



Juliano Hertz Knob
Lucas Patrick Lansing Riffel

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURA SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM ESPUMA DE PVC: ESTUDO DE CASO**

Horizontina - RS
2020

Juliano Hertz Knob
Lucas Patrick Lansing Riffel

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURA SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM ESPUMA DE PVC: ESTUDO DE CASO**

Projeto do Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a o Trabalho Final de Curso na Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina, sob a orientação do professor Me. Luis Carlos Wachholz.

Horizontina - RS
2020

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURA SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM ESPUMA DE PVC: ESTUDO DE CASO**

Elaborada por:

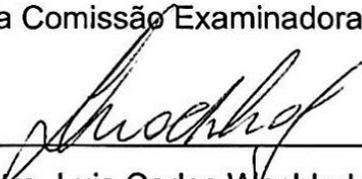
Juliano Hertz Knob

Lucas Patrick Lansing Riffel

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 04/Dezembro/2020

Pela Comissão Examinadora



Mestre. Luis Carlos Wachholz

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



Mestre. Adalberto Lovato

FAHOR – Faculdade Horizontalina



Mestre. Francine Centenaro Gomes

FAHOR – Faculdade Horizontalina

Horizontalina - RS

2020

Dedicamos este trabalho a todo o curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina - FAHOR, corpo docente e discente, a quem fico lisonjeado por dele ter feito parte.

Aos nossos pais e irmãos, que nos incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a nossa ausência enquanto nos dedicávamos à realização deste trabalho.

“As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso”.

(Santos Dumont)

RESUMO

Ao avaliar materiais de alta performance, os compósitos de fibra de carbono se destacam por apresentar características mecânicas pertinentes na confecção de elementos críticos e estruturais, desta forma, seu dimensionamento deve ser meticulosamente avaliado para condizer com a física do material. A confecção de compósitos utilizando a fibra de carbono pode ser realizada de diversas maneiras, além de ser possível a combinação com outros materiais, assim avaliaram-se os compósitos utilizados em projetos existentes na faculdade e optou-se em realizar a análise do compósito sanduíche formado por fibra de carbono e espuma de PVC. Mantendo o âmbito do trabalho, os corpos de prova foram confeccionados na instituição pelos autores, e submetidos a ensaios mecânicos para suprir a necessidade de dados sobre este material, que por apresentar características anisotrópicas, impõe características peculiares em seu dimensionamento. Desta maneira, através dos ensaios de compressão longitudinal, compressão transversal e flexão de três pontos, obtiveram-se propriedades mecânicas pertinentes ao material, que em conjunto com dados fornecidos pelos fabricantes, se tornam útil em futuros dimensionamentos.

Palavras-chave: Fibra de Carbono. Espuma de PVC. Ensaios Mecânicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fase reforço e matriz de um compósito	16
Figura 2 – Classificação de compósitos reforçados por fibras e partículas.....	17
Figura 3 – Transferência de carga e distribuição de tensões em uma única fibra inserida em uma matriz sujeita à uma carga axial.....	18
Figura 4 – Curva tensão-deformação para fibra, matriz e compósito.....	19
Figura 5 – Orientação de fibras utilizadas em reforços	20
Figura 6 – Tipos de formas de entrelaçamentos.	21
Figura 7 – Planos principais de uma lâmina.....	23
Figura 8 – Empilhamento de compósitos laminados	24
Figura 9 – Plano médio de um laminado	25
Figura 10 – Constituição de uma estrutura sanduíche	26
Figura 11 – Comparação de resistência a flexão entre laminado e sanduíche	27
Figura 12 – Tipos de construção de compósitos sanduíche	27
Figura 13 – Espuma polimérica PVC	28
Figura 14 – Comparação entre núcleos rígidos e fracos ao cisalhamento.....	29
Figura 15 – Comportamento elástico de materiais isotrópicos e anisotrópicos.....	31
Figura 16 – Tensões e deformações de um material isotrópico.....	32
Figura 17 – Tensões e deformações de um material anisotrópico.....	33
Figura 18 – Comparativo entre uma viga sanduíche e uma viga I	34
Figura 19 – Seção transversal de viga sanduíche simétrica	34
Figura 20 – Distribuição das tensões de corte em uma viga sanduíche	37
Figura 21 – Deflexão de um compósito sanduiche.....	38
Figura 22 – Deflexão de um compósito sanduiche.....	38
Figura 23 – Falha por compressão da face	39
Figura 24 – Flambagem de um painel sanduíche	39
Figura 25 – Flambagem local.....	40
Figura 26 – Falha por cisalhamento	40
Figura 27 – Falha por compressão local	41
Figura 28 – Dimensões de uma estrutura sanduíche.....	43
Figura 29 – Componentes do processo de infusão a vácuo	45
Figura 30 – Confeção da placa sanduíche	51
Figura 31 – Máquina de ensaios universal.....	52

Figura 32 – Preparação do molde de infusão a vácuo	54
Figura 33 – Disposição dos materiais para infusão a vácuo	54
Figura 34 – Canais de vácuo e resina do sistema.....	55
Figura 35 – Aplicação de vácuo no sistema.....	56
Figura 36 – Preparação da resina e início da infusão	56
Figura 37 – Produção da placa de teste.....	57
Figura 38 – Primeira placa produzida.....	58
Figura 39 – Tela de distribuição	59
Figura 40 – Infusão da placa definitiva.....	59
Figura 41 – Resultado da infusão da placa final.....	60
Figura 42 – Corte dos corpos de prova	61
Figura 43 – Corpos de prova cortados	62
Figura 44 – Ensaio de compressão Longitudinal.....	62
Figura 45 – Corpos de prova para o ensaio de Compressão Longitudinal.....	63
Figura 46 – Carga x deformação do ensaio de compressão longitudinal	63
Figura 47 – Ensaio de Compressão Transversal	65
Figura 48 – Corpos de prova para o ensaio de Compressão Transversal	65
Figura 49 – Curva de tensão x deformação para compressão transversal	66
Figura 50 – Carga x deslocamento do ensaio de compressão transversal	66
Figura 51 – Ensaio de Flexão em 3 pontos	67
Figura 52 – Corpos de prova para o ensaio de Flexão em 3 pontos.....	68
Figura 53 – Curvas de tensão x deformação do ensaio de flexão em 3 pontos	68
Figura 54 – Carga x deformação do ensaio de flexão em 3 pontos	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Informações técnicas da fibra de carbono RC203P	49
Quadro 2 – Características técnicas PVC Divinycell H45	49
Quadro 3 – Propriedades mecânicas PVC Divinycell H45	50
Quadro 4 – Propriedades mecânicas do sistema de resina AR260 e AH260	50
Quadro 5 – Propriedades de manuseio do sistema de resina AR260 e AH260	51
Quadro 6 – Materiais necessários no processo de confecção	53
Quadro 7 – Dimensões dos corpos de prova	61
Quadro 8 – Carga na falha do ensaio de compressão longitudinal	64
Quadro 9 – Modos de falha dos corpos de prova no ensaio de compressão.....	64
Quadro 10 – Resistência máxima a compressão dos corpos de prova.....	64
Quadro 11 – Cargas e tensões do ensaio de compressão transversal	66
Quadro 12 – Propriedades analíticas do ensaio de compressão transversal.....	67
Quadro 13 – Carga e tensão máxima do ensaio de flexão em 3 pontos.....	69
Quadro 14 – Resultados analíticos do ensaio de flexão em 3 pontos.....	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.4 HIPÓTESES.....	12
1.5 JUSTIFICATIVA	13
1.6 OBJETIVOS	14
1.6.1 Objetivo Geral	14
1.6.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 COMPÓSITOS	15
2.1.1 Fibras	19
2.1.2 Matrizes	22
2.1.3 Compósitos laminados	23
2.1.4 Compósitos sanduiche	25
2.1.5 Análise e modos de falhas de sanduíches	29
2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSITOS	44
2.2.1 Infusão a vácuo	44
3 METODOLOGIA	48
3.1 MÉTODOS UTILIZADOS	48
3.2 MATERIAIS	48
3.2.1 Tecido das faces	48
3.2.2 Material do Núcleo	49
3.2.3 Resina Epóxi	50
3.3 CONFECÇÃO DA PLACA SANDUÍCHE E CORTE DOS CORPOS DE PROVA.....	51
3.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....	52
4 RESULTADOS	53
4.1 PROCESSO DE INFUSÃO	53
4.1.1 Placa de teste	57
4.1.2 Primeira placa concludente	58
4.1.3 Segunda placa concludente	58
4.2 CORTE DOS CORPOS DE PROVA	60
4.2.1 Ensaio de Compressão Longitudinal	62
4.2.2 Ensaio de Compressão Transversal	64
4.2.3 Ensaio de Flexão em 3 pontos	67
CONCLUSÃO	70
PERSPECTIVAS FUTURAS	72
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A globalização de componentes estruturais introduziu no mercado maior competitividade entre empresas dos mais diversos ramos, desde aviação até maquinário agrícola, que buscam meios de tornar seus produtos mais leves, resistentes e com elevada autonomia, dando origem a materiais alternativos para confecção de componentes críticos. Dentre estes materiais é possível destacar os compósitos de fibra de carbono, os quais apresentam boa relação entre características mecânicas e densidade.

A confecção do compósito de fibra de carbono pode ser realizada de diversas maneiras, apresentando diferentes níveis de qualidade, variando assim as propriedades mecânicas ao serem comparados entre si. Desta forma, ao utilizar compósitos para estruturas, é imprescindível que as características adotadas para fins de cálculos sejam condizentes com a realidade.

Neste contexto, a tecnologia computacional apresenta-se como uma grande aliada. Através de técnicas de análises, permitiu-se o dimensionamento por elementos finitos, possibilitando a substituição de ensaios mecânicos por análises computacionais. Contudo, os compósitos de fibra de carbono possuem características anisotrópicas, atributo que deve ser meticulosamente avaliado para que as análises computacionais sejam válidas.

As normas ASTM C364, ASTM 365 E ASTM C393 apresentam alternativas para obtenção das características mecânicas de compósitos sanduiche para compressão longitudinal, compressão transversal e flexão em três pontos, surgindo a viabilidade de análises numéricas após o estudo do material. Desta forma, o trabalho tem por objetivo avaliar as características dos compósitos de fibra de carbono confeccionados na Faculdade de Horizontina — FAHOR de modo a viabilizar métodos de análise por elementos finitos para este material.

1.1 TEMA

Obtenção de propriedades mecânicas do material compósito de fibra de carbono e espuma de PVC, com o propósito de possibilitar a análise numérica estrutural no material através de análise numérica.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na obtenção das características mecânicas do compósito de fibra de carbono e espuma PVC confeccionados por infusão a vácuo, submetido a esforços de compressão e flexão. Apresentando somente as propriedades do material, não sendo validada a análise numérica.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Para realização de dimensionamentos estruturais, usualmente utilizam-se métodos analíticos e análises numéricas, que, se devidamente realizados, podem oportunizar redução de custos, diminuição de peso, e confiabilidade de projeto. As análises numéricas podem ser realizadas em diversos *softwares*, os quais, de maneira geral, concedem ao usuário as propriedades mecânicas dos materiais isotrópicos popularmente aplicados.

Contudo, quando se avalia materiais anisotrópicos ou ortotrópicos, observa-se que cálculos analíticos apresentam limitações e os *softwares* que permitem análises numéricas requerem o conhecimento prévio de características específicas do material. Assim, para realizar a análise numérica nestes materiais deve-se realizar ensaios mecânicos. Referindo-se a compósitos de fibra de carbono para dimensionamentos estruturais, nota-se que suas propriedades além de ser anisotrópicas, ainda variam conforme a confecção do material.

Avaliando a alta performance deste material, os projetos de iniciação científica presentes na instituição, como a equipe MasBáh Aerodesign, confeccionam e utilizam compósitos de fibra de carbono na construção de suas aeronaves, porém, se deparam com a falta de dados sobre o material confeccionado no local e concluem o projeto superdimensionado, aumentando custo e peso.

Com base nas informações apresentadas, o problema de pesquisa é estabelecido pela seguinte pergunta: é possível avaliar o compósito confeccionado através dos ensaios mecânicos propostos?

1.4 HIPÓTESES

Com base em pesquisas e discussões sobre os problemas relatados, duas hipóteses foram desenvolvidas para a possível solução. Sendo elas:

- a) Utilizando equipamento disponíveis na instituição, é possível confeccionar chapas do compósito proposto.
- b) Através dos ensaios mecânicos é possível obter as características necessárias para futuras análises numéricas.

1.5 JUSTIFICATIVA

Visando o avanço científico e tecnológico, instituições buscam através de projetos de pesquisa e iniciação científica estimular seus alunos a participar do meio científico. Assim iniciasse a busca pela evolução e aprimoramento a cada etapa dos projetos, acarretando a pesquisa por novas tecnologias que elevem seu desempenho.

O interesse por aperfeiçoamento evidencia a busca e desenvolvimento de novos materiais. Neste âmbito, apontou-se que compósitos de matriz polimérica apresentam características únicas, destacando-se por apresentar propriedades mecânicas favoráveis para diferentes áreas.

Daniel e Ishai (2006) apontam que os compósitos apresentam alta resistência específica (resistência x peso) e elevada rigidez específica (módulo de elasticidade x densidade), propriedades que são capazes de proporcionar benefícios em determinadas aplicações. Ainda para os mesmos autores, compósitos oferecem a vantagem de ter o projeto, a fabricação e a estrutura de componentes num único e simultâneo processo.

No entanto, estes materiais possuem adversidades dimensionais por apresentar propriedades que variam conforme a direção da força aplicada em relação ao sentido da fibra, assim sendo denominado como um material anisotrópico.

Neste âmbito, a análise numérica apresenta resultados condizentes com a física deste material, se tornando grande aliada para seu dimensionamento. Esta metodologia de análise pode ser aplicada através de vários *softwares*, porém, para tornar possível a utilização destes, é necessário o conhecimento prévio de algumas características mecânicas do material. Para ter maior confiabilidade destes dados, deve-se realizar ensaios mecânicos em corpos de prova, que devem ser confeccionados utilizando o mesmo método e material que o proposto para a estrutura.

Tendo em vista que ao avaliar inovações tecnológicas, os compósitos se apresentam como boa alternativa estrutural, e que projetos presentes na FAHOR utilizam compósito de fibra de carbono e espuma de PVC, este trabalho se justifica

pela necessidade do conhecimento das propriedades específicas deste material, introduzindo a possibilidade de dimensionamentos confiáveis, fornecendo suporte para os programas de iniciação científica que se encontram na instituição, bem como para futuras pesquisas.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

O trabalho em questão tem por objetivo adquirir as propriedades mecânicas do compósito sanduíche formado por fibra de carbono com núcleo de espuma de PVC através de ensaios mecânicos de compressão transversal, compressão longitudinal e flexão em três pontos, estabelecidos pelas normas internacionais ASTM C365, ASTM C364 e ASTM C393 respectivamente, visando a viabilização de análise numérica do material.

1.6.2 Objetivos Específicos

- a) Confeccionar corpos de prova;
- b) Obter as propriedades do compósito a partir dos ensaios mecânicos;
- c) Realizar análise de forma analítica dos resultados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPÓSITOS

Tecnologias modernas, como as utilizadas em aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte, requerem materiais com composições não usuais, as quais não estão presentes em elementos como ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. Engenheiros estão buscando materiais estruturais que possuem baixa massa específica, rígidos, que sejam resistentes à abrasão e impacto e não sejam facilmente corroídos (CALLISTER, 2016).

Para Gama (2017) a busca por novos materiais está evidenciando os compósitos, que estão se tornando comuns na indústria em razão da sua versatilidade, sendo aplicados tanto em periféricos de computadores, quanto em veículos e aeronaves. O aumento na utilização destes se dá pela sua variedade de propriedades mecânicas, as quais são resultados da combinação de dois ou mais componentes.

Callister (2016) diz que o conhecimento dos compósitos, bem como do seu comportamento devido às suas características, quantidades, geometria e propriedades das fases constituintes permite o projeto de materiais melhores dos que os disponíveis em qualquer liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico.

Um compósito é formado pela combinação de dois ou mais materiais em uma escala macroscópica, onde as suas propriedades mecânicas e desempenho são superiores que seus constituintes se analisados independentemente (DANIEL e ISHAI, 2006).

Segundo Garbin (2017) segmentos como a indústria aeroespacial e de transporte de cargas utilizam amplamente os materiais compósitos, com o objetivo de obter alto desempenho estrutural e/ou térmico com baixo peso. Em relação ao custo de um material compósito, sua aplicação irá ser determinante, onde existem fibras mais baratas, bem como mais caras com melhores propriedades, com utilização variando da necessidade.

Para Jones (1999) algumas das propriedades que podem ser obtidas pela formação de um material compósito são:

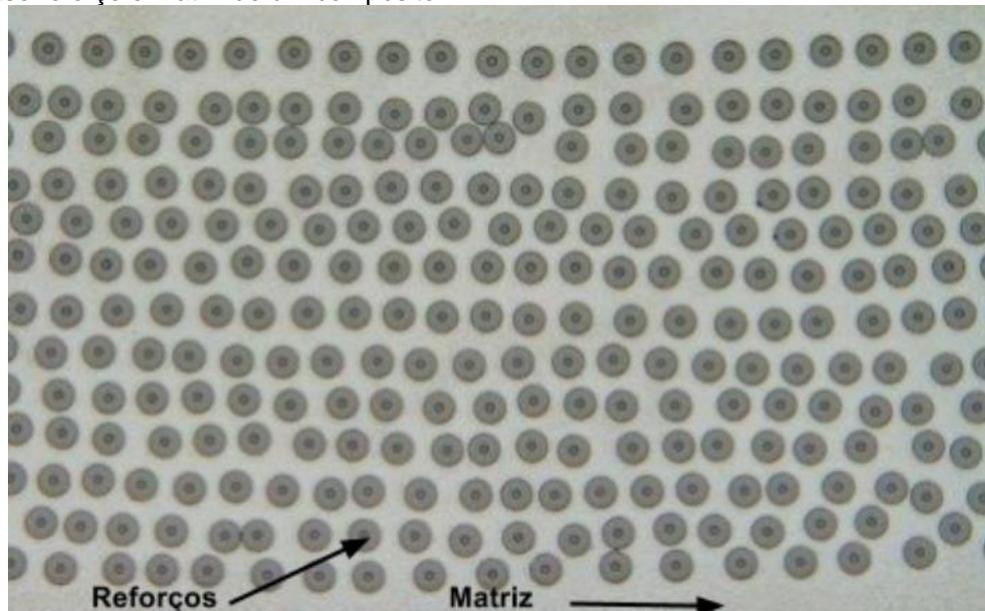
- Força;
- Resistência à corrosão;

- Resistência ao desgaste;
- Peso;
- Vida em fadiga;
- Rigidez;
- Isolamento térmico;
- Condutividade térmica.

Jones (1999) complementa que é natural que estas propriedades não sejam obtidas simultaneamente, e que geralmente isto não é um requisito, visto que algumas destas podem estar em conflito, como o isolamento térmico e a condutividade térmica. Sendo assim, o objetivo principal é da criação de um material que apresente características adequadas para a aplicação necessária.

Geralmente os compósitos fabricados são constituídos de dois materiais, o reforço e a matriz, como apresenta a Figura 1. O reforço geralmente apresenta características descontínuas, rígidas e fortes, já a matriz é contínua, possui menor rigidez e é mais fraca (DANIEL e ISHAI, 2006).

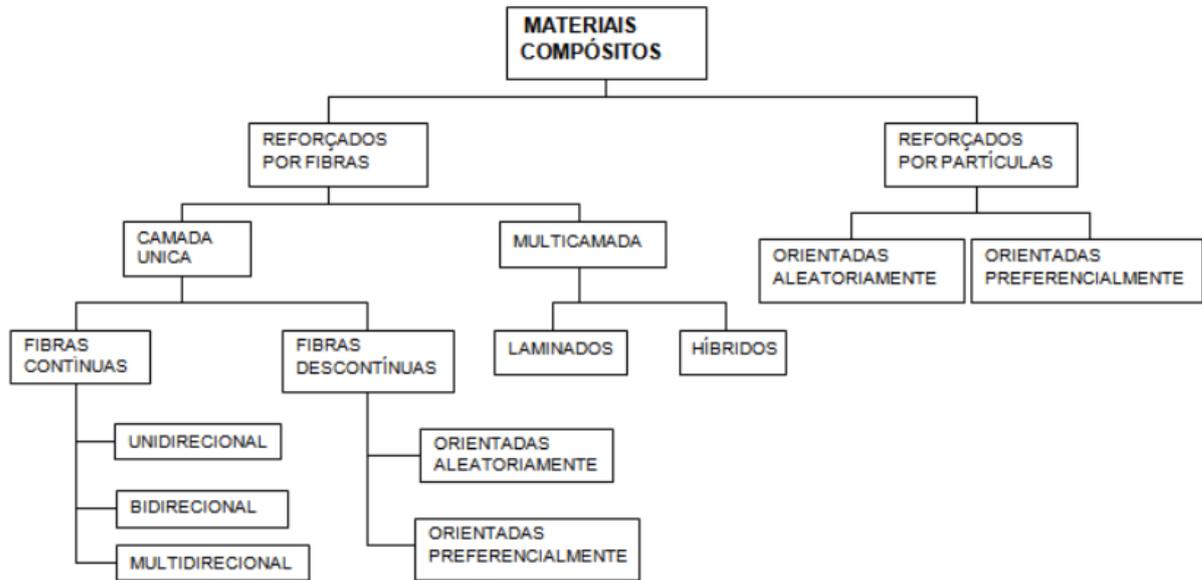
Figura 1 – Fase reforço e matriz de um compósito



Fonte: Gonçalves (2015)

Pode-se classificar os materiais compósitos de diferentes formas, sendo uma destas pela matriz constituinte, onde a mesma pode ser orgânica ou inorgânica, subdividida em diversos materiais. Ainda é possível os separar em relação ao reforço, podendo ser formado por materiais fibrosos e particulados, como apresenta a Figura 2 (GARBIN, 2017).

Figura 2 – Classificação de compósitos reforçados por fibras e partículas.



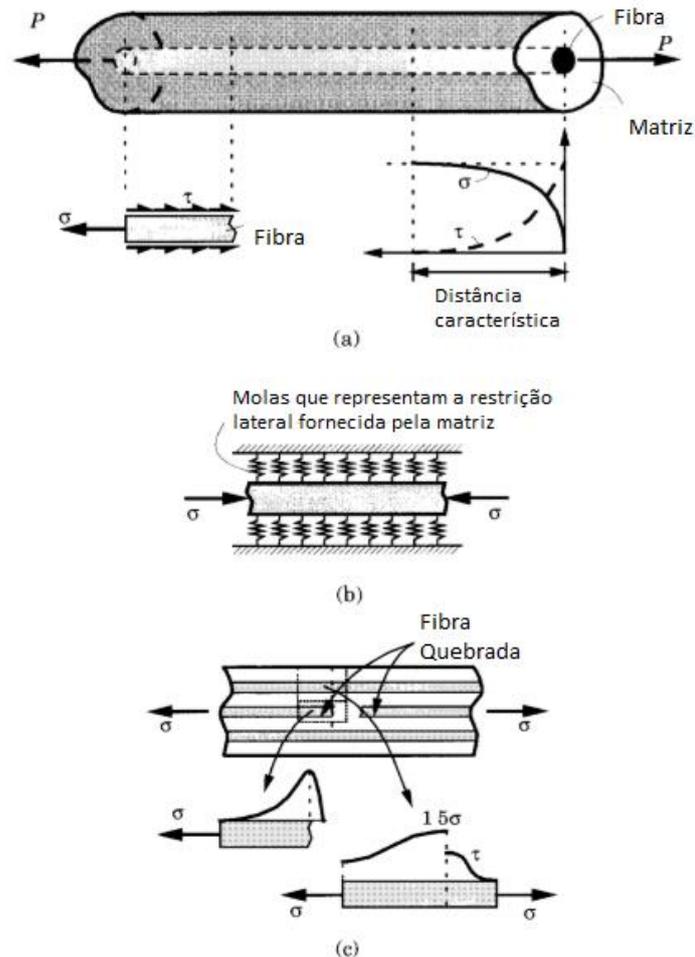
Fonte: Miranda, 2016

As fases que compõem um compósito desempenham papéis diferentes, as quais dependem de sua aplicação. No emprego de compósitos de baixo a médio desempenho, o reforço é geralmente feito por fibras ou partículas curtas, e pode fornecer algum endurecimento, mas o reforço é limitado, onde a matriz se torna o principal constituinte, comandando as propriedades mecânicas do material (DANIEL e ISHAI, 2006).

Já em compósitos estruturais de alto desempenho, o reforço, geralmente fibra, é a espinha dorsal do material, determinando sua rigidez e resistência na direção da fibra. Nesta composição a matriz serve de proteção para as fibras, realizando a ligação, o suporte e a transferência de tensão local de uma fibra para outra (DANIEL e ISHAI, 2006).

A transferência de carga entre a matriz e o reforço, pode ser explicado se considerado uma barra cilíndrica de uma única fibra inserida em uma matriz, como mostra a Figura 3. Através da tensão de cisalhamento as cargas são transferidas entre as fases, onde uma carga P é aplicada na matriz, sendo esta carga de tração, resultando na tensão de cisalhamento τ na superfície externa da fibra. A magnitude da tensão varia de alta no local da carga a zero a uma determinada distância, conhecida como distância característica. Inversamente à tensão de cisalhamento, a tensão de tração σ é nula no local de carregamento e atinge o ponto máximo na distância característica (REDDY, 2003).

Figura 3 – Transferência de carga e distribuição de tensões em uma única fibra inserida em uma matriz sujeita à uma carga axial



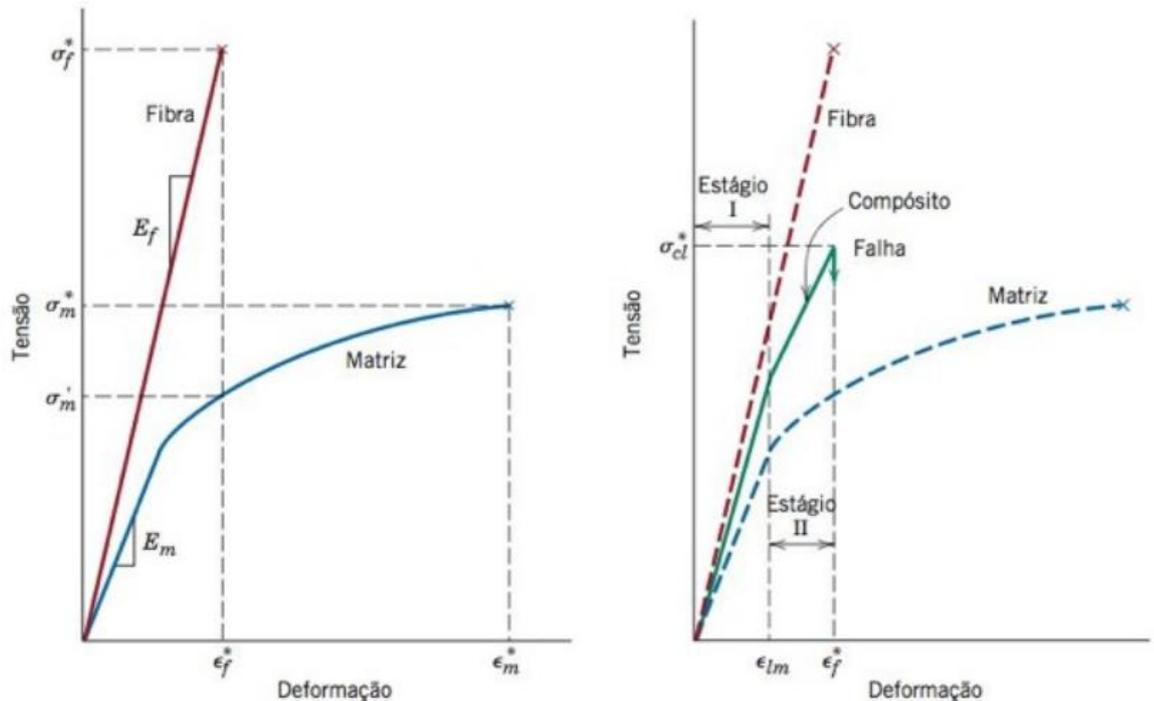
Fonte: Adaptado de Reddy, 2003.

Ainda para Reddy (2003) quando uma carga de compressão é aplicada na matriz as tensões na região da distância característica são revertidas em sinal. No restante do comprimento da fibra, a qual possuirá uma região compreensiva, a mesma tenderá a se dobrar, análogo a um fio sujeito a compressão. Nestas situações, a matriz fornece um suporte lateral, reduzindo a tendência da fibra a se dobrar. Quando uma fibra é quebrada, a carga aplicada é transferida para as duas fibras vizinhas, em forma de tensão de cisalhamento, ilustrado na Figura 3.c, elevando assim a tensão no eixo da fibra a um valor de 1.5σ .

Em relação à resposta das fibras e matrizes à aplicação de esforços, Callister (2016) expõe que aplicando uma tensão uniaxial na direção do alinhamento das fibras, elas apresentam características de tensão-deformação uniaxial, ilustrada na Figura 4. No Estágio I tanto a fibra quanto a matriz sofrem deformação elástica, geralmente caracterizando uma curva linear. Porém, tendo em vista que o limite a tração das fibras

é significativamente maior que o limite de escoamento da matriz, a matriz escoo e deforma-se plasticamente, formando o Estágio II, que traça uma linha muito próxima da linearidade, porém com uma inclinação reduzida em comparação ao Estágio I. Além disso, no Estágio II a proporção da carga aplicada suportada pelas fibras aumenta.

Figura 4 – Curva tensão-deformação para fibra, matriz e compósito.



Fonte: Adaptado de Callister (2016)

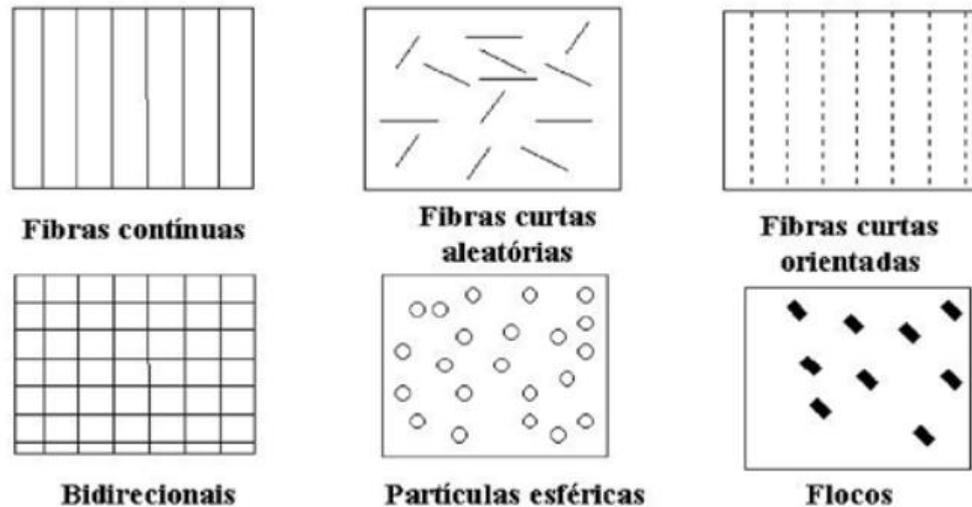
Callister (2016) complementa que a falha do compósito inicia quando as fibras começam a fraturar, porém, as fibras não fraturam de uma só vez, à medida que as fibras se rompem, a matriz, até então intacta, começa a se deformar plasticamente.

2.1.1 Fibras

As fibras, comumente os constituintes do reforço, proporcionam força e rigidez, bem como aumento da resistência ao calor, corrosão e condutividade. Contudo, seu desempenho pode ser afetado por alguns fatores, como comprimento, forma, orientação e composição das fibras, bem como das propriedades mecânicas da matriz (VENTURA, 2009). As fibras apresentam baixo peso, rigidez e força, propriedades estas que são melhores que o material do qual são produzidas, visto que os defeitos superficiais são reduzidos, e as moléculas são orientadas ao longo do filamento (BARBERO, 2010).

Alguns fatores influenciam na resistência das fibras e dos compósitos, como sua distribuição, concentração, e orientação, onde as principais formas de orientação de fibras são apresentadas na Figura 5 (WIEBECK e HARADA, 2005).

Figura 5 – Orientação de fibras utilizadas em reforços



Fonte: Ventura (2009)

Fibras curtas são descontínuas, podendo possuir orientação seguindo uma direção ou ser dispersas randomicamente. Já as fibras particuladas possuem forma de esfera, elipse ou escama, podendo ser maciças ou ocas, utilizando de materiais metálicos, como o alumínio, e não metálicos, como o vidro. As demais orientações de fibras constituem de fibras unidirecionais e multidirecionais, que formam os tecidos, onde as mesmas podem ser construídas para apresentar resistência em mais de uma direção (GONÇALVES, 2015).

Estas fibras unidirecionais e multidirecionais podem ser naturais ou artificiais, onde geralmente possuem um alto Módulo de Elasticidade e alta Resistência à Tração em uma direção. Diferentes materiais podem ser utilizados, como carbono, vidro, aramida e outros (GONÇALVES, 2015).

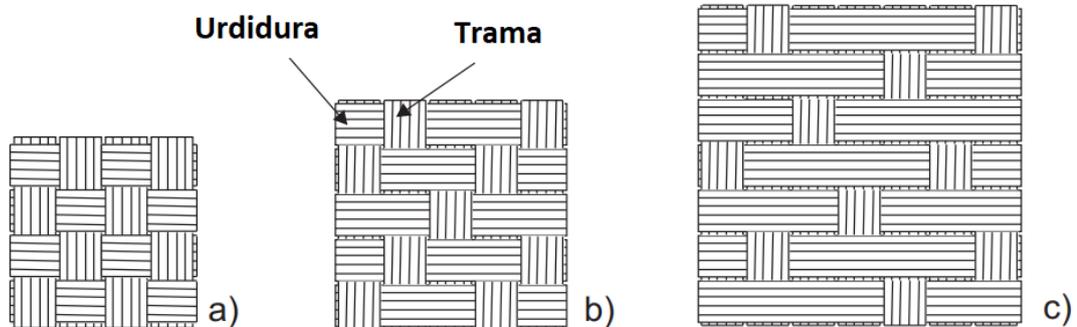
2.1.1.1 Fibras de Carbono

Fibras de carbono são os principais materiais utilizados para aumentar a rigidez e resistência de compósitos avançados leves, aplicados em indústrias e aeronaves. A fibra é caracterizada como de carbono quando em sua composição há mais de 90% de carbono, com filamentos de 5 a 10 um de diâmetro, fabricadas através da pirólise da poliacrilonitrila (PAN), piche ou raiom (WIEBECK e HARADA, 2005).

A fibra de carbono é utilizada principalmente quando há aplicações críticas que envolvem peso, visto que estas possuem resistência e módulo de elasticidade extremamente elevados, podendo ser duas vezes maior que fibras como o Kevlar e o S-glass, e exceder os metais em uma ordem de grandeza, ou seja, a potência de dez mais próxima. Junto da alta resistência e módulo de elasticidade, as fibras de carbono apresentam uma excelente resistência à fadiga, resistência térmica, estabilidade dimensional, além de uma boa resistência elétrica e térmica (WIEBECK e HARADA, 2005).

Para Tuttle (2004), a maioria das fibras de alto desempenho, como a fibra de carbono, pode ser tecida para formar um tecido. Estes tecidos são feitos de fibras orientadas ao longo de duas direções perpendiculares, sendo um chamado de urdidura e o outro de trama. As fibras são entrelaçadas de forma que a trama passa por cima e por baixo das urdiduras, seguindo um padrão fixo. A Figura 6 mostra alguns entrelaçamentos que os tecidos podem apresentar, sendo respectivamente *plain weave*, *twill weave*, *satín weave*.

Figura 6 – Tipos de formas de entrelaçamentos.



Fonte: Adaptado de Barbero, 2010.

O padrão *plain weave* é o mais comumente utilizado, onde a trama é tecida sobre todas as urdiduras, onde no ponto em que a trama passa sobre a urdidura é chamado de cruzamento. Este padrão de tecido é muito estável, apresentando distorção mínima das fibras, bem como força e rigidez idênticas aos dois lados do plano, devido ao padrão do entrelaçado. (TUUTLE, 2004).

O uso de tecidos em projeto é semelhante às lâminas unidirecionais, onde os tecidos balanceados apresentam várias vantagens para a fabricação, *design* e desempenho (BARBERO, 2010).

2.1.2 Matrizes

A fase matriz exerce muitas funções dentro de um compósito, como manter as fibras juntas, transferindo as cargas aplicadas para o reforço (BARBERO, 2010). Pacheco (2016) acrescenta que além das propriedades principais de manter as fibras juntas, protege-las e distribuir as cargas entre as mesmas, a matriz determina certas propriedades mecânicas:

- Resistência à compressão.
- Propriedades mecânicas transversais.
- Contribui para tenacidade à fratura.
- Resistência à corrosão.
- Resistência à temperatura.

Para Pacheco (2016) as matrizes podem ser confeccionadas em material polimérico, metálico ou cerâmico, onde os polímeros são mais usados pelo seu baixo custo e facilidade de manuseio durante a fabricação dos compósitos. Estes polímeros são constituídos de uma resina baseada em material polimérico como matriz.

A matriz polimérica pode ser constituída de um polímero termorrígido ou termoplástico. O polímero termorrígido é formado pela transformação irreversível de um sistema de resina em uma matriz após a cura. As resinas termorrígidas possuem baixa viscosidade, permitindo uma boa impregnação do reforço das fibras, e uma alta velocidade de preparo, sendo este o sistema comumente mais utilizado. Já os polímeros termoplásticos não sofrem transformação química durante o processamento, onde é amolecido o compósito para a impregnação e retorna ao estado sólido posteriormente, permitindo assim o reparo do material, visto que pode ser amolecido pela adição de calor (BARBERO, 2010).

Os polímeros termorrígidos geralmente são mais duros, mais resistentes e mais frágeis que os termoplásticos, e apresentam uma melhor estabilidade dimensional. As propriedades destes polímeros podem variar dependendo dos materiais utilizados para matriz e reforço, onde nos polímeros termorrígidos os mais utilizados são epóxidos, poliéster e resinas fenólicas de poliamida (VENTURA, 2009).

Estas resinas epóxi são utilizadas como matriz principalmente devido à sua versatilidade, altas propriedades mecânicas e alta resistência a corrosão. A maior parte destas é formulada para sofrer menos a ação da água e do calor comparado a outras matrizes poliméricas, oferecendo ainda uma cura simples, operando em

temperaturas que variam de 5 a 150 °C, dependendo do processo e do endurecedor utilizado (BARBERO, 2010).

2.1.3 Compósitos laminados

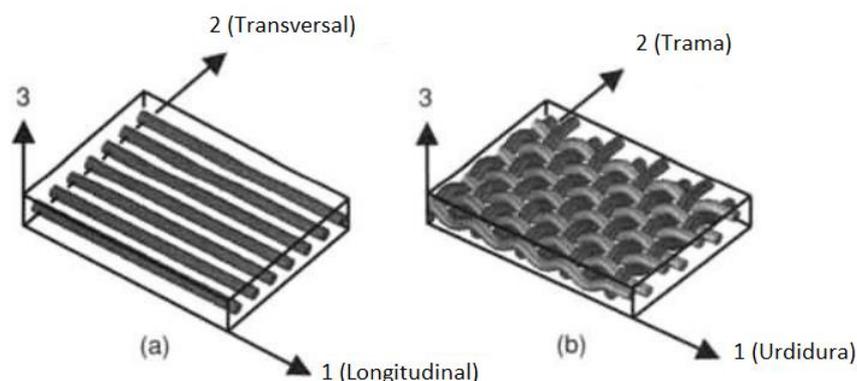
Para Reddy (2003) uma lâmina é uma típica chapa de material compósito, a qual representa a base da fabricação dos laminados. Uma lâmina reforçada com fibra é constituída de muitas fibras incorporadas em um material de matriz, o qual pode ser um metal como o alumínio, ou um não metal como um polímero termo endurecido, ou termoplástico.

Segundo Tuttle (2004), as lâminas geralmente possuem uma espessura que varia de cerca de 0,12 a 0,20 mm, em uma única camada, com fibras unidirecionais, e uma espessura variando de 0,25 a 0,40 mm em cada camada de um tecido ou trançado. Estas lâminas devem apresentar uma elevada resistência mecânica, resistência ao impacto, à corrosão, ao desgaste e ao fogo, bem como uma boa qualidade superficial e espessuras adequadas para resistir às tensões de tração e compressão.

O laminado, ou um compósito laminado, é uma estrutura com duas ou mais lâminas agrupadas de forma que se tenha um componente mais espesso, com alta resistência a momentos fletores, se comparado a uma única lâmina (PACHECO, 2016).

Daniel e Ishai (2006) complementam que as lâminas que compõem um laminado são materiais ortotrópicos, com plano axial principal na direção das fibras (longitudinal), normal às fibras no plano da lamina (transversal) e normal ao plano da lâmina, como apresenta a Figura 7.

Figura 7 – Planos principais de uma lâmina

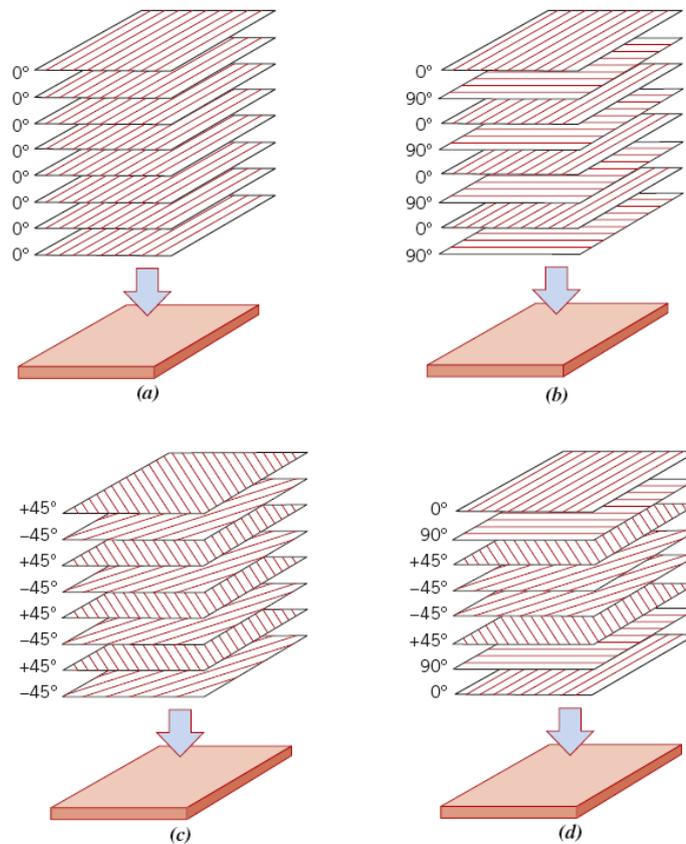


Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai, 2006.

Os eixos principais são denominados de 1, 2 e 3, respectivamente. Em casos de laminados de tecido, que normalmente são constituídos de fibras entrelaçadas, a trama e a urdidura estão nos planos principais 1 e 2 (DANIEL e ISHAI, 2006).

Na construção de um compósito laminado, lâminas ou tecidos entrelaçados são empilhados e unidos, podendo apresentar diferentes orientações em cada lâmina, de modo que possa conter elevada resistência em diferentes direções, como apresenta a Figura 8 (CALLISTER, 2016).

Figura 8 – Empilhamento de compósitos laminados

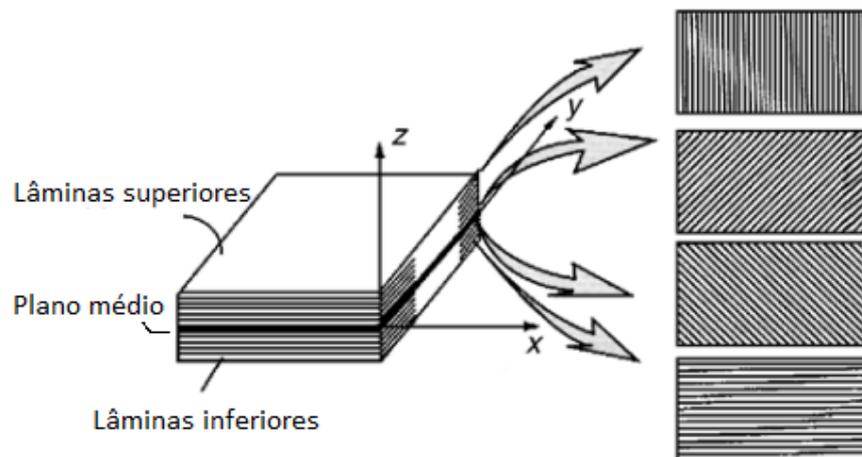


Fonte: Callister (2016)

Nas possibilidades de empilhamento das lâminas há os laminados unidirecionais, cruzados, com camadas em ângulo e multidirecionais, como apresentado na Figura 8. Os laminados unidirecionais (a) possuem somente uma direção de orientação em todas as lâminas, diferente dos cruzados (b), que alternam as camadas em ângulos entre $0/90^\circ$. Nos empilhamentos com ângulos (c), as lâminas são orientadas entre $\pm\theta$ (por exemplo, $\pm 60^\circ$). A última opção de empilhamento, com orientações multidirecionais (d), apresenta diversas orientações, que variam a cada lâmina (CALLISTER, 2016).

Ainda segundo Callister (2016), a orientação das camadas afeta as propriedades do compósito (como módulo de elasticidade e resistência), visto que um laminado unidirecional é altamente anisotrópico, com suas propriedades variando conforme a direção analisada, e as configurações cruzadas, em ângulo e multidirecionais, podem ser fabricadas para aumentar o grau de isotropia no plano. Neste quesito, Gibson (1994) diz que analisar somente a orientação das laminas não necessariamente gera simplificações nas propriedades do laminado. É importante observar outro fator, a simetria ou assimetria do empilhamento das laminas em relação ao plano médio, apresentado na Figura 9, o qual divide em duas porções a espessura do laminado.

Figura 9 – Plano médio de um laminado



Fonte: Gibson, 1994

Uma das possíveis configurações, em relação ao plano médio, é a chamada *cross-ply*, no qual o reforço de cada lâmina alterna entre 0° e 90° . Esta pode ser balanceada, com um número igual de lâminas a $0/90^\circ$, arranjada simétrica ou assimetricamente em relação ao plano (GIBSON, 1994).

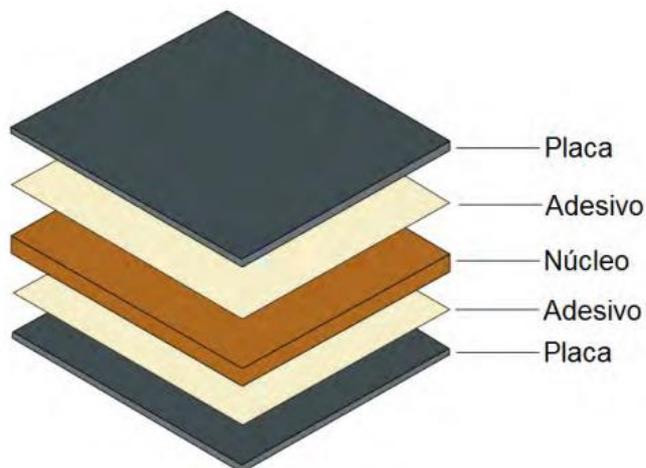
A simetria é caracterizada a partir de um arranjo de lâminas idêntico aos dois lados, a partir do plano médio, o que permite ao laminado suportar simetricamente aos esforços de tensão, prevenindo deformações da estrutura e empenamento (GAY, 2003).

2.1.4 Compósitos sanduíche

Uma estrutura sanduíche é constituída de duas faces, que na maioria das vezes são idênticas em material e espessura, um núcleo, e o adesivo que mantem a

estrutura unida, como apresenta a Figura 10. Em casos especiais, as faces, ou reforços, podem diferir em espessura, material, ou ambos, visto que uma face pode estar exposta à carga primária, com baixa temperatura, enquanto a outra é exposta a uma temperatura elevada, ambiente corrosivo, entre outros (VINSON 1999).

Figura 10 – Constituição de uma estrutura sanduíche



Fonte: GARAY, 2016 apud ALMEIDA, 2009

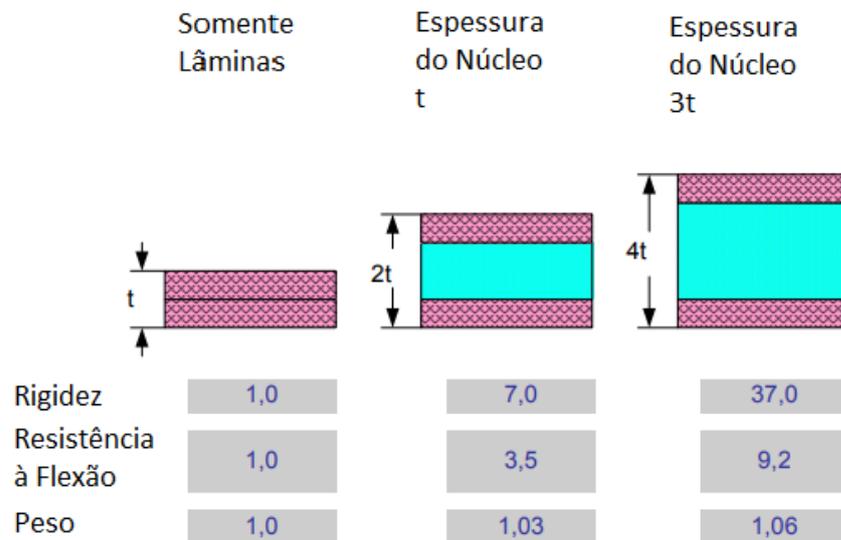
As faces externas são feitas de materiais relativamente rígidos e resistentes, como ligas de alumínio, aço e aço inoxidável, plásticos reforçados com fibras, e madeira compensada, onde estas suportam as cargas de flexão do painel (CALLISTER, 2016). As faces ainda devem resistir aos esforços de tração e compressão desenvolvidos nas camadas opostas quando está sob carregamento, devendo possuir espessura suficiente para resistir à flambagem e avarias por impactos localizados (GARAY, 2016 apud ALMEIDA, 2009).

Já ao núcleo cabe manter as faces na posição original, o qual ainda deverá prover rigidez à compressão, bem como resistência ao cisalhamento. Sem uma resistência à compressão adequada as faces podem se aproximar quando a estrutura sofrer flexão, e se a tensão de cisalhamento não for suficiente as faces podem escorregar em relação à outra, o que reduz sua rigidez e resistência (GARAY, 2016).

Com a utilização do núcleo, a distância entre as faces aumenta, o que amplifica o momento de inércia, junto da rigidez a flexão, sem que haja uma diferença significativa no peso da estrutura, como mostra a Figura 11 (MOREIRA, 2013).

Conforme cita Vinson (1999), o núcleo de uma estrutura sanduíche pode ser composto por diversos materiais, mas geralmente estes se dividem em quatro tipos, como demonstra a Figura 12.

Figura 11 – Comparação de resistência a flexão entre laminado e sanduíche

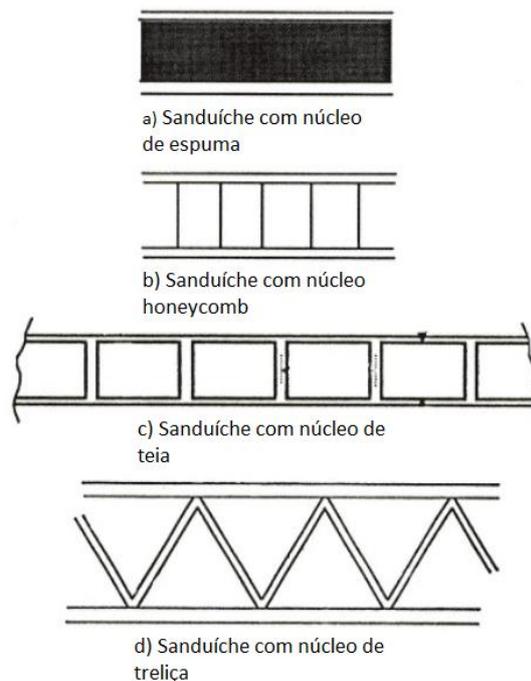


Fonte: Adaptado de Torsakul (2007)

Para Torsakul (2007), as propriedades mais interessantes de um núcleo são:

- Baixa densidade
- Alto módulo de cisalhamento
- Alta resistência ao cisalhamento
- Rigidez perpendicular às camadas da face
- Bom isolamento térmico.

Figura 12 – Tipos de construção de compósitos sanduíche



Fonte: VINSON, 1999.

Os compósitos com núcleo sólido ou de espuma são relativamente baratos, podendo ser constituídos de madeira balsa e uma ampla seleção de materiais de espuma ou plástico, com grande variedade de densidades e módulos de cisalhamento. Os demais núcleos também são utilizados, para diferentes aplicações, como os núcleos de teia e treliça, onde o espaço do núcleo pode ser utilizado para armazenamento de líquido ou para troca de calor (VINSON, 1999).

As espumas poliméricas (Figura 13) são o material mais frequentemente utilizado em núcleos, pois fornecem um bom isolamento térmico, possuem baixa densidade, boa resistência mecânica e custo reduzido. Dentre as espumas destacam-se o poliuretano, o poliestireno, o PVC, entre outras (MATEUS, 2014).

Figura 13 – Espuma polimérica PVC



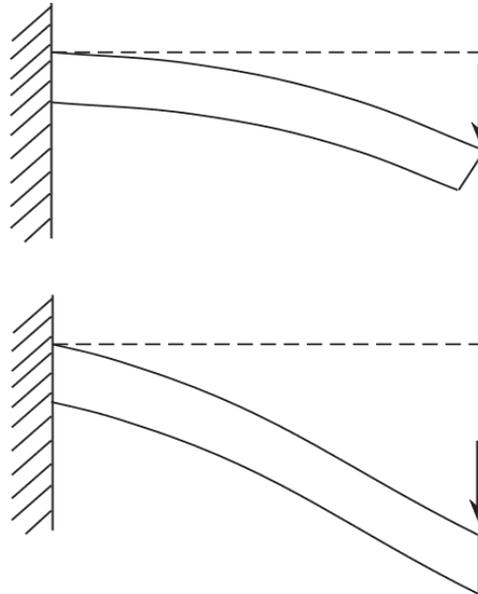
Fonte: Centerglass resinas, 2020

As espumas de PVC podem ser flexíveis (lineares) ou semirrígidas (*cross linked*), onde estas diferentes formações apresentam vários níveis de deformação na ruptura, alcançando até 40%. Em geral, alguns fatores tornam sua aplicação mais restrita, como a dificuldade na produção, baixa resistência a temperatura e baixa resistência às resinas poliéster. Em contrapartida, as espumas semirrígidas possuem uma formulação que suporta grandes deflexões com resistência à temperatura e às resinas adequadas, sendo estas conhecidas como HD (*Hight Ductility*) (GARAY, 2016).

Para que estes núcleos sejam eficientes as faces ligadas a estes não devem deslizar, como apresenta a Figura 14, onde em um comparativo de duas vigas, uma trabalha idealmente, enquanto a outra não apresenta uma boa resistência ao

cisalhamento, em que faces trabalham independentemente, prejudicando as propriedades da estrutura (DIAB, 2003).

Figura 14 – Comparação entre núcleos rígidos e fracos ao cisalhamento



Fonte: DIAB, 2003

Para que as faces sejam ligadas ao núcleo, e a estrutura seja capaz de transferir as cargas as mesmas, é necessária uma boa adesão entre elas, onde uma das formas é a colagem com adesivos. Os adesivos utilizados podem ser: Epóxis, Poliésteres, Poliuretanos e Metacrilatos (GAY, 2003).

Gay (2003) complementa que a utilização da colagem por adesivos apresenta diversos benefícios, como:

- Melhor distribuição das tensões sobre a superfície das faces;
- Possibilidade de otimizar a geometria e as dimensões da ligação;
- Baixo peso da estrutura;
- Propriedades de isolamento e vedação do adesivo.

2.1.5 Análise e modos de falhas de sanduíches

Segundo Gonçalves (2015), para entender os mecanismos de falha de um material primeiramente é necessário analisar as tensões atuantes. Lima (2019) diz que analisar materiais homogêneos e isotrópicos, como metal, é compreensível, visto que sua análise é simplificada. Todavia, em materiais compósitos, suas propriedades apresentam anisotropia, o que dificulta a análise, com diferentes níveis de estudo, como micromecânica, micromecânica e análise estrutural.

A escala micromecânica de análise aborda as propriedades mecânicas dos constituintes de uma lâmina (fase matriz e fase reforço) em nível microscópico. Já a análise a nível estrutural auxilia no estudo e previsão do comportamento global de uma estrutura, utilizando de técnicas como análises numéricas para auxílio (LIMA, 2019).

Daniel e Ishai (2006) acrescentam que, para a análise estrutural de materiais compósitos ensaios mecânicos são utilizados. Estes ensaios visam determinar as propriedades básicas dos materiais constituintes da estrutura, investigar e verificar as previsões analíticas do comportamento mecânico, e estudar experimentalmente o comportamento estrutural para geometrias e carregamentos específicos.

2.1.5.1 Análise micromecânica de tensões e deformações

Segundo Lima (2019) a análise das tensões é uma das principais etapas de um projeto, onde as propriedades elásticas dos materiais se tornam muito relevantes. Assim sendo, através da micromecânica, e suas análises em escala microscópica, é possível prever as propriedades elásticas de uma lâmina (material compósito), e estabelecer a relação entre os esforços mecânicos impostos e as deformações resultantes.

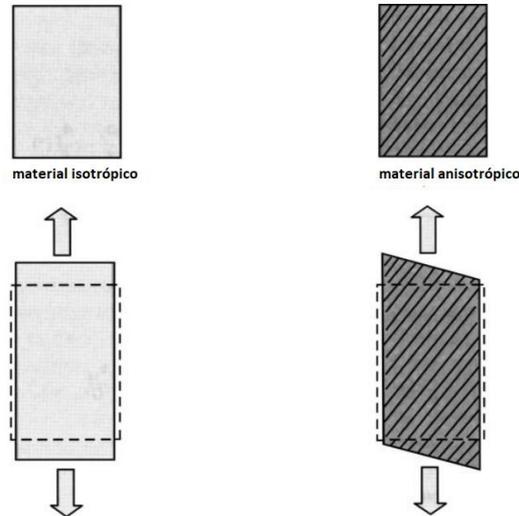
Ainda para Lima (2019), a análise de materiais compósitos é muito complexa, devido ao seu comportamento mecânico inerente, nas quais são adotadas algumas hipóteses para simplificar e facilitar a análise das equações, estas sendo:

- A matriz é homogênea, isotrópica e linear-elástica;
- Fibras são homogêneas, isotrópicas, linear-elásticas e distribuídas uniformemente;
- A aderência entre fibra e matriz é ideal;
- Não existem vazios na estrutura;
- Não há tensões residuais no material.

Para esta comparação primeiramente é necessário entender a diferença do comportamento elástico de um material isotrópico e de um anisotrópico. A figura 15 apresenta a diferença entre a reação destes materiais, onde um carregamento longitudinal aplicado a uma amostra isotrópica promove uma extensão longitudinal e uma contração transversal. Já no material anisotrópico uma distorção angular é

gerada na aplicação da carga, que afeta a extensão longitudinal e a contração transversal (GAY, 2003).

Figura 15 – Comportamento elástico de materiais isotrópicos e anisotrópicos



Fonte: Adaptado de Gay (2003)

Segundo Callister (2016), o comportamento das tensões e deformações é representado pela lei de Hooke, onde:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Nesta relação a constante de proporcionalidade E é o módulo de elasticidade, ou módulo de *Young*, σ a tensão e ε a deformação.

Ainda segundo Callister (2016), quando um material sofre tensões de compressão, cisalhamento ou torção um comportamento elástico também é induzido, com representação da lei de Hook sendo:

$$\tau = G\gamma \quad (2)$$

Onde G é o módulo de cisalhamento, γ a deformação por cisalhamento e τ a tensão de cisalhamento.

Callister (2016) enuncia que quando uma tensão de tração é imposta sobre um material, ocorre o alongamento elástico em uma direção, com deformação (ε) correspondente a direção da tensão aplicada. Em contrapartida, uma deformação lateral ocorrerá, perpendicular a tensão aplicada, com caráter de contração. Como razão entre a deformação lateral e axial, o coeficiente de Poisson é definido, sendo ele:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (3)$$

Callister (2016) complementa que em materiais estruturais ε_x e ε_z terão sinais opostos, e para assegurar que o coeficiente de Poisson seja positivo o sinal negativo foi incluído na expressão.

Para Gay (2003), através das relações de tensão e deformação é possível elaborar uma matriz para análise das constantes do material, sendo esta:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

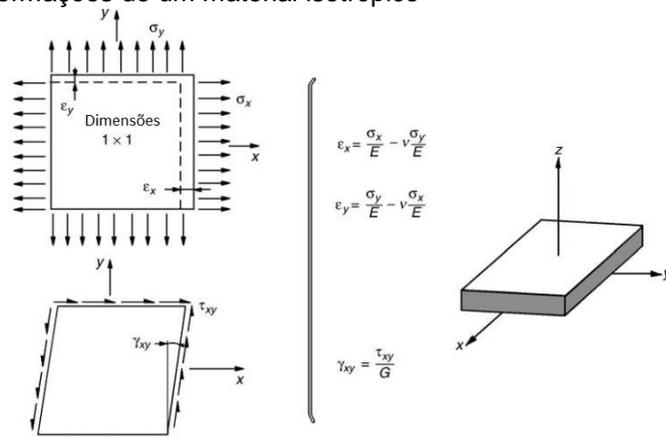
Gay (2003) ainda diz que através das constantes presentes na matriz é possível elaborar uma relação:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

Esta relação demonstra que para materiais isotrópicos as constantes de elasticidade, módulo de elasticidade, módulo de rigidez e coeficientes de Poisson estão relacionadas, e que o material pode ser caracterizado por duas constantes independentes: E e ν (GAY, 2003).

Através das relações da lei de Hooke é possível comparar a relação de tensão e deformação de materiais isotrópicos e anisotrópicos. Na Figura 16 é ilustrado que em materiais isotrópicos a direção do esforço não interfere (GAY, 2003).

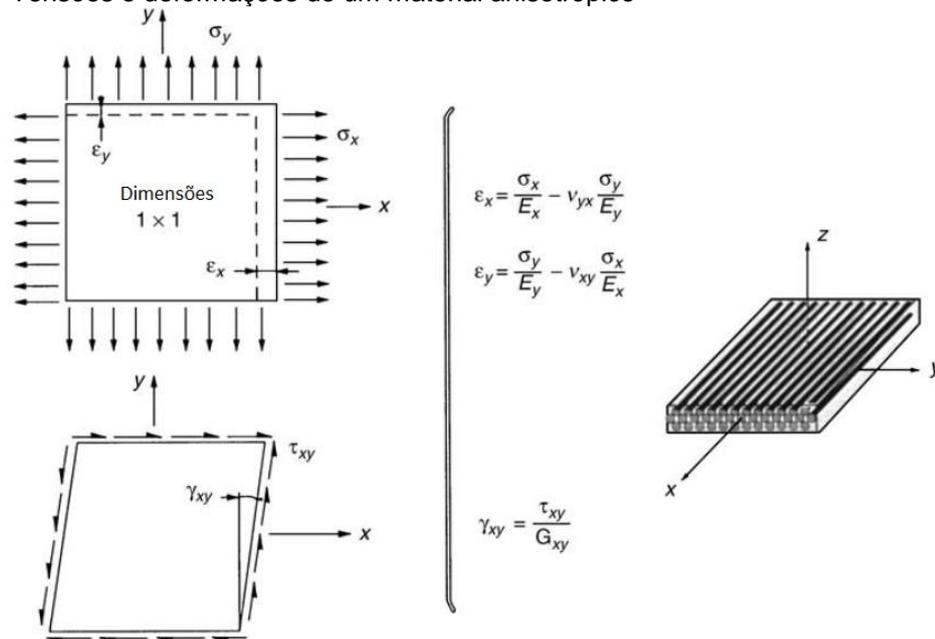
Figura 16 – Tensões e deformações de um material isotrópico



Fonte: Adaptado de Gay (2003)

Em materiais anisotrópicos a direção da aplicação do esforço afeta a deformação dos mesmos, visto que no sentido das fibras a resistência é maior, como apresenta a Figura 17 (GAY, 2003).

Figura 17 – Tensões e deformações de um material anisotrópico



Fonte: Gay (2003)

Através das tensões e deformações dos materiais anisotrópicos, Gay (2003), demonstra a equação matricial dos mesmos:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Esta matriz é simétrica, com cinco constantes elásticas distintas, diferente das três presentes em um material isotrópico, sendo elas: módulo de elasticidade E_x e E_y , coeficiente de Poisson ν_{xy} e ν_{yx} e módulo de cisalhamento G_{xy} . Esta matriz é baseada no plano das fibras, as quais estão dispostas em um estado plano de tensões x-y (GAY, 2003).

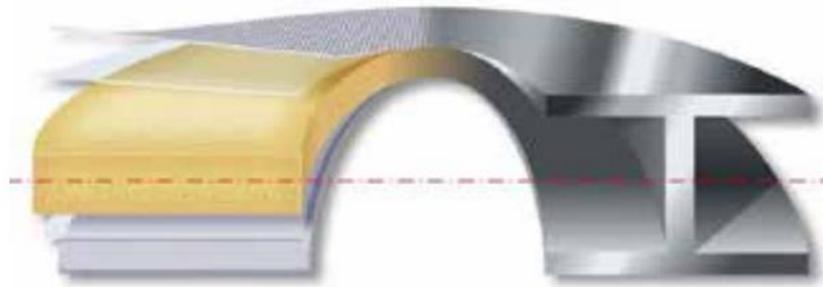
Berthelot (1992) apud Ferreira (2013) aponta que em laminas bidirecionais, onde a trama e urdidura são do mesmo material com a mesma proporção, existe uma variação das propriedades mecânicas, onde $E_x = E_y$ e $\nu_{xy} = \nu_{yx}$.

2.1.5.2 Análise estrutural de placas sanduíche

Almeida (2009) diz que o comportamento estrutural de uma viga de sanduíche pode ser comparada a uma viga em I, onde as lâminas funcionando como banzos, suportando esforços de tração e compressão, e núcleo operando como alma,

distanciando as faces e suportando os esforços de corte, como demonstra a Figura 18.

Figura 18 – Comparativo entre uma viga sanduíche e uma viga I



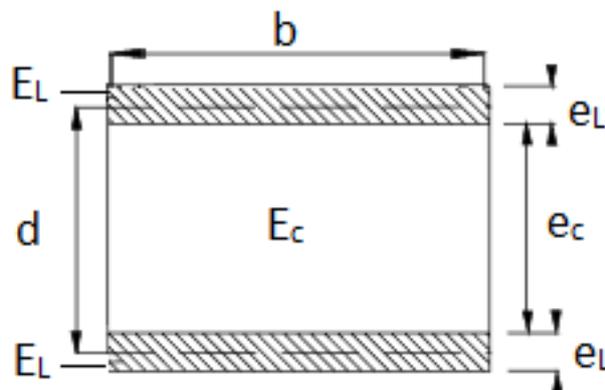
Fonte: DIAB (2018).

Para Allen (1969) e Mendonça (2005) apud Ferreira (2013) é possível caracterizar uma viga sanduíche como uma viga I se:

- a) As três camadas estiverem firmemente ligadas;
- b) A rigidez das faces é significativamente superior à rigidez do núcleo;
- c) A seção transversal é plana e ortogonal ao eixo longitudinal do painel, e assim permanece quando o painel é fletido (hipótese de Bernoulli).

Desta forma, análogo à rigidez de uma viga, onde é composta pelo produto do módulo de elasticidade (em flexão) pelo momento de inércia, em vigas sanduíches a rigidez a flexão é a soma das rigidezes dos diferentes materiais que a constituem, medidas a partir de seu eixo centroidal (ALMEIDA, 2009). Para uma viga sanduíche retangular e simétrica, representada na Figura 19, a rigidez é dada pela expressão (7) (TORSAKUL, 2007).

Figura 19 – Seção transversal de viga sanduíche simétrica



Fonte: Adaptado de Zenkert (1995)

$$D = \frac{E_L e_L^3}{6} + \frac{E_L e_L d^2}{2} + \frac{E_c e_c^3}{12} \quad (7)$$

Onde:

- D - Rigidez de flexão da viga;
- E_L - Módulo de elasticidade do material das lâminas;
- E_c - Módulo de elasticidade do material do núcleo;
- e_L - Espessura das lâminas;
- e_c - Espessura do núcleo;
- d - Distância entre os centros das lâminas.

Nesta equação o primeiro termo corresponde a rigidez a flexão das faces flexionadas em torno de seus eixos neutros, o segundo termo diz respeito a rigidez das faces associado à flexão em torno do eixo centroidal da seção, e o terceiro termo reflete à rigidez a flexão do núcleo. As faces geralmente são finas comparado ao núcleo, onde o primeiro termo é equivalente a 1% do segundo se $d/e_L > 5.77$, assim podendo ser considerado desprezível. Ainda, o núcleo geralmente possui módulo de elasticidade muito menor que as faces, onde se $E_c < E_L$, e se a condição da expressão (8) for atendida, o terceiro termo equivale a menos que 1% do segundo, sendo considerado também desprezível (ZENKERT, 1995).

$$\frac{E_L e_L d^2}{E_c e_c^3} > 16.7 \quad (8)$$

Assim sendo, Zenkert (1995), complementa que para uma estrutura sanduíche com faces de espessura menor que o núcleo, e núcleo com menor resistência que as faces, a rigidez à flexão pode ser descrita pela expressão (9):

$$D = \frac{E_L e_L d^2}{2} \quad (9)$$

Almeida (2009) acrescenta que através da teoria das vigas, com algumas alterações, é possível determinar os esforços, onde a extensão em um ponto a uma determinada distância do eixo centroidal é dada pela expressão (10).

$$\varepsilon = \frac{M_z}{D} \quad (10)$$

Em que:

- ε - extensão axial;
- M - momento fletor;
- z - Distância do ponto do eixo centroidal.

Zenkert (1995), usando a definição da extensão axial ε (10), apresenta as tensões axiais resultantes do esforço de flexão, tanto nas lâminas quanto no núcleo, dispostas nas expressões (11) e (12) respectivamente.

$$\sigma_L = \frac{M_z}{D} E_L \text{ para } \frac{e_c}{2} < |z| < \frac{e_c}{2} + e_L \quad (11)$$

$$\sigma_c = \frac{M_z}{D} E_c \approx 0 \text{ para } |z| < \frac{e_c}{2} \quad (12)$$

Onde:

- σ_L - tensão axial nas lâminas;
- σ_c - tensão axial no núcleo.

Ainda para uma viga sanduíche, Torsakul (2007) apresenta as expressões que relacionam a tensão de cisalhamento nas faces e no núcleo de uma placa sanduíche simétrica, sendo estas (13) e (14) respectivamente.

$$\tau_L(z) = \frac{T_x E_L}{D} \frac{1}{2} \left(\frac{e_c^2}{4} + e_c e_L + e_L^2 - z^2 \right) \quad (13)$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{D} \left[\frac{E_L e_L d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{e_c^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad (14)$$

Em que:

- τ_L – tensão de cisalhamento na face;
- τ_c – tensão de cisalhamento no núcleo;
- T_x – esforço de cisalhamento.

A tensão máxima de cisalhamento aparece no eixo neutro, onde $z = 0$, representada pela expressão (15) (ZENKERT, 1995).

$$\tau_{c, \max}(z = 0) = \frac{T_x}{D} \left(\frac{E_L e_L d}{2} + \frac{E_c e_c^2}{8} \right) \quad (15)$$

A tensão de cisalhamento na interface da lâmina/núcleo é definida pela equação (16) (TORSAKUL, 2007).

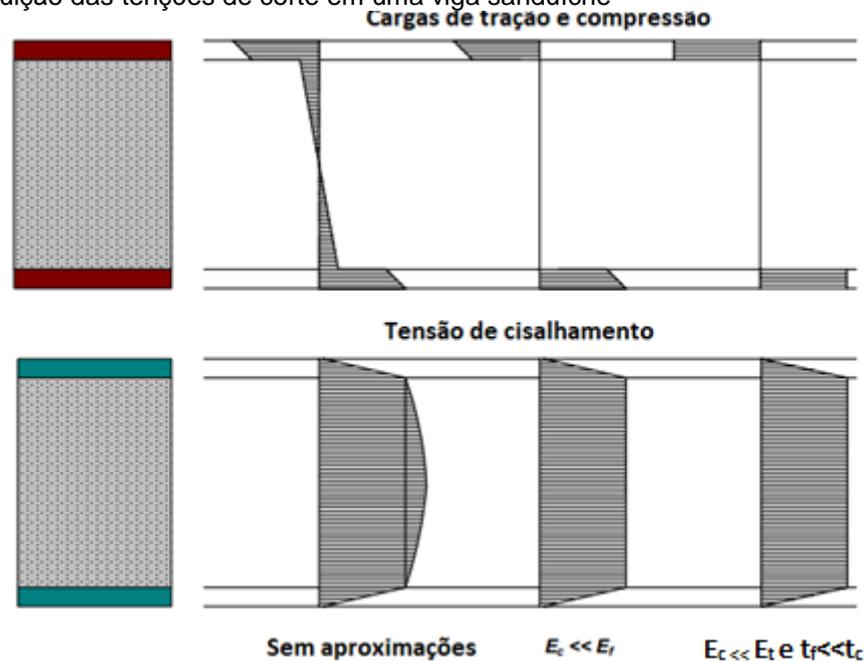
$$\tau_{c, \min} = \tau_{L, \max} = \frac{T_x}{D} \left(\frac{E_L e_L d}{2} \right) \quad (16)$$

Almeida (2009) acrescenta que, se a condição (17) for satisfeita, o esforço cortante ao longo da espessura do núcleo é considerado constante.

$$4 \frac{E_L e_L d}{E_c e_c^2} > 100 \quad (17)$$

Para complementar, Zenkert (1995) diz que as distribuições de tensões para diferentes graus de aproximação podem ser representadas graficamente, traçando as expressões já descritas em função de z , como apresenta a Figura 20.

Figura 20 – Distribuição das tensões de corte em uma viga sanduíche



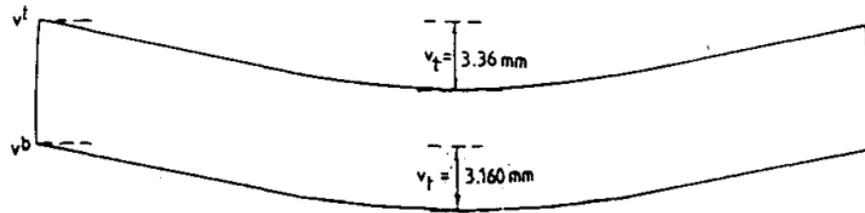
Fonte: Adaptado de Torsakul (2007)

A primeira distribuição de tensão representa uma viga sanduíche sem aproximações, onde não se assume condições em relação ao núcleo ou lâminas, e seu valor máximo é obtido para $z = 0$. Na segunda distribuição, considera-se que as tensões de corte são constantes ao longo do núcleo, atendendo a condição (8) e considerando $E_c = 0$. Já a última distribuição representa o atendimento das condições apresentadas na segunda distribuição e a consideração do primeiro termo de (7) como desprezível (ALMEIDA, 2009).

Desta forma, considerando todas as aproximações de uma viga sanduíche, Frostig (1990), através de análises numéricas, em uma viga engastada nas laterais, em uma carga foi aplicada no centro da estrutura, concluiu que as estruturas sanduíches, quando submetidos a um esforço de flexão, apresentam as seguintes características:

1. A flexibilidade do núcleo afeta toda a estrutura.
2. A deflexão do reforço superior será maior que o inferior nas proximidades do carregamento. Como demonstrado na Figura 21.

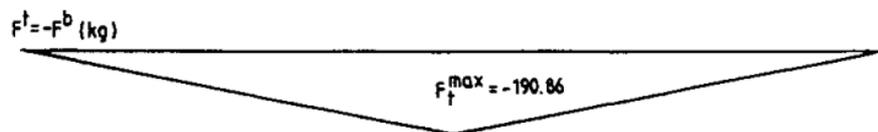
Figura 21 – Deflexão de um compósito sanduíche



Fonte: Adaptado de Frostig, 1990.

3. Os esforços axiais serão maiores onde a carga é aplicada, e diminuem no sentido axial. Como demonstra a Figura 22.

Figura 22 – Deflexão de um compósito sanduíche



Fonte: Adaptado de Frostig, 1990.

4. No local onde a carga é aplicada, a tensão de cisalhamento não é uniforme, conquanto, é uniforme ao longo do corpo de prova.
5. Na face superior do corpo de prova há tensões de compressão, e na parte inferior de tração, sendo estas distribuídas ao longo do corpo de prova conforme a sua resistência a flexão.
6. As forças de cisalhamento são concentradas nas faces do corpo de prova, e diminui conforme se afasta do local de aplicação da força. Devido à simetria do corpo de prova, a tensão de cisalhamento é nula no núcleo.
7. Os momentos de flexão serão induzidos para as faces, portanto, quanto maior a rigidez do núcleo, maior será os momentos de flexão.
8. A flexibilidade do núcleo gera efeitos locais, desta forma, quando mais flexível o núcleo, mais suscetível a um colapso repentino a estrutura será.

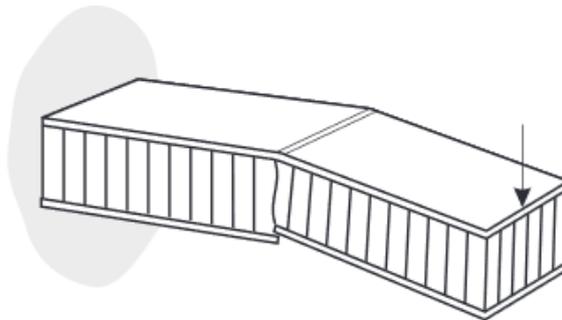
Assim sendo, em função das características da estrutura sanduíche, e da sua resposta a aplicação de esforços, diversos modos de falha podem ser apresentados, os quais limitam a capacidade de resistência da mesma. Esta capacidade de resistência depende dos materiais das lâminas, núcleo e da aderência entre estes, bem como das dimensões e geometria da estrutura (DAVIES, 2001).

Davies (2001) complementa que para se avaliar o desempenho estrutural de uma estrutura sanduíche, é necessário determinar os seus possíveis modos de falha.

2.1.5.3 FALHA POR TRAÇÃO OU COMPRESSÃO DAS FACES

Em painéis sujeitos a flexão, o momento fletor cria tensão de tração e compressão nas lâminas, como apresenta a Figura 23, em que se as mesmas não forem capazes de suportar estas cargas, irão falhar (DAVIES. 2001).

Figura 23 – Falha por compressão da face



Fonte: HexCel (2000).

Em painéis sanduíches com elevada resistência a tração das faces esta falha geralmente não é muito relevante (ALMEIDA, 2009).

2.1.5.4 FLAMBAGEM DO PAINEL

Esta falha ocorre quando a espessura de um núcleo e seu módulo de cisalhamento não são adequados para evitar a flambagem da estrutura, como mostra a Figura 24 (POZO, 2013).

Figura 24 – Flambagem de um painel sanduíche

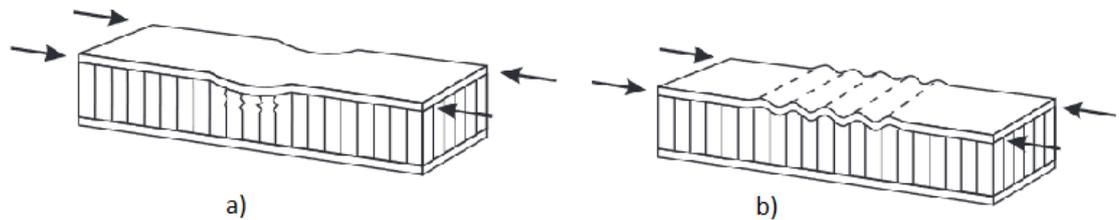


Fonte: HexCel (2000).

Esta ruptura ocorre quando a carga ultrapassa os valores críticos, na qual a deformação se torna incontrolável, podendo apresentar a flambagem de todo o painel ou em locais específicos (GAY, 2003).

A flambagem local pode apresentar diferentes formas, como um enrugamento da face (Figura 25a) ou a flambagem intracelular (Figura 25b) (HEXCCEL, 2000).

Figura 25 – Flambagem local



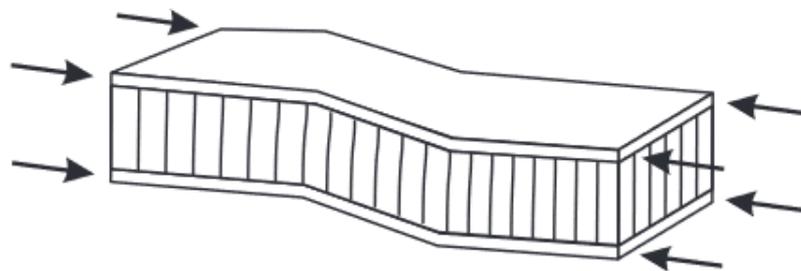
Fonte: HexCel (2000)

O enrugamento da face ocorre quando a estrutura está sujeita a cargas de pressão e o módulo de compressão das faces e do núcleo não apresentam resistência suficiente, ocorrendo a falha e empurrando a face para dentro ou fora da estrutura. Já na flambagem intracelular, quando as células do núcleo não são pequenas o suficiente, ocorre a flambagem entre elas (POZO, 2013).

2.1.5.5 FALHA POR CISALHAMENTO

Esta falha ocorre quando a espessura e módulo de cisalhamento do núcleo não são adequados para evitar a ruptura por cisalhamento da estrutura, quando sujeita a compressão, como apresenta a Figura 26 (POZO, 2013).

Figura 26 – Falha por cisalhamento



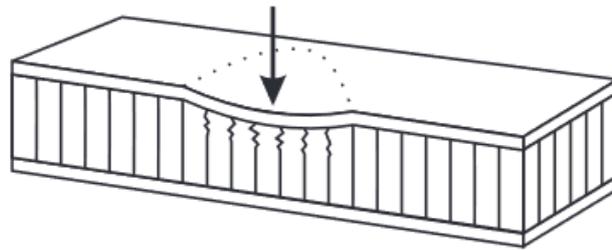
Fonte: HexCel (2000)

Segundo Gloria (2015), as faces não afetam nesta falha, onde com o aumento da espessura do núcleo, ou utilizando um núcleo com maior resistência, esta pode ser evitada.

2.1.5.6 FALHA POR COMPRESSÃO LOCAL

A falha por compressão local ocorre quando cargas perpendiculares à superfície são aplicadas e o núcleo do material não é resistente o suficiente, como demonstra a Figura 27 (POZO, 2013).

Figura 27 – Falha por compressão local



Fonte: HexCel (2000)

Torsakul (2007) diz que esta falha pode ser evitada se a carga for distribuída em uma área maior sobre a superfície da estrutura.

2.1.5.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Hodgkinson (2000) diz que quando uma estrutura ou componente é projetada, os aspectos dos seus subcomponentes devem ser decididos considerando o material do qual será feito, para que este seja adequado ao propósito inicial. Deve-se considerar cuidadosamente a relação de como o material tende a se comportar e as propriedades que o mesmo possui.

Segundo Jawaid, Thariq e Saba (2019) os materiais compósitos apresentam um comportamento mecânico significativamente diferente dos demais materiais convencionais, como metais, devido à natureza destes, que para que se tenha uma caracterização completa de suas propriedades, anisotrópicas e não homogêneas, uma ampla gama de testes são necessários.

Desta forma, Daniel e Ishai (2006) citam os principais objetivos dos ensaios mecânicos em compósitos, sendo eles:

1. Caracterização dos materiais constituintes (fibra, matriz e interfase) para uso em análises micromecânicas (através destas propriedades é possível prever, em princípio, o comportamento da lamina, bem como dos laminados e estruturas).

2. Caracterização da lamina unidirecional básica, que forma a base da construção de todas as estruturas laminadas.
3. Determinação das propriedades Inter laminares.
4. Comportamento do material sob condições especiais de carregamento (multiaxial, fadiga, fluência, impacto, alta taxa de carregamento e outros).
5. Análise experimental de tensão e falha de laminados e estruturas compostas, especialmente as que envolvem descontinuidades geométricas, como bordas livres, recortes, juntas e queda de camadas.
6. Avaliação da integridade estrutural através de testes não destrutivos.

Para que estes valores experimentais obtidos sejam confiáveis é essencial que os corpos-de-prova sejam produzidos com qualidade, sempre se baseando em normas técnicas (ASTM, DIN, etc) (SIQUEIRA, 2009).

Almeida (2009) apresenta as principais características dos ensaios em painéis sanduíches e explana que o ensaio de compressão transversal, que é realizado perpendicularmente a lâmina, é importante na avaliação do comportamento da zona de apoio dos painéis sanduíches, quando submetidos a flexão, visto que o material nesta zona fica sujeito a compressão na direção transversal das lâminas.

Sezgin (2008) demonstra que através dos resultados dos ensaios mecânicos é possível obter os valores da resistência à compressão plana (σ), onde os mesmos são obtidos pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (18)$$

Onde P é a carga máxima aplicada e A a área da seção transversal do corpo de prova.

E segundo Sezgin (2008) ainda é possível determinar o módulo de elasticidade aparente do núcleo ($E_{c,aparente}$), onde a deformação das faces é desprezada, através da equação:

$$E_{c,aparente} = \frac{\frac{\Delta F_{máx}}{A}}{\frac{\Delta \delta}{L_0}} \quad (19)$$

Em que ΔF é a variação da força no período linear, A a área sendo comprimida, $\Delta \delta$ a variação de deslocamento e L_0 o comprimento inicial.

Já o ensaio de compressão no plano, realizado paralelamente às lâminas, exerce uma carga que tende a causar uma instabilidade por flambagem das lâminas,

exceto se a espessura das mesmas forem tal que o esmagamento destas ocorra antes. Assim sendo, o ensaio de compressão no plano é importante para avaliar o comportamento do painel quando as lâminas estão sujeitas a compressão, onde a falha pode ocorrer por enrugamento das mesmas, e o material do núcleo pode acompanhar a deformação.

E Sezgin (2008) complementa que com os resultados do ensaio é possível obter os valores da tensão compressiva da face (σ), através da equação:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (20)$$

Em que P é a carga final aplicada na estrutura e A é a área das duas faces.

Almeida (2009) apresenta ainda considerações a respeito do ensaio de flexão dos painéis sanduíche, onde é pretendido conhecer o seu comportamento em serviço e à ruptura, seus modos de rupturas mais frequente e cargas de colapso, e, ainda, objetiva determinar as constantes elásticas mais relevantes para o dimensionamento de peineis, as quais são a rigidez a flexão e de corte.

Desta forma, Sezgin (2008), apresenta os dados que podem ser obtidos através deste ensaio, como a tensão de cisalhamento do núcleo (τ), descrita pela equação:

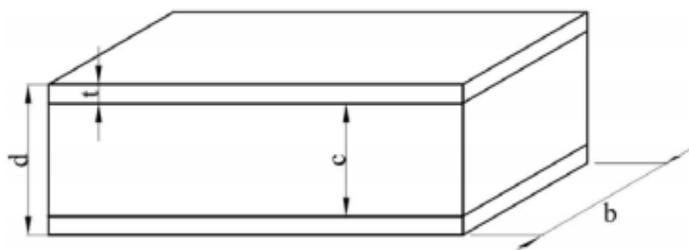
$$\tau = \frac{P}{(d + c)b} \quad (21)$$

Onde P é a carga, d a espessura do sanduíche, c a espessura do núcleo e b a largura do sanduíche. Sezgin (2008) também apresenta a tensão de flexão da face (σ), que pode ser obtida pela equação:

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d + c)b} \quad (22)$$

Em que t é a espessura das faces e L o comprimento do vão utilizado no ensaio. Ainda é possível determinar a rigidez à flexão do painel (D), a qual utiliza a Figura 28 como referência (SEZGIN, 2008).

Figura 28 – Dimensões de uma estrutura sanduíche



Sezgin (2009) apresenta também a equação para a determinação da rigidez a flexão do painel:

$$D = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12} \quad (23)$$

Onde E é o módulo de elasticidade das faces. Ainda é possível calcular a deflexão da placa de sanduíche, em que Sezgin (2008) apresenta a equação:

$$\Delta = \frac{(PL^3)}{48D} + \frac{PL}{4U} \quad (24)$$

No qual Δ é a deflexão total do ponto média da placa. Sezgin (2008) complementa que U nesta equação é a rigidez a dobra do painel, e pode ser obtido por:

$$U = \frac{G(d + c)^2b}{4c} \quad (25)$$

Em que G é o módulo de cisalhamento do núcleo.

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSITOS

Para Silva (2016), são oito principais processos de fabricação popularmente utilizados na indústria, sendo eles:

- Enrolamento filamentar;
- Rotomoldagem;
- Moldagem manual;
- Centrifugação;
- RTM;
- Infusão a vácuo;
- Compressão a quente (QMC) e a frio;
- Pultrusão.

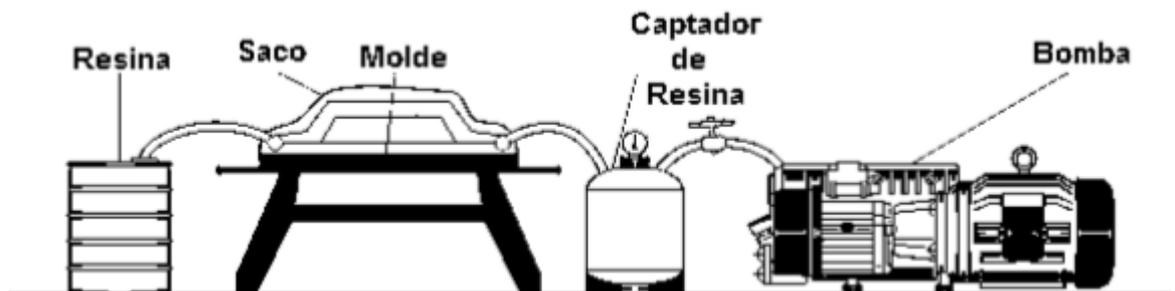
Dentre estes processos, destaca-se a infusão a vácuo, que segundo Hsiao e Heider (2012) desempenha um papel importante na promoção da qualidade, acessibilidade e complexidade das peças grandes, sendo amplamente utilizado na indústria naval, de energia, construção de infraestrutura, aeroespacial e de defesa.

2.2.1 Infusão a vácuo

Para Silva (2016), o processo de infusão a vácuo é caracterizado pela utilização de uma superfície rígida, chamada de molde inferior, e um saco, em filme flexível, para

a execução da infusão a vácuo. Também é incluso um sistema que induz o fluxo de resina, os canais que distribuem a mesma e uma bomba de vácuo, a qual retira o ar existente no interior do saco, de forma a gerar uma pressão negativa, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Componentes do processo de infusão a vácuo



Fonte: Silva (2016)

O processo basicamente é realizado aplicando-se vácuo, de um lado, que influencia a imposição do fluxo de resina no outro. Com a bomba ligada, o ar começa a ser extraído do espaço entre o saco e o molde ferramenta. Com a diminuição da pressão, o diferencial de pressão entre o interior e o exterior será suficiente para vencer as forças viscosas e inerciais da resina, iniciando assim o seu fluxo. Após a impregnação total do tecido fibroso, o fluxo continua até um captador, onde o mesmo é interrompido para que a bomba não aspire resina. Para finalizar, com a peça ainda sob a compressão a vácuo, tem-se um tempo de espera, de forma que o processo de cura se conclua (SILVA, 2016).

Conforme dizem Hsiao e Heider (2012), normalmente nos processos de infusão a vácuo a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão de vácuo é o que mantém o compósito selado no saco, o comprime contra o molde e puxa a resina para dentro da pré-forma.

Hsiao e Heider (2012) ainda descrevem as principais etapas de um processo VARTM (Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo) típico, as quais são:

1. Limpar o molde e aplicar uma cera sobre a superfície para facilitar a desmoldagem.
2. Colocar as fibras, se necessário várias camadas.
3. Aplicar uma película (*peel ply*) de forma a cobrir todo o tecido de fibra.
4. Colocar a camada que contém os distribuidores da canalização de resina.

Esta pode ajudar a aumentar a velocidade de infusão e é comumente usada

na fabricação de grandes peças de laminados compostos. O sistema de injeção será conectado a esta camada, o que implica que esta não possa estar em contato direto com o sistema de extração do ar.

5. Inserir a porta de injeção da resina numa das extremidades da camada de distribuição. Um tubo helicoidal aberto (com forma de mola) ou um tubo em forma de ómega também podem ser usados como meio de injeção e distribuição da resina.
6. Inserir a porta de descarga na parte superior do *peel ply*, enuncia na etapa 3. Convém lembrar que esta não pode ser colocada em contato com o sistema de distribuição.
7. Aplicar a fita dupla face, em torno do molde, para depois proceder à vedação.
8. Pousar cuidadosamente o saco de vácuo sobre o conjunto e verificar a colagem na fita.
9. Conectar os tubos de extração e injeção às portas homólogas. Conectá-los também à bomba e ao reservatório, respectivamente. Não encher ainda o reservatório.
10. Fechar a porta de injeção e abrir a porta de extração para aplicar vácuo no interior do conjunto sob o saco. Verificar cuidadosamente e corrigir qualquer vazamento de ar.
11. Para comprimir o reforço de fibra, aplicar cargas de vácuo ciclicamente.
12. Encher o reservatório de resina. Manter a porta de vácuo ligada. Abrir a porta de injeção para permitir que a tubulação de resina atravesse o tecido de fibra.
13. Ocorrência de uma rápida distribuição de resina na parte superior e uma infusão gradual na direção vertical.
14. Uma vez que a resina atinge a porta de extração, permitir que esta flua mais alguns minutos, de forma a serem eliminadas possíveis bolhas de ar existentes no interior da estrutura.
15. Fechar a porta de injeção e manter a porta de extração aberta, até que se finalize o processo de cura da resina. O vácuo irá manter o conjunto firmemente pressionado contra o molde e também irá manter a pressão de compressão uniforme. Esta prática resulta numa espessura globalmente homogénea.

16. Uma vez finalizada a cura da resina, pode-se desligar o vácuo e desmoldar. Segundo Mesogitis, Skordos e Long (2014) o processo de fabricação de materiais compósitos envolve muitas incertezas, que podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

- Variação de arquitetura de fibra que geralmente são geradas durante a produção, manuseio ou armazenamento.
- A matriz sofre variações devido a condições de armazenamento ou incertezas em composições e formulações da resina.
- Variação nos parâmetros ambientais e nas condições do processo.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa é definida como uma pesquisa bibliográfica, que segundo Gil (2008) “[...] é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Com isso é possível obter material de apoio referente a confecção e ensaio de compósitos, os quais são de grande importância para a pesquisa.

Já no âmbito de delineamento baseado em procedimentos, o trabalho procura seguir artigos e publicações similares, onde é possível compreender e elaborar as necessidades relacionadas ao tema, para que o método fosse definido.

3.1 MÉTODOS UTILIZADOS

Visando atingir o objetivo de confeccionar e ensaiar corpos de prova de compósitos sanduíches fabricados na instituição, foram propostos os seguintes tópicos:

1. Definição do tipo de compósito e escolha dos materiais constituintes
2. Confeção da placa sanduíche e corte dos corpos de prova
3. Realização dos Ensaio Mecânicos

3.2 MATERIAIS

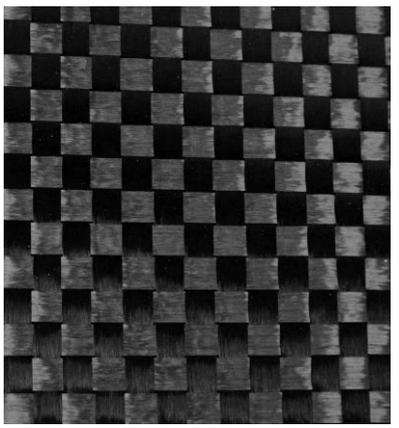
No desenvolvimento do presente trabalho, avaliou-se o compósito sanduíche com camadas externas de fibra de carbono e núcleo de PVC divinylcell, material no qual é comumente utilizado pela equipe MasBah Aerodesign, na confecção de suas aeronaves.

3.2.1 Tecido das faces

Para a determinação do tecido a ser utilizado, buscou-se analisar o tipo que ocasionaria maior interesse para os projetos. Neste âmbito foi utilizado um tecido de fibra de carbono bidirecional, de trama plana, modelo RC203P, com propriedades apresentadas no Quadro 2.

Este modelo de manta de fibra de carbono apresenta tramas com resistência de 240Gpa, construída com 4 filamentos planos alinhados a cada polegada em ambas as direções principais (0/90 graus).

Quadro 1 – Informações técnicas da fibra de carbono RC203P.

	Unidade	Valor	
Tipo de fibra	-	Carbono 12k	
Tipo de trama	-	Plana	
Peso	g/m ²	193	
Tex da urdidura	g/Km	800	
Tex da trama	g/Km	800	
Contagem urdidura	-	1,2	
Contagem trama	-	1,2	
Peso urdidura	g/m ²	96,5	
Peso trama	g/m ²	96,5	

Fonte: Autores (2020) adaptado de *Datasheet* E-Composites

3.2.2 Material do Núcleo

Como material constituinte do núcleo da estrutura sanduíche foi selecionado uma espuma de PVC da marca Divinycell. A espuma PVC Divinycell apresenta alta resistência quando sujeito a fadiga e impacto, como também uma alta adesividade. Assim avaliaram-se opções deste material, e observou-se que o modelo H45 possui menor densidade em relação aos outros.

As principais características técnicas do núcleo do compósito sanduíche, composto pela espuma PVC rígida Divinycell H45, podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 2 – Características técnicas PVC Divinycell H45

	Unidade	Valor	
Variação de densidade	%	±10	
Condução térmica	W/(m-K)	0,028	
Coeficiente de expansão linear		40	
Coeficiente de expansão térmica	°C	±125	
Temperatura de operação	°C	-200+70	
Temperatura máxima de processamento	°C	90	
Fator de dissipação	-	0,0002	
Constante dielétrica	-	1,05	
Coeficiente de poisson	-	0,4	

Fonte: *Datasheet* E-Composites

Para os cálculos abrangidos no trabalho utilizou-se das propriedades mecânicas relacionadas no Quadro 4.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas PVC Divinycell H45

	Ensaio	Unidade	Nominal	Mínimo
Resistência à compressão	ASTM D 1621	MPa	0,6	0,5
Módulo de compressão	ASTM D1621-B-73	MPa	50	45
Resistência à tração	ASTM D 1623	MPa	1,4	1,1
Módulo de tração	ASTM D 1623	MPa	55	45
Resistência ao cisalhamento	ASTM C 273	MPa	0,56	0,46
Módulo de cisalhamento	ASTM C 273	MPa	15	12
Deformação de cisalhamento	ASTM C 273	%	12	-
Densidade	ISO 845	Kg/m ³	48	-

Fonte: *Datasheet* E-Composites

3.2.3 Resina Epóxi

Para a infusão a vácuo utilizou-se o sistema de resina epóxi AR260 com endurecedor epóxi AH260, o qual apresenta baixa viscosidade e um sistema de cura rápida. O Quadro 5 apresenta as propriedades da resina e do endurecedor.

Quadro 4 – Propriedades mecânicas do sistema de resina AR260 e AH260

	Ensaio	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	Mpa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	Mpa	3157,8
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	Mpa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	Mpa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	Mpa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	KJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Fonte: *Datasheet* E-Composites

Para a confecção do compósito sanduíche observaram-se as propriedades de manuseio disponibilizadas pelo vendedor, observadas no Quadro 6.

Estas informações proporcionaram um procedimento padrão para as atividades onde manipula-se a resina.

Quadro 5 – Propriedades de manuseio do sistema de resina AR260 e AH260

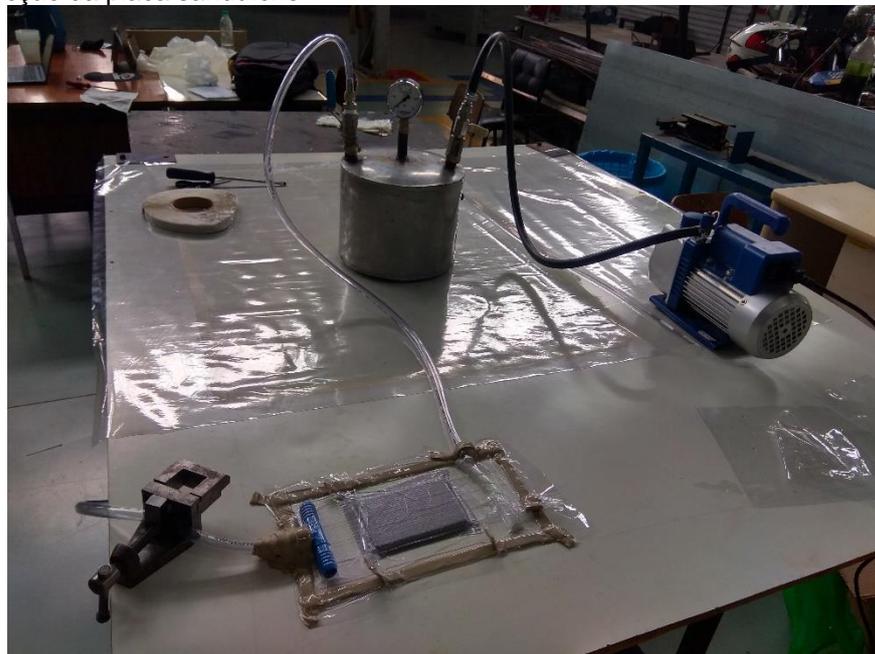
	Ensaio	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	945,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1.200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2427	Minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D2471	Minutos	120

Fonte: *Datasheet* E-Composites

3.3 CONFECÇÃO DA PLACA SANDUÍCHE E CORTE DOS CORPOS DE PROVA

O processo de confecção da placa sanduíche foi procedido no *Box* da equipe MasBah, como apresenta a Figura 30, sediado pela FAHOR, utilizando de equipamentos e materiais cedidos pela mesma, como o molde, o reservatório de vácuo e mangueiras.

Figura 30 – Confecção da placa sanduíche



Fonte: Autores (2020)

Para os cortes dos corpos de prova foram avaliados instrumentos de corte de posse dos autores, em que o equipamento que apresentou o corte mais limpo foi escolhido.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram enviados para o Laboratório de Polímeros da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPOL) para a realização dos ensaios mecânicos e obtenção das propriedades deste material.

Figura 31 – Máquina de ensaios universal



Fonte: UFRGS (2015)

Os procedimentos dos ensaios mecânicos seguiram as recomendações das normas internacionais ASTM C364, ASTM C365 e ASTM C393. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios hidráulica do Laboratório de Polímeros (LAPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da marca Instron, modelo 3382, com célula de carga de 100KN, apresentada na Figura 30.

4 RESULTADOS

4.1 PROCESSO DE INFUSÃO

Esta etapa consistiu em confeccionar uma placa sanduíche para obtenção dos corpos de prova há serem cortados conforme as medidas especificadas pelas normas internacionais ASTM.

A confecção da placa sanduíche foi realizada a partir do processo de infusão a vácuo, utilizando os materiais relacionados no Quadro 7.

Quadro 6 – Materiais necessários no processo de confecção

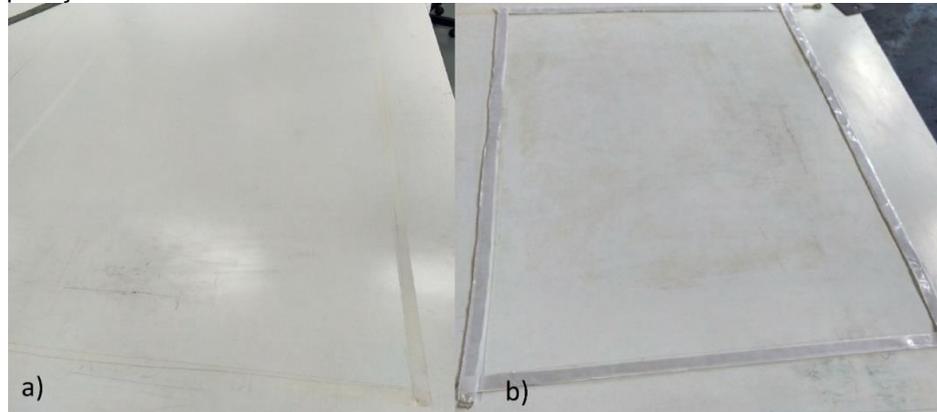
	Descrição	Quantidade	Unidade
Tacky Tape	Fita selante para laminação a vácuo	12 x 6600	mm
Fita Crepe	Fita utilizada para demarcação da área	5	m
Cera de Carnaúba	Cera utilizada como desmoldante, facilitando a retirada do material após a infusão	1	un
Spray adesivo	Adesivo utilizado durante e etapa de empilhamento dos materiais do sanduíche, facilitando a operação	1	un
Spiraduto 5/8"	Tubo para melhor distribuição do vácuo dentro do ambiente de laminação	5	m
Tela de distribuição	Malha plástica para transferência da resina em laminados sólidos durante o processo de infusão a vácuo	150 x 50	cm
Mangueira Cristal de 5/8"	Mangueira para a ligação dos componentes envolvidos no processo	5	m
Bomba de Vácuo	Bomba para aplicar o vácuo no ambiente de laminação	1	-
Bolsa de Polietileno	Bolsa que permite o vácuo no ambiente de laminação	5	m ²
Recipiente de pressão	Recipiente que permite a sucção da resina sem danificar a bomba de vácuo	1	-

Fonte: Autores (2020)

Avaliaram-se superfícies planas disponíveis na instituição que se adequassem para o processo de infusão, desta forma foi utilizado um quadro branco. Na superfície do quadro foi delimitada a área que seria submetida ao processo de infusão, de modo a facilitar a aplicação homogênea da cera de carnaúba, sendo esta aplicada cinco vezes, utilizando um intervalo de 30 minutos entre cada aplicação, desta forma mantendo a superfície encerada, facilitando a remoção da lâmia após a infusão. Após

a aplicação das camadas de cera, removeu-se a fita crepe e aplicou-se a fita tacky tape como demonstra a Figura 31.

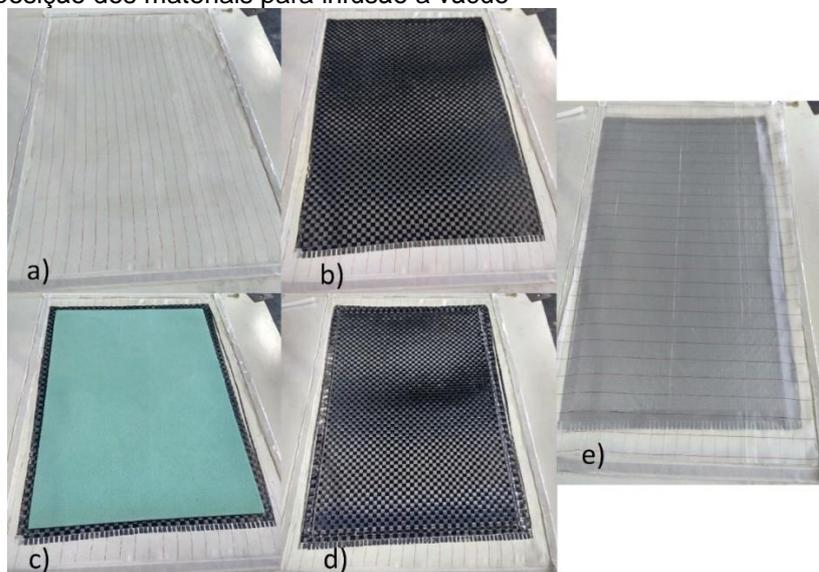
Figura 32 – Preparação do molde de infusão a vácuo



Fonte: Autores (2020)

Posteriormente à preparação do molde, os materiais foram dispostos sobre sua face. Cada camada de material foi fixada utilizando *spray* adesivo, desta forma, iniciou-se o processo fixando o *peel ply* no molde (Figura 32a). Em seguida foi posicionada a primeira camada do tecido de fibra de carbono de forma que as urdiduras e as tramas permanecessem de forma ordenada (Figura 32b), acima deste, foi posicionado o *Dininycell* (Figura 32c). Após estes foi posicionado a próxima face de tecido de fibra de carbono (Figura 32d), desta forma concluindo as faces do material, desta forma foi posicionada a última camada de *pell ply* sobre todas as camadas do material (Figura 32e).

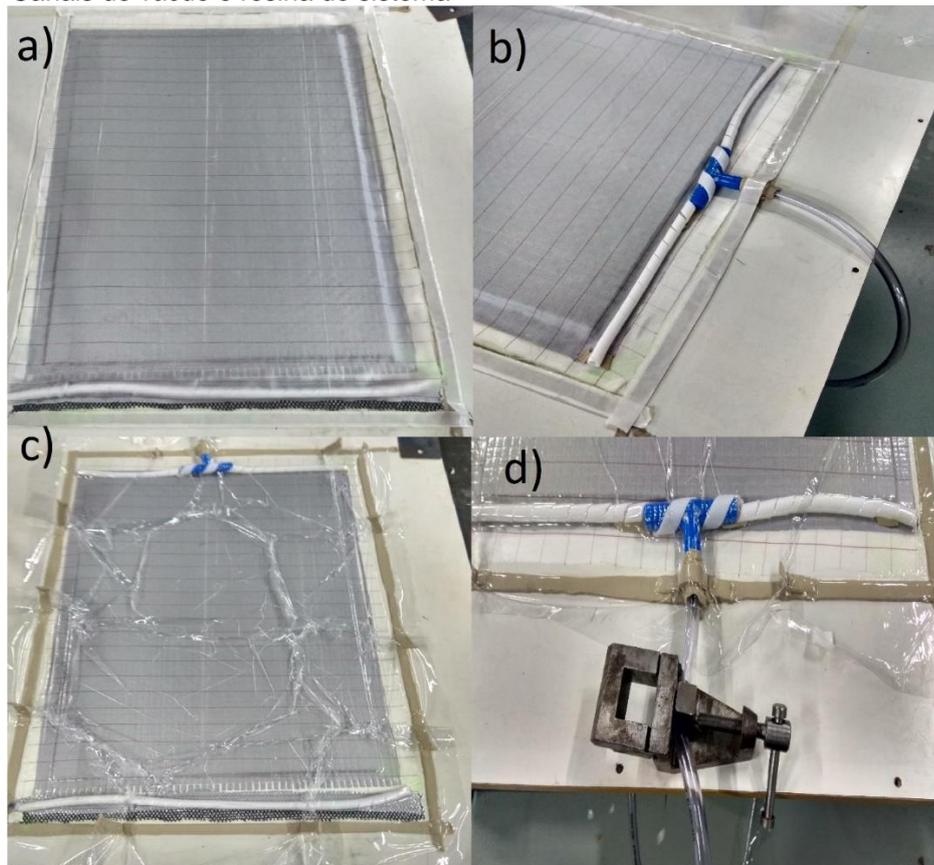
Figura 33 – Disposição dos materiais para infusão a vácuo



Fonte: Autores (2020)

Com os materiais dispostos na configuração desejada, o canal de vácuo foi instalado, sendo conectado o *spiraduto* ao reservatório de vácuo. No outro lado do material, outro *spiraduto* foi conectado ao recipiente de resina, este contendo um interruptor para controle do fluxo da mesma e vedação da mangueira. Em sucessão o saco para a obtenção do vácuo foi inserido, o qual é fixado na fita *tacky tape* dispondo de algumas elevações criadas para evitar vazamentos (Figura 33)

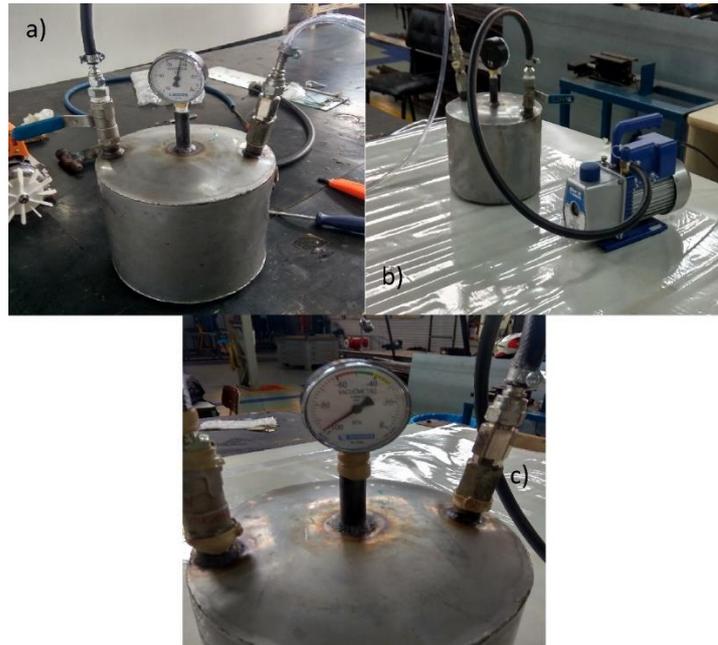
Figura 34 – Canais de vácuo e resina do sistema



Fonte: Autores (2020)

Após inserir o saco de vácuo, o canal de resina foi fechado e o canal de vácuo ligado ao reservatório de vácuo, o qual já estava previamente conectado à bomba de vácuo. Com todas as conexões realizadas, a bomba de vácuo foi acionada de modo a criar vácuo em todo o sistema, sendo este indicado pelo vacuômetro. Após a inserção do vácuo, foi identificado os vazamentos através do som, e corrigidos pressionando a fita *tecky tape*, em seguida. Para confirmação da não presença de vazamentos, o registro entre a bomba de vácuo e o reservatório de vácuo foi fechado e avaliou-se a perda do vácuo em relação ao tempo, a qual se manteve fixa durante 20 minutos.

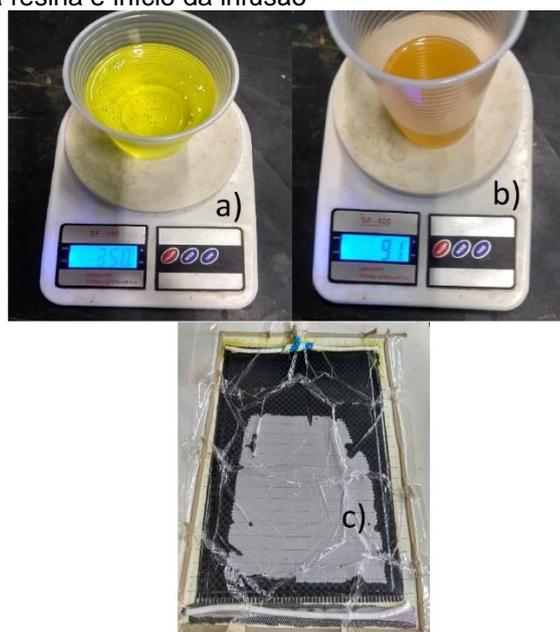
Figura 35 – Aplicação de vácuo no sistema



Fonte: Autores (2020)

Com a confirmação de que o sistema não apresentou entradas de ar a mistura de resina foi preparada. A resina epóxi (Figura 35a) foi misturada ao endurecedor (Figura 35b), em uma proporção de 100:26, como indicado pelo fabricante. A mistura foi misturada até ficar homogênea e a mangueira da resina foi inserida no recipiente da mistura. Desta forma, o canal de resina foi aberto, dando início à infusão a vácuo (Figura 35c).

Figura 36 – Preparação da resina e início da infusão



Fonte: Autores (2020)

Após a resina percorrer por toda a placa, o canal de resina foi fechado (Figura 33d) e manteve-se a bomba de vácuo ligada por apenas alguns minutos. O período de cura foi de 24 horas com a bomba de vácuo desligada e em temperatura ambiente.

4.1.1 Placa de teste

Afim de testar o processo de infusão a vácuo uma pequena placa em tamanho reduzido foi produzida. Para sua confecção, todas as etapas foram seguidas, como mostra a Figura 36, utilizando a proporção de resina indicada.

Figura 37 – Produção da placa de teste



Fonte: Autores (2020)

No processo de infusão a vácuo é indicado que a bomba esteja ligada durante todo o tempo de cura da resina, sendo este de 4 horas, porém, para a preservação do equipamento utilizado, a bomba foi desligada em intervalos controlados para manter a pressão entre -95 e -100 KPa, afim de refrigerar o equipamento. Tendo em vista que foi obtido êxito na infusão da placa de teste, se deu sequência na infusão da placa definitiva.

4.1.2 Primeira placa concludente

A infusão da primeira placa com tamanho próximo ao utilizado pelos projetos seguiu as mesmas etapas da placa de teste, seguindo o mesmo procedimento de empilhamento de placas, utilizou-se a proporção indicada pelo fabricante, e assumiu-se mesma variação de pressão, de -95 a -100 KPa, sendo desligada a bomba de vácuo entre esse intervalo para permitir seu resfriamento.

A placa foi dimensionada para possuir 30 x 60 cm, tendo uma boa margem para a extração dos corpos de prova. Contudo, após o tempo de cura foi constatado que no centro da placa a infusão da resina não ocorreu, como demonstra a Figura 37.

Figura 38 – Primeira placa produzida



Fonte: Autores (2020)

Desta forma, foram avaliadas as possíveis falhas de processo, e realizada uma nova placa para obtenção dos corpos de prova.

4.1.3 Segunda placa concludente

AS pesquisas em artigos e trabalhos semelhantes, como de Caldas (2014), Silva (2016) e Hsiao e Heider (2012) foi constatado que os mesmos utilizavam um consumível a mais durante a infusão, sendo este uma tela de distribuição, a qual facilita a passagem da resina sobre a placa. Desta forma a infusão foi realizada novamente, com o acréscimo da tela de distribuição, tornando a configuração das camadas respectivamente, *pell ply*, tecido de fibra de carbono, *divinycell*, tecido de

fibra de carbono, *pell ply*, e por último a tela de distribuição, configurando assim as camadas do material e consumíveis no processo (Figura 38).

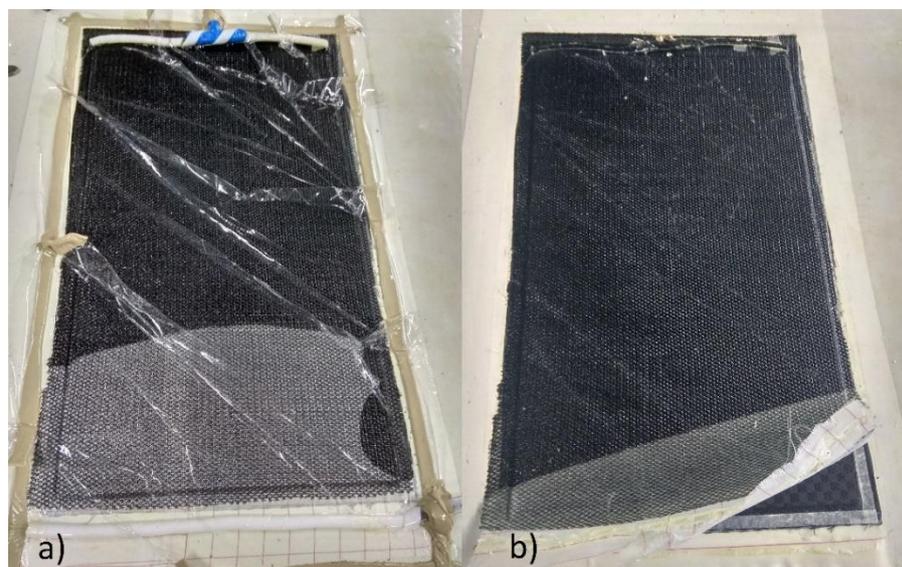
Figura 39 – Tela de distribuição



Fonte: Autores (2020)

Ademais ao acréscimo da tela de distribuição o procedimento seguiu as etapas anteriormente utilizadas, com uma mistura de 100:26 entre resina e endurecedor, pressão entre -95 e -100 KPa, e bomba sendo ligada entre tempos alternados para poder resfriar. A infusão apresentou melhores resultados, proporcionando a infusão completa da face superior, como mostra a Figura 39.

Figura 40 – Infusão da placa definitiva



Fonte: Autores (2020)

Ao retirar a placa do molde, observou-se que a infusão foi incompleta e o centro da placa não recebeu resina, ilustrado na Figura 40.

Figura 41 – Resultado da infusão da placa final



Fonte: Autores (2020)

Analisando pesquisas semelhantes e os processos realizados observa-se que a única variável é o tempo de funcionamento da bomba de vácuo, a indicação é mantê-la ligada durante todo o processo de cura da resina sendo está não sendo seguida no processo pelos fatores citados anteriormente. Desta forma, avaliando a indisposição de materiais para realizar a confecção de uma nova chapa, os corpos de prova foram retirados dos locais onde ocorreu a infusão na primeira placa concludente e na segunda placa concludente.

4.2 CORTE DOS CORPOS DE PROVA

As normas ASTM definem as dimensões dos corpos de prova em relação a sua espessura. Como a chapa confeccionada apresentou espessura de cinco milímetros,

os corpos de prova foram estimados a partir das dimensões, em mm, apresentadas no Quadro 7.

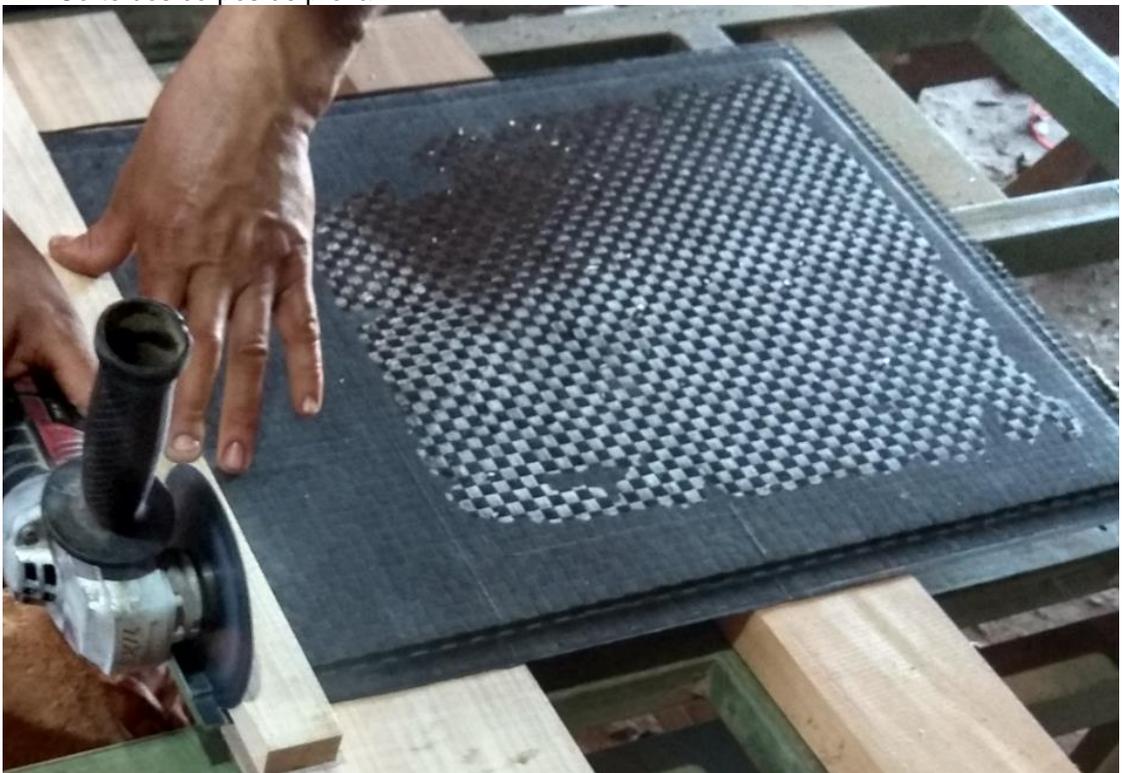
Quadro 7 – Dimensões dos corpos de prova

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
ASTM C364	121X50	121X50	121X49	121X50	120X50,5
ASTM C365	25X26	26X26	26X26,5	25X25,5	26X26
ASTM C393	130X40	130X41	130X41	131X40,5	131X40,5

Fonte: Autores (2020)

Para realização do corte dos corpos de prova, foram realizados testes utilizando diferentes ferramentas de cortes, sendo elas serra manual para ferro, rotativa de madeira, micro retifica com disco de lixa e a rotativa com disco abrasivo. Dentre estes, se destacou a esmerilhadeira com disco abrasivo, apresentando corte limpo e facilidade de manuseio. Desta forma utilizou-se um suporte de madeira (Figura 41) visando proporcionar cortes retos nas dimensões estabelecidas pelas normas internacionais ASTM.

Figura 42 – Corte dos corpos de prova

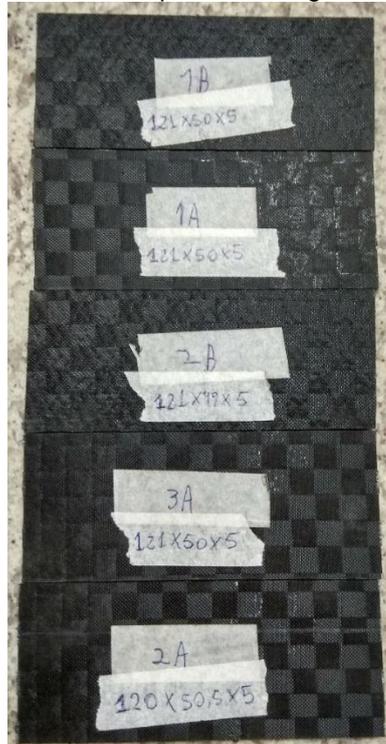


Fonte: Autores (2020)

Os corpos de prova foram extraídos das duas placas concludentes e identificados, sendo estes retirados das partes laterais das placas, visto que a porção

Os corpos de prova, apresentados na Figura 44, foram dimensionados seguindo a metodologia dos autores previamente descritos, os quais utilizam a norma ASTM C364 como base.

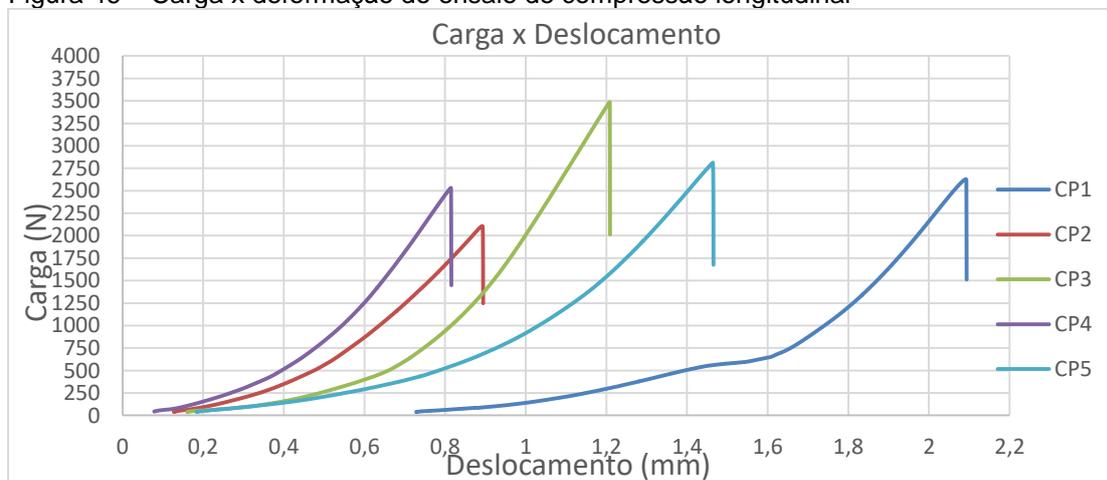
Figura 45 – Corpos de prova para o ensaio de Compressão Longitudinal



Fonte: Autores (2020)

O ensaio, seguindo a norma, foi realizado com uma taxa de deformação de 0,5 mm/min. A figura 45 apresenta o gráfico comparativo da carga x deformação dos corpos de prova ensaiados.

Figura 46 – Carga x deformação do ensaio de compressão longitudinal



Fonte: Autores (2020)

Através dos ensaios foram extraídas informações a respeito dos corpos de prova, como a carga e a tensão aplicada em sua falha, como mostra o Quadro 8.

Quadro 8 – Carga na falha do ensaio de compressão longitudinal

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Carga na falha (N)	2.624,00	2.004,00	3.488,00	2.531,00	2.459,00
Deslocamento compressivo na falha (mm)	1,3634	0,7655	1,0473	0,7352	1,2799
Tensão de flexão na carga máxima (MPa)	10,514	8,43	13,812	10,125	11,48

Fonte: Autores (2020)

No gráfico de carga x deformação do ensaio é possível visualizar o ponto de falha do corpo de prova, estes modos de falha estão dispostos no Quadro 9.

Quadro 9 – Modos de falha dos corpos de prova no ensaio de compressão

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Modo de falha	Flambagem (sem descolamento)	Falha no núcleo	Flambagem	Flambagem + falha no núcleo	Flambagem + falha no núcleo

Fonte: Autores (2020)

A flambagem é o modo de falha mais encontrado, sendo este devido a placa possuir uma menor espessura.

Aplicando os dados experimentais na equação (18) é possível determinar de forma analítica a resistência máxima a compressão dos corpos de prova, apresentada no quadro 10.

Quadro 10 – Resistência máxima a compressão dos corpos de prova

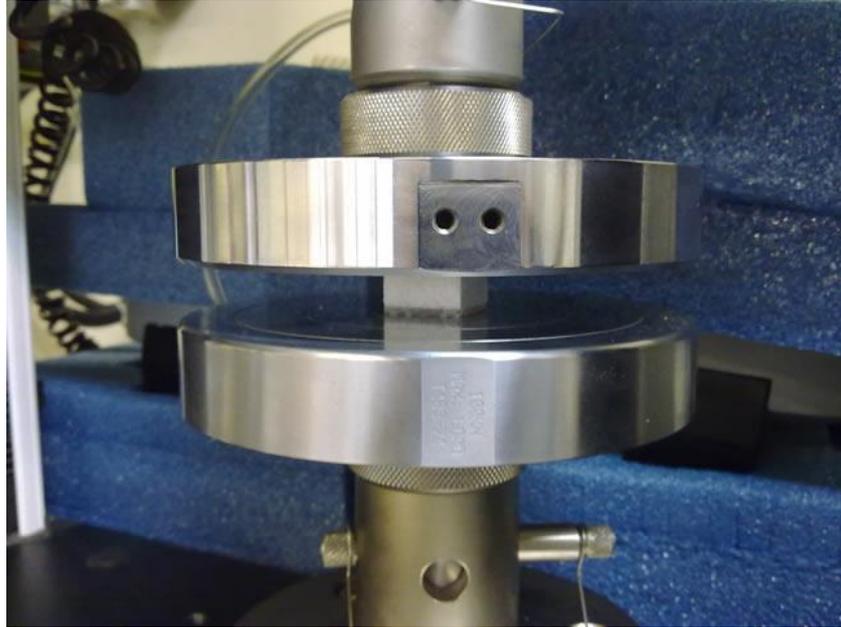
	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Resistência máxima a compressão (MPa)	30,23156	24,94911	41,06165	28,9684	33,51241

Fonte: Autores (2020)

4.2.2 Ensaio de Compressão Transversal

Os ensaios de compressão transversal seguiram a norma ASTM C365, que como também citam Borsellino, Calabrese e Valenza (2004), é realizado para determinar a resistência a compressão e a rigidez a compressão transversal, ou seja, na direção perpendicular às faces do sanduíche, como mostra a Figura 46.

Figura 47 – Ensaio de Compressão Transversal



Fonte: UFRGS (2015)

Os corpos de prova novamente seguiram o método dos autores previamente citados, onde as dimensões são apresentadas na Figura 47.

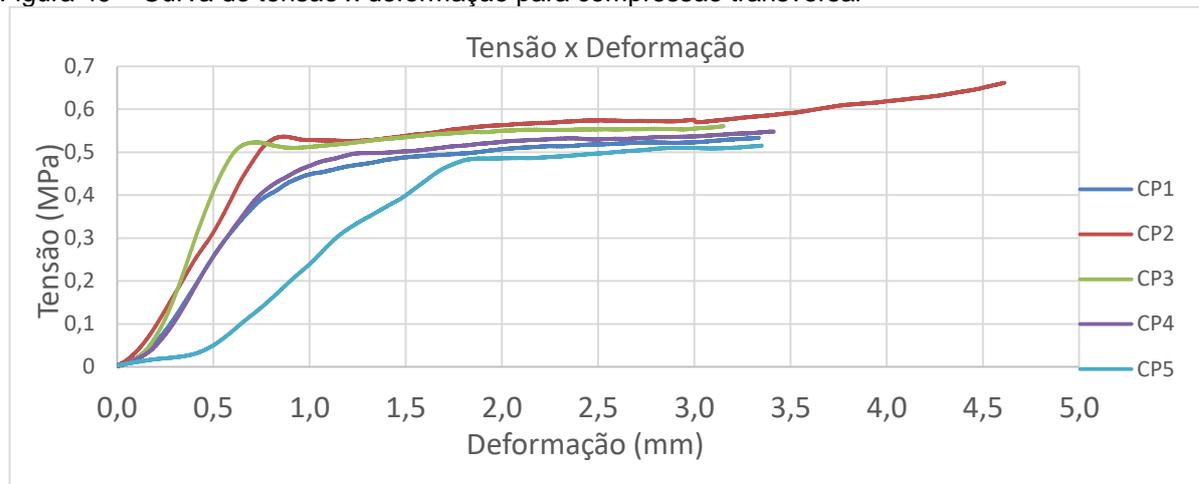
Figura 48 – Corpos de prova para o ensaio de Compressão Transversal



Fonte: Autores (2020)

Este ensaio foi realizado com uma taxa de deformação de 0,5 mm/min, como indica a norma. As curvas de tensão x deformação são apresentadas na Figura 48.

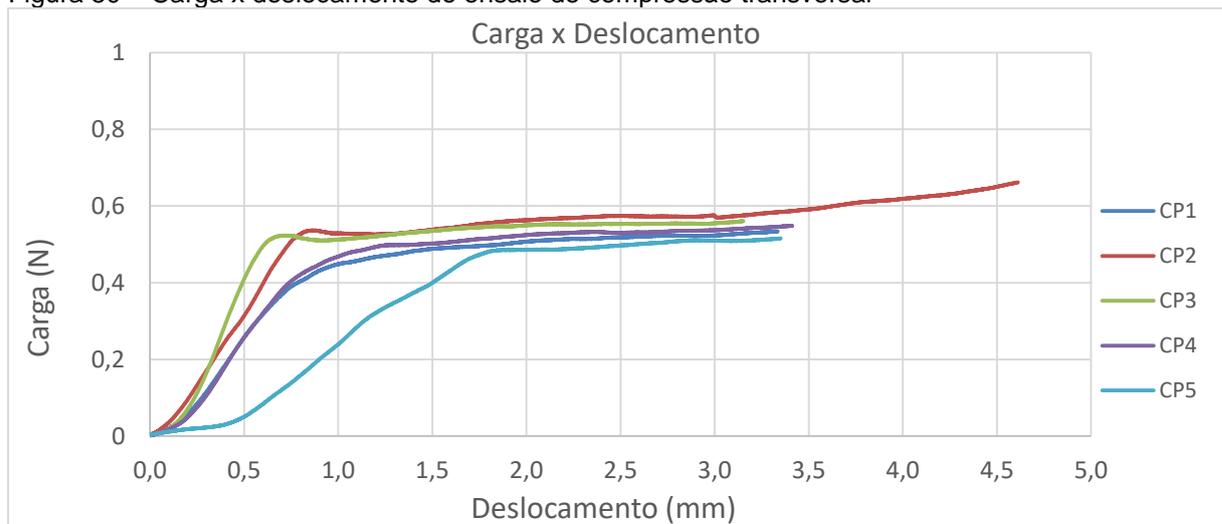
Figura 49 – Curva de tensão x deformação para compressão transversal



Fonte: Autores (2020)

Já as curvas de carga x deslocamento resultantes do ensaio estão presentes na Figura 49.

Figura 50 – Carga x deslocamento do ensaio de compressão transversal



Fonte: Autores (2020)

Por meio do ensaio foi possível obter a carga máxima aplicada nos corpos ensaiados, bem como sua tensão de compressão máxima e módulo de compressão, presentes no Quadro 11.

Quadro 11 – Cargas e tensões do ensaio de compressão transversal

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Carga máxima (N)	347,04	456,03	379,16	349,75	358,57
Deslocamento compressivo na carga máxima (mm)	3,3303	4,6103	3,1517	3,4084	3,35
Tensão de compressão na carga máxima (MPa)	0,53	0,66	0,56	0,55	0,52
Módulo de compressão (MPa)	3,52	3,81	5,86	3,65	1,82

Fonte: Autores (2020)

Através dos resultados experimentais foi possível descrever analiticamente algumas propriedades, como o módulo de elasticidade aparente e a resistência a compressão máxima do painel, orientados pelas equações (19) e (20), com resultados apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 – Propriedades analíticas do ensaio de compressão transversal

	1	2	3	4	5
Módulo de elasticidade aparente (E_c , aparente) MPa)	2,986144	3,773699	6,074409	3,313068	1,81416
Resistencia a compressão máxima (MPa)	0,230769	0,221893	0,217707	0,235294	0,221893

Fonte: Autores (2020)

4.2.3 Ensaio de Flexão em 3 pontos

Os ensaios de flexão em 3 pontos, apresentada na Figura 50, seguiram a norma ASTM C393, que como citam novamente Borsellino, Calabrese e Valenza (2004), é realizado para determinar a tensão de cisalhamento do núcleo, a tensão e a rigidez a flexão do painel sanduíche.

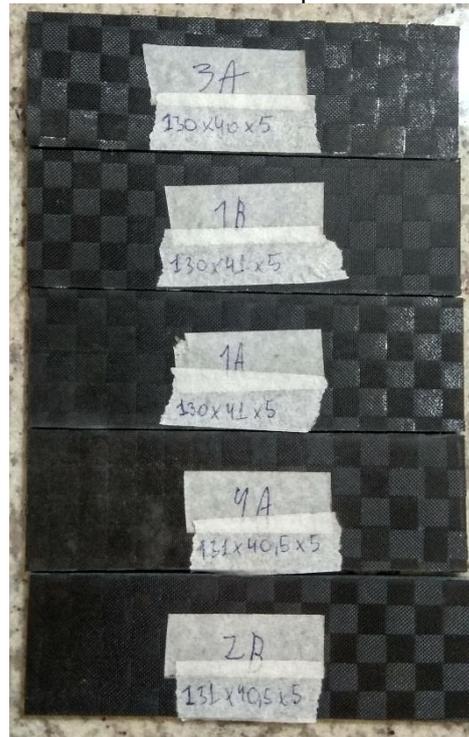
Figura 51 – Ensaio de Flexão em 3 pontos



Fonte: UFRGS (2015)

Os corpos de prova utilizados no ensaio seguiram o método dos autores antes citados, onde os mesmos estão apresentados na Figura 51.

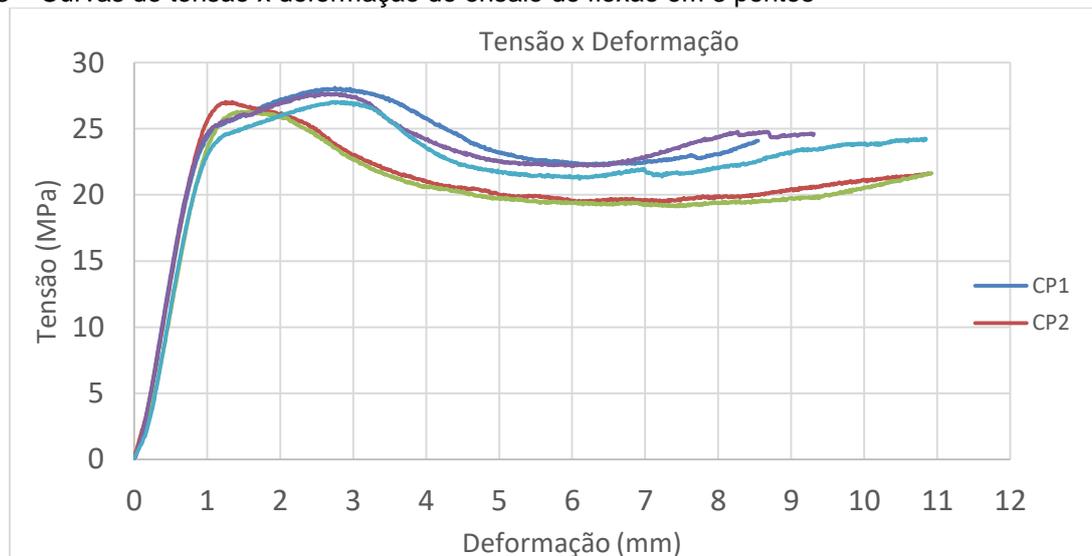
Figura 52 – Corpos de prova para o ensaio de Flexão em 3 pontos



Fonte: Autores (2020)

O ensaio de flexão em 3 pontos foi realizado com uma taxa de deformação de 6 mm/min, como sugere a norma. A figura 52 apresenta as curvas de tensão x deformação resultantes do ensaio.

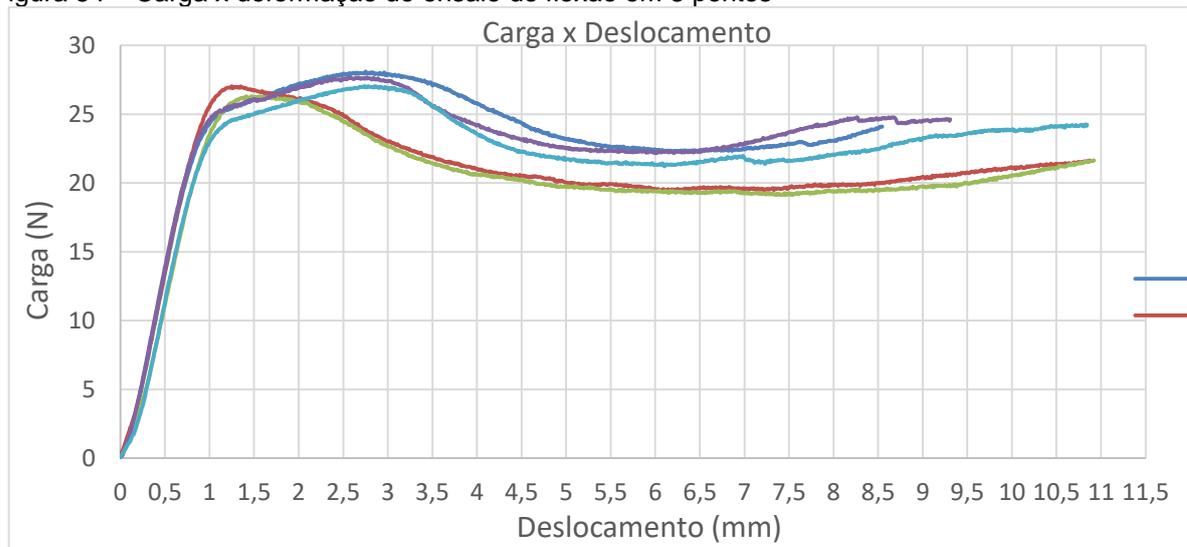
Figura 53 – Curvas de tensão x deformação do ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Autores (2020)

As curvas de carga x deformação resultante do ensaio nos corpos de prova está apresentado na Figura 53.

Figura 54 – Carga x deformação do ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Autores (2020)

Através do ensaio foi possível extrair informações acerca da carga máxima aplicada e da tensão de flexão máxima da estrutura, sendo estas dispostas no Quadro 13.

Quadro 13 – Carga e tensão máxima do ensaio de flexão em 3 pontos

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Carga máxima (N)	240,103	230,923	221,89	230,556	228,103
Deslocamento na carga máxima (mm)	2,7503	1,2503	1,4702	2,6503	2,78
Tensão de flexão máxima (MPa)	28,10966	27,03489	26,29805	27,66668	27,03442

Fonte: Autores (2020)

Em posse dos resultados experimentais do ensaio de flexão em 3 pontos foi realizada a análise analítica de propriedades do painel sanduíche, como a tensão de cisalhamento do núcleo, a rigidez a flexão do painel e a rigidez a dobra do painel, através das equações (21), (23) e (25) respectivamente, com resultados presentes no Quadro 14.

Quadro 14 – Resultados analíticos do ensaio de flexão em 3 pontos

	1	2	3	4	5
Tensão de cisalhamento no núcleo (MPa)	0,667	0,626	0,601	0,633	0,626
Rigidez a flexão do painel sanduíche (N-mm ²)	1,194E+07	1,224E+07	1,224E+07	1,209E+07	1,209E+07
Rigidez a dobra do painel (N)	3037,5	3113,4375	3113,4375	3075,4688	3075,4688

Fonte: Autores (2020)

CONCLUSÃO

Para realizar a avaliação experimental e a análise analítica do material, foi utilizado pesquisas bibliográficas, através das quais foi possível definir os melhores métodos de execução do projeto, as etapas a serem seguidas, bem como os equipamentos e materiais necessários. Os materiais constituintes da estrutura foram escolhidos de forma a serem similares aos utilizados pela equipe MasBah, compostos por duas faces de um tecido bidirecional de fibra de carbono, um núcleo de espuma de PVC e uma resina epóxi para sua junção.

A confecção seguiu recomendações dos fabricantes e pesquisas similares. O processo de infusão a vácuo, apesar das limitantes e de apresentar uma infusão incompleta da resina, proporcionou uma área de infusão suficiente para a extração dos corpos de prova.

Os ensaios experimentais, realizados em uma máquina universal, seguindo as normas técnicas ASTM C364, ASTM C365 e ASTM C393 proporcionou a obtenção das curvas de tensão por deformação dos corpos de prova, que possibilitou a realização de análises analíticas para a obtenção de propriedades de resistência dos painéis, módulo de elasticidade, tensão de cisalhamento no núcleo, bem como os modos de falha sofridos. As curvas de tensão por deformação do ensaio de compressão longitudinal apresentaram linhas de deslocamento distintas, causadas pela execução do ensaio em corpos de prova extraídos de duas placas diferentes, que representa a variação das propriedades que mudanças no processo de fabricação acarretam.

Foi possível observar também que através das curvas de tensão por deformação, a estrutura apresenta um comportamento aproximadamente linear até que o ponto de força máxima seja atingido, seguido de um decréscimo da força, de forma a apresentar um aumento das deformações para valores aproximadamente constantes da força, com deformações residuais elevadas, apresentando alta rigidez e contendo a densidade de 397 kg/m^3 , próximo de 5% da densidade dos metais.

A obtenção das propriedades do material oportuniza análises mais aprofundadas, além de auxiliar no dimensionamento de estruturas utilizando este material. Ainda é possível realizar ensaios mecânicos distintos aos efetuados no presente trabalho, proporcionando assim análises ainda mais confiáveis.

Portanto, através das dificuldades encontradas durante a realização do trabalho, foi possível constatar o esforço que é empregado no desenvolvimento de novos materiais, que possam suprir a necessidade de estruturas de baixa densidade e de elevada rigidez, além da necessidade de redução de custos na fabricação destes, para tornar cada vez mais viável a utilização deste como material em estrutural.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Para sequencia deste trabalho sugere-se:

- Validar um método de elementos finitos para o dimensionamento de estruturas utilizando o compósito de fibra de carbono e espuma de PVC.
- Realizar diferentes ensaios mecânicos afim de obter maior acervo de informações específicas do compósito confeccionado na instituição.
- Realizar ensaios mecânicos utilizando um material distinto para o núcleo afim de comparar as propriedades mecânica.
- Reproduzir a infusão a vácuo utilizando os parâmetros citados após a segunda placa concludente afim de validar o método.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. I. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**: 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C364 / C364M - 16**. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/C364.htm>. Acesso em: 2 set. 2020.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C365 / C365M - 16**. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/C365.htm>. Acesso em: 2 set. 2020.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C393 / C393M - 20**. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/C393.htm>. Acesso em: 2 set. 2020.
- BARBERO, Ever J. **Introduction to composite materials design**. 2. ed. New York: CRC Press, 2010.
- BORSELLINO, C.; CALABRESE, L.; VALENZA, A. Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures. **Composite Science and Technology**, Amsterdam, v. 64, fev/2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353804000119>. Acesso em: 10 set. 2020.
- CALDAS, B. G. S. **Estruturas sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo**. 2014 Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2014.
- CALLISTER, W. D. J; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CENTERGLASS. **Material de núcleo**. Disponível em: <http://centerglassresinas.com.br/material-de-nucleo/>. Acesso em: 2 set. 2020.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- DAVIES, J. M. **Lightweight sandwich construction**. Oxford: Blackwell Science, 2001.
- DIAB. **Guideline to core and sandwich**. Sweden, 2018.

DIAB. Sandwich Concept: **DIAB sandwich handbook**. Sweden, 2003. Disponível em: http://www.stmboats.com/articles/sandwich_hb.pdf. Acesso em: 3 set. 2020.

FERREIRA, M. R. S. **Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro**: 2013. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

FROSTIG, Y.; BARUCH, M. Bending of sandwich beams with transversely flexible core. **AIAA JOURNAL**, Israel, v. 28, n. 3, p. 1-1, mar./1990. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.10423>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GAMA, D. P. N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017, Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

GARAY, André C. **Propriedades mecânicas de compósitos estruturas sanduíche moldadas por rtm light e simulação numérica da infiltração**: 2016. Tese (Doutorado em engenharia), Escola de engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

GARBIN, D. F. **Efeito do material da face nas propriedades mecânicas de painéis sanduíche para aplicação rodoviária**: .2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Materiais e Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite materials**: design and applications. Florida: CRC Press, 2003.

GIBSON, Ronald F. **Principles of composite material mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1994.

GLORIA, M. Y. R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**: 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GONÇALVES, K. M. S. **Análise numérica e experimental de falhas em juntas de materiais compósitos tipo single-lap fixadas por parafusos escareados**: 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2015.

HEXCEL. **HexWeb honeycomb sandwich design technology**. Disponível em: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf. Acesso em: 4 set. 2020.

HODGKINSON, J. M. **Mechanical testing of advanced fibre composites**. 1. ed. New York: CRC Press, 2000.

HSIAO, K. T.; HEIDER, D. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites: Manufacturing techniques for polymer matrix composites.

Composites Science and Engineering, Cambridge, jan./2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090676500109>. Acesso em: 11 ago. 2020.

JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. **Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites**. Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing, 2019.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

LIMA, Felipe Silva. **Análise estrutural de uma longarina compósita para uma aeronave esportiva leve**: 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2019.

MATEUS, K. D. S. **Melhoria das propriedades mecânicas de uma sandwich de compósito**: 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica), Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2014.

MESOGITIS, T. S.; SKORDOS, A. A.; LONG, A. C. Uncertainty in the manufacturing of fibrous thermosetting composites: A review. **Composites Part A**, Reino Unido, v. 57, n. 1, p. 67-75, fev./2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X13003035?via%3Di> hub. Acesso em: 12 ago. 2020.

MOREIRA, P. J. D. **Análise de vigas sanduíche de alumínio-aglomerado de cortiça**: 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2013.

PACHECO, Guilherme. **Análise numérica e experimental em placa de material compósito de aplicação na indústria automotiva**. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) UnB, Brasília, DF, 2016.

POZO, I. I. **Análisis y modelización de vigas sándwich sometidas a impactos de baja velocidad**: 2013. Tese (Doutorado), Departamento de mecánica de medios contínuos y teoría de estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2013.

REDDY, J. N. **Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis**. 2. ed. New York: CRC Press, 2003.

SEZGIN, F. E. **Mechanical Behaviour and Modeling of Honeycomb Cored Laminated Fiber/Polymer Sandwich Structures**: Dissertação (Mestrado), 2008, Izmir Institute of Technology, Turquia, 2008.

SILVA, F. D. R. **Modelação dinâmica de um processo de infusão a vácuo**: 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

SIQUEIRA, E. J. **Estudo dos critérios de falhas em compósitos ppps/fibras de carbono utilizando elementos finitos**: 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, SP, 2009.

TORSAKUL, Sirichai. **Modellierung and simulation eines verbunds von sandwichplatten zur entwicklung einer mechanischen verbindungstechnik**: 2007. Tese (Doutorado em Engenharia), Aachen, 2007.

TUTTLE, M. E. **Structural analysis of polymeric composite materials**. New York: Marcel Dekker, 2004.

UFRGS. **GCOMP**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lapol/gcomp/>. Acesso em: 16 set. 2020.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas: **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, Portugal, v. 21, n. 3, p. 1-1, mar./2009. Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v21n3-4/v21n3-4a03.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

VINSON, Jack R. **The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials**. Pennsylvania: TECHNOMIC, 1999.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia**: tecnologia e aplicações. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

ZENKERT, Dan. **Introduction to Sandwich Construction**. Worcestershire: Engineering Materials Advisory Services, 1995.