resina epóxi, de forma geral, possui quatro tipos principais. O tipo mais utilizado é a base de bisfenol A, por ser versátil quanto a aplicação e com baixo custo, podendo ser líquida ou sólida. A resina a base de bisfenol F possui maior reticulação entre as cadeias, o que pode propiciar melhor desempenho mecânico, químico e térmico. Esta melhora é ampliada quando a resina é curada com aminas aromáticas ou anidridos. A resina epóxi também possui a opção de ser auto extingüível, quando se adicionam moléculas adicionais de bromo a resina a base de bisfenol A. De forma geral, esta resina mantém as qualidades da resina a base de bisfenol A, agregando somente a característica auto extingüível. Por fim, tem-se a resina epóxi flexível. Este tipo de resina é obtido substituindo os bisfenóis por poliglicóis pouco ramificados de cadeias longas lineares. Este tipo de resina é utilizado para adição em outras resinas epóxi, melhorando as propriedades de impacto devido ao aumento de flexibilidade (CAN; KINACI; PALMESE, 2015).

Por fim, existem as resinas fenólicas, obtidas pela reação em etapas e polimerização entre um fenol e um aldeído, normalmente ácido fórmico e hidroxibenzeno. No estado líquido, conhecida como resol, possui alta viscosidade, é solúvel em éteres, cetonas e até em água. É utilizada na impregnação de papéis, tecidos, madeira e fibras de vidro, aramida e carbono e na fabricação de vernizes e adesivos. Este tipo de resina, na forma líquida, é catalisado com um sistema ácido tolueno sulfônico e é largamente empregada para utilizada para pultrusão e prensagem, sendo utilizada em escala menor para RTM e laminação manual. Já no estado sólido é popularmente conhecido como baquelite®, geralmente formulado com cargas, plastificantes e outros aditivos. Devido à sua alta resistência a temperatura (até 250 °C), baixa inflamabilidade, emissão de fumaça e gases tóxicos, elevada rigidez dielétrica, resistência térmica e estabilidade dimensional, é muito utilizada para aplicação em locais confinados, como acabamentos internos de aviões, helicópteros e trens. Também é utilizada em aplicações estruturais como polias, pisos, rotores para helicópteros e plataformas offshore de exploração e beneficiamento de petróleo (MALLICK, 2008).

Para que um compósito atinja as propriedades desejadas e o desempenho para o qual foi projetado, a adesão fibra/matriz é muito importante. A adesão não contempla somente as interações físicas e químicas da interface fibra/matriz, mas também as propriedades próximas a essa interface, onde se encontram propriedades diferentes da fibra e da matriz separadamente. Por definição, a interfase ocorre desde onde as propriedades da fibra começam a mudar no interior da fibra, passando pela interface fibra/matriz, entrando na matriz e terminando onde a matriz retorna as propriedades somente da matriz (MIRACLE *et al.*, 2001).

Uma das melhores formas de atingir as propriedades desejadas de um compósito é garantir a infiltração do reforço pela matriz. Desta forma, a boa molhabilidade da fibra pela matriz é um requisito para qualquer compósito e a ausência de vazios comprova a boa molhabilidade do compósito. Frequentemente, propriedades mecânicas transversais abaixo do esperado são atribuídas à baixa adesão fibra/matriz e, por consequência, baixa molhabilidade e incompatibilidade química entre fibra e matriz e baixa tensão superficial da matriz. Existem várias formas de melhorar a molhabilidade do reforço pela matriz, como tratamento superficial, acabamento superficial e a adição de *sizings* (MIRACLE *et al.*, 2001).

3.2. Poliuretano

Poliuretanos comerciais utilizados em isolamento térmico são produzidos pela mistura de dois componentes, polioli e isocianato, pelo método da poliadição. Os poliols são compostos que contém em sua formulação hidróxidos ou oxidrilo (OH) que reagem com isocianatos. São líquidos de viscosidade média, cor clara entre água e parda amarela e praticamente inodoros (podem ter odor desagradável quando adicionada amina). Os isocianatos mais utilizados comercialmente são o diisocianato de difenilmetano (MDI) e o diisocianato de toluila ou tolueno 80/20 (TDI) ou misturas entre estes dois tipos. O MDI é, normalmente, escuro devido as suas impurezas e produz uma espuma amarelo-parda, sendo limitado para aplicação em espumas rígidas e semirrígidas. Já o TDI é um líquido claro como a água e produz uma espuma branca. É utilizado para a fabricação de espumas flexíveis, mas também pode fazer espumas rígidas se passar por um processo de pré-polimerização (TORREIRA, RAUL P., 1980). A Figura 6 mostra algumas aplicações do poliuretano.



Figura 5 – Aplicações diversas do poliuretano.

Outros componentes podem ser usados na formulação do PU. Catalizadores são utilizados para acelerar a reação, permitindo a produção em escala industrial, podendo ser tanto aminas terciárias como componentes organometálicos. Os estabilizadores também são muito utilizados para controlar de forma precisa a estrutura celular, o tamanho das células e a fluidez do material. Normalmente são utilizados silicones em quantidades controladas, o que melhora muito a qualidade final do produto. Em algumas aplicações críticas, como o transporte de alimentos, o

retardante de chama é muito importante e possui a função de tornar o material auto extingüível. Por fim, são utilizados agentes expansores, emulsificadores e, caso necessário, pigmentos. Super isolantes com aerogel também estão sendo muito utilizados (NAZERAN; MOGHADDAS, 2017).

Para a produção da mistura, pode-se utilizar dois processos, o direto e o com pré-polimerização. No processo direto, as quantidades totais de polioliol e de isocianato são misturadas de uma só vez. Os materiais auxiliares podem ser misturados no início da reação ou estarem já misturados junto ao polioliol. Neste processo, a reação tem início imediato após a mistura. No processo com pré-polimerização, muito utilizado para a produção de elastômeros fundidos, acontece a reação do isocianato com parte do polioliol. No segundo estágio, este pré-polímero é misturado ao restante do polioliol contendo os materiais auxiliares (DEMHARTER, 1998).

Para a expansão do PU existem dois processos principais, expansão química e expansão física. O processo de expansão química ocorre pela reação do agente de expansão e sua taxa de processamento depende do calor da reação e do tipo e quantidade do agente expensor. Já no processo de expansão física, um líquido halogenado alcalino de baixo ponto de ebulição é adicionado à mistura reacional. Este líquido evapora com o calor da reação, formando assim as células dentro da espuma, e mantendo o vapor halogenado dentro destas células. Este processo produz espumas de células fechadas, impermeáveis ao ar, e com condutividade térmica muito baixa. Esta rota também consome menos isocianato, pois parte é substituída pelo líquido, sendo mais econômico que o processo de expansão química (TORREIRA, RAUL P., 1980).

As características acima afetam a principal propriedade física do poliuretano, a densidade. A densidade afeta de forma direta as propriedades térmicas e mecânicas do material. A Figura 6 mostra como o aumento da densidade afeta positivamente os módulos de elasticidade e de cisalhamento do PU e sua resistência à tração e à compressão a 10% de deformação.

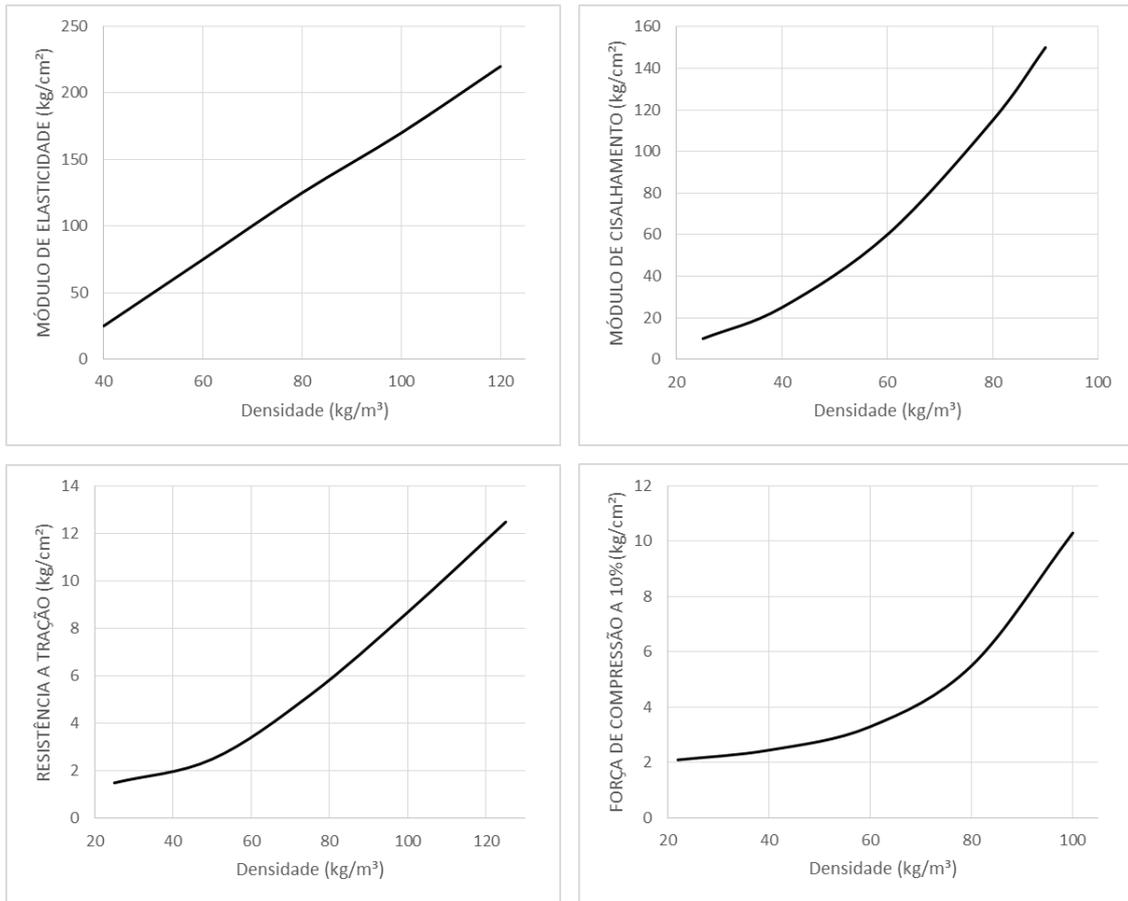


Figura 6 – Variação do módulo de elasticidade, de cisalhamento, resistência à tração e à compressão a 10% de deformação em relação a densidade do PU (adaptado de Torreira, 1980).

3.3. Painéis Sanduíche

O painel sanduíche é um tipo de estrutura com um núcleo e duas faces externas. O aumento da utilização deste tipo de material tem ocorrido, por demandas de aplicações na engenharia que exigem baixo peso e alto desempenho. Este fato, em conjunto com o crescente desenvolvimento de novas matérias primas, como materiais de face (fibra de aramida, carbono e vidro) e núcleos (*honeycomb* e metálicos) mais avançados, para aplicações neste material, torna fundamental o seu estudo e entendimento.

A construção dos painéis sanduíche segue, de forma geral, o mesmo tipo de montagem, possuindo um núcleo com grande espessura, baixo peso e baixa resistência mecânica e duas faces externas de pouca espessura e alta resistência mecânica. Combinando os mais variados tipos de núcleo, obtêm-se as mais variadas

propriedades mecânicas, acústicas, vibracionais e térmicas, sendo possível construir um material com as propriedades desejadas. As faces podem ser de aço carbono, aço inox, alumínio, madeira, polímeros, compósitos e outros.

O núcleo pode ser de cortiça, madeira balsa, polietileno, poliuretano, poliestireno, placas de lã mineral ou de colméias dos mais diversos materiais (DAVIES, 2001). Os núcleos são divididos principalmente em três tipos: espuma ou sólido (a), colméia (b) e treliçado ou corrugado (c), como apresentado na Figura 7.

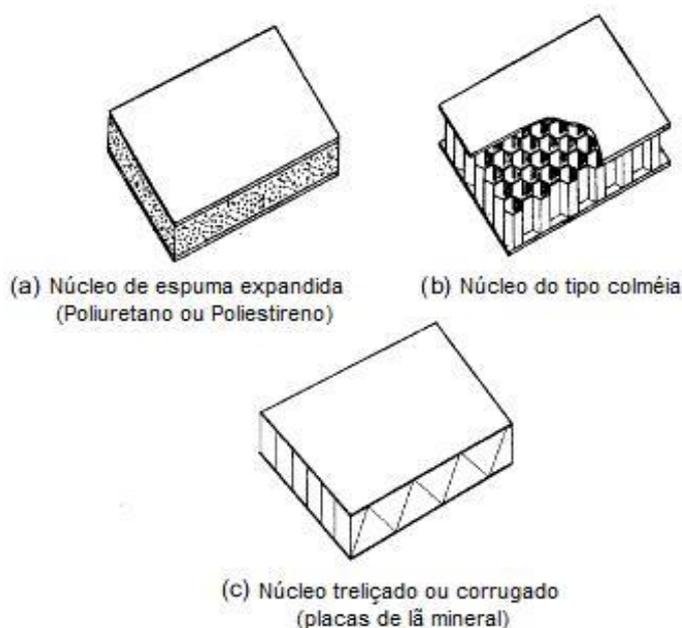


Figura 7 – Principais tipos de núcleo utilizados em painéis sanduíche (adaptada de Davies,2001).

A união entre as faces e o núcleo (extremamente leve), de forma geral, é feita por colagem ou soldagem das faces no mesmo. Esta estrutura apresenta ótimas propriedades como alta resistência à flexão, baixo peso específico e bom a excelente isolamento térmico (GAY; HOA, 2007). As duas faces externas podem ser feitas do mesmo material e com a mesma espessura, tornando o painel simétrico. Este é o tipo mais comum de painel sanduíche, mas existem aplicações especiais que requerem que o painel possua faces distintas, tornando o painel assimétrico (VINSON, 1999).

Os núcleos esponjosos possuem um custo atrativo e promovem um aumento de rigidez da estrutura comparado ao material da face sólido. Além disso, o núcleo pode fornecer propriedades interessantes ao painel como, por exemplo, isolamento térmico

ou acústico. Este tipo de painel é o mais indicado para aplicações onde existe a necessidade de resistência estrutural e isolamento térmico ou acústico, pois as faces conferem resistência estrutural e o núcleo faz o isolamento desejado (CODYRE; FAM, 2016).

A Figura 8 apresenta o painel sanduíche completo e as faces isoladas. Quando aumenta a distância entre as faces, aumenta também o momento de inércia de área do painel, aumentando sua resistência à flexão. Entretanto, o material do núcleo deve suportar as tensões de cisalhamento que irão ser geradas no mesmo, senão o painel irá falhar pelo cisalhamento do núcleo.

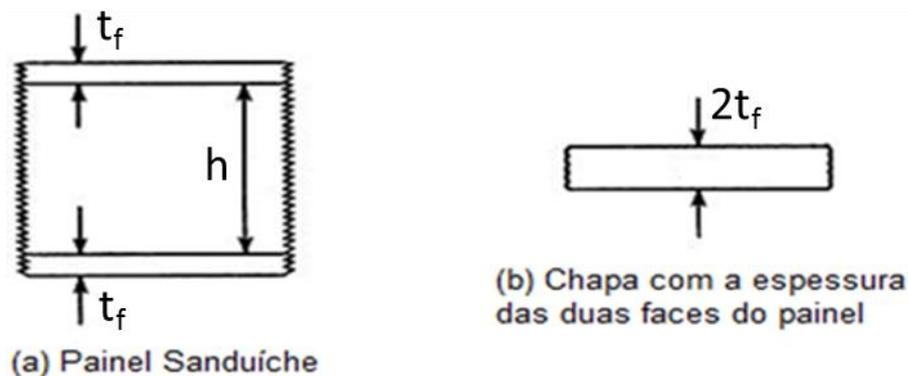


Figura 8 – Painel sanduíche completo e as faces isoladas (adaptada de: Vinson, 1999).

Onde, t_f representa a espessura das faces e h representa a espessura do núcleo. Também, é possível construir painéis sanduíche com características puramente estruturais, como por exemplo, os painéis formados com núcleos de espuma metálica (*metal foam*) e os painéis com núcleo em forma de colméia (*honeycomb*). Estes painéis são de aplicação estritamente estrutural e cumprem com eficácia esta função podendo substituir chapas metálicas sem perda estrutural e com redução de peso significativa. Entretanto, esta tecnologia ainda é considerada cara quando comparada às chapas metálicas e, portanto, não tem sido utilizada em segmentos onde o fator peso não é primordial.

Para o estudo das características mecânicas do painel sanduíche, pode-se considerá-lo simplesmente apoiado nas duas extremidades e submetido a uma carga vertical w distribuída ao longo do comprimento L . A Figura 9 mostra o painel

deformado após a aplicação da carga, bem como as reações nos apoios. O diagrama de esforço cortante resultante pode ser visto na Figura 10(a) e o de momento fletor na Figura 10(b).

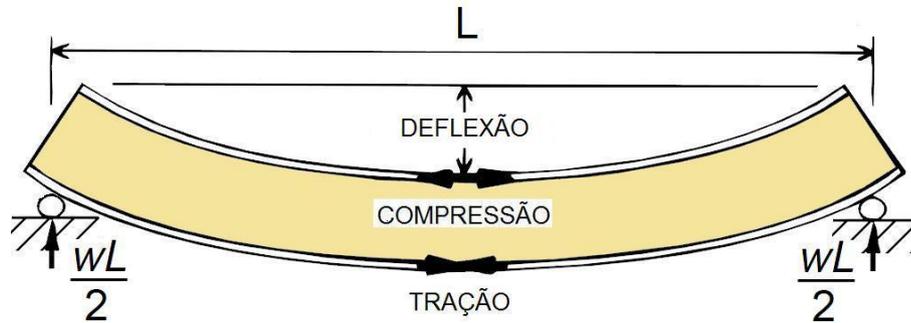


Figura 9 – Painel deformado devido à aplicação de carga vertical distribuída.

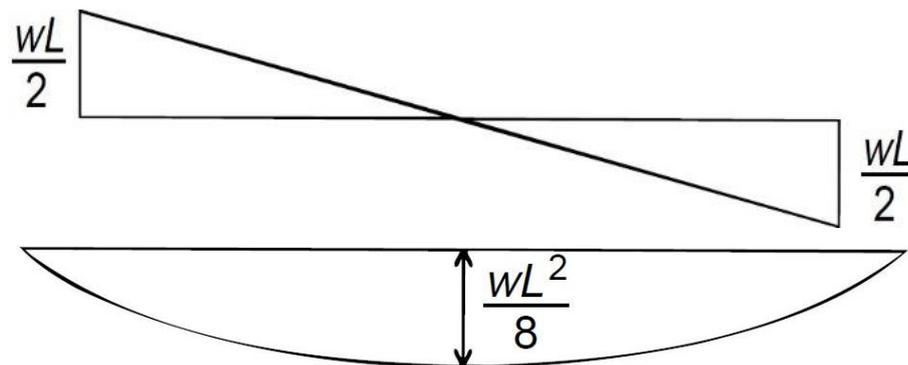


Figura 10 – Diagrama de esforço cortante (a) e de momento fletor (b) resultantes no painel.

As propriedades mecânicas de um painel sanduíche variam conforme os materiais que constituem o mesmo. As faces possuem módulo de elasticidade, resistência à tração, à compressão e à fadiga diferente do material do núcleo. De forma geral, as faces devem resistir aos esforços normais de tração e compressão e, caso desejável, à fadiga. O núcleo possui baixa resistência a tração, baixa a média resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade. Entretanto, o núcleo deve resistir aos esforços de cisalhamento gerados por cargas de flexão (BORST; SADOWSKI, 2008).

Por se tratar de uma combinação de materiais, o painel sanduíche deve ser dimensionado utilizando a tensão admissível para o material da face externa (somente na direção normal), a tensão de cisalhamento admissível da união adesiva entre o

material da face e o núcleo e a tensão de cisalhamento admissível do núcleo do painel (DAVIES, 2001).

3.4. Análise Estrutural

Os autores abordam diversas formas de análise mecânica do painel sanduíche, dependendo do tipo de painel, do tipo de carregamento, das propriedades dos materiais constituintes e da precisão que se deseja obter nas análises. Desta forma, o dimensionamento estrutural se faz complexo e requer habilidade (BORST; SADOWSKI, 2008). O seu estudo analítico pode ser feito de várias formas, não existindo um consenso sobre qual atende melhor cada caso.

Painéis sanduíche são componentes estruturais relativamente simples e que podem ser analisados utilizando-se os princípios convencionais da mecânica estrutural. Desta forma, o painel pode ser analisado com base nas tensões e deflexões atuantes no mesmo. Porém, painéis de grande espessura não podem ser modelados com base nas teorias tradicionais para placas e vigas, pois deve ser considerado o cisalhamento do núcleo que é relativamente flexível (DAVIES, 2001).

3.4.1. Método dos Elementos Finitos

Nas atividades de engenharia, os engenheiros, analistas e projetistas se deparam com desafios e problemas técnicos de dificuldades variadas. De uma forma geral, na área de cálculo estrutural, o engenheiro deve garantir que a estrutura não irá falhar quando sujeita às diversas condições de operação. Para casos simples, que dispõem de formulações prontas e as condições de carregamento e as restrições sejam simples, o método analítico é suficiente. Entretanto, para casos complexos, onde é necessária a dedução de inúmeras equações diferenciais para a resolução do problema, a utilização do método dos elementos finitos se torna viável (ALVES FILHO, 2008).

Os métodos analíticos possibilitam o cálculo da resposta exata das tensões, deslocamentos e deformações nos infinitos pontos de uma estrutura. No entanto, este

método não pode ser aplicado na maioria dos casos práticos encontrados corriqueiramente. Já o método dos elementos finitos pode ser aplicado em todos os casos, fornecendo uma solução aproximada para o problema dentro de uma faixa de precisão considerada aceitável, desde que utilizado de forma correta (BATHE; BATHE, 1996).

O Método dos Elementos Finitos é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos onde o corpo contínuo é subdividido em um número finito de elementos conectados entre si, chamados de nós. O modelo matemático é construído por meio da montagem destes elementos que possuem um número finito de parâmetros correspondentes ao número de elementos. Para análise estrutural, de forma geral, as incógnitas do problema são os deslocamentos nodais (BATHE; BATHE, 1996).

A análise de estruturas pelo MEF, pode ser feita de duas formas, por meio de estruturas reticuladas e por meio de elementos estruturais conectados continuamente. As estruturas reticuladas podem ser descritas por barras, treliças ou vigas fixadas somente nos nós, onde os mesmos transferem todo o carregamento para o próximo elemento. No entanto, nas aplicações de engenharia em geral, vários componentes precisam de um tratamento diferente do que o aplicado para o cálculo das estruturas reticuladas, onde o corpo contínuo é subdividido artificialmente em certo número de nós ou elementos fazendo a representação aproximada do corpo contínuo (ALVES FILHO, 2008). Ainda, para que esta representação não se torne grosseira, a compatibilidade nos nós e a mera imposição das equações de equilíbrio não são suficientes.

Também têm grande importância a subdivisão da estrutura em elementos (malha de elementos finitos) e a escolha do elemento apropriado para modelar cada situação. Os programas de MEF oferecem uma biblioteca de elementos, cada qual com um diferente comportamento estrutural (estado plano de tensões, placas, membranas, cascas, sólidos, etc.). Os tipos de elementos utilizados variam conforme a estrutura a ser analisada, podendo ser classificados como elementos de treliça ou barra, elementos de mola, elementos de viga e elementos bidimensionais ou tridimensionais (placas, cascas e sólidos). A seguir, comentam-se os elementos de treliça, os elementos de viga, os elementos bidimensionais e os tridimensionais.

Elementos de treliça ou barras articuladas nas extremidades são elementos que transmitem apenas forças axiais de compressão ou tração, não estando sujeitos a ação de forças cortantes, momentos fletores e momentos torçores. Então, a estrutura reticulada (treliça) leva em consideração somente o deslocamento de cada nó da treliça e a rigidez axial de cada membro estrutural (JIANG *et al.*, 2016). A Figura 11 mostra a análise de elementos finitos de uma estrutura treliçada.

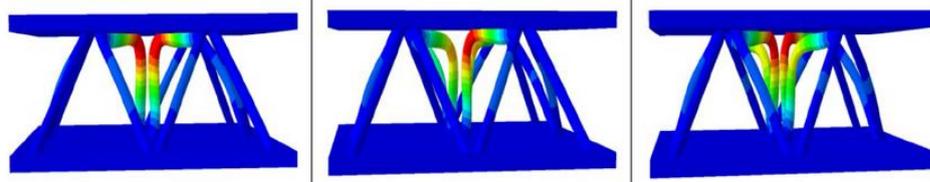


Figura 11 – Exemplo de análise pelo MEF da estrutura treliçada de um painel sanduíche (adaptado de Jiang *et al.*, 2016).

Elementos de viga podem ser utilizados como vigas contínuas, pórticos planos e pórticos espaciais, sendo parte da família de estruturas reticuladas com conexões rígidas. Uma viga é uma barra reta de comprimento muito maior que suas dimensões da seção transversal e que pode transmitir forças axiais, forças cortantes, momentos fletores, e momentos torçores (ANSARI *et al.*, 2015). A Figura 12 exemplifica uma análise de viga/sanduíche utilizando o MEF.

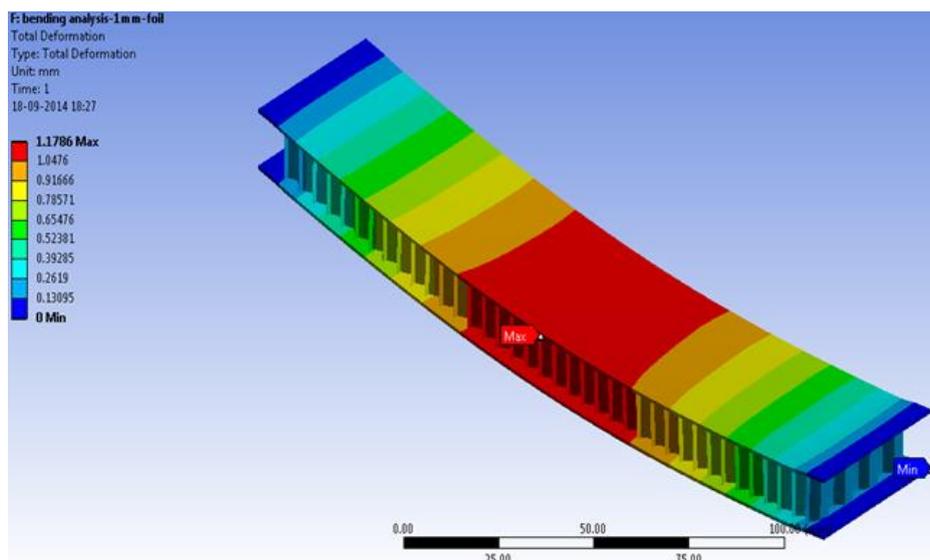


Figura 12 – Exemplo de análise de uma viga de um painel sanduíche utilizando o MEF (Ansari *et al.*, 2015).

O elemento mais simples é o elemento de estado plano de tensões triangular linear, apresentado na Figura 13(a). Este elemento possui três nós e seis graus de liberdade, e nele as tensões e as deformações são constantes. Já o elemento de estado plano de tensões retangular linear, apresentado na Figura 13(b), possui tensões e deformações que variam de forma linear ao longo do elemento. Por estar no plano e possuir quatro nós, apresenta oito graus de liberdade. Enquanto o elemento de estado plano de tensões triangular parabólico, na Figura 13(c), apresenta tensões e deformações que variam linearmente e, por possuir nós intermediários entre os vértices do triângulo (6 nós no total), possui doze graus de liberdade (BHAVIKATTI, 2005).

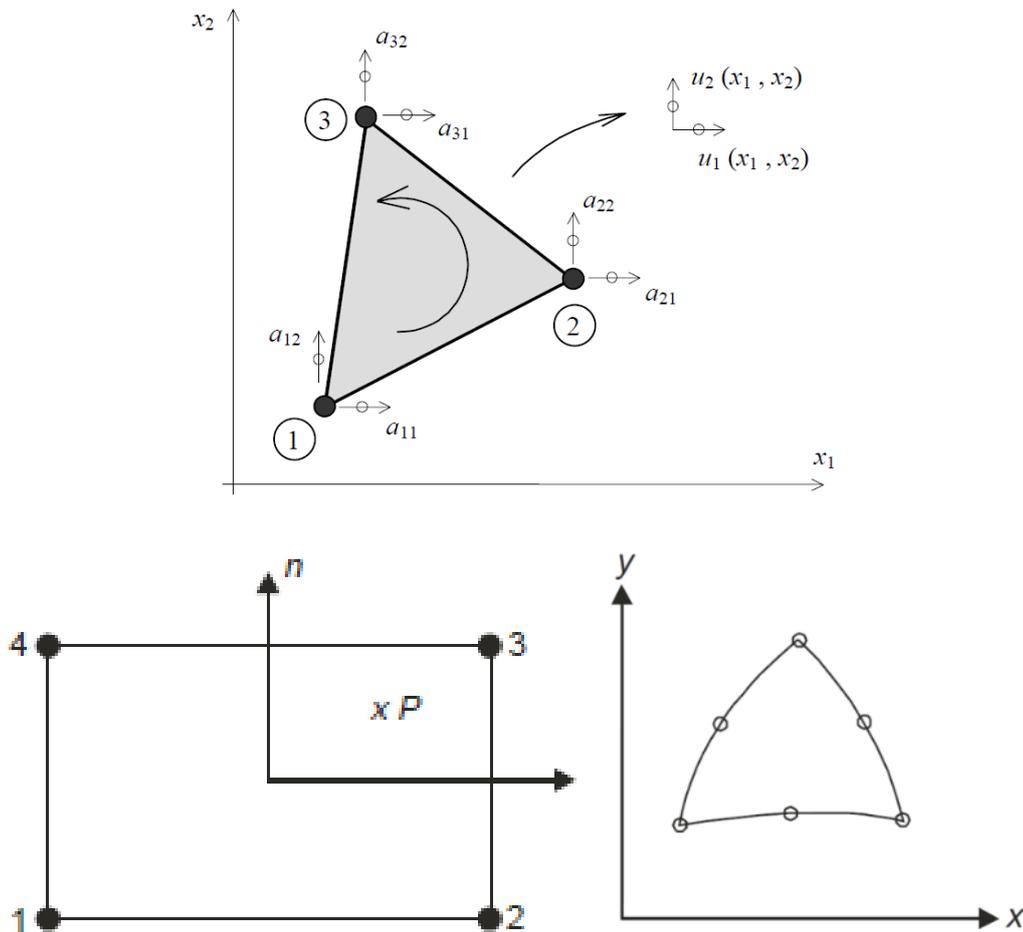


Figura 13 – Elemento de estado plano de tensões triangular linear (a), retangular linear (b) e triangular parabólico (c) (adaptados de: Azevedo, 2003 e Bhavikatti, 2005).

Para os elementos bidimensionais e tridimensionais, as condições de contorno, o conhecimento da matriz de rigidez da estrutura e o carregamento atuante não são suficientes para determinar os deslocamentos nodais de toda a estrutura. Por este motivo, usa-se aproximações para descrever o comportamento de cada elemento dentro da estrutura e como cada elemento influencia os elementos vizinhos. A condição real da estrutura não se modifica devido ao fato de estar se propondo um modelo de cálculo, porém este modelo deve ser capaz de prever o comportamento da estrutura adequadamente (ALVES FILHO, 2008).

Elementos de placa retangular linear possuem doze graus de liberdade e se comportam como chapas ou placas submetidas à flexão, onde suas tensões e deformações respeitam a teoria da elasticidade. O elemento pode utilizar a teoria de Kirchhoff, onde são desconsideradas as deformações por cisalhamento no elemento, ou a teoria de Mindlin, onde estas são consideradas na formulação do elemento (MATTHEWS, 2000). A Figura 14 apresenta um elemento de placa.

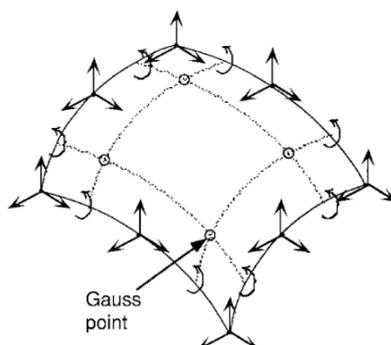


Figura 14 – Exemplo de elemento de placa (Matthews, 2000).

O elemento de casca retangular linear possui quatro nós, totalizando vinte graus de liberdade. Esse elemento é recomendado para a análise detalhada de estruturas com chapas de baixa espessura, sendo aplicados em análises de chassi, trens, aviões, etc. (ALVES FILHO, 2008). A principal diferença entre os elementos de placa e de casca está localizada nas deformações internas de cada material. Elementos de casca considerando somente uma deformação média para o material, desconsiderando a espessura.

Além dos elementos anteriores, pode-se utilizar elementos tridimensionais para o cálculo estrutural por elementos finitos. O elemento sólido tetraédrico linear, ilustrado na Figura 15(a), apresenta tensões e deformações constantes, mas por se tratar de um elemento com quatro nós e ser sólido possui doze graus de liberdade. O elemento sólido hexaédrico linear, na Figura 15(b), possui tensões e deformações que variam linearmente ao longo do elemento e oito nós, tendo vinte e quatro graus de liberdade. O elemento sólido tetraédrico parabólico, na Figura 15(c), tem tensões e deformações que variam linearmente e, como possui nós intermediários entre os vértices de cada triângulo que compõe o tetraedro, possui trinta graus de liberdade (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

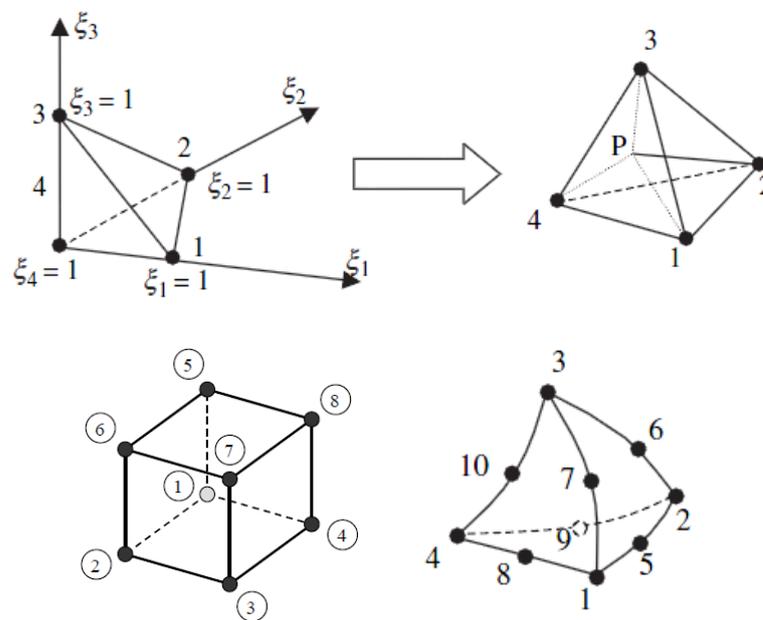


Figura 15 – Exemplos de elemento sólido tetraédrico linear (a), hexaédrico linear (b) e tetraédrico parabólico (c) (Adaptado de Fish, 2007).

O transporte de produtos de alto grau de fragilidade (perceíveis) aumentou de forma considerável nos últimos anos, se tornando mais importante a cada dia pelo aumento da demanda. A maneira de transportar estes produtos e a integridade da carga são muito importantes e estimularam os órgãos governamentais brasileiros a criar critérios de inspeção mais rigorosos. Estes critérios desencadearam a elaboração de norma que regulariza e caracteriza carrocerias frigoríficas quanto ao seu índice de isolamento térmico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS (ABNT), 2006). A Figura 16 apresenta um modelo de carroceria para termicamente isolada para transporte de alimentos perecíveis.



Figura 16 – Carroceria termicamente isolada para transporte de alimentos perecíveis.

Este tipo de carroceria termicamente isolada é composto por um chassi, normalmente fabricado em aço ou alumínio, e uma caixa de carga fabricada com diferentes matérias-primas, como aço, alumínio, fibra de vidro, poliuretano, adesivos e selantes, borrachas e componentes eletrônicos. A densidade do poliuretano utilizado como núcleo de sanduíches afeta diretamente sua resistência mecânica em tração, compressão e cisalhamento (FAM; SHARAF, 2010).

O comportamento do núcleo em compressão pode ser dividido em três regiões distintas. A energia de deformação relacionada a cada uma destas regiões é relacionada com tensão-deformação normal, tensão-deformação de cisalhamento e uma combinação destas. Na primeira parte, a tensão de cisalhamento transversal ultrapassa a tensão de escoamento do poliuretano em cisalhamento enquanto a tensão normal continua dentro da região elástica. Na segunda parte, a tensão de cisalhamento transversal está dentro do regime elástico e a tensão normal ultrapassa o limite de escoamento. Já na terceira parte, as tensões de cisalhamento e normal ultrapassam o limite de escoamento, causando a falha do núcleo do painel (JEDARI SALAMI; SADIGHI, M.; SHAKERI, 2015).

Compósitos reforçados com tecido são largamente utilizados nas indústrias aeroespacial, automotiva e de defesa. Isto ocorre devido a sua facilidade de manuseio, baixo custo de fabricação e excelentes propriedades mecânicas (SIDDHARTHA; GUPTA, 2012).

Esta estrutura é submetida aos mais diversos tipos de carregamento estático e dinâmico durante sua utilização, todos provenientes do seu acoplamento ao cavalo mecânico e do contato da suspensão com o solo. A Figura 17 mostra a distribuição de carga em uma carroceria termicamente isolada.

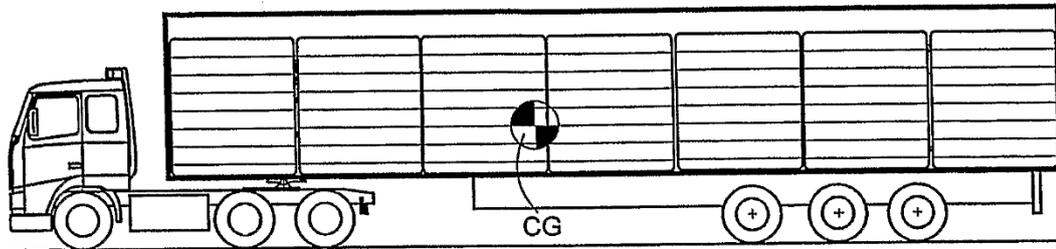


Figura 17 – Distribuição de carga em uma carroceria termicamente isolada.

A análise estrutural dos painéis sanduíche pode ser feita de forma analítica ou por meio do método dos elementos finitos. Neste estudo, por se tratar de análises de média complexidade, sendo a possibilidade de ensaiar diversos tipos de material sem preparar amostras uma necessidade, escolheu-se utilizar o método dos elementos finitos para solução. Este método permite variar as propriedades dos constituintes dos painéis de forma ágil, rodar novamente a análise e extrair os resultados para cada variação desejada. As condições de contorno comumente utilizadas neste tipo de análise são face inferior do painel com grau de liberdade zero em todas as direções e face superior presa a uma placa rígida com liberdade em todos os sentidos onde é aplicado o carregamento desejado (SADIGHI, Mojtaba; HOSSEINI, 2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Experimental

4.1.1. Fabricação dos Painéis Sanduíche

No presente estudo, as faces do painel sanduíche foram fabricadas com fibra de vidro e resina poliéster pelo processo de laminação contínua. Este processo de laminação é muito utilizado na indústria pela sua boa repetibilidade e confiabilidade, baixo custo e alta capacidade produtiva. Depois de laminadas e quase curadas, as bobinas de compósito são estocadas em ambiente apropriado para finalizar a liberação do monômero de estireno residual durante a estocagem, e em seguida encaminhadas para confecção dos painéis sanduíche. A Figura 18 mostra o processo de laminação contínua para compósito fabricado com manta.



Figura 18 – Processo de laminação contínua para compósito fabricado com manta.

Os materiais compósitos utilizados nas faces foram produzidos utilizando resina poliéster e reforço de fibra de vidro tipo E. Com o intuito de comparar dois diferentes tipos de reforço considerando a influência da espessura e da gramatura dos reforços nos compósitos. O primeiro compósito foi fabricado com manta de fibra de vidro (gramatura: 775 g/m²) de padrão P243 da Owens Corning e resina poliéster (padrão 10.335 da fabricante Reichhold) com espessura de 1,9 mm. Já o segundo compósito foi fabricado com tecido de fibra de vidro bidirecional (gramatura: 900 g/m²) de padrão LT0530 da Owens Corning e a mesma resina poliéster, com espessura de 1,2 mm.

Depois de recebidas e cortadas no tamanho apropriado para a confecção dos painéis sanduíche, as amostras do compósito foram inseridas no gabarito de confecção dos painéis. Este gabarito garante o espaçamento de 64 mm do núcleo de poliuretano, por meio de um quadro de espaçadores de 1,0 m x 2,5 m. Este quadro é posicionado em um porta-molde específico para a injeção de poliuretano (PU), com restrições mecânicas em suas extremidades para garantir a espessura e as propriedades desejadas do núcleo. A Figura 19 mostra o equipamento utilizado para a montagem dos painéis utilizados para a confecção dos corpos de prova.

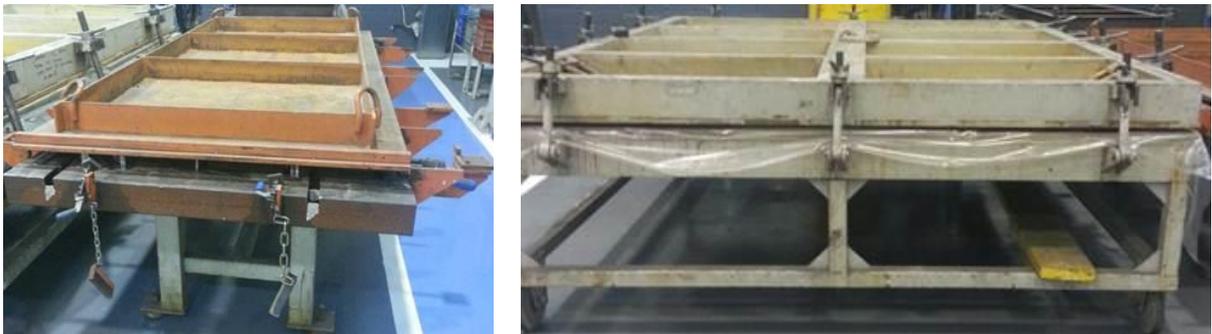


Figura 19 – Equipamento utilizado para a montagem dos painéis utilizados para a confecção dos corpos de prova.

O poliuretano (padrão Randon e fabricante Purcom) foi então injetado com uma máquina injetora da Transtécnica com potência de 3,4 kW e misturador a ar no cabeçote. Este equipamento garante melhor homogeneidade de propriedades do núcleo, garantindo boa confiabilidade e repetibilidade em suas propriedades e, conseqüentemente, do painel sanduíche como um todo. Os painéis foram injetados com densidade de 40 kg/m³ e proporção de mistura de 1,23:1 (isocianato:poliol). O PU foi mantido no porta-molde por aproximadamente 2 horas para evitar variações dimensionais, com tempo de cura total de 72 horas. O PU, quando não controlamos os parâmetros de processo corretamente, pode apresentar variações de densidade, falta de preenchimento da cavidade, vazios, tamanhos irregulares de célula e contração. A espessura final do núcleo do sanduíche foi de 64 mm. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado para a injeção de PU.

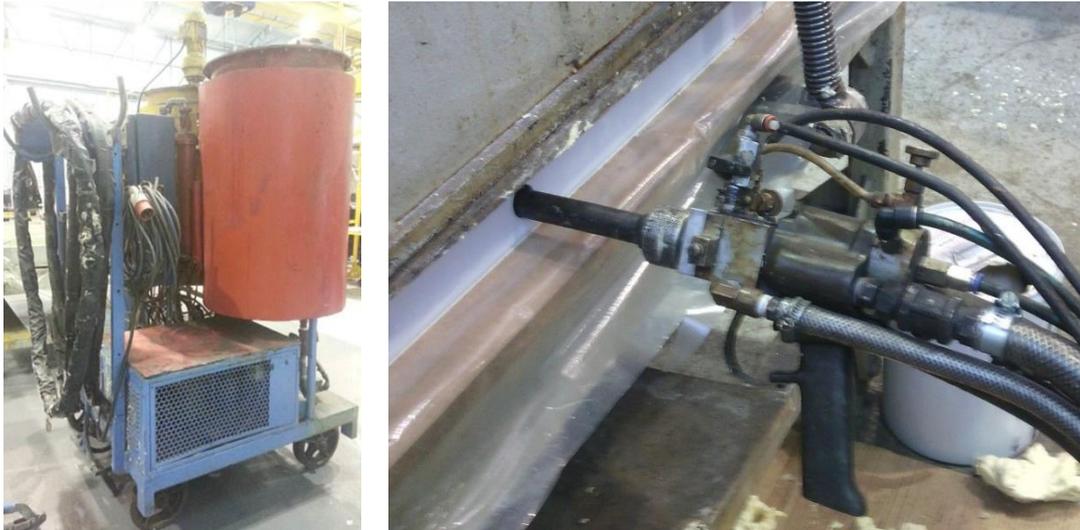


Figura 20 – Equipamento utilizado para injeção de PU.

Somente após esta cura é possível afirmar que o processo de injeção foi bem-sucedido e as amostras injetadas são confiáveis. Após a cura, os painéis foram cortados no formato e dimensões dos corpos de prova para ensaio, determinados pelas normas ASTM descritas posteriormente. Este corte foi realizado com serra circular em bancada, deixando os corpos de prova com dimensões maiores do que as solicitadas pela norma. Posteriormente, os corpos de prova foram lixados até a medida final. A Figura 21 mostra as amostras cortadas para ensaio.

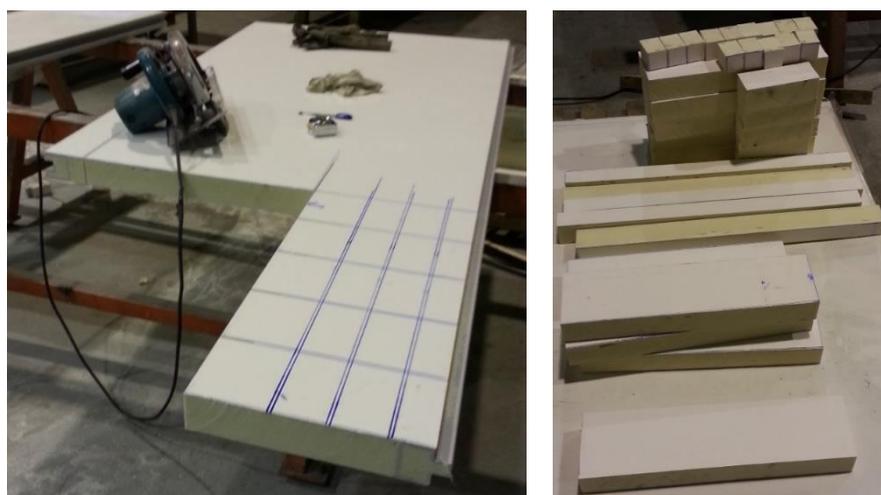


Figura 21 – Amostras cortadas para ensaio.

4.1.2. Caracterização dos Painéis Sanduíche

A determinação das propriedades dos compósitos utilizados nas faces dos painéis sanduíche foi realizada por meio corpos de prova confeccionados com base em normas ASTM específicas para cada tipo de ensaio, conforme será visto a seguir. As amostras das duas configurações de compósito ensaiadas foram produzidas pelo processo de laminação contínua, conferindo maior homogeneidade e repetibilidade das propriedades mecânicas das amostras. Após a fabricação das placas de fibra de vidro, as mesmas foram cortadas nos tamanhos especificados e encaminhadas para a realização dos ensaios conforme norma específica para cada tipo de ensaio.

A primeira avaliação realizada foi do teor mássico de fibra de vidro que contém o material. Este ensaio foi realizado conforme ASTM D 5630 e a Figura 22 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.



Figura 22 – Mufla utilizada para determinação do teor de reforço com relação a massa em compósitos (a) e vista das amostras (b).

Para os ensaios mecânicos, foi utilizada uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 3382, equipada com uma célula de carga com capacidade de 5 kN. O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D3039/D3039M, com corpos de prova retangulares com 25 mm de largura e 175 mm de comprimento e foram ensaiados com velocidade de 2 mm/min. Apesar da norma recomendar espessura de 2 mm, ensaiaram-se as amostras (3 CPs por tipo de reforço) disponíveis, com espessura de 1,2 mm e de 1,9 mm. Optou-se por realizar os ensaios nas espessuras finais para facilitar a comparação direta entre os materiais analisados. A Figura 23

apresenta o corpo de prova utilizado para este ensaio, com destaque para o início da falha.

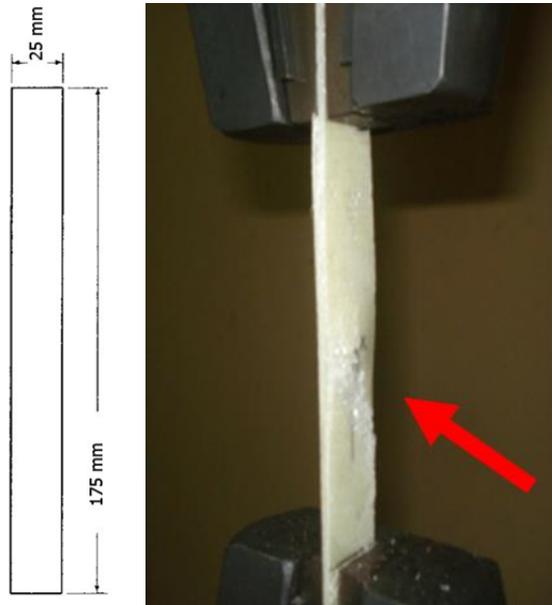


Figura 23 – Detalhe do corpo-de-prova utilizado em ensaio de tração (a) e fixação nas garras (b).

O ensaio de compressão dos compósitos foi realizado de acordo com a norma ASTM D6641/D6641M, com corpos de prova retangulares com 12 mm de largura e 140 mm de comprimento e foram ensaiados com velocidade de 1,3 mm/min. Para este ensaio, é necessária a colocação de *tabs* em cada extremidade do corpo de prova, de forma a garantir que o mesmo não flambe, como mostra a Figura 24(a). O ensaio de cisalhamento dos compósitos foi realizado segundo a norma ASTM D7078/7078M e o corpo de prova está apresentado na Figura 24(b) e foram ensaiados com velocidade de 2 mm/min. Utilizaram-se sempre 3 e 5 CPs por tipo de reforço, respectivamente.

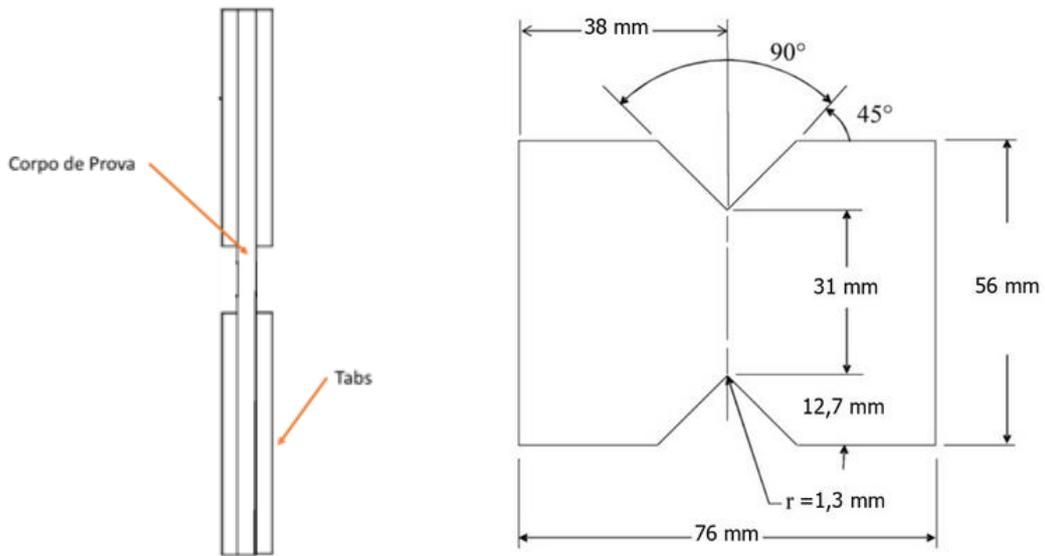


Figura 24 – Amostra utilizada para ensaio de compressão (a) e de cisalhamento (b) dos compósitos das faces.

A validação experimental dos painéis sanduíche foi realizada em corpos de prova confeccionados com base em normas ASTM específicas e utilizando a mesma máquina universal de ensaios Instron. Inicialmente foi realizado o ensaio de compressão de núcleo pela norma ASTM C365/C365M, como mostra a Figura 25. Para este ensaio, optou-se por utilizar como CP os painéis prontos, ao invés do núcleo isolado, para minimizar alguma influência do processo fabril nas características das espumas finais se produzida por outro método. Os corpos de prova foram fabricados com largura de 50 x 50 mm e espessura de núcleo de 64 mm e foram ensaiados com velocidade de 10 mm/min.



Figura 25 – Ensaio de compressão do núcleo dos painéis.

O ensaio de compressão longitudinal (*edgewise*) do painel sanduíche, apresentado na Figura 26(a) foi realizado conforme a norma ASTM C364/C364M. Diferentemente do ensaio anterior, este é influenciado decisivamente pelas propriedades da face do painel. Os corpos de prova foram fabricados com largura de 140 mm, comprimento de 500 mm e espessura de núcleo de 64 mm e foram ensaiados com velocidade de 5 mm/min.

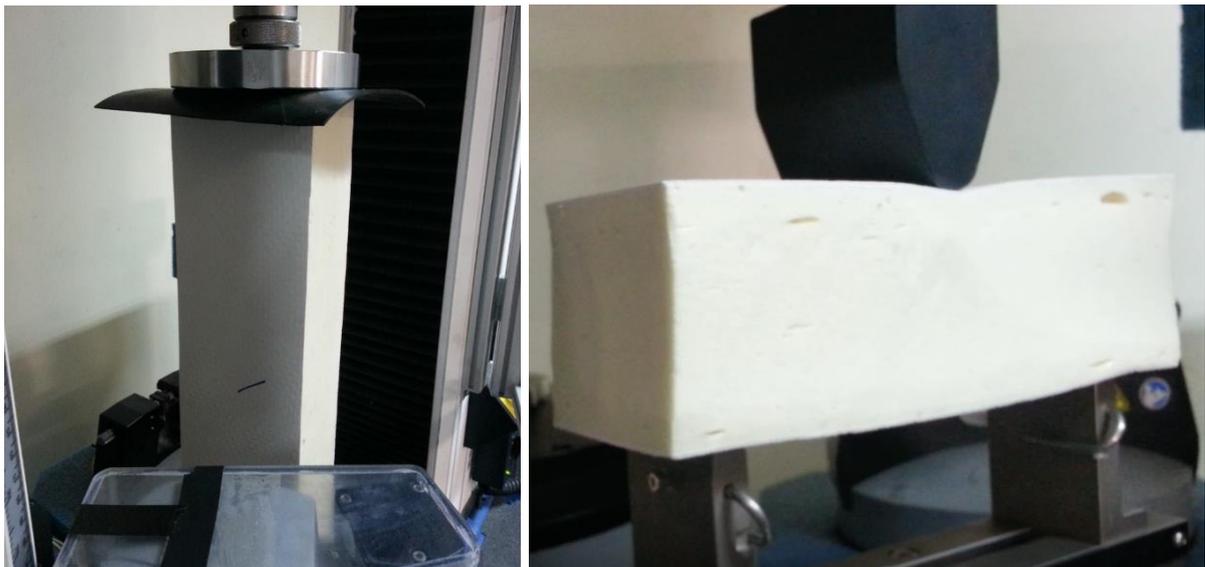


Figura 26 – Ensaio de compressão longitudinal (*edgewise*) (a) e de flexão (b) do painel sanduíche.

Por fim, foi realizado o ensaio de flexão de viga apresentado na Figura 26(b), conforme a norma ASTM C393/C393M, para determinação das propriedades de cisalhamento do núcleo. Os corpos de prova foram fabricados com largura de 70 mm, comprimento de 140 mm e espessura de núcleo de 64 mm e foram ensaiados com velocidade de 20 mm/min. Pode-se observar pequenas falhas no núcleo de PU, derivadas do processo de fabricação dos painéis. Esta falha é considerada normal neste tipo de processo de fabricação, mas deve ser controlada.

Este ensaio permite avaliar como o painel se comporta em flexão e como se dá o cisalhamento do núcleo, sendo considerado o mais usual para painéis sanduíche com faces em compósitos reforçados com fibras. Apesar de muito popular devido à sua simplicidade de aplicação para avaliação do cisalhamento do painel, este ensaio produz uma estimativa conservadora, pois o painel está sendo submetido a tensão máxima de flexão no mesmo ponto da tensão de cisalhamento máxima (MANALO, 2013).

4.2. Análise Estrutural dos Painéis Sanduíche

A análise das propriedades dos compósitos propostos no presente estudo para utilização nos painéis sanduíche foi realizada por meio do programa MECH-Gcomp, utilizando valores de referência encontrados na literatura e em fichas técnicas para os constituintes deste compósito. Por meio do MECH-Gcomp, é possível obter estimativas de propriedades dos materiais propostos, acelerando a velocidade de desenvolvimento de novos materiais. Os materiais analisados foram submetidos, posteriormente, aos ensaios mecânicos para confirmar suas propriedades.

O MECH-Gcomp é uma ferramenta para cálculos de propriedades de materiais compósitos poliméricos desenvolvida pelo Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos do Laboratório de Materiais Poliméricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (GCOMP/LAPOL/UFRGS, [s.d.]). O mesmo possui um banco de dados contendo diversos modelos para a análise micromecânica, permitindo a determinação das propriedades elásticas e resistência de uma lâmina por meio da Lei das Misturas, Halpin-Tsai, Elasticity Approach, fibras aleatórias e fibras curtas, orientadas ou aleatórias no plano. Por permitir a inclusão de novos reforços e matrizes,

calcular as propriedades mecânicas por meio de modelos diferentes e permitir analisar os resultados com o auxílio de gráficos e tabelas, o MECH-Gcomp se torna uma ferramenta importante para cálculo de propriedades micromecânicas de uma lâmina de compósito.

A análise estrutural dos painéis sanduíche foi realizada utilizando o método dos elementos finitos através do programa comercial Abaqus versão 6.14, referência na análise de materiais compósitos. Utilizou-se elementos sólidos e, como entrada, as propriedades do núcleo e dos materiais de face encontrados em literatura técnica, obtidos com o programa MECH-Gcomp ou por ensaios dos compósitos.

Para o núcleo, as propriedades de tração ($E=25 \text{ kg.f/cm}^2$; $\sigma_t=2 \text{ kg.f/cm}^2$), flexão ($\sigma_f=4,2 \text{ kg.f/cm}^2$) e cisalhamento ($G=25 \text{ kg.f/cm}^2$) foram retiradas da literatura. As propriedades de compressão ($\sigma_c=2,45 \text{ kg.f/cm}^2$) também, em um primeiro momento, mas posteriormente foi inserida a curva experimental no Abaqus para maior precisão. Já para os materiais das faces, os mesmos foram obtidos por meio do MECH-Gcomp para os estudos iniciais (manta: $E=7,98 \text{ GPa}$ e $\nu=0,379$; tecido: $E=13,15 \text{ GPa}$ e $\nu=0,354$). Após os ensaios mecânicos, os mesmos foram calibrados com os valores dos ensaios. A Figura 27(a) mostra o modelo utilizado para o cálculo de compressão de núcleo, a Figura 27(b) para flexão e a Figura 27(c) para compressão longitudinal (*edgewise*).

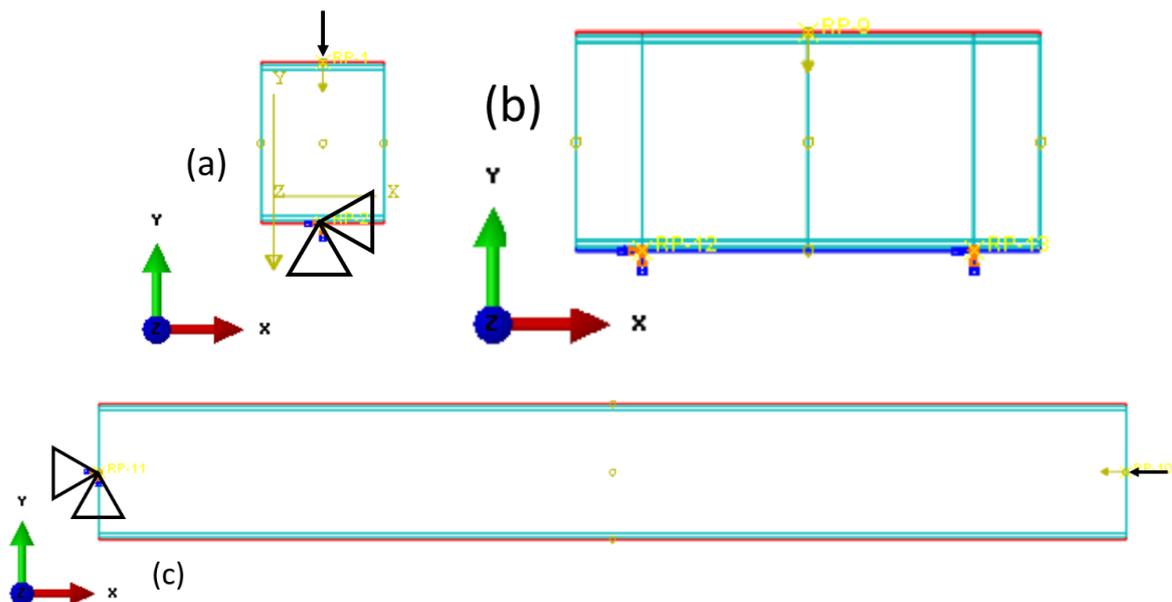


Figura 27 – Modelo para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (*edgewise*) (c) dos painéis sanduíche.

Para o cálculo utilizando estes modelos, a malha foi confeccionada com o elemento C3D8R, padrão do Abaqus, linear com integração reduzida de 8 nós. Para o ensaio de compressão de núcleo, foi utilizada malha padrão com elementos de 1 mm. Para a ensaio de flexão, foi utilizada malha padrão com elementos de 2 mm. Já para o ensaio de compressão longitudinal (*edgewise*), foi utilizada malha padrão com elementos de 5 mm. A Figura 28(a) mostra a malha utilizada para compressão de núcleo, a Figura 28(b) para flexão e a Figura 28(c) para compressão longitudinal (*edgewise*).

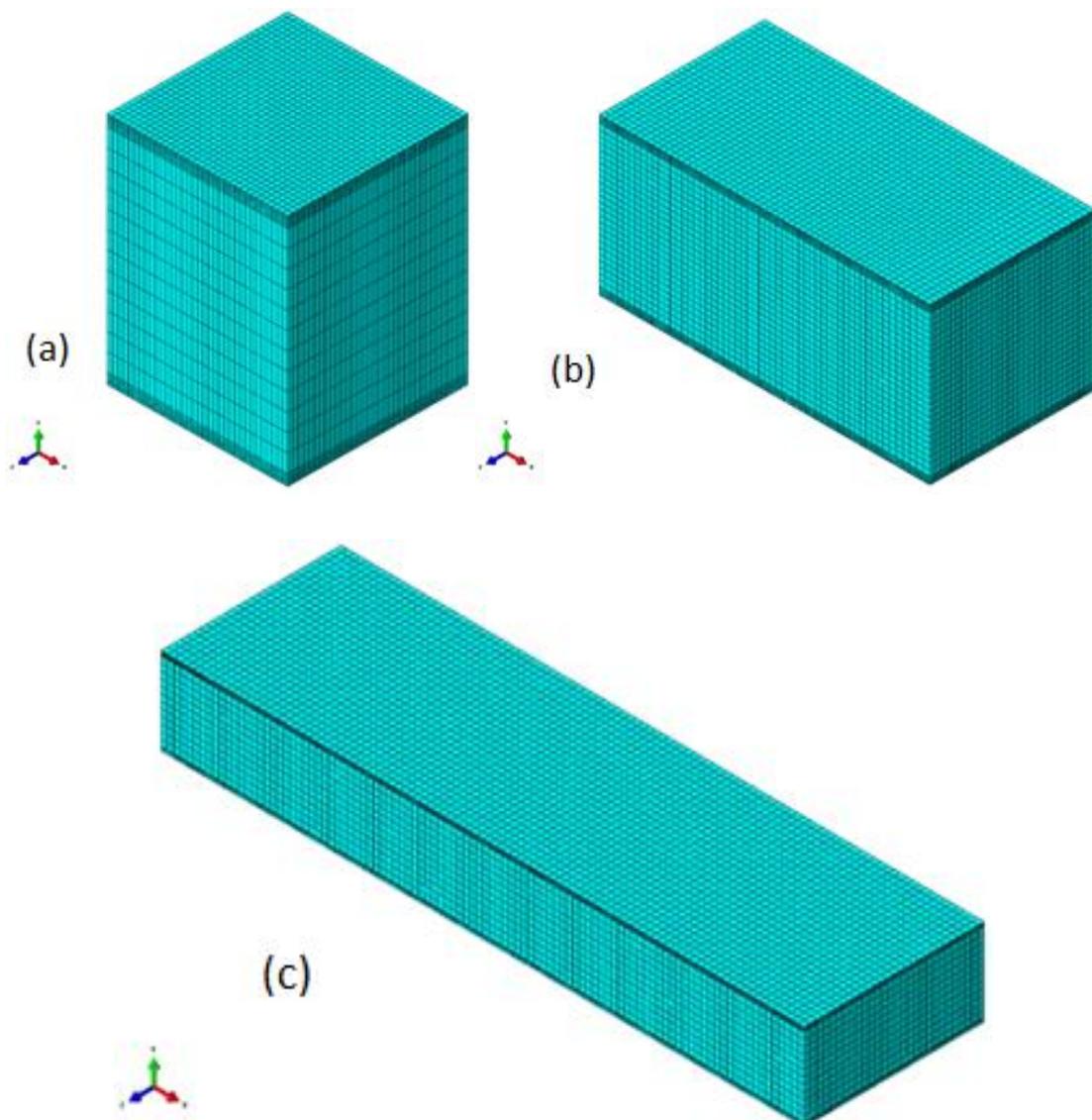


Figura 28 – Malha para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (*edgewise*) (c) dos painéis sanduíche.

A Tabela 1 mostra o número de elementos e nós para cada malha criada.

Tabela 1 – Número de elementos e nós da malha para cada ensaio.

	ELEMENTOS	NÓS
Compressão de núcleo	30056	33075
Flexão	67704	72960
Compressão longitudinal (<i>edgewise</i>)	72800	79083

O refinamento de malha para todos os modelos foi feito com 4 elementos na espessura das faces de fibra de vidro e 4 elementos no início do núcleo de poliuretano (área de transição entre face e núcleo). A consideração de 4 elementos na espessura das faces e no início do núcleo e os testes de independência de malha são derivados de ensaios e análises realizados anteriormente, não sendo objetivo de estudo neste trabalho. Da mesma forma, foram utilizados os mesmos parâmetros utilizados anteriormente, validados em estudos anteriores. A Figura 29(a) mostra o refinamento da malha utilizada para compressão de núcleo, a Figura 29(b) para flexão e a Figura 29(c) para compressão longitudinal (*edgewise*).

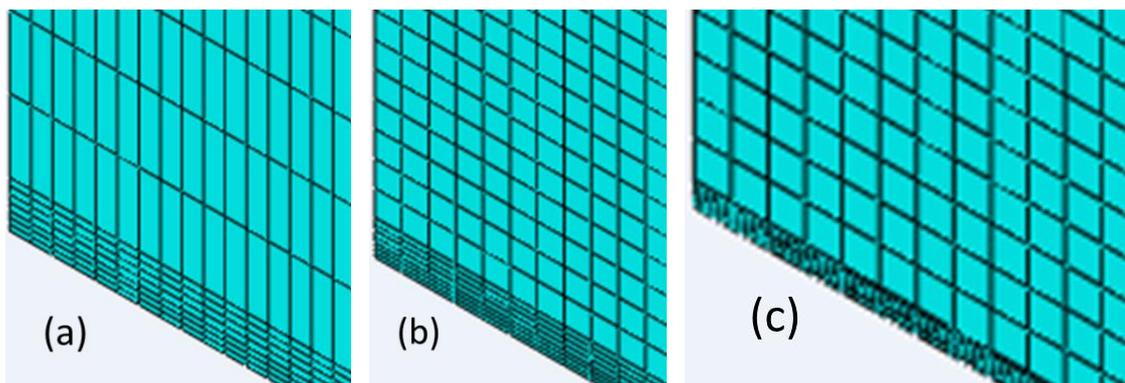


Figura 29 – Refinamento da malha para cálculo de compressão de núcleo (a), flexão (b) e compressão longitudinal (*edgewise*) (c) dos painéis sanduíche.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A validação dos compósitos utilizados nas faces do sanduíche proposto é de grande importância pois suas propriedades afetam decisivamente as propriedades do painel como um todo. Primeiramente, foi avaliado o teor de fibra de vidro nos compósitos com manta e tecido com relação ao seu peso. Quanto maior a quantidade de reforço, com relação ao peso, maior será em geral a resistência do compósito que está sendo analisado atendendo um limite que nos compósitos estruturais é em torno de 65% em volume.

Para esta avaliação, foi utilizada a norma ASTM D5630, utilizada para a determinação de conteúdo inorgânico em polímeros por meio de queima destrutiva. Este método permite detectar teores de cinzas maiores do que 0,01% e é limitada à análise de materiais estáveis a 900°C, incluindo vidro. Polímeros fluorados e halogenados não estão inclusos neste procedimento (ASTM D5630-13: Standard Test Method for Ash Content in Plastics, [s.d.]).

A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados neste ensaio, com a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Vê-se que o teor de fibra foi maior para o compósito reforçado com tecido, o que indica propriedades mecânicas superiores para o mesmo.

Tabela 2 – Teor mássico de fibras nos compósitos com manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Massa Média Inicial	1,50	1,28
Massa Média Final	0,59	0,69
Fração Mássica de fibra – W_f (%)	39	54
Desvio Padrão	0,6	1,4
Coeficiente de Variação (%)	1,5	2,5

A resistência mecânica à tração do material compósito está diretamente relacionada às propriedades dos constituintes, sua proporção e o ângulo de alinhamento das fibras. Assim, quanto mais alinhado estiver o ângulo de aplicação das cargas com o ângulo de alinhamento das fibras, maior será a resistência do compósito (KAYNAK *et al.*, 2005).

Para a avaliação do comportamento dos compósitos à tração foi utilizada a norma ASTM D3039/D3039M. Esta norma determina as propriedades de tração de compósitos poliméricos reforçados com materiais de alto módulo. Pode ser utilizada para compósitos com reforços contínuos ou descontínuos dispostos de forma simétrica com relação a direção do ensaio (ASTM D3039/D3039M-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, [s.d.]).

A Figura 30 apresenta as curvas obtidas no ensaio de tração para os compósitos com mantas ou tecidos. Vê-se que as curvas apresentam comportamentos parecidos, com deformações similares e resistência mecânica superior para o compósito construído com tecido.

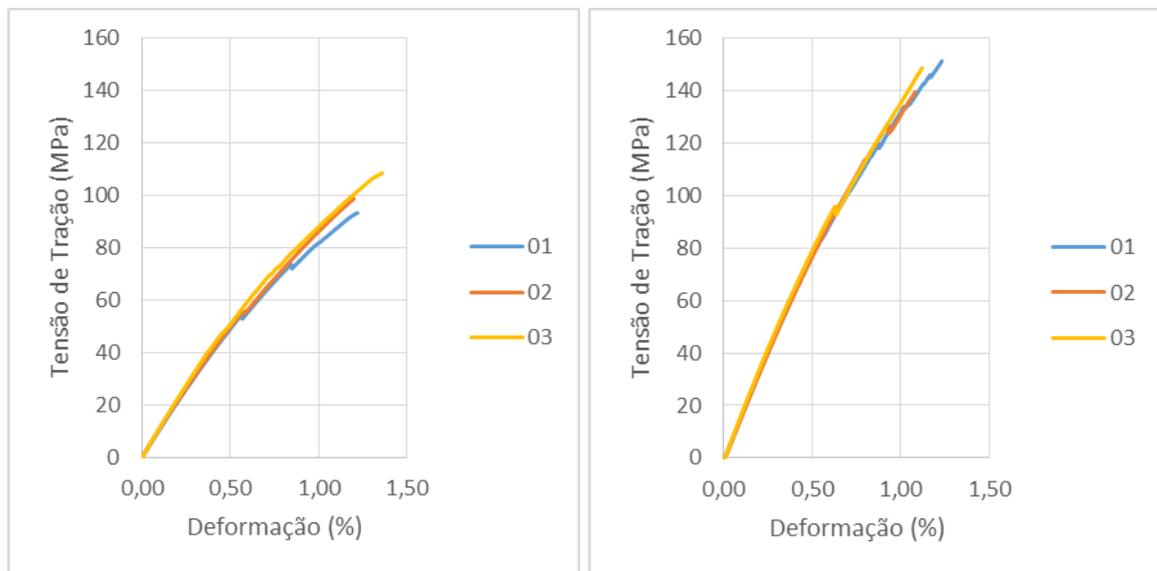


Figura 30 – Resultado do ensaio de tração: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.

Analisando o comportamento dos gráficos é possível observar-se um comportamento levemente serrilhado ao final das curvas. Este comportamento pode acontecer, na maioria dos casos, por dois motivos. Um destes motivos está relacionado com a característica construtiva dos compósitos, onde pode-se ter o início do rompimento das fibras e, conseqüentemente, a redução da rigidez do compósito, reduzindo a inclinação da curva tensão/deformação. Outro motivo comum para este tipo de comportamento é relacionado as condições de ensaio do compósito. Devido ao fato dos corpos de prova não terem sido confeccionados com *tabs*, pode estar ocorrendo o escorregamento da garra durante o ensaio. Quando este efeito é

observado de forma a prejudicar o ensaio, recomenda-se refazer os ensaios utilizando *tabs* e comparar os resultados obtidos com e sem este artifício.

A Tabela 3 mostra os resultados encontrados neste ensaio. Vê-se que a resistência mecânica do compósito reforçado com tecido de vidro apresenta comportamento superior ao reforçado com manta. Este mesmo comportamento pode ser observado com relação ao módulo de elasticidade, pois a deformação na ruptura demonstrada pelo compósito com tecido é um pouco menor do que a apresentada para o compósito com manta.

Tabela 3 – Comparativo do ensaio de tração entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Deformação Máxima Média (%)	1,26	1,15
Desvio Padrão	0,09	0,08
Coeficiente de Variação (%)	6,9	6,7
Resistência Média (MPa)	100	146
Desvio Padrão	7,8	6,2
Coeficiente de Variação (%)	7,8	4,2
Tensão Média à 0,5% de Deformação (MPa)	50	78
Desvio Padrão	0,9	1,2
Coeficiente de Variação (%)	1,8	1,6
Módulo Longitudinal (GPa)	8	13
Desvio Padrão	0,3	0,5
Coeficiente de Variação (%)	3,7	3,9

Quando se compara os resultados da resistência média com os resultados da tensão média à deformação de 0,5%, podemos observar a mesma distribuição de carregamento. Isto demonstra que, neste ensaio, os dois materiais apresentaram um comportamento frágil, quase sem deformação plástica até atingirem a ruptura. Este comportamento é esperado em materiais compósitos, sendo característico dos mesmos.

O compósito construído com manta, por possuir fibras curtas com orientação aleatória, é quase-isotrópico, possuindo as mesmas propriedades mecânicas em

todas as direções exceto na direção da espessura. O compósito construído com tecido bidirecional 0/90°, por possuir fibras orientadas nestas direções, possui as mesmas propriedades mecânicas a 0° e 90°. No entanto, em qualquer outra direção intermediária, as propriedades mecânicas variam de acordo com o ângulo que está sendo avaliado. Desta forma, mesmo possuindo E_1 e E_2 iguais, o compósito com tecido é considerado ortotrópico.

A Tabela 4 apresenta a comparação dos resultados encontrados neste ensaio para o módulo de elasticidade E_1 com o calculado pelo programa Mech-G utilizando a abordagem Halpin-Tsai para o compósito com manta e Lei das Misturas para o compósito com tecido. Para o compósito com tecido, a Lei das Misturas foi aplicada dividindo a quantidade de fibra de vidro por dois, representando a quantidade de fibra de vidro na direção longitudinal. Encontra-se uma diferença de 0,34% para o compósito confeccionado com manta e de 2,79% para o compósito confeccionado com tecido. Esta diferença pode ser considerada baixa para aplicações em semirreboques, justificada pelas incertezas envolvidas na fabricação e no ensaio, como quantidade de vazios, fibras desalinhadas durante a fabricação e escorregamento da garra durante o ensaio.

Tabela 4 – Comparativo entre o valor teórico e o resultado do ensaio de tração.

	MANTA			TECIDO		
	Teórico Mech-G	Real	Variação (%)	Teórico Mech-G	Real	Variação (%)
Ex (GPa)	7,98	7,96	-0,34	13,15	12,79	-2,79

Para esta análise, foi utilizada a norma ASTM D6641/D6641M, utilizada para a determinação das propriedades de compressão de compósitos de matriz polimérica usando um carregamento de compressão. Este procedimento é aplicado para compósitos de forma geral, desde que os mesmos sejam balanceados e simétricos. A mesma pode ser utilizada sem *tabs* (Procedimento A) e com *tabs* (Procedimento B), conforme necessidade. O Procedimento A é recomendado para materiais de baixa ortotropia, com no máximo 50% das camadas a 0°. Já o Procedimento B é recomendado para materiais de média e alta ortotropia, onde normalmente é recomendado o uso de *tabs*. O comprimento útil, segundo ASTM D6641, é de 12,7

mm para este tipo de ensaio (ASTM D6641/D6641M-16e1: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, [s.d.]).

As curvas dos ensaios de compressão dos compósitos com mantas e tecidos de fibra de vidro são mostradas na Figura 31.

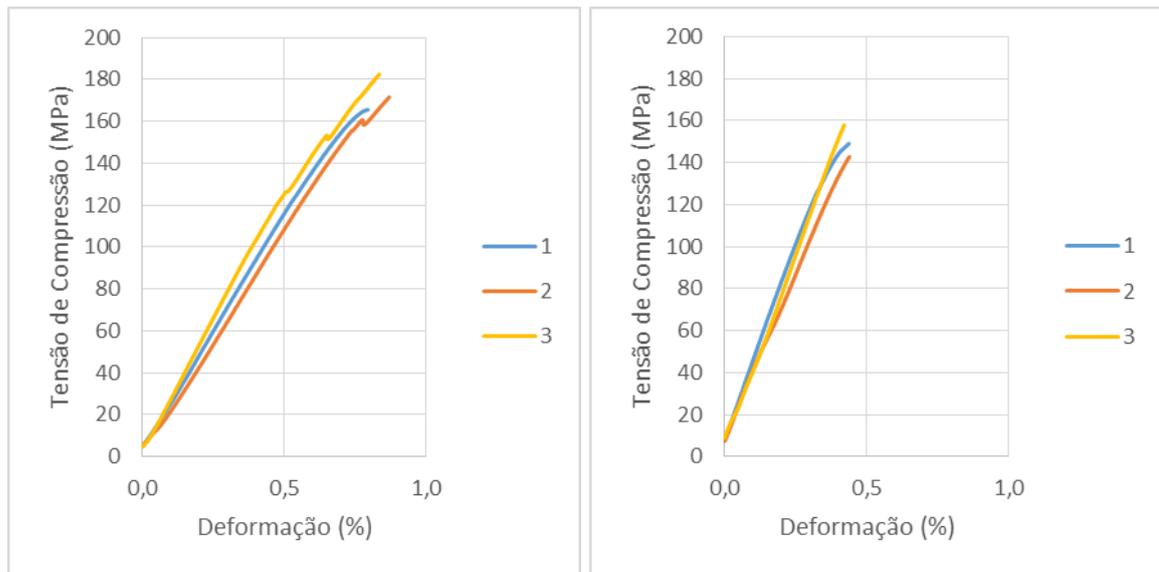


Figura 31 – Resultado do ensaio de compressão: (a) manta e (b) tecido bidirecional 0/90°.

Para os compósitos fabricados com tecido, pode-se perceber um comportamento mecânico similar aos fabricados com manta, apesar dos valores encontrados serem um pouco diferentes. Esta diferença, como no ensaio de tração, pode ser justificada pela maior quantidade de fibra de vidro e pela orientação das fibras do tecido. Pode-se perceber um módulo de elasticidade muito maior para o compósito reforçado com tecido, decorrente da maior quantidade de reforço contido no mesmo.

A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados no ensaio de compressão. Pode-se observar uma resistência menor e uma deformação bem menor para o compósito fabricado com tecido em relação ao com manta. No entanto, a resistência à compressão aparente diminuiu somente 12%, o que não prejudica a aplicação deste compósito na maioria dos casos. Deve-se levar em conta também o fato de que este material não é aplicado em regiões próximas à ruptura, devendo ser avaliado em mais pontos da sua curva.

Tabela 5 – Comparativo do ensaio de compressão entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Deformação Máxima Média (%)	0,83	0,43
Desvio Padrão	0,04	0,01
Coefficiente de Variação (%)	4,5	2,4
Resistência Média (MPa)	173	150
Desvio Padrão	8,5	7,6
Coefficiente de Variação (%)	4,9	5,0
Tensão Média à 0,3% de Deformação (MPa)	72	112
Desvio Padrão	7,3	7,8
Coefficiente de Variação (%)	10	7

Apesar da resistência a compressão ter diminuído, quando se compara a tensão de compressão à 0,3% de deformação, temos um aumento de 56% na resistência quando se utiliza tecido. Este aumento ocorre dentro da faixa de deformação onde o tecido é aplicado, pois o mesmo não é exigido próximo a tensão de ruptura, mas é exigido dentro da região elástica.

Em seguida, foi realizado o ensaio de cisalhamento dos compósitos com os dois tipos de reforço. Para este ensaio foi utilizada a norma ASTM D7078/D7078M, utilizada para a determinação das propriedades de cisalhamento de compósitos com reforços de alto módulo de elasticidade. Os corpos de prova são presos no dispositivo pelas pontas e possuem um entalhe em forma de V em seu centro. Quando as pontas são acionadas em tração, transferem cargas de cisalhamento para o interior do compósito, provocando sua falha no entalhe. Este entalhe deve ser usinado, de forma a garantir as dimensões necessárias para evitar distorções nos resultados do ensaio. As aplicações deste ensaio são restritas a laminados unidirecionais, balanceados ou simétricos com as fibras a 0° ou 90°, tecidos e mantas (ASTM D7078/D7078M-12: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method, [s.d.]).

As curvas dos ensaios de cisalhamento dos compósitos com mantas e tecidos de fibra de vidro são mostradas na Figura 32, e vê-se um perfil de curva distinto em cada caso, onde as curvas do compósito reforçado com manta apresentam uma resistência

maior e comportamento quase elástico antes da ruptura, com pouca deformação plástica. Já as curvas do compósito reforçado com tecido apresentam um comportamento visco-elástico já no início do ensaio, possuindo uma resistência mecânica menor e uma deformação maior.

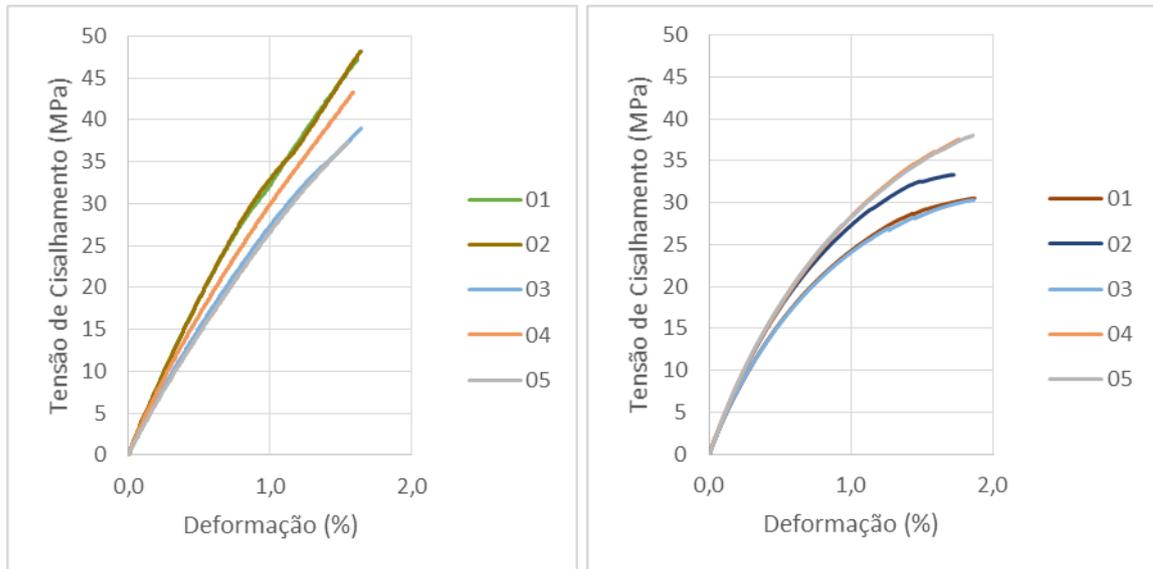


Figura 32 – Resultado do ensaio de cisalhamento: a) manta 1,9 mm e b) tecido bidirecional 1,2 mm com orientação 0/90°.

A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados neste ensaio. Mesmo com o aumento no teor de fibra de vidro, a resistência ao cisalhamento do compósito reforçado com tecido é inferior à do compósito reforçado com manta. Este resultado pode também ser explicado pela orientação das fibras. A manta possui as fibras orientadas aleatoriamente em muitas direções, por isso sua resistência ao cisalhamento é igual em todas as direções e normalmente maior do que a encontrada em compósitos reforçados com tecido bidirecional quando as direções de orientação são 0/90. Caso o tecido estivesse orientado nas direções $\pm 45^\circ$, a resistência ao cisalhamento seria bem maior.

Novamente, a redução de 21% na resistência ao cisalhamento não deve prejudicar a maioria das aplicações em implementos rodoviários para compósitos de resina poliéster reforçados com fibra de vidro. Este tipo de compósito é utilizado normalmente na indústria automotiva, onde é utilizado um coeficiente de segurança de 2 e uma

redução deste nível em compressão e cisalhamento não prejudica a aplicação do material.

Tabela 6 – Comparativo do ensaio de cisalhamento entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Deformação Máxima Média (%)	1,61	1,83
Desvio Padrão	0,04	0,08
Coeficiente de Variação (%)	2,3	4,3
Resistência Média (MPa)	43	34
Desvio Padrão	4,8	3,6
Coeficiente de Variação (%)	11,2	10,7
Tensão Média à 0,3% de Deformação (MPa)	11	11
Desvio Padrão	1,2	0,7
Coeficiente de Variação (%)	11	6

Quando se realiza a análise da tensão média à 0,3% de deformação, dentro do limite elástico do material, se pode perceber um desempenho muito parecido entre os dois compósitos. Desta forma, quando o carregamento aplicado for de cisalhamento dentro do regime elástico, utilizando os materiais apresentados neste trabalho, esta propriedade não precisa ser considerada na escolha do material.

Núcleos confeccionados em poliuretano possuem um comportamento característico quando submetidos à compressão, caracterizado por uma zona linear elástica no início da curva, uma zona de colapso das células com tensão quase constante, e uma zona de aumento da densidade do núcleo onde a tensão aumenta exponencialmente. Este comportamento é comum em diversos polímeros (MOHAMED *et al.*, 2015).

Após a análise dos materiais de face, se realizou a análise dos painéis. O primeiro ensaio foi o de compressão de núcleo, realizado para os dois tipos de materiais de face (manta e tecido), apesar deste ensaio ser determinado pelas propriedades do núcleo, e não das faces. Para este ensaio foi utilizada a norma ASTM C365/C365M, que determina a resistência à compressão e módulo de elasticidade de núcleos de painéis sanduíche. A mesma pode ser utilizada para determinação das propriedades

em diversas direções e também com núcleos contínuos (madeira balsa e espumas) e descontínuos (*honeycomb*) (ASTM C365/C365M-16: Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, [s.d.]).

As curvas obtidas nesses ensaios de compressão são mostradas na Figura 33. Estas curvas possuem dispersão na fase de colapso das células devido a variações no processo produtivo.

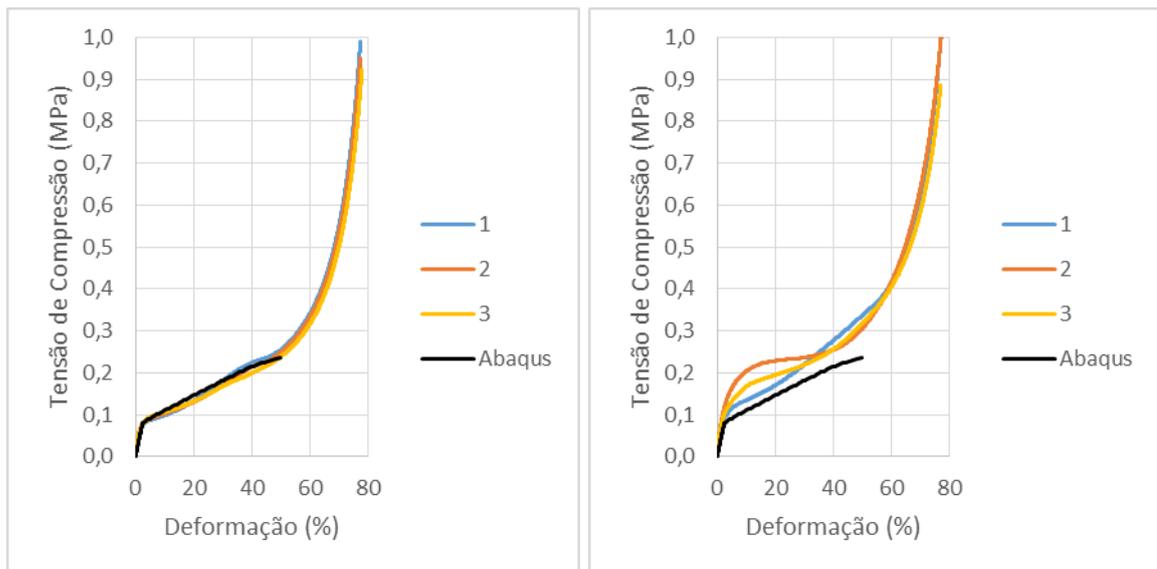


Figura 33 – Resultado do ensaio de compressão de núcleo: a) manta 1,9 mm e b) tecido bidirecional 1,2 mm com orientação 0/90°.

Comparando as curvas nos gráficos, pode-se observar que o comportamento à compressão do núcleo do painel não é afetado de forma significativa pelos materiais de revestimento da face. E a pequena variação observada entre as amostras de uma mesma família pode ser atribuída a variações no processo produtivo do núcleo, pois o mesmo apresenta variação de ordem prática devido à sua natureza manual.

Este ensaio foi realizado para identificar possíveis variações decorrentes da fabricação dos painéis. Porém, como os resultados não apresentaram variação, pode-se esperar que os núcleos se comportarão de maneira similar em todos os ensaios dos painéis sanduíche. Além disso, como o material da face não possui influência no comportamento do painel, pode-se usar este ensaio simples para controle de qualidade dos núcleos. Este tipo de material é largamente utilizado na indústria

automotiva e dispor de uma curva calibrada para utilização em estudos futuros permite o desenvolvimento de novos painéis sanduíche.

A Tabela 7 compara os resultados obtidos no ensaio de compressão de núcleo para os dois tipos de revestimento onde novamente vê-se a similaridade nos resultados.

Tabela 7 – Comparativo do ensaio de compressão de núcleo entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Resistência Média (MPa)	954	967
Desvio Padrão	33,7	69,7
Coefficiente de Variação (%)	3,5	7,2

Considerando o número de parâmetros que influenciam o comportamento mecânico de painéis sanduíche, o modelamento computacional deste tipo de painel é complexo e deve ser acompanhado de validação. Existem atualmente poucos modelos numéricos capazes de prever este comportamento com precisão, tornando esta tarefa mais complicada do que para outros materiais (SADIGHI, Mojtaba; HOSSEINI, 2013).

Nas simulações realizadas, foram avaliadas somente as partes 1 e 2 da curva que representa o comportamento do PU, conforme explicado na abordagem teórica, devido à faixa de trabalho deste material em sua aplicação na indústria automotiva. As partes 1 e 2 da curva contemplam a região elástica e o início da região visco-elástica, onde o painel apresenta tensão quase constante e sofre aumento em sua deformação.

Para que se consiga fazer a validação do cálculo realizado pelo método dos elementos finitos, plotou-se o gráfico das amostras juntamente com o cálculo realizado na Figura 33. Analisando o gráfico, pode-se observar que o cálculo é bastante preciso para deformações de até 50% e pode ser utilizado sem restrições. Deformações de trabalho maiores de 50% são pouco usuais na indústria e não serão analisadas neste trabalho. Assim, o cálculo realizado no programa Abaqus apresentou resultado praticamente idêntico ao ensaiado em laboratório, estando validado para a utilização em trabalhos futuros dentro de uma faixa controlada.

Já a análise de compressão longitudinal apresenta grande dependência das propriedades das faces deste painel, em detrimento das propriedades do núcleo. De forma geral, esta análise é realizada com uma das extremidades do painel com grau de liberdade zero em todas as direções e a outra extremidade com uma placa de carregamento com todos os graus de liberdade de deslocamento e rotação livres (SADIGHI, Mojtaba; HOSSEINI, 2013).

Para esta análise foi utilizada a norma ASTM C364/C364M, que determina as propriedades de compressão longitudinal de painéis sanduíche. Este procedimento permite a determinação das propriedades de compressão na direção das faces do painel, podendo ser utilizada com núcleos contínuos (madeira balsa e espumas) e descontínuos (*honeycomb*) (ASTM C364/C364M-16: Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, [s.d.]).

As curvas obtidas nos ensaios de compressão longitudinal das estruturas sanduíche estão apresentadas na Figura 34. Vê-se que, de forma geral, estas iniciam com uma pequena região de acomodação do painel seguido de um comportamento quase linear até a falha por ruptura do mesmo.

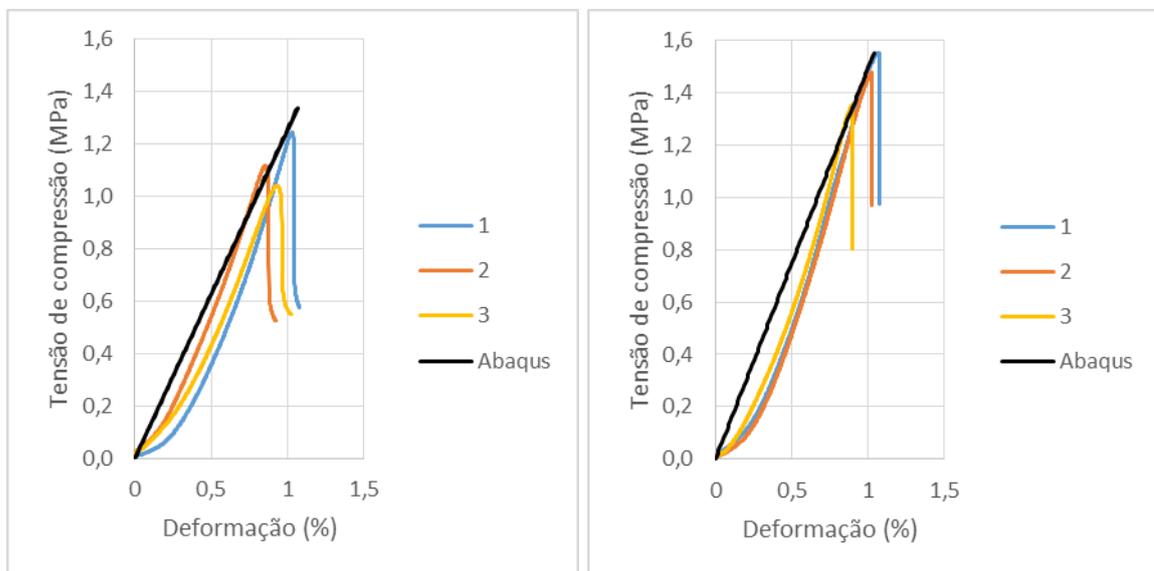


Figura 34 – Resultado do ensaio de compressão longitudinal do painel com: (a) manta e (b) tecido bidirecional 0/90°.

Diferentemente da compressão do núcleo, no ensaio de compressão longitudinal do painel se espera uma variação nas propriedades mecânicas relacionada às propriedades da face. A carga de compressão do sanduíche, da mesma forma que a resistência à compressão e à flambagem aumenta com o aumento do módulo de elasticidade das faces (YEH; WU, 1991).

Para a compressão longitudinal, houve uma evidência do aumento de resistência relacionado à troca de material de face do painel. Isto ocorreu apesar do compósito da face reforçado com tecido ter apresentado uma menor resistência à compressão. No entanto, quando se compara este resultado com a tensão à deformação de 0,3% do tecido, o mesmo apresenta comportamento esperado, com aumento na resistência mecânica do painel.

A Tabela 8 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados de compressão do sanduíche. Observa-se que a alteração de manta para tecido provocou um aumento de 14% na resistência à compressão do sanduíche. Isto ocorre mesmo com a redução da espessura das faces (redução de 37% no caso do tecido).

Tabela 8 – Comparativo dos resultados de compressão dos painéis sanduíche.

	MANTA	TECIDO
Deformação Máxima Média (%)	1,01	1,00
Desvio Padrão	0,08	0,09
Coeficiente de Variação (%)	7,9	9,2
Resistência Média (MPa)	1134	1297
Desvio Padrão	103,4	99,8
Coeficiente de Variação (%)	9,1	7,7

Analisando os gráficos entre os ensaios realizados e os resultados numéricos encontrados, também apresentados nas Figura 34(a)-(b), percebe-se uma grande diferença entre estes. Esta diferença é explicada pela forma construtiva do modelo numérico, onde foi considerada a perfeita adesão entre os materiais das faces e o núcleo. Esta condição não é reproduzida no ensaio, pois devido à grande diferença

de módulos de elasticidade, começa a ocorrer o descolamento da fibra de vidro do núcleo.

De fato, em núcleos de poliuretano, é comum observar delaminação da face do sanduíche, pois a diferença na capacidade de deformar das faces e do núcleo é significativa. Este efeito é prejudicial para o desempenho do painel e artifícios de engenharia devem ser adotados para a solução deste problema (CORREIA *et al.*, 2012). Em aplicações automotivas desenvolvidas com painéis sanduíche em condições similares de carregamento, este é montado com as duas extremidades restritas, de forma que as faces não possam se desprender do núcleo nesta região, que é crítica em termos de descolamento.

Desta forma, para efeitos de cálculos preliminares, pode-se utilizar o modelo numérico, mas se faz imprescindível a realização de ensaios de laboratório com painéis de tamanho real em sua aplicação final. Para os painéis sanduíche, a adesão entre o núcleo e as faces é tão importante quanto as propriedades dos materiais do núcleo e das faces em si. Assim, o comportamento estrutural deste tipo de painel só pode ser avaliado completamente se for avaliada esta adesão, como em ensaio de compressão de sanduíche, que é amplamente difundido por ser de fácil execução e propiciar resultados confiáveis.

No ensaio de compressão da estrutura sanduíche, a determinação do tipo de falha é muito importante para a avaliação do comportamento da estrutura, podendo indicar sua região mais frágil. Assim, torna-se possível desenvolver soluções para que este tipo de comportamento possa ser evitado (VADAKKE; CARLSSON, 2004). Além de delaminação/descolamento da face com o núcleo, pode ocorrer durante o ensaio de flexão do painel, cisalhamento do núcleo, cisalhamento das faces e esmagamento das faces. Para núcleos de PU estes outros modos de falha são menos comuns, mas não menos prejudiciais ao desempenho do painel (FLECK; SRIDHAR, 2002).

Por último, realizou-se o ensaio de flexão 3 pontos para avaliação do cisalhamento do núcleo. Para esta análise, foi utilizada a norma ASTM C393/C393M, que determina as propriedades de cisalhamento do núcleo de uma forma que os momentos aplicados no painel geram a curvatura dos planos das faces do painel. Este procedimento pode ser utilizado para materiais com núcleo contínuo (madeira balsa e espumas) e

descontínuo (*honeycomb*) (ASTM C393/C393M-16: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, [s.d.]).

Na flexão em 3 pontos as propriedades dos materiais do núcleo e das faces influenciam diretamente o comportamento do painel. Este ensaio também permite verificar o comportamento da interface entre o núcleo e as faces do painel. Para efeitos de cálculo numérico, esta adesão foi considerada perfeita, mas nos ensaios a falha pode ocorrer nessa interface.

A Figura 35 mostra o resultado dos ensaios dos painéis neste ensaio, onde se pode observar uma menor homogeneidade nos resultados, tornando mais difícil a análise.

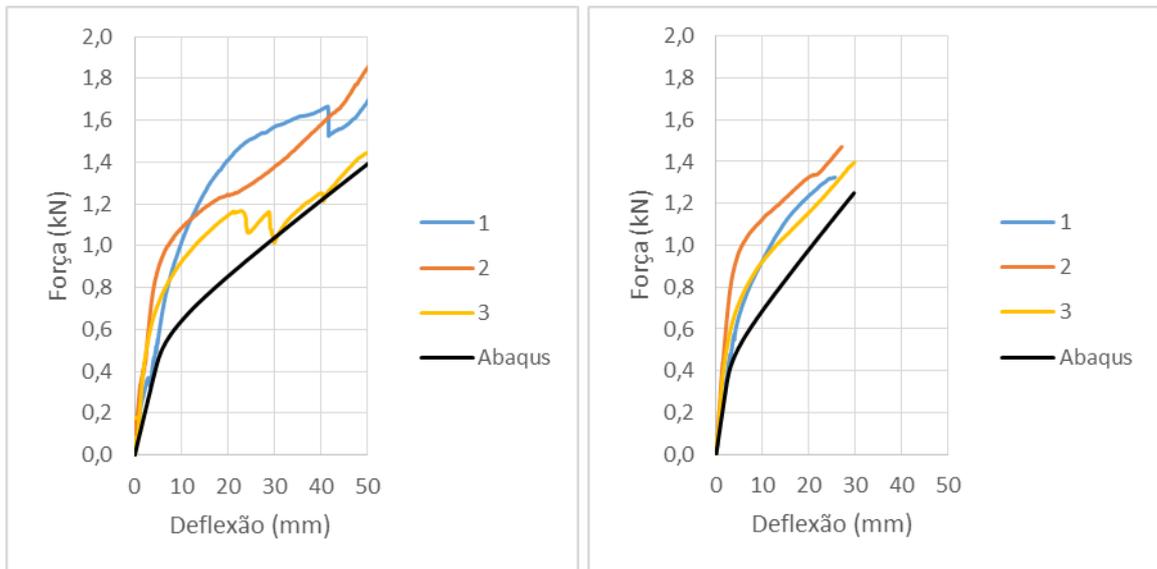


Figura 35 – Resultado do ensaio de flexão com: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.

De forma geral, as cargas aumentam de forma linear com a deflexão até que o núcleo começa a falhar sob esforços de compressão e, especialmente, de cisalhamento. Depois de atingido este ponto, o painel começa a se comportar de forma visco-elástica, mudando a inclinação da curva até que fique horizontal. Os ensaios do painel com os revestimentos fabricados com tecido apresentaram comportamento similar aos fabricados com manta.

No painel revestido com faces fabricadas com tecido, pode-se notar a influência da maior rigidez das faces no comportamento do sanduíche. Este comportamento é esperado, pois o ensaio de flexão tem seu resultado diretamente associado às propriedades das faces. Devido a este comportamento mais rígido do painel revestido com tecido, se pode perceber que o mesmo apresentou deflexão final menor do que o painel revestido com manta.

Os materiais que constituem o painel sanduíche possuem, em sua grande maioria, comportamento não-linear. Este comportamento é evidenciado com maior influência no núcleo, devido às suas características de fabricação e ao seu comportamento não-linear. E como as deformações dos materiais de face são muito menores do que as deformações do núcleo quando o painel está sendo submetido a flexão, a não-linearidade dos mesmos pode ser desconsiderada para simplificação do modelo numérico, pois o núcleo irá se deformar muito mais durante o carregamento, falhando antes do material das faces (MOSTAFA; SHANKAR; MOROZOV, 2013).

A Tabela 9 apresenta o comportamento para o ensaio de flexão da estrutura sanduíche com os dois tipos de placa de face. Vê-se que a deflexão e a força média encontrados para o painel com revestimentos fabricados com manta apresentam valores maiores do que para o painel com faces fabricadas com tecido, demonstrando a maior rigidez do painel revestido com tecido.

Tabela 9 – Comparativo do ensaio de flexão entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Deflexão Máxima Média (mm)	53	28
Desvio Padrão	2,1	2,1
Coefficiente de Variação (%)	3,9	7,7
Força Máxima Média (N)	1742	1398
Desvio Padrão	259,9	72,5
Coefficiente de Variação (%)	14,9	5,2

Desta forma, quando são comparados os dois resultados em conjunto, pode-se perceber claramente a influência das propriedades dos materiais das faces no comportamento do painel sanduíche quando submetido à flexão. Com esta percepção

da influência das propriedades do material das faces no comportamento do painel, é possível combinar as propriedades ideais para cada aplicação, otimizando o desempenho. Desta forma, é possível prevenir alguns tipos de falha de flexão indesejados para a aplicação escolhida.

Utilizando a norma ASTM C393, é possível calcular a tensão máxima de cisalhamento do núcleo e a tensão nas faces, utilizando as equações (4) e (6) da norma, representadas pelas Equações (1) e (2).

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d + c)b} \quad (1)$$

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

onde, F_s^{ult} é a tensão máxima de cisalhamento do núcleo, P_{max} é a carga máxima antes da falha, d é a espessura do sanduíche, c é a espessura do núcleo, b é a largura do sanduíche, σ é a tensão nas faces, S é a distância entre os apoios e t é a espessura dos materiais das faces. A Tabela 10 mostra o comportamento dos painéis com os valores calculados conforme essa norma. Vê-se que o painel com faces fabricadas com manta possui uma resistência maior ao cisalhamento de núcleo, porém a resistência do painel com tecido é superior quando avaliamos a tensão das faces.

Tabela 10 – Comparativo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces entre manta e tecido.

	MANTA	TECIDO
Tensão Máxima de Cisalhamento do Núcleo (MPa)	0,19	0,15
Desvio Padrão	0,03	0,09
Coefficiente de Variação (%)	14,9	5,2
Tensão nas Faces (MPa)	4,97	6,38
Desvio Padrão	0,74	0,33
Coefficiente de Variação (%)	14,9	5,2

Quando se avalia o resultado obtido para o cálculo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo, têm-se um desempenho superior para o painel com faces fabricadas com manta de espessura de 1,9 mm. Este painel apresenta uma resistência ao cisalhamento do núcleo 21% maior do que o painel com faces fabricadas com tecido de espessura de 1,2 mm. Isto pode ser explicado devido ao menor módulo de elasticidade das faces com manta, aumentando o esforço transferido para o núcleo pelas faces.

Já quando se avalia o resultado obtido para o cálculo de tensão nas faces, têm-se um desempenho superior para o painel com faces fabricadas com tecido de espessura de 1,2 mm. Este painel apresenta uma resistência nas faces 28% maior do que o painel com faces fabricadas com manta de espessura de 1,9 mm. Devido ao maior módulo de elasticidade das faces de tecido, as mesmas assumem uma quantidade maior do carregamento, transferindo menos esforço para o núcleo.

As falhas macroscópicas no ensaio de flexão podem ser divididas, de forma geral: delaminação/descolamento da face superior, falha por compressão da face superior e falha por cisalhamento do núcleo. No primeiro caso, a tensão de cisalhamento na interface da face superior e do núcleo é maior que a resistência do adesivo que garante esta interface, ocorrendo a delaminação. No segundo caso, a tensão de compressão na face superior do sanduíche é maior que a resistência à compressão da face, ocasionando falha por compressão. E, no terceiro caso, a tensão de cisalhamento do núcleo excede sua resistência ao cisalhamento, ocasionando a falha. A delaminação pode ser prevenida alterando o tipo de adesivo ou adicionando elementos de reforço conectados às faces dentro do núcleo (WANG *et al.*, 2014).

Quando se compara os resultados encontrados no ensaio de flexão do painel com as estimativas numéricas, pode-se observar um perfil muito similar, porém os valores encontrados no numérico são inferiores. Apesar da variação encontrada poder ser considerada grande (até 20%), não afeta a aplicação do compósito na indústria automotiva pelos elevados coeficientes de segurança normalmente empregados, em torno de 2. Este efeito pode ser minimizado em painéis maiores, pois a deflexão é distribuída em uma maior área e o painel se comporta de forma mais parecida com uma viga clássica de Euler, com comportamento mais próximo ao do aço, minimizando os efeitos do cisalhamento do núcleo do painel. Do ponto de vista de engenharia

automotiva, o fato do comportamento da curva ser similar com valores absolutos inferiores, aumenta o coeficiente de segurança.

Avaliando o comportamento das propriedades no ensaio de flexão, após cálculo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces, comparou-se os resultados obtidos com o programa específico para compósitos *Autodesk Simulate Composite Design*. A Figura 36 mostra os resultados encontrados neste programa para manta e tecido.

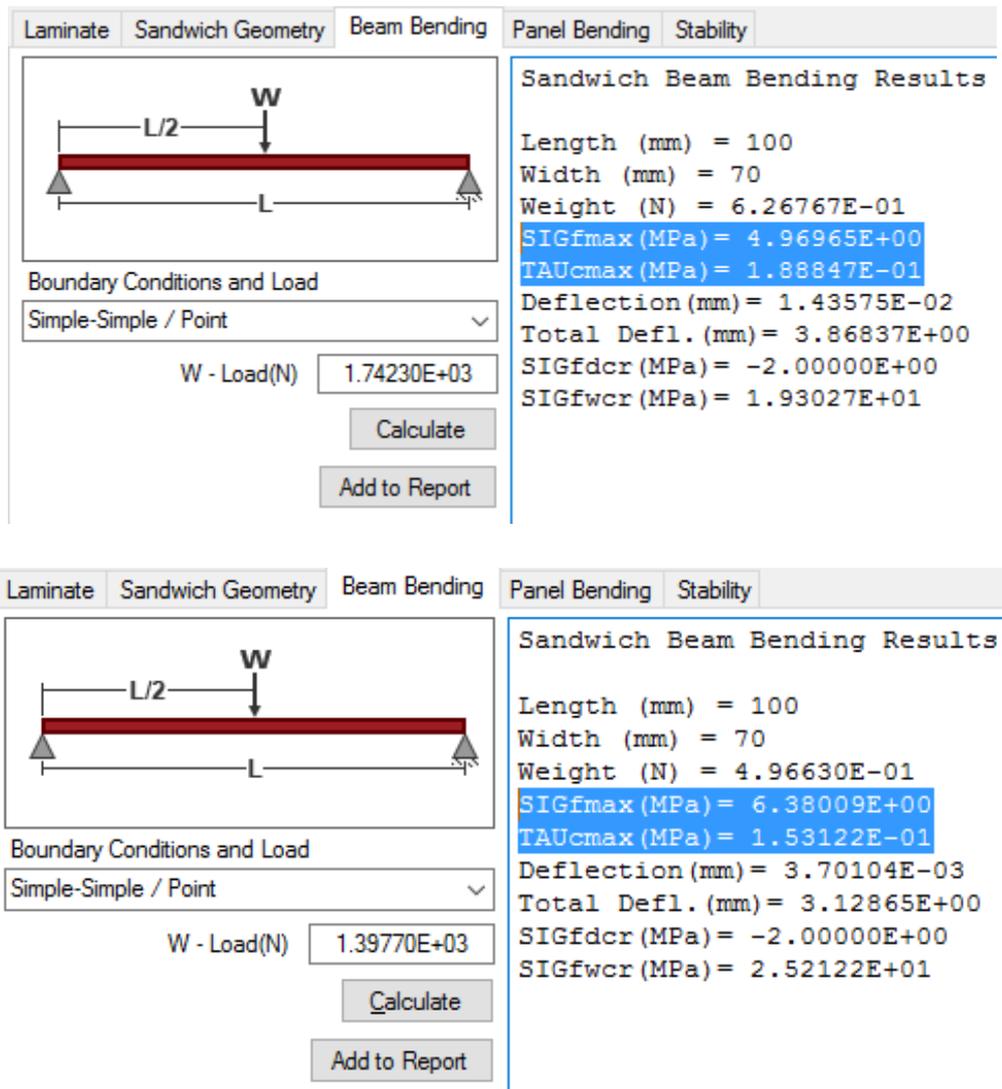


Figura 36 – Valores encontrados no *Autodesk Simulate Composite Design*: (a) manta e (b) tecido bidirecional com orientação 0/90°.

Este programa utiliza a Teoria Clássica de Placas, brevemente descrita no apêndice, para realizar os cálculos de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces. Esta teoria pode ser consultada com mais detalhes no apêndice, onde está detalhada para facilitar o entendimento.

A Tabela 11 mostra o comparativo entre os valores calculados conforme ASTM C393 e os valores calculados com o *Autodesk Simulate Composite Design*.

Tabela 11 – Comparativo de tensão máxima de cisalhamento do núcleo e tensão nas faces entre manta e tecido encontrados no ensaio e no *Autodesk Simulate Composite Design*.

	MANTA			TECIDO		
	Teórico	Real	Variação (%)	Teórico	Real	Variação (%)
Core Shear Ultimate Stress (MPa)	0,19	0,19	0,00014	0,15	0,15	-0,00017
Facing Stress (MPa)	4,97	4,97	-0,00002	6,38	6,38	-0,00007

Pode-se observar que os cálculos teóricos apresentam os mesmos resultados do ensaio, demonstrando que os resultados obtidos no Abaqus, apesar do comportamento similar ao ensaio, apresentam variações nos valores encontrados. Esta variação pode ser desconsiderada para a maioria dos ensaios, conforme disposto acima.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, observou-se um maior teor mássico de fibra de vidro no compósito com tecido, de menor espessura. Este teor maior de reforço, de forma geral, causa o aumento das propriedades mecânicas de tração, compressão e cisalhamento do compósito. O tipo de reforço, aleatório *versus* bidirecional, também afeta as propriedades. O tecido, por possuir as fibras orientadas somente em duas direções, apresentou um comportamento superior à tração e compressão quando comparado com a manta (orientação aleatória).

O programa MECH-Gcomp utilizado para a determinação das propriedades dos compósitos fabricados com fibra de vidro, nas configurações manta 1,9 mm e tecido bidirecional 1,2 mm apresentou resultados compatíveis comparados aos experimentais. As diferenças encontradas, abaixo de 3%, são insignificantes quando comparadas às variáveis encontradas no processo produtivo para a fabricação do compósito e o uso de propriedades tabeladas das fases. Mesmo com a utilização de um processo de laminação contínua, mais controlado do que outros tipos de laminação, o compósito pode apresentar variações nas propriedades maiores de 10%, consideradas normais e acompanhadas durante o processo produtivo, que devem ser compensadas pela escolha de um coeficiente de segurança adequado. Núcleos de poliuretano injetados podem apresentar diferenças de até 25% em suas propriedades térmicas e mecânicas devido a variações inerentes ao processo produtivo e estas variações devem ser consideradas no projeto de painéis com este tipo de núcleo.

Com os resultados encontrados, pode-se concluir que é possível reduzir a espessura de materiais compósitos mudando o tipo de reforço e o teor de fibra de vidro no compósito. Apesar da redução de espessura de 1,9 para 1,2 mm ser significativa, de aproximadamente 37%, o aumento na quantidade de reforço compensa a redução na espessura aumentando a resistência à tração em 46%, apesar de uma pequena diminuição na resistência a compressão. Esta pequena diminuição na resistência a compressão não é observada quando avaliamos o compósito em seu regime de trabalho, de até 0,3% de deformação, onde temos um aumento na tensão média de compressão de aproximadamente 56%. Quando avaliamos o comportamento de ambos os materiais em cisalhamento, o tecido possui um comportamento visco-elástico e resistência ao cisalhamento inferior. No entanto,

quando avaliamos a região de trabalho, de até 0,3% de deformação, o comportamento dos dois materiais é muito parecido. Além disso, a redução de espessura vai ao encontro de um dos principais objetivos na utilização dos materiais compósitos, a redução de peso aliada ao aumento de desempenho.

A análise estrutural dos compósitos utilizados nas faces do sanduíche é muito importante pois permite comparar, de forma ágil, diversas opções de materiais e definir qual se adapta melhor para a aplicação desejada. O fato de ser possível construir materiais das propriedades mais diversas por meio da combinação dos constituintes torna a agilidade fundamental para este tipo de desenvolvimento. No entanto, faz-se necessário realizar ensaios de caracterização dos materiais que compõem as faces e o núcleo do painel que será calculado, pois as propriedades de materiais poliméricos e compósitos variam de forma significativa de acordo com sua composição química, teor de cada componente, método de processamento e estocagem, entre outros.

Por fim, pode-se concluir com este trabalho que os materiais compósitos possuem excelente versatilidade e podem ser combinados das mais diversas formas para se encontrar o material que melhor atenda às necessidades de projeto e aplicação do produto final. Pontos fortes podem ser maximizados e pontos fracos minimizados ou eliminados com artifícios de engenharia encontrando assim o máximo desempenho do material que se deseja aplicar.

A possibilidade de combinação de propriedades mecânicas de forma a maximizar as propriedades desejadas e minimizar as propriedades indesejadas é um dos grandes trunfos dos materiais compósitos. Esta característica é maximizada quando se produzem painéis do tipo sanduíche, formando uma estrutura com propriedades mecânicas e comportamento completamente diferente dos seus constituintes. Esta característica os torna muito atrativos e certamente irá aumentar de forma incremental sua utilização.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros se deve aprofundar mais o estudo avaliando a confiabilidade do método dos elementos finitos na avaliação dos painéis sanduíche. Sugere-se especificamente:

- Avaliação de diferentes constituintes dos materiais de face pelo MEF (fibra de vidro x fibra de carbono x fibras vegetais).
- Avaliação de diferentes densidades de núcleo no comportamento do painel sanduíche.
- Avaliação de diferentes materiais de núcleo no comportamento do painel sanduíche.
- Outros ensaios de caracterização para comparação com os resultados obtidos com o MEF.
- Avaliação de diferentes técnicas utilizadas no MEF para comparação com os resultados experimentais.

8. REFERÊNCIAS

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and performance of fiber composites**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. Google-Books-ID: T1CtwL9uK5MC.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia cae**. São Paulo: Editora Érica, 2008.

ANSARI, M. Z. *et al.* Compressive behaviour of polymer/honeycomb sandwich composites. **American journal of materials science**, 2015. v. 5, n. 3C, p. 112–115.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 14457: implemento rodoviário – carroceria termicamente isolada – desempenho térmico**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

Astm c364/c364m-16: standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm c365/c365m-16: standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm c393/c393m-16: standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm d3039/d3039m-14: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm d3878-16: standard terminology for composite materials. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm d5630-13: standard test method for ash content in plastics. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm d6641/d6641m-16e1: standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (clc) test fixture. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

Astm d7078/d7078m-12: standard test method for shear properties of composite materials by v-notched rail shear method. [S.l.]: ASTM, [s.d.].

BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design, second edition**. [S.l.]: CRC Press, 2010. Google-Books-ID: fZSan7b5z0IC.

BATHE, K.-J.; BATHE, K.-J. **Finite element procedures**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1996.

BHAVIKATTI, S. S. **Finite element analysis**. [S.l.]: New Age International, 2005. Google-Books-ID: YzecxxuNJPwC.

BORST, R. De; SADOWSKI, T. (Org.). **Lecture notes on composite materials: current topics and achievements**. New York, NY: Springer, 2008.

CAN, E.; KINACI, E.; PALMESE, G. R. Preparation and characterization of novel vinyl ester formulations derived from cardanol. **European polymer journal**, nov. 2015. v. 72, p. 129–147.

CHOUFFART, Q.; SIMON, P.; TERRAPON, V. E. Numerical and experimental study of the glass flow and heat transfer in the continuous glass fiber drawing process. **Journal of materials processing technology**, maio. 2016. v. 231, p. 75–88.

CODYRE, L.; FAM, A. The effect of foam core density at various slenderness ratios on axial strength of sandwich panels with glass-frp skins. **Composites part b: engineering**, dez. 2016. v. 106, p. 129–138.

CORREIA, J. R. *et al.* Gfrp sandwich panels with pu foam and pp honeycomb cores for civil engineering structural applications: effects of introducing strengthening ribs. **International journal of structural integrity**, 25 maio. 2012. v. 3, n. 2, p. 127–147.

DAVIES, J. M. (Org.). **Lightweight sandwich construction**. London ; Malden, MA: Blackwell Science, 2001.

DEMHARTER, A. Polyurethane rigid foam, a proven thermal insulating material for applications between+ 130 c and- 196 c. **Cryogenics**, 1998. v. 38, n. 1, p. 113–117.

FAM, A.; SHARAF, T. Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and gfrp skins and ribs of various configurations. **Composite structures**, nov. 2010. v. 92, n. 12, p. 2927–2935.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

FLECK, N. A.; SRIDHAR, I. End compression of sandwich columns. **Composites part a: applied science and manufacturing**, mar. 2002. v. 33, n. 3, p. 353–359.

GAY, D.; HOA, S. V. **Composite materials: design and applications, second edition**. [S.l.]: CRC Press, 2007. Google-Books-ID: OvrLBQAAQBAJ.

GCOMP/LAPOL/UFRGS. **Mech-gcomp**. [S.l.: s.n., s.d.].

JEDARI SALAMI, S.; SADIGHI, M.; SHAKERI, M. Improved high order analysis of sandwich beams by considering a bilinear elasto-plastic behavior of core: an analytical and experimental investigation. **International journal of mechanical sciences**, abr. 2015. v. 93, p. 270–289.

JIANG, W. *et al.* An analytical model to predict the equivalent creep strain rate of a lattice truss panel structure. **Materials science and engineering: a**, abr. 2016. v. 661, p. 152–159.

JR, W. D. C. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

KAYNAK, C. *et al.* Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes. **Polymer testing**, ago. 2005. v. 24, n. 5, p. 648–655.

LAKAWICZ, J. M.; BOTTEGA, W. J. Branch dependent shear coefficients and their influence on the free vibration of mindlin plates. **Journal of sound and vibration**, fev. 2017. v. 389, p. 202–223.

LIU, C. *et al.* Development of biobased unsaturated polyester resin containing highly functionalized castor oil. **Industrial crops and products**, jan. 2014. v. 52, p. 329–337.

LUBIN, G. (Org.). **Handbook of composites**. Boston, MA: Springer US, 1982.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. 3rd ed., [expanded and rev. ed.] ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

MANALO, A. C. Behaviour of fibre composite sandwich structures under short and asymmetrical beam shear tests. **Composite structures**, maio. 2013. v. 99, p. 339–349.

MATTHEWS, F. L. (Org.). **Finite element modelling of composite materials and structures**. 1st publ ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press [u.a.], 2000.

MIRACLE, D. B. *et al.* **Asm handbook**. [S.l.]: ASM international Materials Park, OH, USA, 2001. V. 21.

MOHAMED, M. *et al.* Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures. **Composite structures**, maio. 2015. v. 123, p. 169–179.

MOSTAFA, A.; SHANKAR, K.; MOROZOV, E. V. Influence of shear keys orientation on the shear performance of composite sandwich panel with pvc foam core: numerical study. **Materials & design**, out. 2013. v. 51, p. 1008–1017.

NAZERAN, N.; MOGHADDAS, J. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application. **Journal of non-crystalline solids**, abr. 2017. v. 461, p. 1–11.

PARK, J.-H. *et al.* Characterization and application of propylene grafted hydrogenated dicyclopentadiene hydrocarbon resin. **International journal of adhesion and adhesives**, jul. 2016. v. 68, p. 326–332.

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**, jan. 2008. v. 264, n. 1–2, p. 96–105.

SADIGHI, Mojtaba; HOSSEINI, S. A. Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3d woven glass fiber composite sandwich panels. **Composites part b: engineering**, dez. 2013. v. 55, p. 158–166.

Sandwichelemente für den fahrzeugbau: aufbau, fertigung, montage, anwendung. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2006.

SIDDHARTHA; GUPTA, K. Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped e-glass fiber reinforced composite materials. **Materials & design**, mar. 2012. v. 35, p. 467–479.

TORREIRA, RAUL P. **Isolamento térmico**. São Paulo: Fulton Editora Técnica, 1980.

VADAKKE, V.; CARLSSON, L. A. Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond. **Composites part b: engineering**, set. 2004. v. 35, n. 6–8, p. 583–590.

VENTURA, A. M. F. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & tecnologia dos materiais**, 2009. v. 21, n. 3–4, p. 10–19.

VINSON, J. R. **The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials**. [S.l.]: CRC Press, 1999.

WANG, L. *et al.* Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: experimental investigation and analytical modeling. **Composites part b: engineering**, dez. 2014. v. 67, p. 270–279.

YEH, W.-N.; WU, Y.-E. Enhancement of buckling characteristics for sandwich structure with fiber reinforced composite skins and core made of aluminum honeycomb and polyurethane foam. **Theoretical and applied fracture mechanics**, 1991. v. 15, n. 1, p. 63–74.

YUE, Y. M.; RU, C. Q.; XU, K. Y. Modified von kármán equations for elastic nanoplates with surface tension and surface elasticity. **International journal of non-linear mechanics**, jan. 2017. v. 88, p. 67–73.

APÊNDICE – Teoria Clássica de Placas

O painel sanduíche é um tipo especial de estrutura, normalmente de 3 camadas, um núcleo espesso e duas faces finas, onde as faces são construídas de materiais rígidos. Para as faces pode-se considerar um estado plano de tensões, enquanto o núcleo transfere somente forças cisalhantes transversais (CODYRE; FAM, 2016).

Os problemas básicos na engenharia mecânica são as análises das tensões, da estabilidade estrutural e do comportamento vibracional utilizando modelos analíticos. Uma estrutura complexa deve ser construída de vários elementos estruturais individuais e o comportamento de toda a estrutura é afetado pela interação entre os elementos que compõem a mesma (BORST; SADOWSKI, 2008).

Elementos estruturais podem ser divididos em três categorias: elementos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. O elemento unidimensional possui duas dimensões de mesma ordem, referentes à sua seção transversal, e uma dimensão muito maior, referente ao comprimento. Os elementos bidimensionais possuem duas dimensões espaciais de mesma ordem e a terceira, referente à espessura, muito menor, enquanto os elementos tridimensionais possuem três dimensões espaciais de mesma ordem. Ao se utilizar elementos bidimensionais para a análise estrutural, emprega-se um sistema de equações diferenciais parciais onde as duas coordenadas representam a superfície e a espessura é aproximada por considerações de engenharia. A transição do sistema tridimensional para bidimensional não é trivial, mas o esforço para a resolução do problema diminui significativamente e a possibilidade de resolução analítica do problema aumenta (BORST; SADOWSKI, 2008).

Elementos estruturais bidimensionais possuem várias aplicações, como por exemplo placas finas homogêneas, placas finas não homogêneas (laminados e painéis sanduíche), placas moderadamente espessas, placas com anisotropia estrutural, placas dobradas, membranas, membranas biológicas etc. Os principais segmentos da indústria que utilizam esta tecnologia atualmente são aeronáutica, aeroespacial, naval, automotiva, sistemas veiculares, engenharia civil, medicina e etc. (BORST; SADOWSKI, 2008).

As teorias clássicas para placas podem ser divididas em dois grandes grupos, o das pequenas deformações, como as teorias de Kirchhoff e de Mindlin, e o grupo das grandes deformações, como as teorias de membrana e de Von Kármán. Para a utilização da teoria de Kirchhoff, deve-se observar algumas considerações e restrições. A deformação deve ser menor que 20% da espessura da placa, o material pode ser isotrópico e qualquer seção transversal deve ser plana e ortogonal ao plano central antes e após a deformação. Não é considerada variação na espessura da placa ou deformação cisalhante, e considera-se distribuições lineares de tensão nos planos e distribuição parabólica da tensão cisalhante transversal (BORST; SADOWSKI, 2008). A Figura 37 apresenta as considerações da teoria de Kirchhoff.

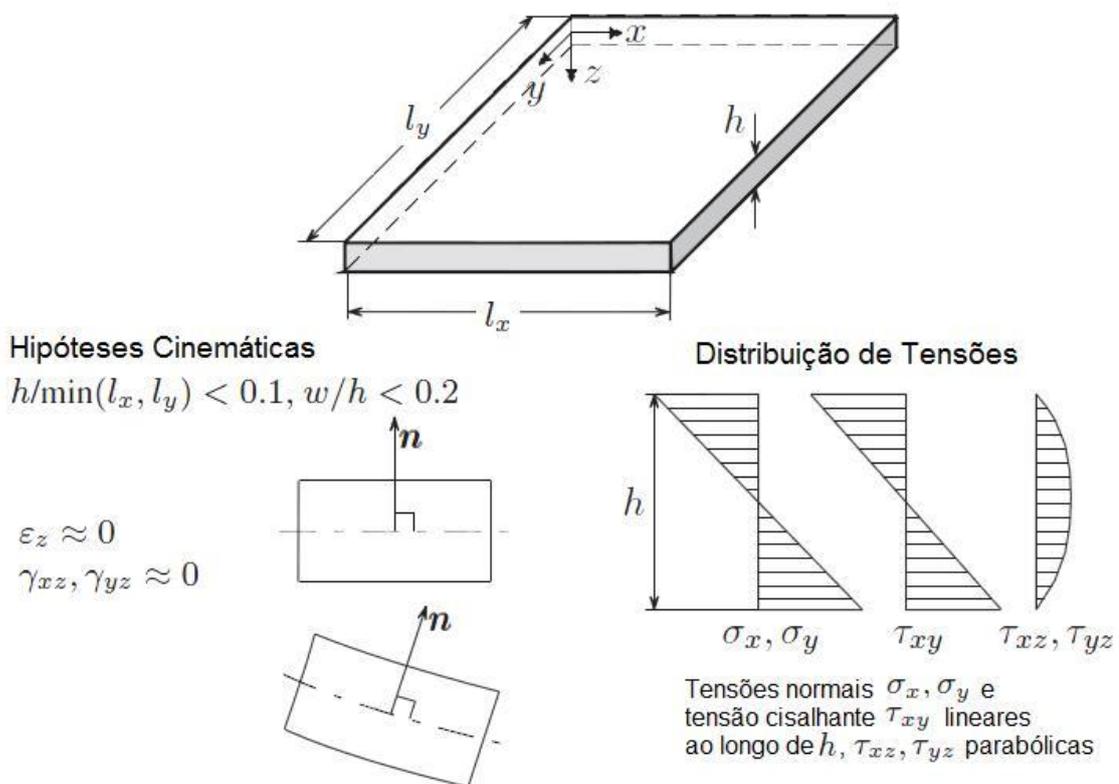


Figura 37 – Teoria de Kirchhoff – Considerações básicas (adaptado de: Borst *et al.*, 2008).

onde, l_x e l_y são, respectivamente, largura e comprimento do painel, w representa a deflexão e h a espessura do painel. Já ϵ_z representa a deformação ao longo do eixo z , γ_{xz} e γ_{yz} representam as deformações cisalhantes em x , y e z .

Já a teoria de Mindlin, apesar de muito parecida com a teoria de Kirchhoff, considera a deformação cisalhante. As considerações da teoria de Kirchhoff continuam válidas, exceto pelo fato da seção transversal após a deformação não ser

mais ortogonal ao plano médio. Esta consideração adiciona dois graus de liberdade ao sistema, duas rotações independentes. Não é considerada variação de espessura, a deformação cisalhante é definida por uma função constante, existem distribuições lineares de tensão nos planos e distribuição constante de tensão cisalhante transversal. Esta teoria pode ser aplicada para placas feitas de material compósito (painéis sanduíche) e para placas relativamente espessas, ou seja, placas para as quais não se pode utilizar a teoria de placas de Kirchhoff devido à influência do cisalhamento no comportamento do painel compósito ou da placa (LAKAWICZ; BOTTEGA, 2017).

Para grandes deformações, se pode utilizar a teoria de membrana e a teoria de Von Kármán. Na teoria de membrana, não é considerada variação de espessura, tensão cisalhante e o modelo assume um comportamento similar em tração e compressão, apesar de uma membrana não suportar compressão. Esta consideração é uma simplificação, de forma a tornar o cálculo mais acessível sem grandes recursos computacionais. No entanto, a teoria de Von Kármán traz um modelo para grandes deformações que considera as tensões de cisalhamento. Nesta, pode-se considerar o cisalhamento pela teoria de Kirchhoff ou Mindlin, tornando a teoria de Von Kármán ideal para a análise de compósitos sujeitos a grandes deformações. Para isso, Von Kármán sugeriu que a cinemática do sistema seja baseada em deformações de ordens diferentes. As deformações dentro do plano são pequenas, como na teoria de Kirchhoff, e as deflexões são grandes, e utiliza-se três equações diferenciais para os deslocamentos e duas equações diferenciais parciais para a deflexão (YUE; RU; XU, K. Y., 2017).

Para a análise de placas laminadas e painéis sanduíche, podem ser aplicadas as teorias vistas anteriormente, porém é necessário trocar a rigidez constante considerada nestas teorias pela rigidez efetiva do laminado ou sanduíche. E para a utilização de tais teorias, deve-se conhecer o comportamento (tensões admissíveis e rigidez do material) de cada camada que compõe o material em estudo, seja ele um laminado ou um painel sanduíche (BORST; SADOWSKI, 2008).

A Teoria Clássica dos Laminados (Teoria de Kirchhoff) se baseia na Lei de Hooke, utilizando as matrizes de rigidez e de flexibilidade representadas nas Equações (3) e (4).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

onde σ_n representa as tensões normais, τ_n representa as tensões cisalhantes, ε_n representa as deformações normais, γ_n representa as deformações cisalhantes, C_n representa os coeficientes de rigidez e S_n representa os coeficientes de flexibilidade.

Quando se avaliam materiais ortotrópicos simétricos, alguns valores das matrizes de rigidez e flexibilidade são considerados nulos, simplificando as matrizes conforme as Equações (5) e (6).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Para análises em 2D e considerando estado plano de tensões, as matrizes acima podem ser simplificadas conforme as Equações (7) e (8) que representam a relação tensão *versus* deformação para uma lâmina.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (8)$$

onde Q_n representa os coeficientes de rigidez para a matriz de rigidez 2D. Para se trabalhar com laminados, as equações utilizadas para lâminas são retrabalhadas formando a Equação Constitutiva do Laminado, conforme demonstrado na Equação (9).

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (9)$$

onde, N_x e N_y representam as forças normais / [comprimento], N_{xy} representa a força cisalhante / [comprimento], M_x e M_y representam os momentos normais / [comprimento], M_{xy} representa o momento cisalhante / [comprimento]. A matriz [A] é a matriz de rigidez extensional, a matriz [B] é a matriz de acoplamento e a matriz [D] é a matriz de rigidez de flexão e torção. As deformações ε_x e ε_y representam as deformações normais, γ_{xy} representa a deformação cisalhante, κ_x , κ_y e κ_{xy} representam as curvaturas do laminado.

Para laminados simétricos, a matriz [B] = 0, desta forma é possível simplificarmos o equacionamento, separando os mecanismos de deformação dos mecanismos de flexão, conforme demonstrado nas Equações (10) e (11).

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (11)$$

A aplicação da teoria de membrana ou de Von Kármán é similar à aplicação das teorias de Kirchhoff e Mindlin, mudando a ordem da deflexão a ser inserida em cada um dos conjuntos vetor-matriz apresentados anteriormente. Para determinar a deflexão e as tensões de um painel sanduíche de faces planas ou levemente perfiladas, utiliza-se a teoria convencional para vigas adicionando a deformação cisalhante (YUE; RU; XU, K. Y., 2017). A Figura 38 mostra as tensões e as deformações resultantes em um pequeno elemento de painel sanduíche, onde N representa a força normal atuando nas faces do painel, q representa a carga distribuída por unidade de comprimento, V_s é o esforço cortante, M_s é o momento fletor atuante no painel, σ_{F1} e σ_{F2} são as tensões normais atuantes nas faces e τ_c é a tensão cisalhante.

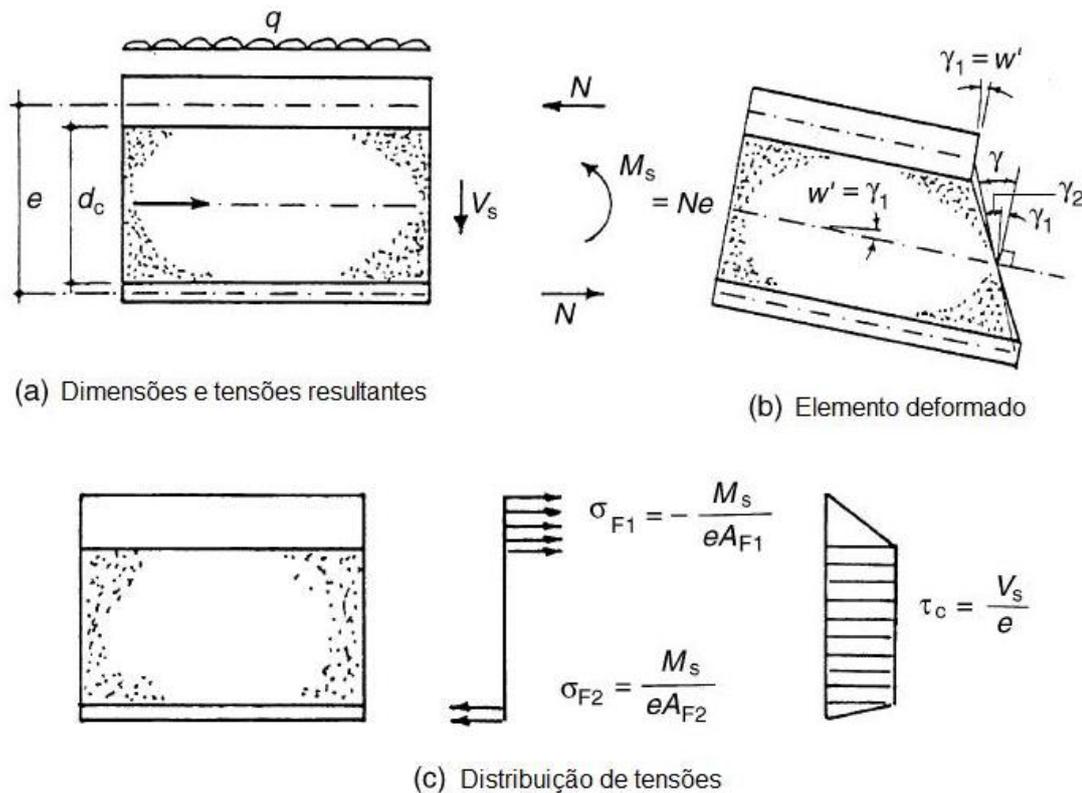


Figura 38 – Forças, deformações e tensões resultantes em um elemento de painel sanduíche de faces finas (adaptado de Davies, 2001).

As relações entre deformações e tensões resultantes podem ser escritas conforme as Equações (12) e (13).

$$M_s = B_s(\gamma_2' + \theta) = B_s(\gamma' - w'' + \theta) \quad (12)$$

$$V_s = A_c G_{eff} \gamma \quad (13)$$

Na Equação (10), B_s representa a rigidez do painel sanduíche, γ é a deformação cisalhante no núcleo do painel, w é a deflexão total do painel, θ representa a influência da variação da temperatura entre as duas faces, A_c representa a área efetiva do núcleo de espuma e G_{eff} é o módulo de elasticidade transversal efetivo do núcleo.

A Equação (14) mostra a equação para obtenção da rigidez do painel sanduíche.

$$B_s = \frac{E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2} e^2}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2}} \quad (14)$$

onde A_{F1} e A_{F2} representam as áreas das seções transversais das faces do painel, E_{F1} e E_{F2} são os módulos de elasticidade das faces do painel, e é a espessura do painel considerando a linha neutra das duas faces.

A Equação (15) mostra o cálculo do módulo de elasticidade transversal efetivo do núcleo.

$$G_{eff} = \frac{G_c e}{d_c} \quad (15)$$

onde G_c é o módulo de elasticidade transversal e d_c a espessura do núcleo do painel.

A influência da variação da temperatura entre as duas faces do painel é apresentada na Equação (16).

$$\theta = \frac{\alpha_{F2} T_2 - \alpha_{F1} T_1}{e} \quad (16)$$

onde α_{F1} e α_{F2} representam os coeficientes de dilatação térmica dos materiais das faces do painel e T_1 e T_2 são as temperaturas em cada uma das faces do painel.

As equações de equilíbrio para o painel são as equações tradicionais da mecânica dos sólidos, representadas pelas Equações (17) e (18).

$$\frac{dM_s}{dx} - V_s = 0 \quad (17)$$

$$\frac{dV_s}{dx} + q = 0 \quad (18)$$

Substituindo as Equações (17) e (18) nas Equações (12) e (13), obtêm-se as Equações (19) e (20).

$$B_s w'''' = q - \frac{B_s}{A_c G_{eff}} q'' \quad (19)$$

$$\gamma'' = -\frac{q'}{A_c G_{eff}} \quad (20)$$

Muitas vezes os momentos fletores e os esforços cortantes são determinados por meio das equações de equilíbrio estático e é possível simplificar o cálculo conforme demonstrado nas Equações (21) e (22).

$$w'' = -\frac{M_s}{B_s} + \frac{V'_s}{A_c G_{eff}} - \theta \quad (21)$$

$$\gamma = \frac{V_s}{A_c G_{eff}} \quad (22)$$

As equações acima descrevem o comportamento do painel sanduíche de uma forma geral, mas este equacionamento pode ser adaptado para atender casos específicos. No caso de um painel simplesmente apoiado com carga distribuída uniforme, com as condições de contorno apresentadas na Figura 39, o momento fletor e o esforço cortante podem ser determinados estaticamente, conforme mostram as Equações (23) e (24).

$$M_s = \frac{qL^2}{2} (\xi - \xi^2) \quad (23)$$

$$V_s = \frac{qL}{2} (1 - 2\xi) \quad (24)$$

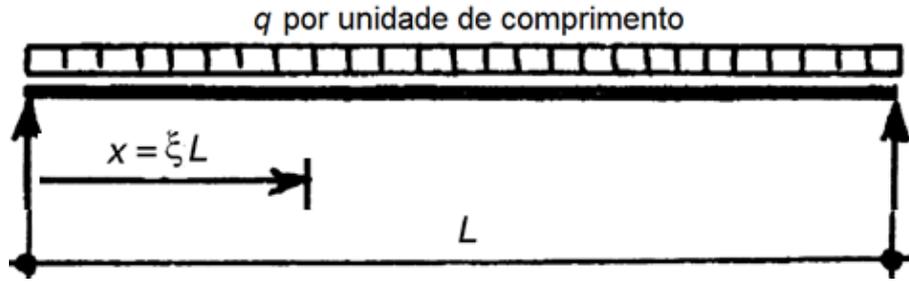


Figura 39 – Painel simplesmente apoiado com carga distribuída uniforme (adaptado de: Davies, 2001).

onde $\xi = x/L$. A deflexão do painel pode ser descrita pela Equação (25).

$$w = \frac{qL^4}{24B_s} \xi(1 - \xi)(1 + 4k + \xi - \xi^2) \quad (25)$$

As tensões máximas nas faces do painel ocorrem no meio do painel. As Equações (26)-(28) mostram o momento fletor máximo aplicado no painel, a tensão normal máxima nas faces do painel e a deflexão máxima do painel, respectivamente.

$$M_s \max = \frac{qL^2}{8} \quad (26)$$

$$\sigma \max = \pm \frac{qL^2}{8eA_F} \quad (27)$$

$$w \max = \frac{5qL^4}{384B_s} (1 + 3,2k) \quad (28)$$

onde, A_F é a área da seção transversal de cada face do painel e k pode ser obtido conforme a Equação (27):

$$k = \frac{3B_s}{A_c G_{eff} L^2} \quad (27)$$

A tensão cisalhante máxima no núcleo do painel ocorre nos suportes, enquanto a deflexão máxima ocorre no centro do painel. Considerando B a largura do painel, as Equações (30) e (31) fornecem o esforço cortante e a tensão cisalhante máximos, respectivamente.

$$V_s max = \pm \frac{qL}{2} \quad (30)$$

$$\tau_c max = \frac{qL}{2Bd_c} \quad (31)$$

Já no caso de um painel simplesmente apoiado com uma carga concentrada, como ilustrado na Figura 40, utilizando-se a mesma notação anterior e adotando a convenção de Macauley, onde o conteúdo de dentro dos parênteses somente deve ser considerado quando o mesmo for positivo, obtêm-se as Equações (32) e (33) para, respectivamente, o momento fletor e o esforço cortante para o painel.

$$M_s = PL(1 - \varepsilon)\xi - PL\{\xi - \varepsilon\} \quad (32)$$

$$V_s = P(1 - \varepsilon) - P\{\xi - \varepsilon\} \quad (33)$$

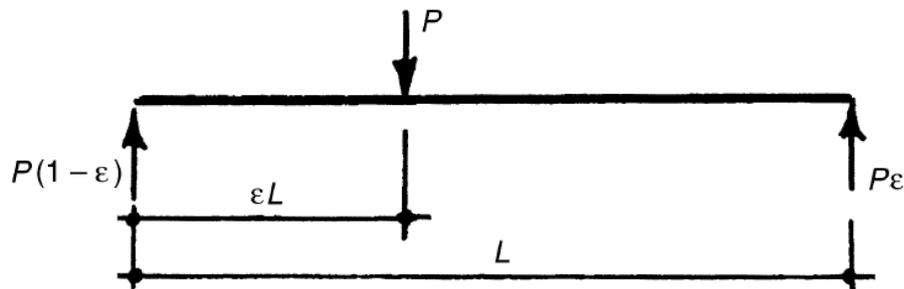


Figura 40 – Painel simplesmente apoiado com carga concentrada (adaptado de: Davies, 2001).

A deflexão para este tipo de carregamento pode ser descrita pelas Equações (34) e (35), onde w_1 representa a deflexão para o lado esquerdo do carregamento combinado e w_2 representa a deflexão para o lado direito.

$$w_1 = \frac{PL^3}{6B_s} (1 - \varepsilon)\xi(2k + 2\varepsilon - \varepsilon^2 - \xi^2) \quad (34)$$

$$w_2 = \frac{PL^3}{6B_s} \varepsilon(1 - \xi)(2k - \varepsilon^2 + 2\xi - \xi^2) \quad (35)$$

A deflexão abaixo da carga concentrada pode ser definida considerando $\xi = \epsilon$ nas Equações (34) ou (35). Entretanto, no caso da carga concentrada estar localizada no centro do painel, pode-se utilizar as Equações (36)-(38) para determinar o momento máximo, a tensão normal máxima e a deflexão máxima, respectivamente.

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad (36)$$

$$\sigma_{max} = \pm \frac{PL}{4eA_F} \quad (37)$$

$$w_{max} = \frac{PL^3}{48B_s} (1 + 4k) \quad (38)$$

Deve-se considerar ainda o caso de um painel simplesmente apoiado com diferença de temperatura entre as faces externas. Se os momentos fletores e esforços cortantes forem considerados iguais a zero, pode-se analisar o efeito da temperatura isoladamente. Utilizando a Equação (21) e zerando os termos que não dizem respeito à diferença de temperatura, obtêm-se a Equação (39):

$$w'' = -\theta \quad (39)$$

Integrando esta equação duas vezes e zerando a deflexão nos apoios do painel, obtêm-se a Equação (40):

$$w = \frac{\theta L^2}{2} \xi(1 - \xi) \quad (40)$$

onde a deflexão máxima se localiza no centro do painel e pode ser descrita pela Equação (41):

$$w_{max} = \frac{\theta L^2}{8} \quad (41)$$

Para se resolver problemas que combinam carregamento externo com tensões por diferença de temperatura, deve-se combinar as equações utilizadas para o carregamento externo e para as tensões térmicas.

Ainda pode-se considerar os casos vistos anteriormente para painéis com três ou mais apoios igualmente separados entre si. As Figura 41(a)-(b) ilustram o procedimento de cálculo para três ou quatro suportes, respectivamente. Neste caso, deve-se considerá-lo somente com dois apoios nas pontas somado a uma carga “P” capaz de gerar a mesma deflexão “ Δ ” de um painel com dois apoios nas extremidades. A deflexão “ Δ ” considerada pode ser descrita conforme a Equação (42):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (42)$$

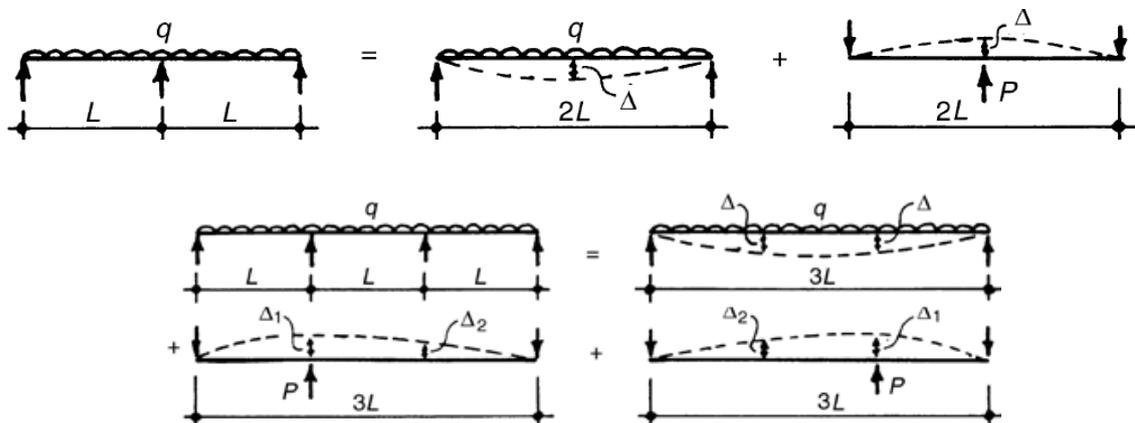


Figura 41 – Procedimento para cálculo de um painel com três (a) ou quatro (b) apoios (adaptado de: Davies, 2001).