



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUCAS MACIEL FREITAS**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM PAINEL-SANDUÍCHE  
DE MATRIZ POLIÉSTER COM REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO E COM  
NÚCLEO DE ESPUMA DE PVC SOB FLEXÃO.**

**RUSSAS**

**2022**

LUCAS MACIEL FREITAS

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM PAINEL-SANDUÍCHE DE  
MATRIZ POLIÉSTER COM REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO E COM NÚCLEO DE  
ESPUMA DE PVC SOB FLEXÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em engenharia Mecânica  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães  
Pinheiro

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F936a Freitas, Lucas Maciel.  
Avaliação das propriedades mecânicas de um painel-sanduiche de matriz poliéster com reforço de fibra de vidro e com núcleo de espuma de PVC sob flexão. / Lucas Maciel Freitas. – 2022.  
106 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.
1. Materiais compósitos; estrutura sanduiche; fibra de vidro; matriz poliéster.. I. Título.
- CDD 620.1
-

LUCAS MACIEL FREITAS

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM PAINEL-SANDUÍCHE DE  
MATRIZ POLIÉSTER COM REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO E COM NÚCLEO DE  
ESPUMA DE PVC SOB FLEXÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em engenharia Mecânica  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães  
Pinheiro

Aprovada em: 07/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado forças para continuar mesmo em momentos difíceis e enfrentar as adversidades que surgiram durante o percurso da minha vida acadêmica.

Agradeço imensamente aos meus pais, Damião Bessa de Freitas e Maria Franciene Maciel Bessa, por todo o apoio fornecido durante essa jornada, pelo o esforço para que esse sonho se tornasse realidade e pelos valores ensinados. Sem eles, não seria possível essa realização. A toda minha família que sempre me apoiou.

A minha ex-professora Marcia Cristina (*in memoriam*), que sempre me incentivou a estudar e evoluir. E também por todo o apoio fornecido nas feiras de ciências que tiveram papel fundamental na minha evolução, tanto profissional como pessoal.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Pedro Helton, pela paciência e por todo o suporte.

A minha namorada, Letícia Grazielle, por me apoiar e motivar nos momentos difíceis e me auxiliar na fabricação dos corpos de prova.

Em especial, ao Professor Ms. Ramon Rudá e ao técnico de laboratório João Pedro, por me auxiliarem na fabricação dos corpos de prova, nos métodos de ensaio e na interpretação dos resultados. E aos demais professores da UFC campus de Russas que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Agradeço também ao professor Dr. Edvan Cordeiro, por ter iniciado o projeto Aratinga Aerodesign que no qual obtive momentos importantes que me incentivaram a desenvolver diversas habilidades técnicas e vivências de estruturar um projeto mecânico do zero.

A todos os meus amigos que fiz durante a graduação, pelos momentos compartilhados. Em especial ao Edgar Bruno, Gustavo Monteiro, Gilvan Cappi, Lucas Veríssimo, João Paulo, Breno Moreira, Marcão, Amanda Accorsini, Luis Carlos e ao Antônio Rebouças.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem,  
enquanto você não tem condições melhores,  
para fazer melhor ainda.”

-Mario Sérgio Cortella, 2014.

## RESUMO

O desenvolvimento dos materiais compósitos é um dos avanços mais importantes da história da engenharia. Pois, essa classe de matérias combinam as melhores propriedades dos materiais que os constituem para obter propriedades mecânicas únicas. Disto isso, no presente estudo buscou-se a caracterização de painéis-sanduiche e assim como a avaliação de seus constituintes. Analisou-se duas configurações diferentes da estrutura sanduiche e essa diferença se dá pela variação da quantidade de camadas nos reforços. Os constituintes da estrutura são o tecido de fibra de vidro bidirecional, matriz poliéster e um núcleo de espuma de PVC. Também foram analisados, separadamente, a resina poliéster que compõe a matriz polimérica, o laminado de fibra de vidro que integra o reforço e a espuma de PVC que é empregada no núcleo. Os compósitos foram fabricados pelo método de laminação manual e a cura ocorreu em temperatura ambiente com uma duração de 6 horas. Para os ensaios os corpos de prova das estruturas sanduiche foram construídos em concordância com a norma ASTM C393-00, os laminados de fibra de vidro pela norma ASTM D 7264/D 7264 M e os corpos de prova de resina poliéster pela norma ASTM D 790-17. O ensaio de flexão evidenciou que a variação da quantidade de camadas nos reforços da estrutura sanduiche, geram impactos na rigidez a flexão do painel, nas tensões atuantes nas faces e na deformação máxima da estrutura.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos; estrutura sanduiche; fibra de vidro; matriz poliéster.

## ABSTRACT

The development of composite materials is one of the most important advances in the history of engineering. Well, this class of materials combines the best properties of the materials that constitute them to obtain unique mechanical properties. With that in mind, the present study sought to characterize sandwich panels and evaluate their constituents. Two different configurations of the sandwich structure were analyzed and this difference is due to the variation in the number of layers in the reinforcements. The constituents of the structure are bidirectional fiberglass fabric, polyester matrix and a PVC foam core. The polyester resin that makes up the polymeric matrix, the fiberglass laminate that integrates the reinforcement and the PVC foam that is used in the core were also analyzed separately. The composites were manufactured by the manual lamination method and cured at room temperature for 6 hours. For the tests, the specimens of the sandwich structures were constructed in accordance with the ASTM C393-00 standard, the fiberglass laminates according to the ASTM D 7264/D 7264 M standard and the polyester resin specimens according to the ASTM D 790 standard. -17. The bending test showed that the variation in the number of layers in the reinforcements of the sandwich structure, generate impacts on the flexural rigidity of the panel, on the stresses acting on the faces and on the maximum deformation of the structure.

**Keywords:** Composite materials; Sandwich structure; fiberglass; Polyester matrix.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos.....	3
Figura 2 - Fotomicrografia cermeto.....	4
Figura 3 - Esquemático de um laminado. ....	6
Figura 4 - Material para núcleos: (a) polímero, (b) colmeia (c) corrugado.....	7
Figura 5 - Vista da seção transversal de um compósito sanduiche.....	8
Figura 6 - Diagrama esquemático de um painel-sanduiche.....	8
Figura 7 - Representação da seção transversal de um compósito laminado.....	10
Figura 8 - Formas que os reforços podem ser encontrados. ....	12
Figura 9 - Disposição das fibras no tecido. ....	13
Figura 10 - Representação do urdume e trama. ....	13
Figura 11 - Categorias de núcleos estruturais.....	14
Figura 12 - Efeitos da resistência e da rigidez com o aumento da espessura do núcleo em uma estrutura sanduiche. ....	15
Figura 13 - Representação do processo de laminação manual. ....	16
Figura 14 - Modos de falha: (a) fratura na face; (b) falha por cisalhamento do núcleo, (c) e (d) enrugamento da face; (e) flambagem; cisalhamento; (g) ondulação da face e (h) indentação local. ....	18
Figura 15 - Falha por compressão do reforço.....	19
Figura 16 - Baixa rigidez.....	19
Figura 17 - Flambagem no painel.....	20
Figura 18 - Cisalhamento por crimpagem. ....	20
Figura 19 - Enrugamento do reforço. ....	21
Figura 20 - Empenamento das faces.....	21
Figura 21 - Compressão local.....	22
Figura 22 - Falha intralaminar. ....	22
Figura 23 - Fissuras na matriz. ....	23
Figura 24 - (a) Microflambagem e (b) cisalhamento.....	23
Figura 25 - Percurso em voo.....	26
Figura 26 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	27
Figura 27 - Detalhes da orientação das fibras.....	29
Figura 28 - Tecido.....	29
Figura 29 - Resina poliéster.....	29

Figura 30 - Desmoldante ultralub.....	32
Figura 31: Cera desmoldante da redelease.....	32
Figura 32 - Cera desmoldante TR 102 <i>release</i> .....	33
Figura 33 - Fluxograma do processo de laminação.....	34
Figura 34 - Placa de vidro após a aplicação da cera.....	35
Figura 35 - Técnica de marcação para.....	36
Figura 36 - Pesagem do tecido.....	37
Figura 37 - Placa laminada com 16.....	39
Figura 38 - Demarcações dos corpos.....	39
Figura 39 - CP's após o corte com a.....	40
Figura 40 - CP's após o procedimento.....	41
Figura 41 - Painel-sanduiche laminado.....	42
Figura 42 - Delimitações dos CP's no painel-sanduiche.....	43
Figura 43 - CP's do sanduiche cortados.....	43
Figura 44 - Corpos de prova finalizados.....	44
Figura 45 - Molde impresso.....	45
Figura 46 - Chapas de vidro preparadas para o processo de fabricação.....	46
Figura 47 - Molde posicionado nas chapas.....	46
Figura 48 - Grampos aplicados.....	47
Figura 49 - Conjunto alocado na morsa.....	47
Figura 50 - CP's de resina desmoldados.....	48
Figura 51 - CP's com resquícios.....	48
Figura 52 - CP's com as.....	49
Figura 53 - CP's da espuma de PVC.....	50
Figura 54 - Máquina universal de.....	51
Figura 55 - Célula de carga.....	52
Figura 56 - Medição do comprimento de vão.....	52
Figura 57 - Apoios inferiores posicionados.....	53
Figura 58 - CP posicionado do corpo de prova.....	53
Figura 59 – Início do ensaio de flexão.....	54
Figura 60 - Abertura do vão, posicionamento e.....	55
Figura 61 – Ensaio de flexão.....	55
Figura 62 - Abertura do vão e início do ensaio nos CP's.....	56
Figura 63 - Balança.....	57

Figura 64 - Cutelo fabricado por .....	57
Figura 65 - Apoio fabricado por impressão 3D.....	58
Figura 66 - Sistema montado para o ensaio de flexão.....	58
Figura 67 - Detalhes do sistema montado. ....	59
Figura 68: Registro da execução do ensaio de flexão .....	59
Figura 69: Registro realizado pela câmera. ....	60
Figura 70 - Corpos de prova de resina após o ensaio. ....	65
Figura 71 - CP's após o ensaio: a) vista superior e b) vista inferior. ....	67
Figura 72 - CP's após o ensaio - a) vista superior e b) vista lateral. ....	69
Figura 73 - CP' do sanduiche após o ensaio - a) face superior, b) detalhe do modo de falha e c) descrição da estrutura. ....	72
Figura 74 - CP's sanduiche após o ensaio - a) vista superior e b) detalhes da fratura. ....	74
Figura 75 - Distribuição de tensão - a) Tensões normais e.....	80

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tensão de flexão x deformação - resina poliéster.....	64
Gráfico 2: Tensão de flexão x deformação - laminado de fibra de vidro. ....	66
Gráfico 3: Tensão de flexão x deformação - espuma de PVC.....	68
Gráfico 4: Tensão de flexão x deformação - sanduiche com 2 camadas de reforço.....	70
Gráfico 5: Tensão de flexão x deformação - sanduiche com 4 camadas de reforço.....	73
Gráfico 6: Influência das condições na tensão máxima de flexão.....	75
Gráfico 7: Influência das condições na deformação máxima.....	76
Gráfico 8: Efeito dos sanduiche na tensão de cisalhamento do núcleo. ....	78
Gráfico 9: Efeito dos sanduiche na tensão das faces. ....	79
Gráfico 10: Efeito dos sanduiche na deflexão do painel. ....	81
Gráfico 11: Efeito do sanduiche na rigidez a flexão.....	82
Gráfico 12: Efeito do sanduiche na rigidez de cisalhamento. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as propriedades mecânicas das resinas. ....	11
Tabela 2: Propriedades de fibras comumente utilizadas.....	11
Tabela 3: Propriedades físicas e mecânicas dos fios. ....	28
Tabela 4: Características construtivas do tecido.....	28
Tabela 5: Propriedades mecânicas do divinycell H45 GSP. ....	30
Tabela 6: Outras propriedades da espuma de PVC.....	31
Tabela 7: Dimensões dos CP's do laminado de fibra de vidro.....	38
Tabela 8: Dimensões dos CP's.....	42
Tabela 9: Dimensões dos CP's de materiais moldados. ....	45
Tabela 10: Dimensões dos CP's da espuma de PVC. ....	50
Tabela 11: Massa dos corpos de prova. ....	61
Tabela 12: Parâmetros para os ensaios de flexão.....	62
Tabela 13: Dados obtidos no ensaio de flexão para a resina poliéster.....	65
Tabela 14: Dados obtidos no ensaio de flexão para o laminado de fibra de vidro .....	67
Tabela 15: Dados obtidos no ensaio de flexão para a espuma de PVC. ....	69
Tabela 16: Dados obtidos no ensaio de flexão para o sanduíche com duas camadas de reforço. .....	71
Tabela 17: Dados obtidos no ensaio de flexão para o sanduíche com quatro camadas de reforço. .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
PVC	Policloreto de vinila
SAE	<i>Society of Automobile Engineers</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$l$	Comprimento de vão
$f$	Constante de proporcionalidade
$d$	Espessura do corpo de prova
$b$	Largura do corpo de prova
$\sigma_f$	Tensão de flexão
$P$	Carga aplicada no meio do vão
$L$	Comprimento de vão
$\epsilon_f$	Deformação de flexão
$De$	Deslocamento
$c$	Espessura do núcleo
$\sigma$	Tensão de flexão nas faces
$t$	Espessura das faces
$\Delta$	Deformação total do painel
$U$	Rigidez de cisalhamento do painel
$E$	Modulo de elasticidade
$D$	Rigidez de flexão do painel
$G$	Módulo de cisalhamento do núcleo

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<i>1.1.1. Objetivo geral .....</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2. Objetivos específicos .....</i>	<i>2</i>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Materiais compósitos.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Compósitos Particulados.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Compósitos fibrosos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Compósito estrutural.....</b>	<b>5</b>
<i>2.4.2. Laminados.....</i>	<i>5</i>
<i>2.4.2. Painel-sanduiche .....</i>	<i>6</i>
<b>2.5. Matriz .....</b>	<b>9</b>
<i>2.5.1. Matrizes poliméricas.....</i>	<i>9</i>
<b>2.6. Reforço.....</b>	<b>11</b>
<b>2.7. Núcleo estrutural .....</b>	<b>14</b>
<b>2.8. Processo de laminação manual.....</b>	<b>16</b>
<b>2.9. Cura da resina.....</b>	<b>17</b>
<b>2.10. Modos de falha .....</b>	<b>17</b>
<i>2.10.1. Painel sanduiche.....</i>	<i>17</i>
<i>2.10.1.1 Ruptura das faces .....</i>	<i>18</i>
<i>2.10.1.2 Deflexão excessiva.....</i>	<i>19</i>
<i>2.10.1.3 Falha por flambagem do painel .....</i>	<i>19</i>
<i>2.10.1.4 Cisalhamento .....</i>	<i>20</i>
<i>2.10.1.5 Falha por enrugamento .....</i>	<i>20</i>
<i>2.10.1.6 Falha por empenamento das faces .....</i>	<i>21</i>
<i>2.10.1.7 Falha por compressão local .....</i>	<i>22</i>
<i>2.10.2. Compósito laminado .....</i>	<i>22</i>
<i>2.10.2.1. Ruptura das fibras .....</i>	<i>22</i>
<i>2.10.2.2. Fissura na matriz.....</i>	<i>23</i>

2.10.2.3. <i>Microflanbagem e cisalhamento</i> .....	23
<b>2.11. Propriedades e equações para a caracterização das estruturas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.12. Aplicação no aerodesign</b> .....	<b>26</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1. Materiais</b> .....	<b>28</b>
3.1.1. <i>Tecido de fibra de vidro</i> .....	28
3.1.2. <i>Resina poliéster</i> .....	29
3.1.3. <i>Divinycell H45 GSP</i> .....	30
3.1.4. <i>Desmoldante</i> .....	31
<b>3.2. Método de fabricação</b> .....	<b>34</b>
3.2.2. <i>Corpos de prova do compósito painel-sanduiche de 2 e 4 camadas</i> .....	41
3.2.2. <i>Corpos de prova da resina</i> .....	44
3.2.3. <i>Corpos de prova da espuma de PVC</i> .....	49
<b>3.3. Métodos de ensaio</b> .....	<b>51</b>
3.3.1. <i>Ensaio de flexão</i> .....	51
3.3.1.1. <i>Ensaio de flexão nos CP'S dos painéis-sanduiche</i> .....	52
3.3.1.2. <i>Ensaio de flexão nos CP's do laminado</i> .....	54
3.3.1.3. <i>Ensaio de flexão nos CP's de resina</i> .....	55
3.3.1.4. <i>Ensaio de flexão nos CP's de espuma de PVC</i> .....	56
<b>4. RESULTADOS E DISCURSSÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1. Dimensões e massa dos corpos de prova</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2. Propriedades mecânicas</b> .....	<b>63</b>
4.2.1. <i>Tensão máxima de flexão e deformação máxima</i> .....	63
4.2.1.1. <i>Resina</i> .....	63
4.2.1.3 <i>Espuma de PVC</i> .....	68
4.2.1.5. <i>Sanduiche com 4 camadas de reforço</i> .....	73
4.2.1.6. <i>Análise geral da tensão máxima de flexão e deformação máxima</i> .....	75
4.2.2. <i>Análise dos parâmetros particulares dos compósitos sanduiche</i> .....	78
4.2.2.1. <i>Tensão de cisalhamento do núcleo</i> .....	78
4.2.2.2. <i>Tensão nas faces</i> .....	79
4.2.2.3. <i>Deflexão do sanduiche e rigidez a flexão do painel</i> .....	81
4.2.2.4. <i>Rigidez de cisalhamento do painel</i> .....	83
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>85</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>
-------------------------	-----------

## 1. INTRODUÇÃO

Um material compósito estrutural é classificado em duas categorias, em compósitos estruturais laminados e painéis-sanduíche. As propriedades desses materiais dependem de parâmetros geométricos dos elementos estruturais e, principalmente, das propriedades dos materiais constituintes dos laminados (CALLISTER, 2012).

Um dos grandes desafios na engenharia é a correlação entre o peso final de uma peça e suas propriedades mecânicas. Os materiais compósitos, em especial os sanduíches, entram como uma alternativa de se obter estruturas com elevadas propriedades mecânicas e de baixo peso. Esse tipo de estrutura se destaca em relação ao desempenho elevado quando estão submetidas a cargas de flexão e compressão. Pois, o laminado é capaz de combinar uma alta rigidez a flexão com um baixo peso (GAGLIARDO, 2008).

Conforme Tita (2007), essas estruturas constituem uma classe especial de laminados. As faces têm a função de suportar tensões normais de tração, compressão ou cisalhamento associadas à flexão. Por sua vez, o núcleo deve manter o espaçamento das faces, ser rígido o suficiente na direção perpendicular a elas para evitar o esmagamento e ter resistência ao cisalhamento transversal suficiente para garantir o bom funcionamento do componente.

Pode-se observar que os compósitos sanduíches tem uma grande vantagem sob os demais materiais. Pois, essas estruturas podem ser extremamente versáteis por dispor de uma alta diversidade de materiais que podem compor o núcleo da estrutura, de tecidos de fibras que podem ser utilizados como reforços para as faces da estrutura e de inúmeras matrizes.

Por fim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de um painel-sanduíche, submetido a flexão, que dispõe de uma matriz polimérica poliéster com os reforços de fibra de vidro e com núcleo homogêneo de espuma de PVC.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. *Objetivo geral*

Avaliação das propriedades mecânicas de um painel-sanduiche de matriz poliéster com reforço de fibra de vidro e com núcleo de espuma de PVC sob flexão.

### 1.1.2. *Objetivos específicos*

1. Avaliar a resistência a flexão do laminado de fibra de vidro com matriz poliéster;
2. Aferir a resistência a flexão da resina poliéster;
3. Avaliar a resistência a flexão do painel-sanduiche de matriz poliéster com reforço de duas camadas de fibra de vidro;
4. Avaliar a resistência a flexão de um painel-sanduiche de matriz poliéster com reforço de quatro camadas de fibra de vidro;
5. Aferir a resistência a flexão da espuma de PVC;
6. Analisar a influência dos componentes na tensão máxima de flexão;
7. Analisar a influência das estruturas na deformação máxima;
8. Verificar o impacto da variação da quantidade de reforço nos painéis-sanduiche nas seguintes propriedades:
  - a. Tensão de cisalhamento do núcleo;
  - b. Tensão nas faces;
  - c. Deflexão do sanduiche;
  - d. Rigidez a flexão do painel;
  - e. Rigidez de cisalhamento do painel.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

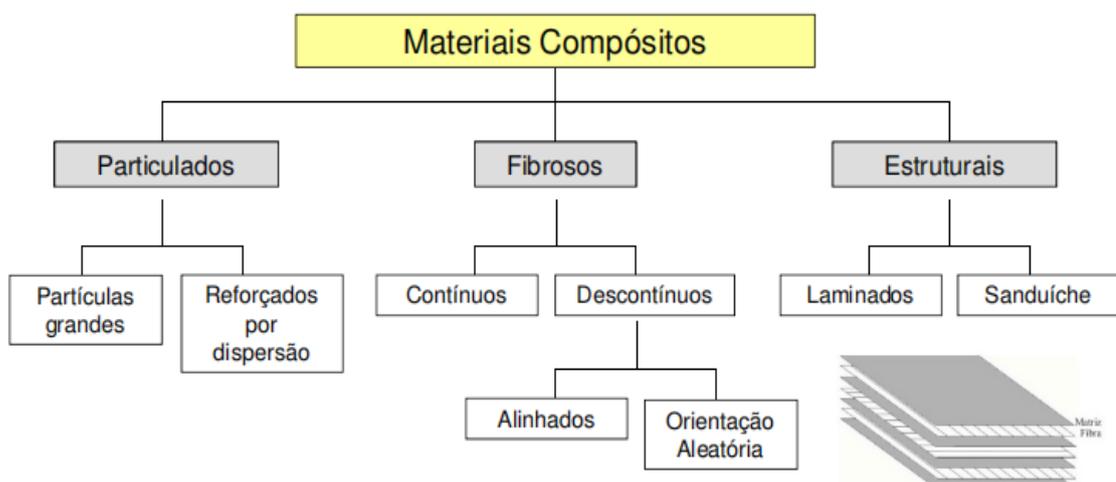
### 2.1. Materiais compósitos

Segundo Kutz (2015), o desenvolvimento de materiais compósitos, bem como as tecnologias relacionadas ao projeto e a fabricação, é um dos avanços mais importantes da história da engenharia. Os materiais compósitos ou compostos são materiais que resultam da combinação de dois ou mais componentes, que diferem em suas propriedades físicas e químicas de cada um. A finalidade da combinação é prover características específicas para o material resultante, para cada tipo de aplicação desejada (CARVALHO, 2005). Os compósitos exibem uma importante característica de baixo peso específico e uma alta resistência mecânica, que os tornam atraentes para inúmeras aplicações. Muitos compósitos também apresentam uma elevada resistência ao desgaste, corrosão e a altas temperatura. Tais características únicas fornecem ao engenheiro mecânico oportunidades de realizar projetos que não são possíveis com os materiais convencionais (materiais monolíticos), (KUTZ, 2015).

Os mercados de matérias compósitos estão cada vez mais difundidos. O maior mercado é o de transportes (31%), em seguida a construção civil (19,7%), equipamento elétrico/eletrônico (9,9%), produtos de consumo (5,8%) e, por fim, o mercado aeroespacial e de aeronaves que representa apenas 0,8% o que é surpreendente tendo em conta a importância do setor na origem e no desenvolvimento dos compósitos, (VENTURA, 2009).

Callister (2012) propõe uma classificação dos materiais compósitos de acordo com o diagrama apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos.



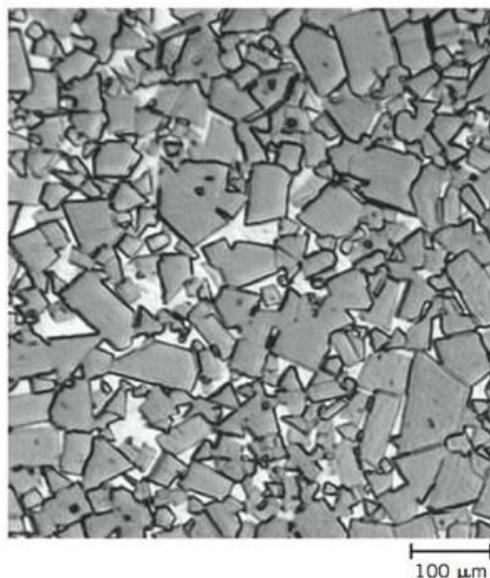
Fonte: Adaptado de Callister (2012).

## 2.2. Compósitos Particulados

A classe de compósitos particulados é dividida, como mostrado na Figura 1, em compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão. A diferenciação dessas duas subcategorias dar-se pelo mecanismo de reforço ou de aumento da resistência. O termo *grande* é utilizado para prever que as interações partículas-matriz não podem ser tratadas ao nível atômico ou molecular, de outro modo, a mecânica do contínuo é empregada. Contrariamente, os compósitos reforçados por dispersão, as partículas são, em geral, muito menores, com diâmetro entre 10 nm e 100 nm. Neste caso, as interações partículas-matriz que levam o aumento da resistência ocorrem no nível atômico ou molecular (CALLIESTER, 2012).

De acordo com Diacenco (2010), o concreto é um exemplo clássico de compósito com partículas grandes, sendo que, neste caso, a matriz é o cimento e a areia e brita são os elementos particulados. Outro exemplo que pode ser citado, é a utilização do cermeto como ferramenta de corte para aços endurecidos, sendo que o mais comum, constituído por partículas extremamente duras de uma cerâmica refratária à base de carbeto, tal como o carbeto de tungstênio ou carbeto de titânio, envolvidas em uma matriz de metal como, por exemplo, o cobalto ou níquel. Os cermetos são exemplos de compósitos de cerâmica-metal (CALLIESTER, 2012).

Figura 2 - Fotomicrografia cermeto.



Fonte: Calister.

Na Figura 2 é exibido um exemplo de um cermeto, onde as áreas claras são a matriz, neste caso é uma matriz de cobalto, e as regiões escuras são as partículas de carbeto de

tungstênio.

### **2.3. Compósitos fibrosos**

As fibras são materiais filamentosas que podem ser naturais ou artificiais. As fibras são os elementos básicos para formar tecidos e outras estruturas têxteis. Tais tecidos, constituídos pelas fibras, são usados como reforço e por isso, geralmente, possuem alto módulo de elasticidade e alta resistência a tração em uma direção. Os reforços, feitos com os tecidos, conferem rigidez a estrutura e principalmente previne a propagação de trincas até certo limite (DIACENCO, 2010).

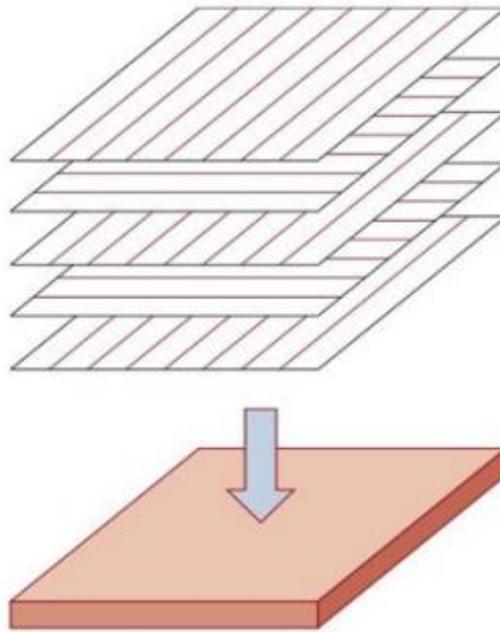
### **2.4. Compósito estrutural**

Um compósito estrutural é constituído normalmente tanto por materiais homogêneos quanto por materiais compósitos e suas propriedades mecânicas, resultantes das combinações de dois ou mais materiais, dependem não somente das propriedades dos constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. Os painéis-sanduiche e os compósitos laminados são os dois dos compósitos mais comuns (CALLISTER, 2012).

#### **2.4.2. Laminados**

Um compósito laminado é composto por lâminas ou painéis bidirecionais com direção preferencial de alta resistência. As camadas, que compõe o laminado, são empilhadas e posteriormente unidas umas às outras, de tal modo que a orientação da direção de alta resistência varie com cada camada sucessiva (CALLISTER, 2012). A Figura 3, exibe como um compósito laminado é composto.

Figura 3 - Esquemático de um laminado.



Fonte: Callister (2012).

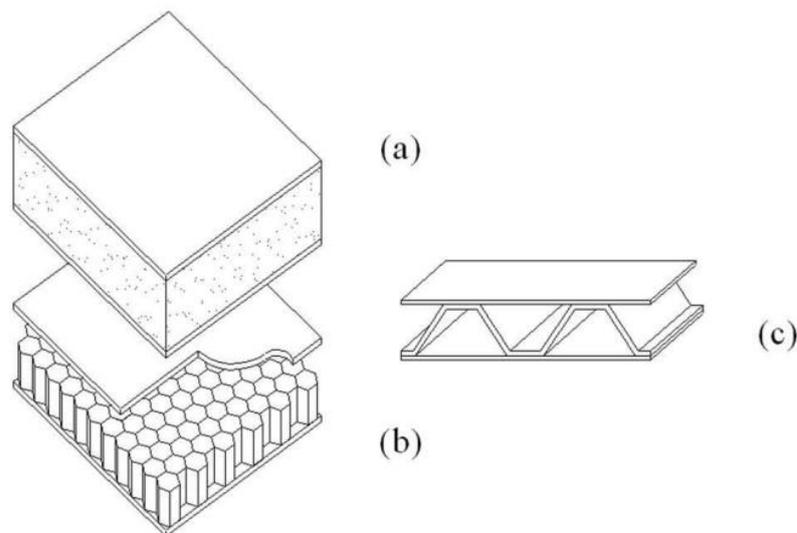
Segundo Costa (2017), o compósito laminado tem como objetivo combinar as melhores propriedades de cada tipo de camada e do material ligante de modo a melhorar as propriedades da estrutura, tendo em vista a aplicação que se pretende fazer. Menciona também que a orientação das fibras, nas camadas do laminado, é um fator essencial nas propriedades finais da estrutura.

#### **2.4.2. Painel-sanduiche**

De acordo com Gagliardo (2010), uma estrutura da classe painel-sanduiche consiste basicamente de duas placas (faces finas) de um material resistente, intercaladas por uma camada de outro material, em geral de baixa densidade e de resistência inferior à das placas. Menciona também que a resistência do conjunto que compõe o sanduiche a flexão, em certas condições, pode ser muito mais que uma placa maciça, constituída do mesmo material e de mesma densidade que as duas faces do sanduiche. É válido ressaltar que projetos de estruturas do tipo sanduiche tem sido concebido e adotado como um meio de gerar estruturas resistentes, duráveis e de baixa peso. Tais estruturas apresentam uma alta

eficiência quando se fala na transferência de cargas de flexão e compressão. O uso desse tipo de estrutura vem se expandindo devido a sua capacidade de combinar alta rigidez a flexão e aliado ao baixo peso (GAGLIARDO, 2010). A Figura 4 exhibe diferentes possibilidades de núcleos que podem compor esse tipo de estrutura. Tornando-a muito versátil para diversas aplicações e demandas específicas.

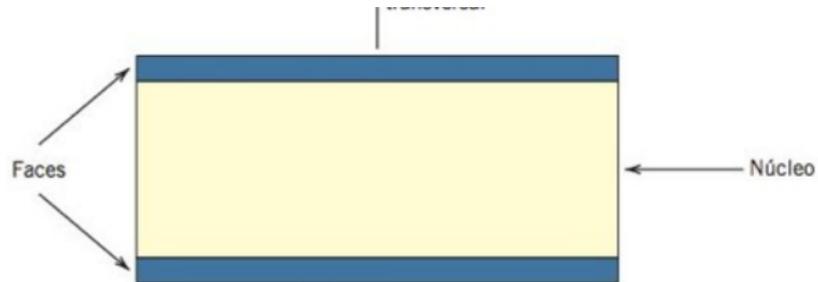
Figura 4 - Material para núcleos: (a) polímero, (b) colmeia (c) corrugado.



Fonte: Gagliardo (2010)

Conforme Tita (2007), essas estruturas constituem de uma classe especial de laminado. As faces tem como função suportar as tensões normais de tração, compressão ou cisalhamento que estão associados a flexão. O núcleo, por sua vez, deve manter o afastamento das faces, ser suficientemente rígido na direção perpendicular a elas, a fim de evitar o esmagamento, e sua rigidez ao cisalhamento transversal deve ser grande o suficiente para garantir que o conjunto funcione. A Figura 5 mostra, de forma mais detalhada, uma vista da seção transversal de uma estrutura sanduíche.

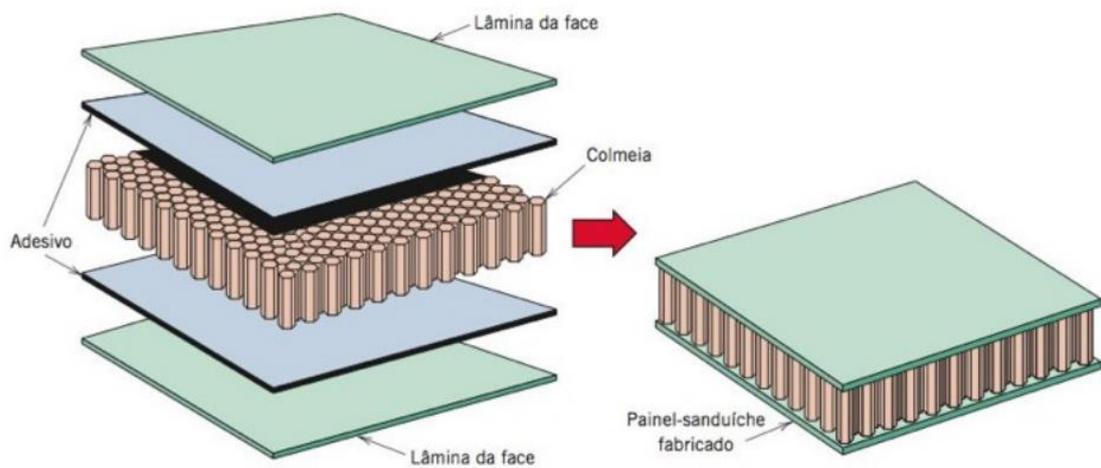
Figura 5 - Vista da seção transversal de um compósito sanduiche.



Fonte: Callister (2012).

Já na Figura 6, é exibido um diagrama que contém as camadas que constituem a estrutura de um compósito sanduiche.

Figura 6 - Diagrama esquemático de um painel-sanduiche.



Fonte: Callister (2012).

## 2.5. Matriz

A matriz, na estrutura de um compósito, é a fase contínua do sistema, os materiais empregados para esse papel governam os parâmetros do processo de fabricação, conferem a forma final da estrutura composta e fornecem uma distribuição uniforme de carga aos reforços devido a adesão entre os distintos materiais utilizados (VASILIEV; MOROZOV; 2001).

Segundo Akovali (2001), a matriz deve apresentar características e cumprir certos requisitos para obter um desempenho satisfatório, em termos estruturais, dependendo da aplicação da estrutura. Tais características são:

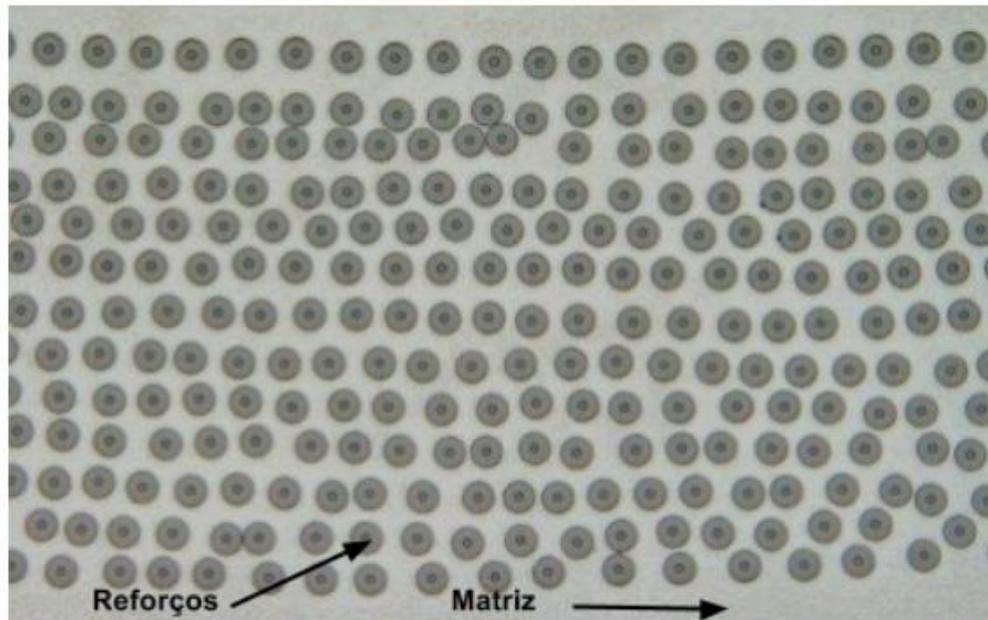
- a) Ser aderente aos constituintes;
- b) Ter uma viscosidade adequada possibilitando uma penetração total e, dessa forma, tornando possível uma elevada impregnação dos constituintes e amenização dos defeitos como vazios;
- c) Ser suficientemente elástico;
- d) Apresentar baixa contração;
- e) Ser facilmente processável;
- f) Apresentar resistência química adequada;
- g) Estabilidade dimensional;
- h) Capacidade para trabalhar em baixas e altas temperatura.

### 2.5.1. Matrizes poliméricas

A matriz polimérica propicia ao compósito uma forma geométrica, proteção contra os ataques de agentes externos, mantém a orientação do reforço no composto, e transfere a solicitação do carregamento aos reforços, que no caso são as fibras. Ela é um resultado da mistura de uma resina e de agentes de cura (CARVALHO, 2019).

De acordo com Carvalho (2019), os materiais poliméricos são formados por cadeias carbônicas nos quais os átomos de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, cloro, flúor ou enxofre podem se ligar quimicamente. Sendo que as matrizes mais usuais, comercialmente, nos compósitos poliméricos são os termoplásticos e termofixos.

Figura 7 - Representação da seção transversal de um compósito laminado.



Fonte: Gonçalves (2015).

Na Figura 7 é exibida uma representação da seção transversal de uma compósito laminado de matriz polimérica. Nela é possível observar, de forma clara, os reforços e a matriz que une todos os elementos presente na construção.

As resinas são categorizadas em resinas termoplásticas e termofixas. A principal diferença, entre os dois grupos, é o comportamento característico quando são aquecidas. As termoplásticas se fundem em um líquido viscoso capaz de sofrer grandes deformações para serem moldadas e solidificadas. Dentre as quais se destaca-se: o polietileno, o polipropileno e o nylon. Por outro lado, as termofixas podem inicialmente formar ligações químicas inter cruzadas, processo de cura, e posteriormente, caso a taxa de aquecimento permaneça, podem sofrer uma deposição térmica. Dentre as quais destacam-se: as epóxis, poliésteres e as fenólicas. Diante disso, as resinas termoplásticas após se solidificarem podem ser novamente fundidas e reaproveitadas, o mesmo não ocorre quando se trata das resinas termofixas (TITA, 2007). A Tabela 1, exibe uma comparação entre as propriedades das duas classes de resinas anteriormente mencionadas.

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades mecânicas das resinas.

<b>Propriedades</b>	<b>Termofixas</b>	<b>Termoplásticas</b>
<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	1,3 – 6	1 – 4,8
<b>Resistencia a tração (Gpa)</b>	0,02 – 0,18	0,04 – 0,19
<b>Temperatura máxima de serviço (°C)</b>	50 – 450	25 – 230

Fonte: Tita (2007).

## 2.6. Reforço

O reforço é componente descontínuo do material, e, em regra, os materiais empregados no reforço apresentam a maior resistência nos materiais compósitos. É ressaltado que os reforços geralmente se apresentam sob a forma de fibras ou partículas, que por sua vez, são imersas na matriz e tem como função essencial resistir aos carregamentos mecânicos (GAMA, 2011). A Tabela 2, mostras as propriedades de alguns dos reforços mais usuais.

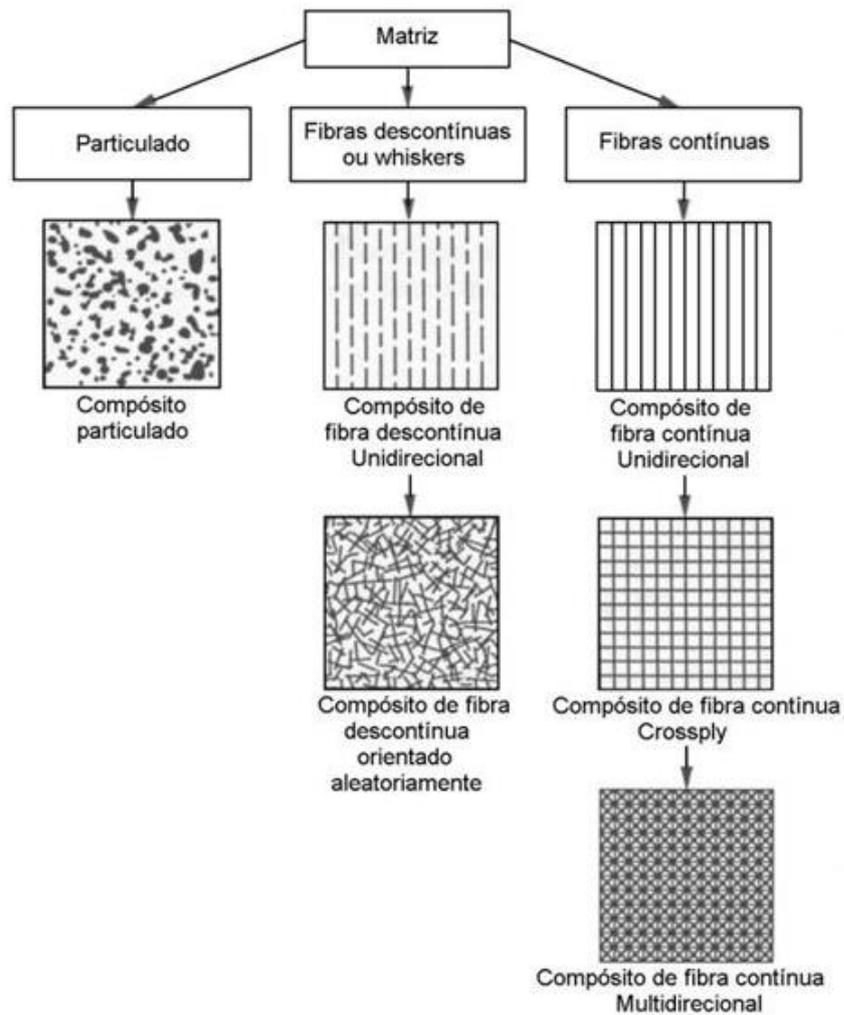
Tabela 2 - Propriedades de fibras comumente utilizadas.

<b>Fibra</b>	<b>Densidade [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	<b>Resistência à tração [Mpa]</b>
<b>Fibra de vidro (tipo E)</b>	2,54	70	2200
<b>Kevlar 49 (Araminada)</b>	1,45	130	2900
<b>SiC</b>	6,6	250	2200
<b>Alumina</b>	3,9	380	1400
<b>Boro</b>	2,65	420	3500
<b>Carbono</b>	1,86	380	2700

Fonte: Adaptado de Tita (2007).

Segundo Tita (2007) os reforços podem ser encontrados basicamente em duas formas: fibras ou partículas. Os reforços em partículas podem ser orientados de forma aleatório ou preferencialmente me uma direção. Os reforços por fibras podem ser dispostos em uma única camada ou em múltiplas camadas. São apresentados, na Figura 8, os modos que os reforços podem ser encontrados.

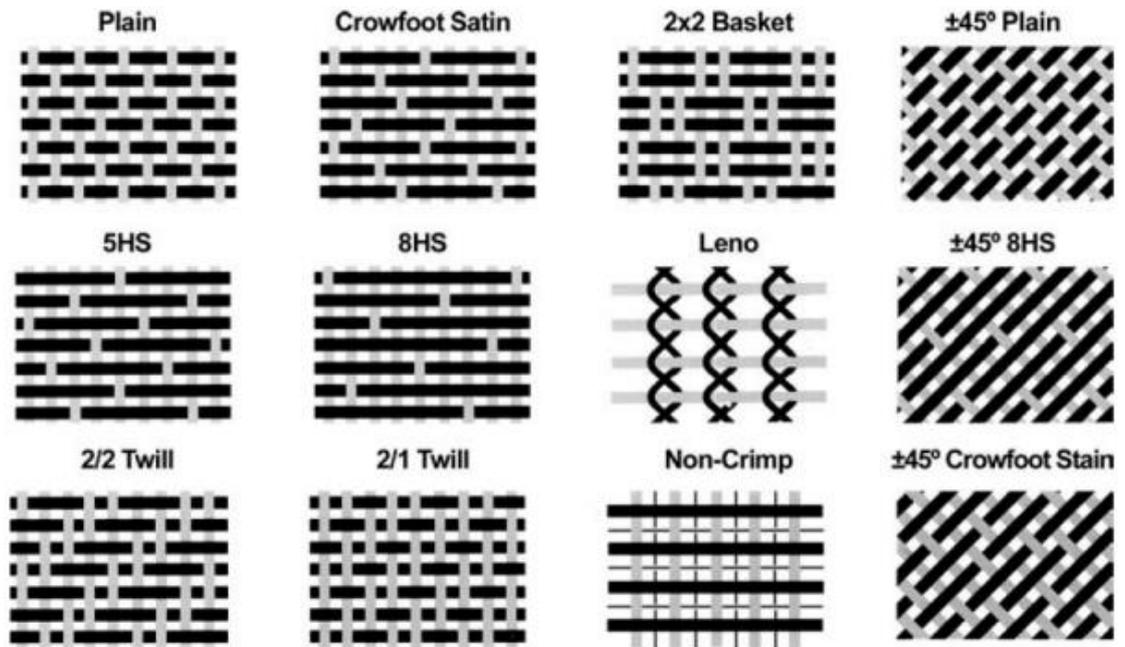
Figura 8 - Formas que os reforços podem ser encontrados.



Fonte: Gonçalves (2015).

De acordo com Angrizani (2011), em tecidos, as fibras podem assumir distintas configurações em termos de disposição. Elas podem ser dispostas de forma unidirecional, bidirecional e em arranjos multidirecionais das fibras no plano que exibe uma maior tenacidade quando compara-se as configurações anteriormente citadas. Na Figura 9, são exibidos alguns arranjos das fibras nos tecidos.

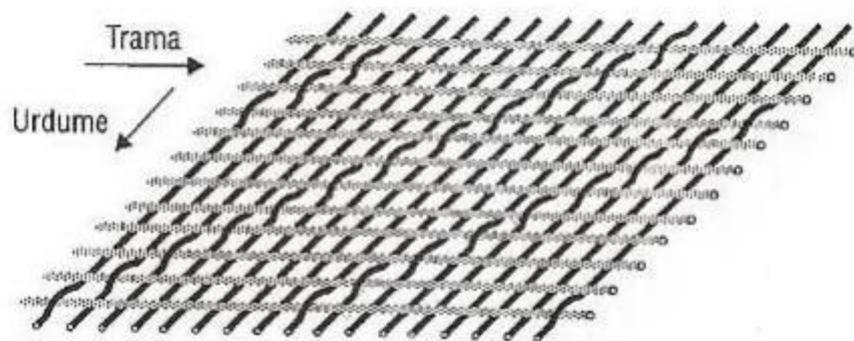
Figura 9 - Disposição das fibras no tecido.



Fonte: Angrizani (2011).

De acordo com Cerchiaro (2010), os tecidos da classe urdinos e tramados são construindo alternando os cordões de fibra em duas direções: o urdume, que são os fios longitudinais, e a trama composta de fios transversais. A Figura 10, exibe a estrutura descrita.

Figura 10 - Representação do urdume e trama.



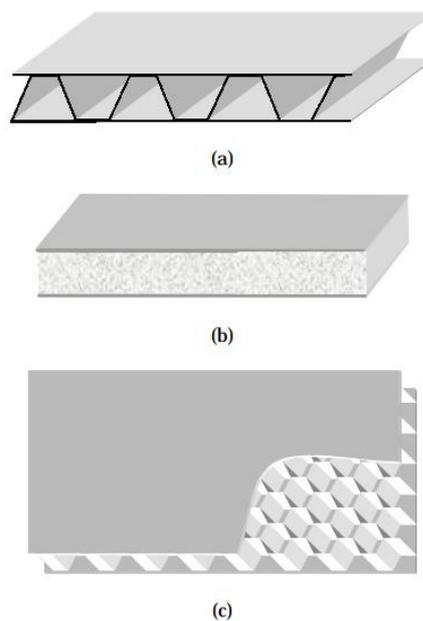
Fonte: Cecharo (2010).

## 2.7. Núcleo estrutural

Segundo Garay (2016), o núcleo, em uma estrutura do tipo sanduiche, mantem as faces nas posições originais em relação ao eixo neutro do painel onde uma não deve se mover em relação a outra, dessa forma, promovendo rigidez à compressão e cisalhamento. Em uma situação na qual o material que constitui o núcleo tiver uma baixa resistência a compressão, as faces poderão se aproximar quando o painel-sanduiche estiver submetido a um esforço de flexão.

Existem dois principais grupos de painéis-sanduiche, tais grupos são diferenciados pela forma geométrica do material do núcleo. São eles, os núcleos homogêneos e os núcleos não homogêneos ou estruturados, que por sua vez, distinguem-se os núcleos canelados e os núcleos favo de mel (GARAY, 2016).

Figura 11 - Categorias de núcleos estruturais.



Fonte: Petras (1998).

A Figura 11 exhibe as diferentes categorias de materiais que podem compor o núcleo estrutural de um painel-sanduiche. Na letra (a) é mostrado um núcleo do tipo corrugado não homogêneo bem como na letra (c), que exhibe um núcleo classificado como favo de mel. Por fim, a letra (b) exhibe um núcleo homogêneo.

Garcia (2014) ressalta que no núcleo corrugado, os reforços são longitudinais ou

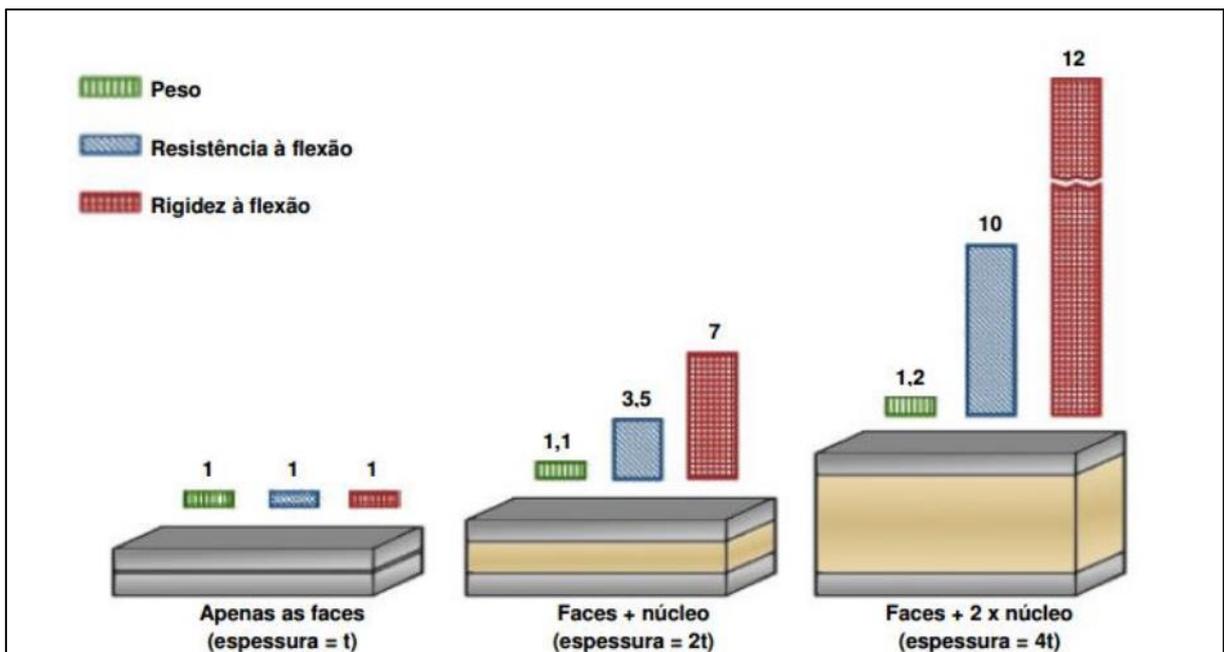
transversais às faces. Os materiais que aplicados, nesse tipo de estrutura, são geralmente os polímeros, alumínio e até mesmo o papel, podendo ser embebido ou não por resina.

Quanto aos núcleos de favo de abelha, a estrutura apresenta reforços normais as faces e são constituídos por finas e leves placas formando células, normalmente, hexagonais. Porém, a forma geometria da estrutura pode ser alterada de acordo com a necessidade do projeto e aplicação (COSTA, 2017).

Por fim, os núcleos do tipo sólido conferem um suporte homogêneo as lâminas dos reforços de tecido nas estruturas sanduiche. Os matérias empregados, neste tipo de estrutura, são comumente espumas poliméricas (GARCIA, 2014).

De acordo com Costa (2017), o núcleo permite o aumento do momento de inércia do painel-sanduiche, com apenas um pequeno aumento no peso estrutural total do componente, o que, conseqüentemente, leva um aumento da resistência perante aos esforços de flexão e encurvadura.

Figura 12 - Efeitos da resistência e da rigidez com o aumento da espessura do núcleo em uma estrutura sanduiche.



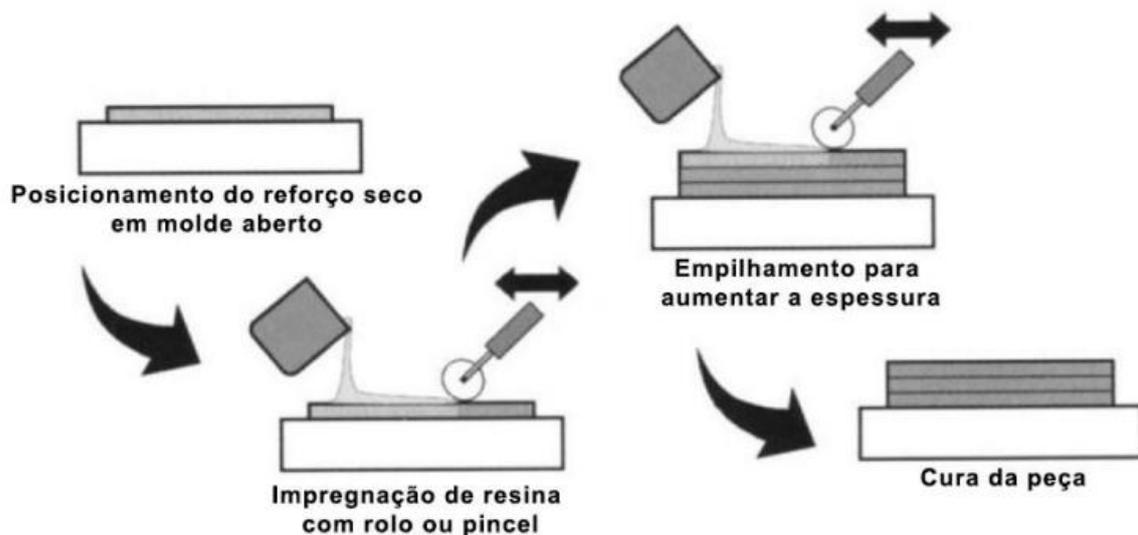
Fonte: Costa (2017).

Na Figura 12 é possível notar a influência, positiva, da espessura do núcleo no peso final da estrutura, na resistência a flexão e na rigidez a flexão.

## 2.8. Processo de laminação manual

De acordo com Te (2016), o processo de laminação manual é o mais difundido quando o assunto é a fabricação de grandes peças em baixa escala. Uma das principais características do processo, é a aplicação manual de uma camada de resina para cada reforço, em molde aberto, até que a espessura desejada seja atingida. A Figura 13 ilustra as etapas que constituem o processo de laminação manual.

Figura 13 - Representação do processo de laminação manual.



Fonte: Te (2016).

No primeiro momento do processo de laminação manual, ocorre a deposição de um agente desmoldante sobre a superfície na qual ocorrerá o processo. Pois, além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, o desmoldante evita a aderência da peça no molde. Dessa forma, impactando positivamente no acabamento superficial final da peça (BITTENCOURT, 2015).

Após a etapa que corresponde a aplicação do agente desmoldante, o procedimento de empilhamento das camadas de reforço é iniciado juntamente com a impregnação do tecido com a matriz polimérica designada.

Te (2016) ainda destaca que, por tratar de um processo manual, a matriz polimérica é normalmente composta por uma resina de baixa viscosidade que facilita a aplicação durante o processo. Em geral, a resina utilizada nesse processo possui cura a temperatura ambiente.

Por fim, este processo tem como vantagens o baixo investimento em ferramentas, é de

constituído por etapas simples e a não limitação dimensional entre outros. Quanto as desvantagens, pode-se citar que o processo é pouco reprodutivo, insalubre devido os agentes presentes na resina e a qualidade depende da habilidade do indivíduo que está realizando o procedimento (BITTENCOURT, 2015).

## **2.9. Cura da resina**

Segundo (GOMES, 2008) a cura dos matéria compósitos, de matriz polimérica, varia de acordo com a classe da resina utilizada. Nos poliésteres, por exemplo, é obtida a polimerização por radicais livres, na qual a resina passa do estado líquido para uma estrutura rígida. Em geral, o tempo de cura sofre influência direta pelo tipo e também pela quantidade de catalisador utilizado.

O processo de cura da resina é influenciado pelo tempo, temperatura e pressão. Quando se trata de resinas termoendurecíveis, a cura terá início a temperatura ambiente que pode ser um processo lento. Com o aumento da temperatura, o tempo necessário para que o processo de cura seja concluído diminuirá (AKOVALI, 2001).

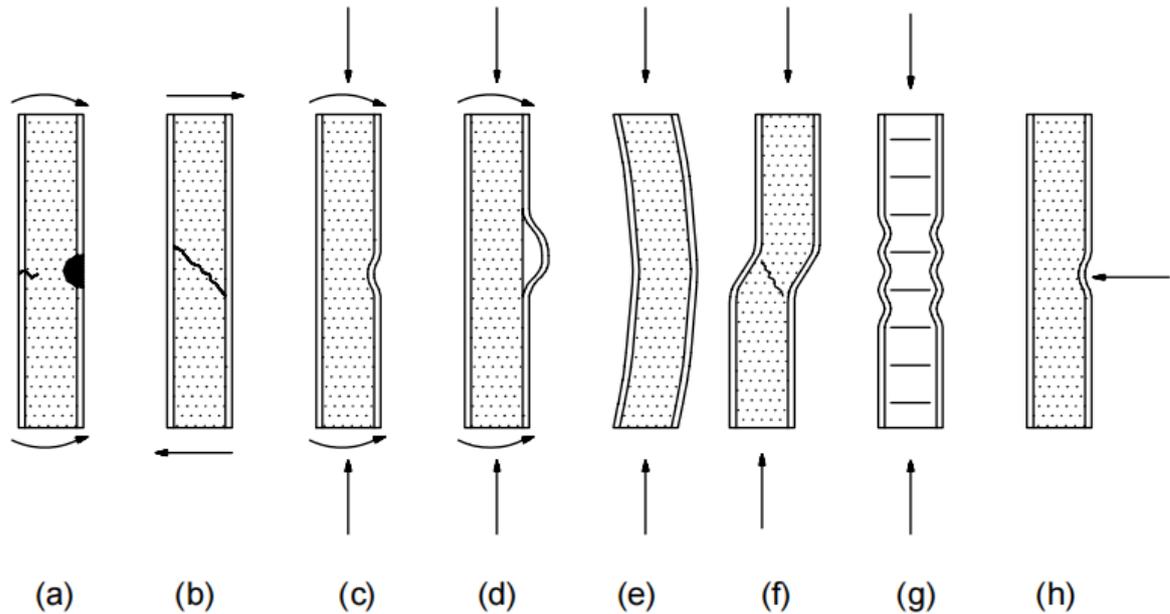
## **2.10. Modos de falha**

De acordo com Gonçalves (2015) a falha em compósitos, diferentemente de metais, é um processo que ocorre em vários estágios, de alta complexidade e que podem ocorrer por meio de diversos mecanismos de falha. Em um elemento estrutural, a falha mecânica é associada ao momento em que o elemento não pode mais desempenhar a função para a qual foi projetado.

### ***2.10.1. Paineis sanduiche***

Segundo Zenkert (1995), as falhas nos painéis-sanduiche podem ocorrer de distintas maneiras, sendo que cada um dos modos de falha indicam uma restrição na capacidade de carga do sanduiche. É valido ressaltar que parâmetros como a geometria do painel-sanduiche e o tipo de carregamento, diferentes modos de falha tornam-se críticos e, portanto, estabelecem limites para o emprego e desempenho das estruturas. Na Figura 14, são exibidos os principais modos de falhas dos sanduiches.

Figura 14 - Modos de falha: (a) fratura na face; (b) falha por cisalhamento do núcleo, (c) e (d) enrugamento da face; (e) flambagem; cisalhamento; (g) ondulação da face e (h) indentação local.



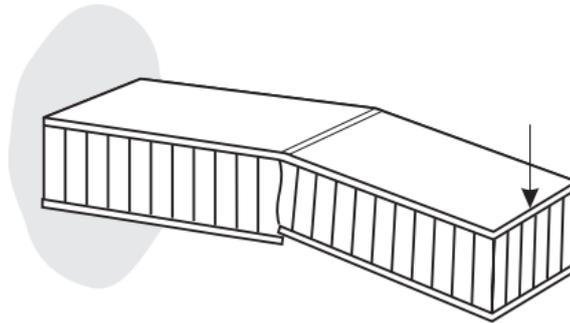
Fonte: Dan Zenkert (1995).

O manual de fabricação da *Hexcel composites*, sobre estruturas sanduíche, menciona os principais cuidados que o profissional projetista deve ter no momento da concepção de uma estrutura desta classe de compósitos estruturais e associa os principais modos de falhas com as causas prováveis.

### 2.10.1.1 Ruptura das faces

Os materiais que compõem os reforços devem ser capazes de suportar tensões de tração, compressão e cisalhamento induzidas devido os carregamentos durante os esforços nas estruturas. A matriz, neste caso, polimérica deve ser capaz de transferir as tensões entre os reforços e o núcleo. Na Figura 15, a falha por compressão é ilustrada.

Figura 15 - Falha por compressão do reforço.

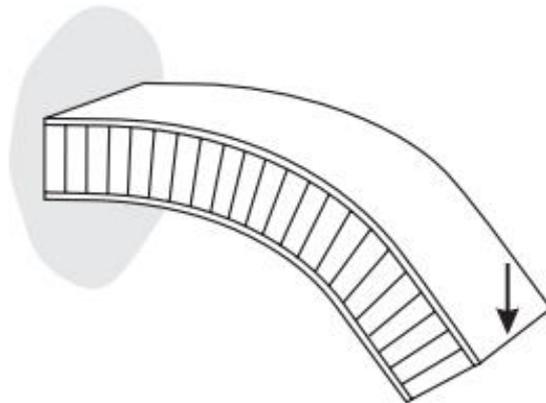


Fonte: Hexcel composites (2000).

#### 2.10.1.2 Deflexão excessiva

O painel-sanduiche deve apresentar rigidez a flexão e ao cisalhamento, suficientemente, para que não ocorram deflexões excessivas, Figura 16.

Figura 16 - Baixa rigidez.



Fonte: Hexcel composites (2000).

#### 2.10.1.3 Falha por flambagem do painel

De acordo com Gagliardo (2008), a espessura do núcleo deve ser considerável e ter módulo de elasticidade transversal elevado suficientemente para prevenir a falha por flambagem. A Figura 17, demonstra o modo de falha debatido.

Figura 17 - Flambagem no painel.

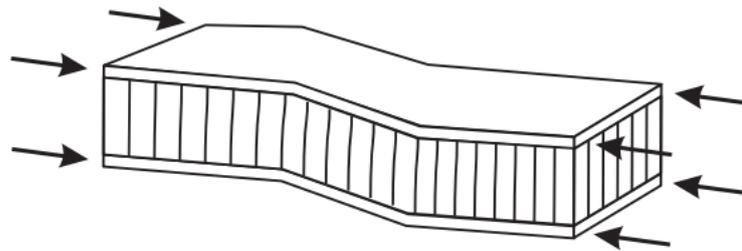


Fonte: Hexcel composites (2000).

#### 2.10.1.4 Cisalhamento

O núcleo deve ter espessura e possuir o módulo de cisalhamento adequados para evitar a falha prematura da estrutura sob esforços que gerem cisalhamento (HEXCEL, 2000).

Figura 18 - Cisalhamento por crimpagem.

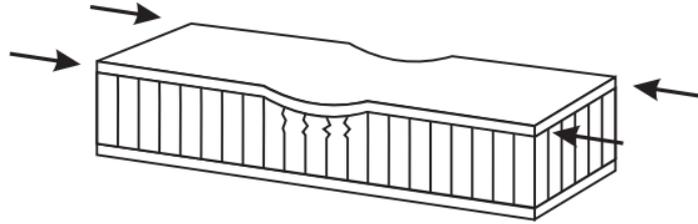


Fonte: Hexcel composites (2000).

#### 2.10.1.5 Falha por enrugamento

O módulo de compressão do reforço da estrutura e do núcleo devem ser elevados o suficiente para que a falha por enrugamento dos reforços, não ocorra de forma precoce (HEXCEL, 2000).

Figura 19 - Enrugamento do reforço.

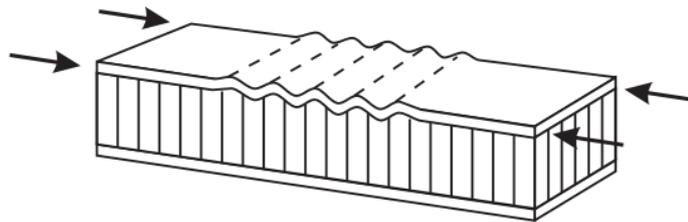


Fonte: Hexcel composites (2000).

#### 2.10.1.6 Falha por empenamento das faces

Quando se trata desse modo de falha, trata-se de uma flambagem local dos reforços. Quando este modo de falha ocorre, os reforços podem se deslocar tanto para dentro quanto para fora (GAGLIARDO, 2008). A Figura 20, ilustra a situação.

Figura 20 - Empenamento das faces.

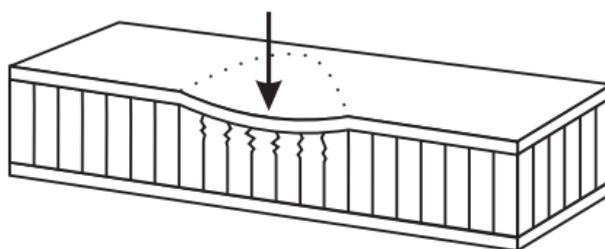


Fonte: Hexcel composites (2000).

### 2.10.1.7 Falha por compressão local

Quanto a carga de compressão local, o núcleo deve possuir resistência a compressão adequada para que a estrutura possa resistir as cargas locais, quando expostas, na superfície do painel.

Figura 21 - Compressão local.



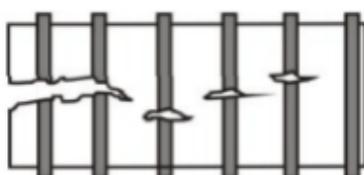
Fonte: Hexcel composites (2000).

## 2.10.2. Compósito laminado

### 2.10.2.1. Ruptura das fibras

De acordo com Gonçalves (2015), a falha intralaminar ocorre na estrutura quando a resistência a tração das fibras, que constituem o tecido, é baixa ou inadequada para os esforços que atuam na estrutura. Ressalta também que este modo de falha é mais comum em tecidos que são constituídos por fibras vegetais por apresentarem baixa resistência a tração. A Figura 22, representa o modo de falha mencionado.

Figura 22 - Falha intralaminar.



Fonte: Agarwal e Broutman (1990).

### 2.10.2.2. Fissura na matriz

Este modo de falha, também intralaminar, ocorre quando há uma relação desproporcional entre a resistência a tração da matriz polimeria e do reforço utilizado. Tal modo de falha desencadeia um fenômeno chamado de *fiber bridging*. Ou seja, as fibras resistem aos esforços como se fossem uma ponte entre as duas superfícies da matriz fissurada (GONÇALVES, 2015). A Figura 23, exibe uma representação do modo de falha descrito.

Figura 23 - Fissuras na matriz.

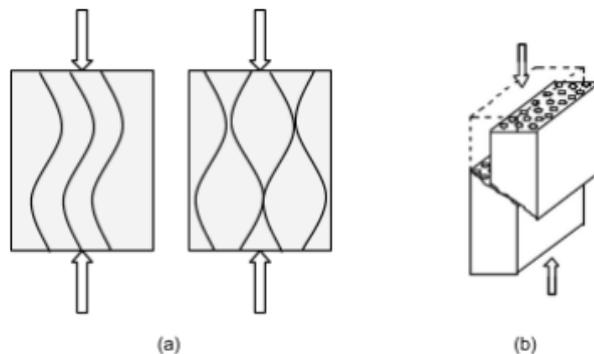


Fonte: Agarwal e Broutman (1990).

### 2.10.2.3. Microflambagem e cisalhamento

Em concordância com Souza (2003), quando os compósitos laminados são submetidos a carregamentos de compressão longitudinal, a estrutura sujeita-se a ocorrência de falhas por microflambagem ou por cisalhamento. Na Figura 24, item a, é possível observar que as fibras podem sofrer microflambagem alinhadas entre si ou independentemente umas das outras, respectivamente.

Figura 24 - (a) Microflambagem e (b) cisalhamento.



Fonte: Gonçalves (2015).

## 2.11. Propriedades e equações para a caracterização das estruturas

As equações para a caracterização das estruturas são extraídas das normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Para a tensão de flexão e deformação dos compósitos utiliza-se as Equações 1 e 2, das normas ASTM D 790-17 e da ASTM D 7264/D 7264M, respectivamente.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2db^2} \quad (1)$$

Onde:

- $\sigma_f$  – Tensão de flexão (MPa);
- P – Carga aplicada no meio do vão (N);
- L – Comprimento de vão (mm);
- d – Espessura do corpo de prova (mm);
- b – Largura do corpo de prova (mm).

Para a deformação tem-se a seguinte expressão:

$$\epsilon_f = \frac{6D_e d}{L^2} \quad (2)$$

Sendo que:

- $\epsilon_f$  – Deformação de flexão (mm/mm).
- De – Deslocamento (mm).

Para a avaliação e obtenção das propriedades mecânicas dos sanduíches, a norma ASTM C 393 – 00 abrange as equações e o modos de análise. A Equação 3, mensura a tensão de cisalhamento no núcleo do sanduiche.

$$\tau = \frac{P}{(d + c)b} \quad (3)$$

No qual:

- c – Espessura do núcleo (mm).

A Equação 4 é aplicada para determinar as tensões atuantes nas faces da estrutura sanduíche. Logo mais, a equação é apresentada.

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (4)$$

Onde:

$\sigma$  – Tensão de flexão nas faces;

t – Espessura das faces.

Em relação as deflexões do sanduíche, os deslocamentos são calculados de acordo com a Equação 5. Segue-se que.

$$\Delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U} \quad (5)$$

Sendo que:

$\Delta$  - Deformação total do painel;

U – Rigidez de cisalhamento do painel;

E – Modulo de elasticidade;

D – Rigidez de flexão do painel;

G – Módulo de cisalhamento do núcleo.

$$D = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12} \quad (6)$$

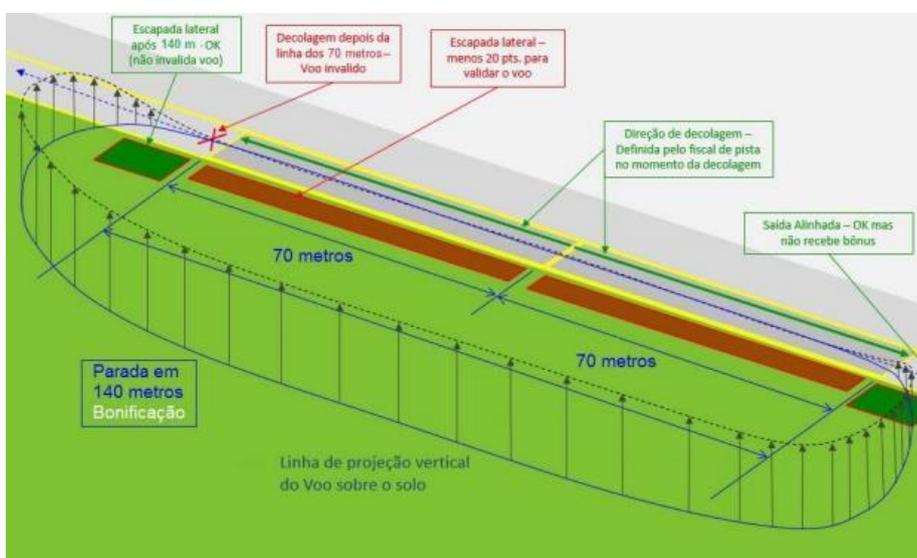
$$U = \frac{G(d+c)^2b}{4c} \quad (7)$$

É valido ressaltar que a Equação 5 é usada somente no caso em que os reforços utilizados na estrutura sanduíche, em ambas as faces, são iguais.

## 2.12. Aplicação no aerodesign

A SAE (Society of Automotive Engineers) ou associação dos engenheiros da mobilidade, é uma organização criada em 1905 para padronizar e normatizar itens relacionados ao setor automobilístico. Já o programa SAE aerodesign, é um desafio, lançado anualmente, aos estudantes de engenharia que tem como principal objetivo propiciar a difusão e o intercâmbio de técnicas e conhecimentos de engenharia aeronáutica, através de aplicações e da competição entre equipes (MIRANDA, 2012). O desafio propõe que as equipes inscritas na competição desenvolvam uma aeronave radio controlada com a capacidade de transportar no mínimo 5 kg de carga durante um trajeto determinado pela comissão técnica do torneio e formalizado em um edital. A Figura 25 mostra o trajeto.

Figura 25 - Percurso em voo.



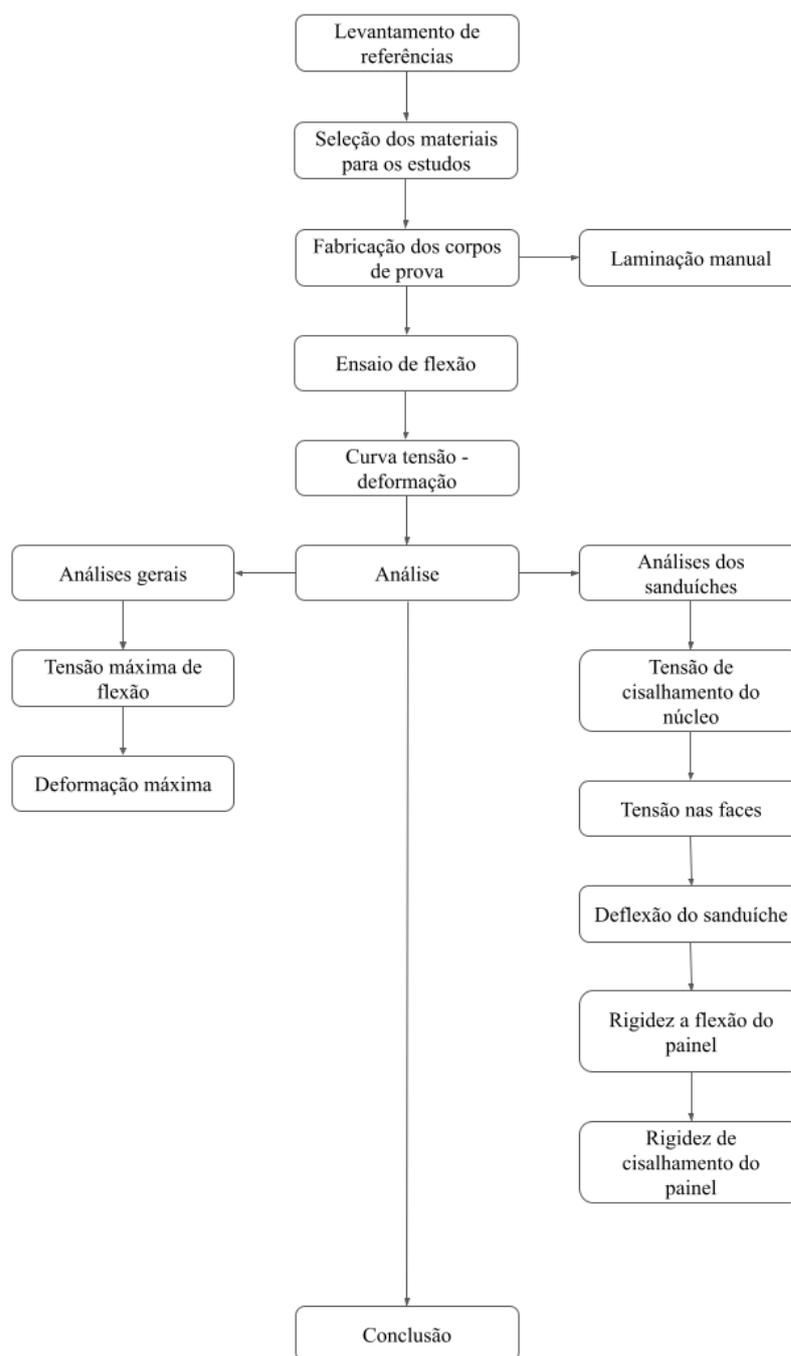
Fonte: Miranda (2012).

Dentre os vários fatores que contribuem nos somatórios de pontos, para as equipes durante a competição, destaca-se o fator de eficiência estrutural da aeronave. O fator de eficiência estrutural dar-se pela razão entre a carga total transportada e o peso vazio do avião. Diante disto, em uma tentativa de aumentar a pontuação durante o torneio é fundamental que o avião seja leve. Para isso, os materiais compósitos e mais especificamente os compósitos estruturais possibilitam a obtenção de uma aeronave leve e a mesmo tempo resistente aos esforços solicitantes durante o percurso de voo. Dessa forma, os materiais compósitos possibilitam obter um alto fator de eficiência estrutural se os elementos estruturais forem dimensionados de forma eficiente (MIRANDA, 2012).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 26, apresenta um fluxograma das etapas que constituem a presente pesquisa.

Figura 26 - Fluxograma das etapas do trabalho.



### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Tecido de fibra de vidro

Tanto para os laminados quanto para os painéis-sanduiche, o reforço utilizado foi o tecido de fibra de vidro RE200P bidirecional ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Na Tabela 3, é possível observar algumas características do tecido utilizado na construção das estruturas.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas dos fios.

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade de medida</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Nominal</b>	<b>Máximo</b>
<b>Peso</b>	g/m <sup>2</sup>	180	200	220
<b>Espessura</b>	mm	0,18	0,21	0,24
<b>Carga de ruptura do urdume</b>	kgf/cm	40	50	55
<b>Carga de ruptura da trama</b>	kgf/cm	40	50	55

Fonte: Adaptado de e-composites (2022).

Já na Tabela 4, é apresentada a configuração do tecido em termos da trama, urdume e a classe da fibra de vidro que o compõe.

Tabela 4 - Características construtivas do tecido.

<b>Construção</b>	<b>Material</b>	<b>Número de fibras por cm</b>		
$0^\circ$	Fibra de vidro E	4,8	5	5,3
$90^\circ$	Fibra de vidro E	4,5	5	5,3

Fonte: Adaptado de e-composites (2022).

O tecido é estruturado, segundo especificações do fabricante, em trama plana e é constituído por 50% das fibras de vidro orientadas a  $0^\circ$  e 50% de fibras orientadas a  $90^\circ$ . O tecido é compatível com as resinas mais usuais tais como poliéster, estervinílica e epóxi e pode ser laminado manualmente ou por meio da laminação a vacuum. A Figura 27 e a Figura 28, exibem o tecido em questão.

Figura 28 - Tecido.



Fonte: e-composites, (2022).

Figura 27 - Detalhes da orientação das fibras.



Fonte: Advanced vacuum (2022).

### 3.1.2. Resina poliéster

Para a matriz polimérica das estruturas, adotou-se a resina poliéster. A resina poliéster, Figura 29, se destaca no mercado pelo baixo custo, facilidade de uso, e sua grande disponibilidade para compra. Os poliésteres possuem muitas vantagens se comparado com outras resinas, como baixo tempo de cura a temperatura ambiente, transparência e baixa viscosidade.

Figura 29 - Resina poliéster.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3. Divinycell H45 GSP

O material do núcleo, utilizado na confecção dos corpos de prova dos painéis-sanduiche, foi o divinycell H45 GSP. O divinycell foi selecionado devido, principalmente, pelo seu baixo peso específico e por suas propriedades mecânicas. Diante disto, o material é atraente para aplicações em vários setores. Na Tabela 5, são exibidas as propriedades mecânicas da espuma de PVC e as normas que foram utilizadas, pelo fabricante, nos ensaios para a aquisição dos valores apresentados.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do divinycell H45 GSP.

<b>Propriedade</b>	<b>Teste</b>	<b>Unidade</b>	<b>Nominal</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Resistência à compressão</b>	ASTM D 1621	MPa	0,6	0,5
<b>Módulo de compressão</b>	ASTM D1621-B-73	MPa	50	45
<b>Resistência à tração</b>	ASTM D 1623	MPa	1,4	1,1
<b>Módulo de tração</b>	ASTM D 1623	MPa	55	45
<b>Resistência ao cisalhamento</b>	ASTM C 273	MPa	0,56	0,46
<b>Módulo de cisalhamento</b>	ASTM C 273	MPa	15	12
<b>Deformação de cisalhamento</b>	ASTM C 273	%	12	-
<b>Densidade</b>	ISSO 845	kg/m <sup>3</sup>	48	-

Fonte: e-composites (2022).

O material do núcleo, como já mencionado anteriormente, é utilizado para conferir uma maior espessura na estrutura e possibilitar a obtenção de formas geométricas variadas. A Tabela 6 exibe outras propriedades e características físicas do material.

Tabela 6 - Outras propriedades da espuma de PVC.

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
<b>Varição da densidade</b>	%	$\pm 10$
<b>Condução térmica</b>	W/(m-K)	0,028
<b>Coefficiente de expansão linear</b>	$\times 10^{-6}/^{\circ}C$	40
<b>Temperatura de distorção térmica</b>	$^{\circ}C$	125
<b>Temperatura de operação</b>	$^{\circ}C$	-200 a 70
<b>Temperatura máxima de processamento</b>	$^{\circ}C$	90
<b>Fator de dissipação</b>	-	0,0002
<b>Constante dielétrica</b>	-	1,05
<b>Coefficiente de Poisson</b>	-	0,4

Fonte: e-composites (2022).

#### **3.1.4. Desmoldante**

No processo de laminação manual e nos demais processos que envolvem a fabricação de estruturas com materiais compósitos moldados de matriz polimérica, é necessário utilizar um desmoldante para facilitar a remoção da peça da superfície e/ou do molde no qual a mesma foi inserida no início do processo. Diante do exposto, foram utilizados três distintos desmoldantes de acordo com a necessidade e criticidade de cada estrutura fabricada.

Primeiramente, aconteceu o processo de fabricação dos CP's de resina poliéster e empregou-se um desmoldante a base de silicone. Devido a presença de outros consumíveis, o spray de silicone mostrou-se suficiente para facilitar a retirada dos corpos de prova e, conseqüentemente, na preservação do molde utilizado. A Figura 30 apresenta o desmoldante.

Figura 30 - Desmoldante ultralub.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, ocorreu a confecção do laminado de fibra de vidro com o empilhamento de 16 camadas de tecido. Nesse caso, a resina tem contato direto com o vidro. Por causa disso, a cera desmoldante, da *redelease*, foi aplicada na superfície na qual ocorreu o processo de laminação e a mesma apresentou uma eficiência mediana. Porém, foi possível retirar a peça. A Figura 31, mostra o desmoldante anteriormente citado.

Figura 31: Cera desmoldante da redelease.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o desmoldante utilizado no processo de laminação dos painéis-sanduíche foi a cera da *release* TR 102 a base de carnaúba. Por causa do seu desempenho elevado e também

devido a fragilidade da estrutura do núcleo que compõe o painel-sanduiche, optou-se por emprega-la e garantir a integridade da estrutura após o desmolde e também a preservação das superfícies de laminação. A Figura 32, exibe o desmoldante citado.

Figura 32 - Cera desmoldante TR 102 *release*.

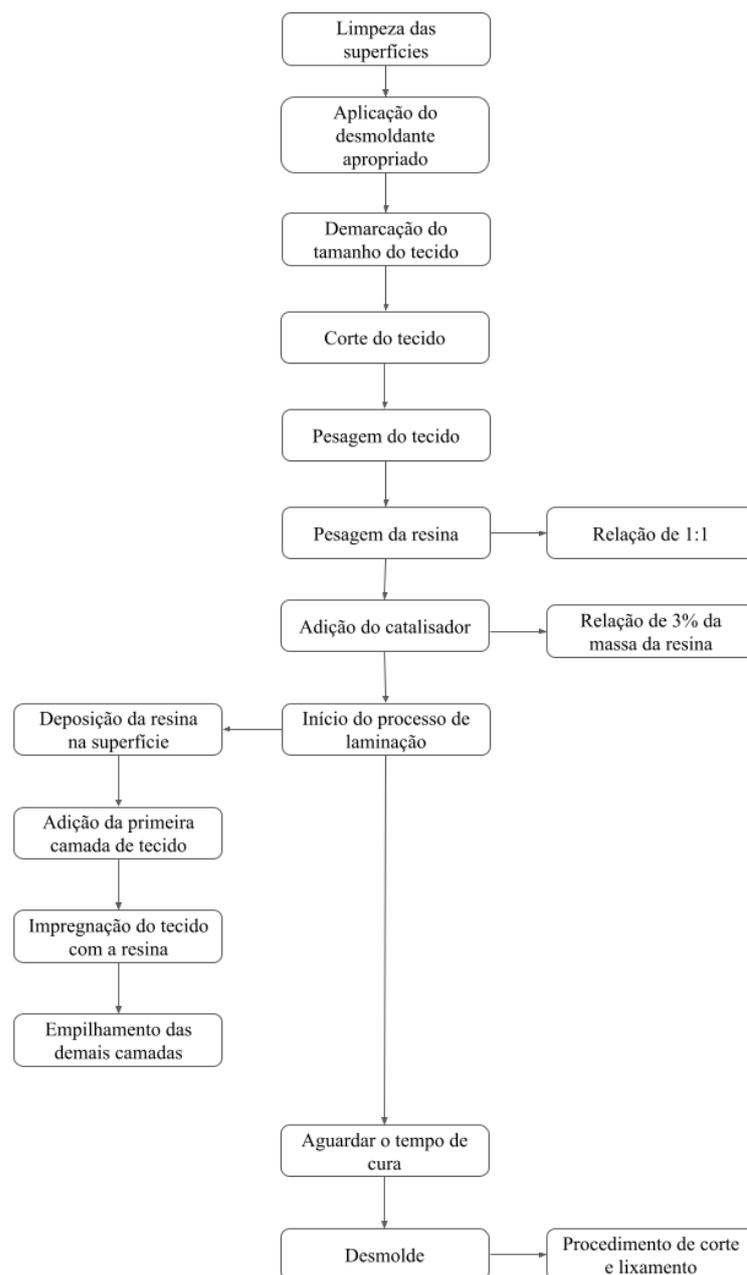


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2. Método de fabricação

Para a fabricação de todos os CP's empregou-se o método de laminação manual. No fluxograma exposto na Figura 33, é possível observar os processos que compuseram a etapa de fabricação.

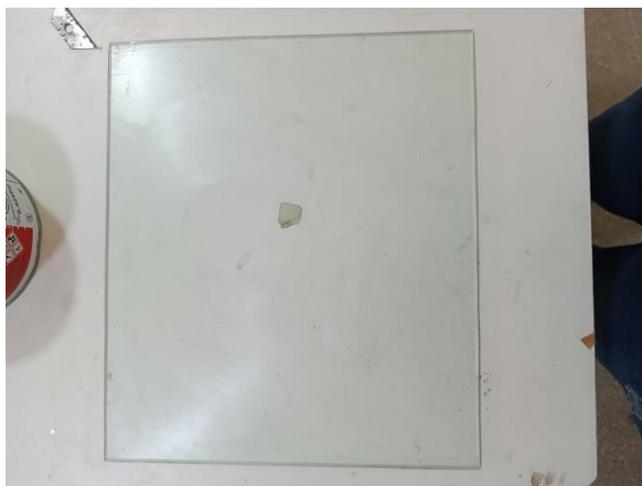
Figura 33 - Fluxograma do processo de laminação.



É válido salientar que o mesmo reforço foi utilizado no laminado e no painel-sanduiche. A relação de proporcionalidade entre a massa da resina e a massa do tecido foi mantida em 1:1, devido as recomendações encontradas na literatura. Já a relação entre o catalisador e a resina poliéster foi de 20 gotas a cada 100 g de resina. Dessa forma, tendo uma proporção de 3% do peso da resina que condiz a quantidade de catalisador em ml e que cada ml correspondente a 10 gotas do conta gotas utilizado.

Na primeira etapa, do processo de laminação, aconteceu a preparação da superfície. A superfície empregada foi uma chapa de vidro. Inicialmente, realizou-se uma raspagem nas faces da placa com uma lâmina, objetivando a retirada das camadas de resina e fibras presentes de processos realizados anteriormente. Após essa etapa, a chapa de vidro foi submetida a uma lavagem em água corrente e aplicou-se um detergente neutro, com o auxílio de uma esponja, em todas as faces para realizar a remoção de partículas e sujeitas mais encrustadas. Em seguida, a cera desmoldante, mais apropriada para o processo, foi aplicada em uma das faces da placa para possibilitar o desmolde da estrutura após o processo de cura. Após a aplicação da cera, recomenda-se um período entre 20 a 30 minutos até a aplicação de outra demão. Dessa forma, após o termino período recomendado retirou-se a cera desmoldante com o auxílio de uma flanela seca. Esse processo, foi repetido 5 vezes com o objetivo de garantir uma superfície com um mínimo de impurezas aceitáveis para o processo e suficientemente lisa. A Figura 34, mostra o vidro após as etapas mencionadas.

Figura 34 - Placa de vidro após a aplicação da cera desmoldante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, com a superfície pronta para o processo de laminação iniciou-se a fase correspondente a demarcação e ao corte do tecido. A técnica utilizada para a marcação das dimensões das peças no tecido e evitar a degradação da região após o corte, é caracterizada pela retirada de um fio da trama do tecido, a

Figura 35 demonstra o processo.

Figura 35 - Técnica de marcação para corte no tecido.



Fonte: Advanced vacuum (2018).

Dessa forma, a região de corte é delimitada e com o auxílio de uma tesoura realizou-se os cortes e as peças foram obtidas com as dimensões estabelecidas.

Seguidamente, a pesagem do tecido cortado é realizada. A Figura 36, mostra um exemplo do procedimento. Após esse processo, ocorreu a pesagem da resina e respeitando a relação de proporcionalidade, já mencionada anteriormente, é possível mensurar a quantidade de resina necessária para a quantidade de tecido demandado para a fabricação dos. Logo após, adicionou-se o catalisador no recipiente onde a resina é armazenada e realizou-se o processo de mistura de ambos componentes.

Figura 36 - Pesagem do tecido.



Fonte: Autor (2022).

A posteriori, com a mistura pronta, deu-se início no processo de laminação das estruturas. Primeiramente, depositou-se uma parte da mistura, resina - catalisador, diretamente na face da chapa, para garantir uma adesão da primeira camada do tecido ao vidro e, dessa forma, evitando o escorregamento das demais camadas no momento de espalhar a resina com a espátula. Após a primeira camada aplicada as demais são empilhadas em sequência.

Ao término do processo de laminação da chapa, iniciou-se o período de cura da mistura resina-catalisador. A cura total da mistura, segundo o fabricante, é de 4 horas. Entretanto, as chapas foram desmoldadas após 6 horas após o início do processo de cura para garantir a cura total.

Com isso, após decorrido esse período, as chapas foram desmoldadas e efetuou-se as demarcações iniciais dos corpos de prova. Sendo que, as tolerâncias dimensionais, nessa etapa, foram largas. Pois, os cortes nas chapas deram-se por meio de um processo manual usando uma esmerilhadeira angular. Dessa forma, para cada classe de laminado os corpos de prova tiveram tolerâncias dimensionais distintas.

Por fim, com todos os CP's cortados, deu-se início a etapa correspondente ao processo de lixamento. Nessa etapa, o objetivo foi ajustar as tolerâncias dimensionais dos CP's para enquadrá-las nas restrições estabelecidas pelas normas de ensaio.

### 3.2.1. Corpos de prova do compósito laminado

Para o compósito laminado, as dimensões dos CP's foram estabelecidas em concordância com a norma padrão ASTM D 7264/D 7264M – 07. Em relação aos tamanhos dos CP's, a norma impõe uma espessura de 4 mm com uma tolerância de  $\pm 3$  e uma largura de 13 mm. Já o comprimento do corpo de prova, dar-se pela soma entre o comprimento do vão entre os apoios e um acréscimo de 20% dessa medida. No tocante a definição do comprimento de vão, tal parâmetro é definido pela Equação 8.

$$L_{\text{vão}} = f \times l \quad (8)$$

Onde:

- $L_{\text{vão}}$  – Comprimento do vão;
- $l$  – Largura do corpo de prova.
- $f$  – Fator de proporcionalidade.

Diante disto, é recomendado utilizar um fator de 32:1 quando se trata de estruturas da classe compósito laminado. Também é válido ressaltar, que norma delimita uma quantidade mínima de 5 CP's para os ensaios. Na Tabela 7, são exibidas as dimensões que os corpos de prova devem ter.

Tabela 7 - Dimensões dos CP's do laminado de fibra de vidro.

Componente	Valor	Unidade de medida
Largura	13	mm
Comprimento do vão	128	mm
Comprimento do CP	154	mm
Espessura	4	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante do exposto, inicialmente adotou-se dimensões maiores para os CP's devido ao procedimento de corte manual. Inicialmente, projetou-se os corpos de prova com 13,5 mm largura e com 160 mm de comprimento. Por conta disso, foi confeccionada uma chapa de 135 mm x 160 mm x 4 mm. Dessa forma, sendo possível obter 8 CP's. Na Figura 37, é mostrada a

chapa laminada.

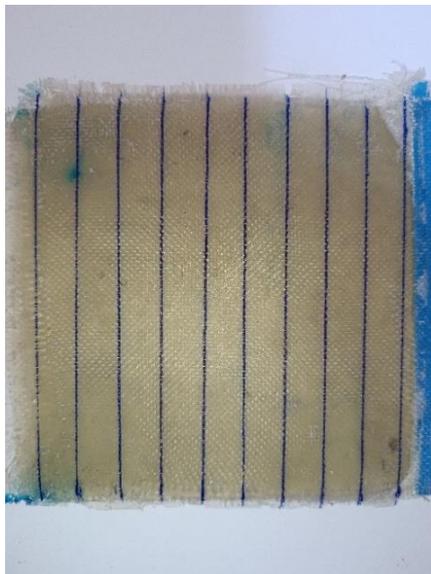
Figura 37 - Placa laminada com 16 camadas do tecido de fibra de vidro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a determinação das dimensões iniciais dos CP's, ocorreu o procedimento de demarcação na chapa. Na Figura 38, são mostradas as delimitações realizadas.

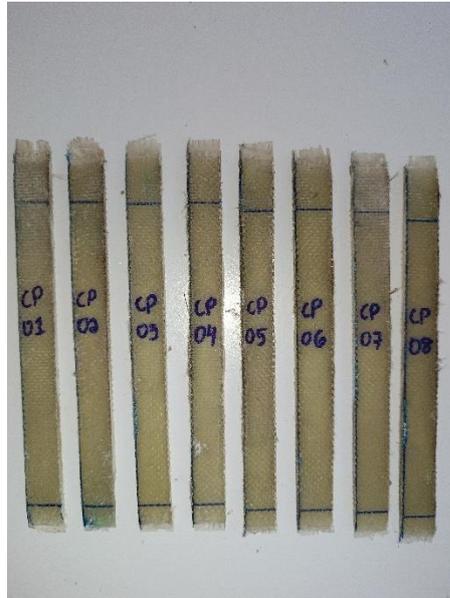
Figura 38 - Demarcações dos corpos de prova na chapa laminada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, os cortes foram executados na chapa. A Figura 39 mostra os CP's após essa etapa de corte.

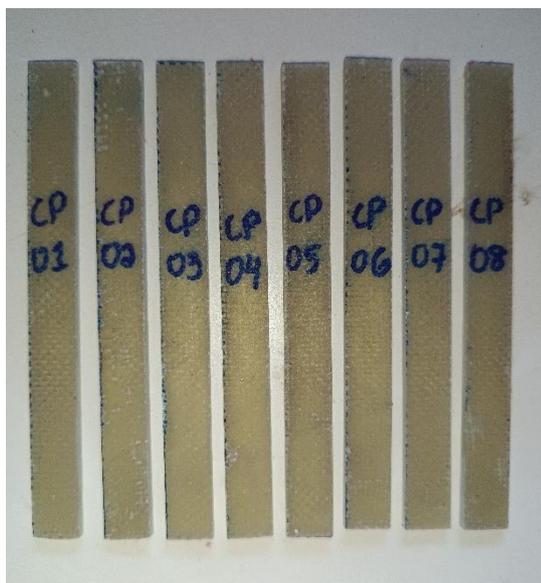
Figura 39 - CP's após o corte com a esmerilhadeira angular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguidamente, os corpos de prova foram lixados com uma lixa P80 para conferir as tolerâncias dimensionais mais estreitas e, dessa maneira, entrando em concordância com as dimensões estabelecidas pela norma ASTM D 7264/D 7264M – 07. Após realizar o lixamento em todas as faces dos CP's os mesmos ficaram como é mostrada na Figura 40.

Figura 40 - CP's após o procedimento de lixamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2. *Corpos de prova do compósito painel-sanduiche de 2 e 4 camadas*

Utilizou-se a norma ASTM C 393 – 001 para delimitar os parâmetros e requisitos de ensaio para os painéis-sanduiche. Ela estabelece a relação entre o vão dos apoios da máquina de teste de flexão e delimita o formato geométrico do corpo de prova. A norma afirma que a geometria do corpo de prova deve ser retangular. E em relação a espessura do CP, é mencionada que deve ser igual a soma da espessura do núcleo e das espessuras das camadas do reforço. Porém, com o objetivo de obter um espaçamento único de vão e facilitar o posicionamento dos apoios no momento dos ensaios, adotou-se a espessura do núcleo como uma aproximação para a espessura final do sanduiche. Visto que a variação é pequena, pois a espessura do tecido utilizado é de apenas 0,22 mm. Em respeito a largura do CP, é indicado que a mesma seja no mínimo duas vezes maior ou igual que a espessura do sanduiche e menor que a metade do comprimento do vão. Já em relação ao comprimento total do corpo de prova, deve-se tomar como referência o comprimento do vão e acrescentar mais 50 mm. O comprimento de vão delimitou-se a partir da Equação 8. Quanto a relação de proporcionalidade, é recomendado adotar 16:1 com uma tolerância de  $\pm 1$  podendo ser 15:1 ou 17:1. Por fim, é indicado no mínimo 5 CP's para a realização dos ensaios de flexão.

As dimensões dos corpos de prova, para os painéis-sanduiche, tanto de 2 camadas quanto

para 4 camadas de reforço, são exibidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões dos CP's.

<b>Componente</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade de medida</b>
Largura	40	mm
Comprimento do vão	150	mm
Comprimento do CP	200	mm
Espessura	10	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido o processo de corte ser manual inicialmente adotou-se dimensões maiores para os CP's. A largura inicial do CP foi de 45 mm e com um comprimento de 230 mm. Com isso, foram confeccionadas duas placas de 315 mm x 230. Uma placa com 4 camadas de reforço em cada face e outra com 2 camadas. A Figura 41 mostra a chapa laminada.

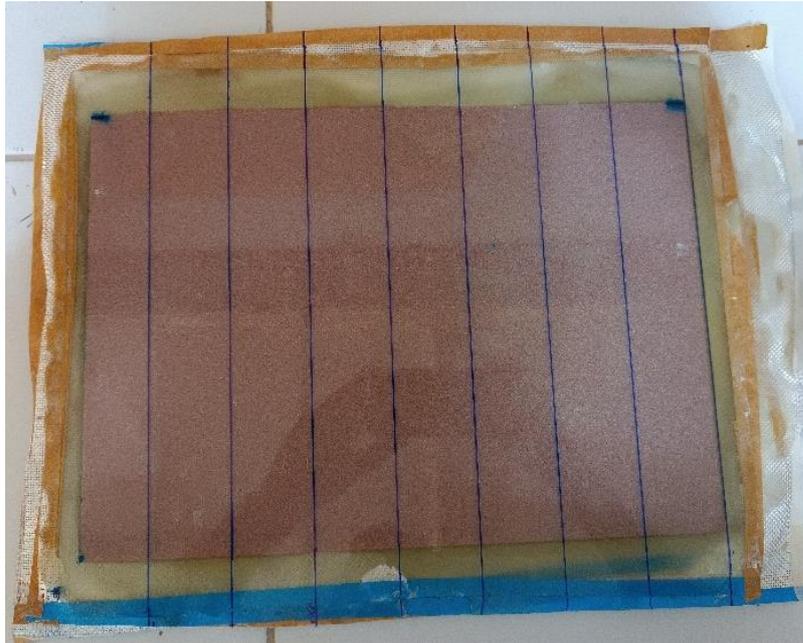
Figura 41 - Painel-sanduiche laminado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

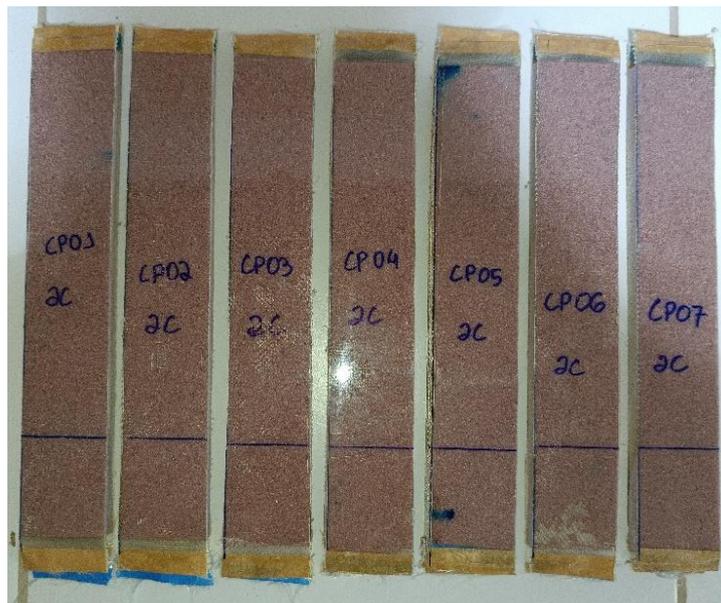
Após a laminação das chapas, os CP's foram delimitados e cortados. A Figura 42 e a Figura 43 exibem, respectivamente, as delimitações realizadas nas chapas e os corpos de prova.

Figura 42 - Delimitações dos CP's no painel-sanduiche.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - CP's do sanduiche cortados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foi realizado o processo de lixamento com uma lixa P80 e o estreitamento das tolerâncias dimensionais. Após o lixamento, foram feitos os cortes das bordas dos corpos de prova. E, conseqüentemente, as dimensões dos CP's entraram em concordância com as recomendações da norma ASTM C 393 – 001. Na Figura 44, é mostrado o resultado final.

Figura 44 - Corpos de prova finalizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### ***3.2.2. Corpos de prova da resina***

Para a confecção dos corpos de provas de resina, tomou-se como base a norma ASTM D 790 - 03. Em relação a fabricação dos CP's, averiguou-se a necessidade de desenvolver um molde. Após constatar essa necessidade, verificou-se que os CP's se enquadram no tópico de materiais moldados que é tratado no tópico 7.5 pela norma ASTM D790 - 17. Neste tópico, são definidas as dimensões dos corpos de prova do material moldado. Na Tabela 9, é possível observar as dimensões finais que são estabelecidas para os corpos de prova dessa categoria.

Tabela 9: Dimensões dos CP's de materiais moldados.

<b>Componente</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade de medida</b>
Largura	12,7	mm
Comprimento do vão	51,2	mm
Comprimento do CP	127	mm
Espessura	3,2	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em primeiro momento, o foco direcionou-se no desenvolvimento do molde com o auxílio de um software CAD. O molde foi desenvolvido com dimensões maiores devido aos fatores de contração da resina, imperfeições no molde e também ao processo de corte.

Logo em seguida, após a etapa de desenvolvido, o molde foi confeccionado utilizando uma impressora 3D com o filamento de ABS. O material que constitui a estrutura do molde, o termoplástico ABS, foi selecionado principalmente por não reagir com a resina poliéster e também por apresentar uma alta rigidez estrutural. Na Figura 45, o molde impresso é mostrado.

Figura 45 - Molde impresso



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao termino da impressão do molde, iniciou-se a fase de preparação para a fabricação dos CP's. Primeiramente, realizou-se a limpeza dos vidros e logo em seguida aplicou-se o spray de silicone nas faces das chapas de vidro e também no molde. Após isso, para delimitar a área de trabalho e facilitar na remoção dos corpos de prova, adicionou-se uma folha de papel A4 nas

faces das chapas e o spray de silicone também foi aplicado nas mesmas. Na Figura 46 e na Figura 47, é possível observar as chapas com as folhas e com o molde posicionado, respectivamente.

Figura 46 - Chapas de vidro preparadas para o processo de fabricação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

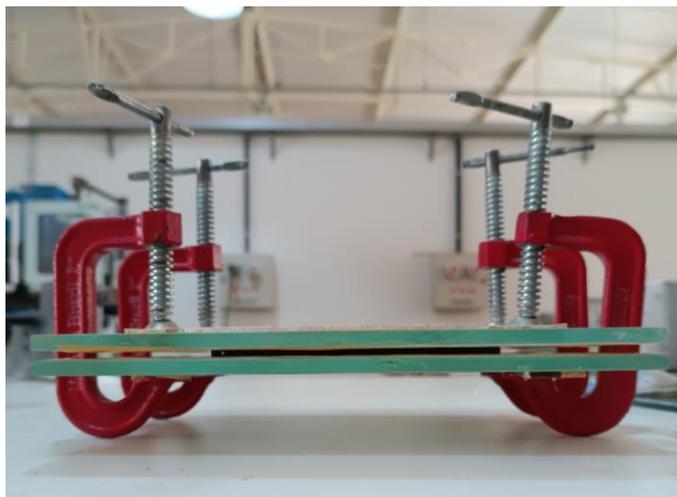
Figura 47 - Molde posicionado nas chapas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo em seguida, com o molde posicionado na área delimitada em uma das placas, adicionou-se a outra placa de vidro e, dessa forma, fechando o sistema. Para restringir a movimentação do molde durante o processo de cura da resina, foram utilizados grampos nas extremidades das chapas. O sistema é mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Grampos aplicados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguidamente, para estabilizar a estrutura utilizou-se uma morsa fixando as placas com o molde. A Figura 49, mostra o resultado final.

Figura 49 - Conjunto alocado na morsa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, com molde posicionado e a estrutura alocada na morsa, a resina foi adicionada no molde com o auxílio de um recipiente de plástico. Após o período de cura da resina, a estrutura foi retirada da morsa e posteriormente os corpos de prova desmoldados. A Figura 50, mostra os CP's após o desmolde.

Figura 50 - CP's de resina desmoldados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 51, observa-se a presença de resquícios das folhas de papel após o processo de desmolde dos corpos de prova. Logo, para retirar esses resquícios realizou-se a limpeza das superfícies utilizando uma esponja úmida.

Figura 51 - CP's com resquícios de papel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, ocorreu o procedimento de lixamento nos CP's para o estreitamento das tolerâncias dimensionais. A Figura 52, exibe os corpos de prova após todas as etapas realizadas e com as identificações designadas.

Figura 52 - CP's com as identificações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### ***3.2.3. Corpos de prova da espuma de PVC***

Para confecção dos corpos de prova da espuma de PVC, assim como para o sanduíche, utilizou-se a norma ASTM C 393 – 001. As dimensões dos CP's seguiram a mesma metodologia e as restrições impostas foram respeitadas. No tocante a relação de proporcionalidade do comprimento do vão, adotou-se uma relação de 16:1. Diante disso, os valores obtidos para os corpos de provas são expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões dos CP's da espuma de PVC.

<b>Componente</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade de medida</b>
Largura	40	mm
Comprimento do vão	150	mm
Comprimento do CP	200	mm
Espessura	10	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a delimitação das dimensões dos corpos de prova, realizou-se as marcações nas chapas e com o auxílio de uma lâmina, os CP's foram destacados. Neste caso, especificamente, a espuma apresenta uma resistência baixa quanto ao processo de corte. Por consequência disto, as dimensões iniciais dos CP's foram alcançadas sem a necessidade da etapa de lixamento das faces laterais. Na Figura 53, é mostrado os CP's destacados.

Figura 53 - CP's da espuma de PVC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3. Métodos de ensaio

#### 3.3.1. Ensaio de flexão

Para realizar os ensaios de flexão, nos CP's dos sanduiches e assim como nos corpos de prova do compósito laminado e da resina moldada, utilizou-se uma máquina universal de ensaios da EMIC com capacidade máxima de 100 kN. Quanto a célula de carga, utilizou-se uma célula de 30 kN. A Figura 54 e a Figura 55, exibe a máquina utilizada e a célula de carga, respectivamente.

Figura 54 - Máquina universal de ensaio utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

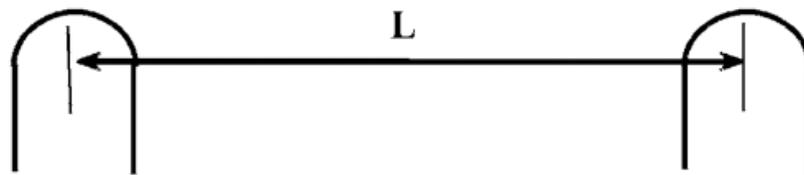
Figura 55 - Célula de carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um dos pontos primordiais no ensaio de flexão é a relação de proporcionalidade do vão. A relação pode variar, quando aplicável entre 16:1 até 64:1, com as devidas tolerâncias, dependendo do caso e da necessidade do corpo de prova a ser ensaiado e de acordo com as recomendações que as normas estabelecem para cada caso. No tocante ao comprimento do vão, o mesmo deve ser mensurado como é mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Medição do comprimento de vão.



Fonte: Norma ASTM D 7664/D 7264 M.

### 3.3.1.1. Ensaio de flexão nos CP'S dos painéis-sanduiche

Os parâmetros de ensaio e as dimensões dos corpos de prova dos painéis-sanduiche, como já mencionado anteriormente, tanto para o de 2 camadas quanto para o de 4 camadas de reforço nas faces do núcleo, foram estabelecidos em concordância com a norma ASTM C 393-00. Em relação a velocidade do ensaio, de acordo com a norma, foi utilizada uma velocidade correspondente a 1 mm/min. Pois, é mencionado que o tempo de ensaio deve ser entre 3 e 6 minutos, no máximo, até o momento no qual ocorre a falha. Em relação ao comprimento de vão

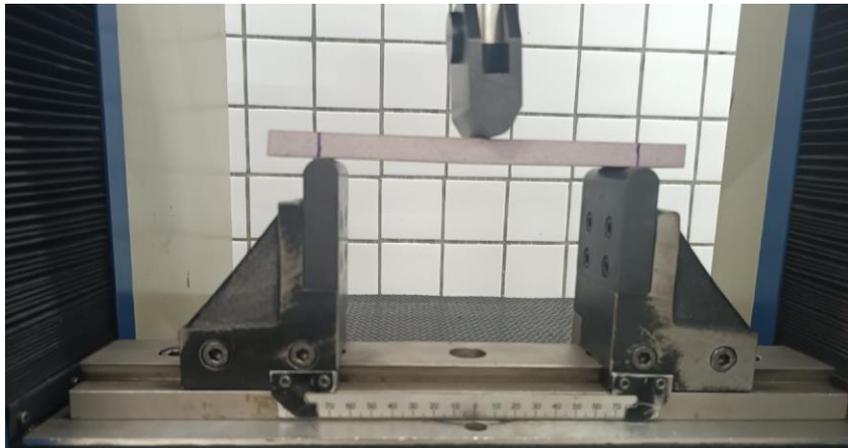
empregou-se um espaçamento de 150 mm. Na Figura 57 exibe a abertura do vão. Já na Figura 58, mostra o CP posicionado. Por fim, a Figura 59 mostra o início do ensaio de flexão.

Figura 57 - Apoios inferiores posicionados.



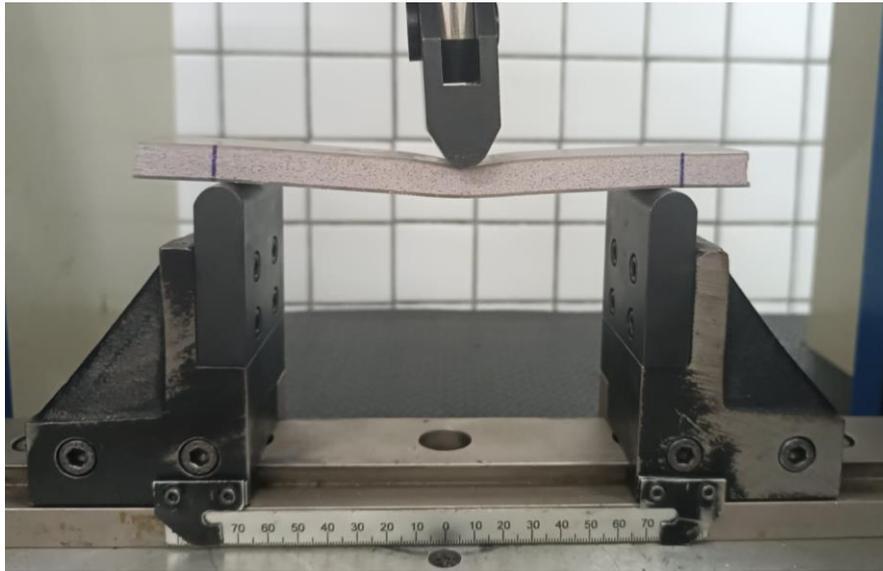
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - CP posicionado do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 – Início do ensaio de flexão.

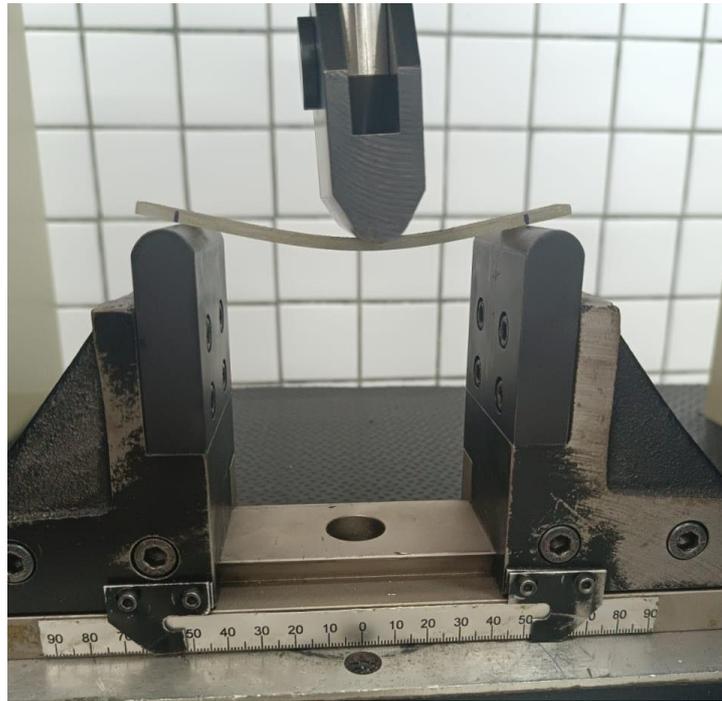


Fonte: Elaborado pelo autor.

### *3.3.1.2. Ensaio de flexão nos CP's do laminado*

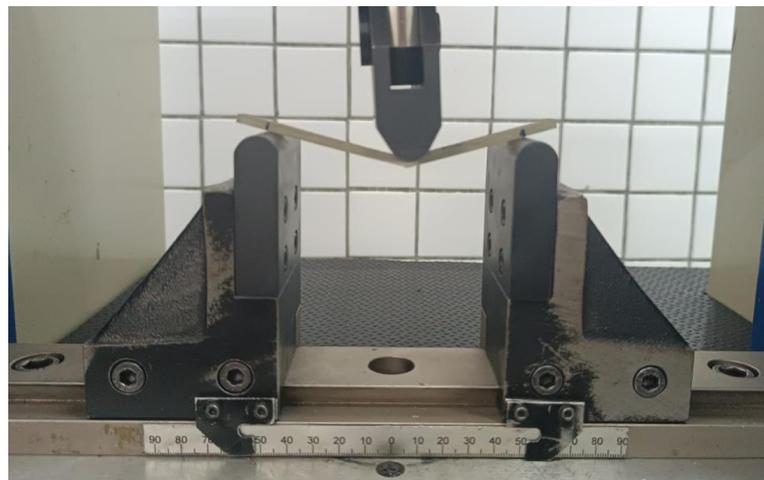
Em referência aos parâmetros de ensaio e as dimensões do CP do laminado, foram estabelecidos de acordo com a norma ASTM D 7264/D 7264 M. Diante disso, o comprimento de vão estabelecido foi de 128 mm. Em relação a velocidade de ensaio, adotou-se a velocidade recomendada de 2 mm/min. A Figura 60 mostra a abertura do vão e o posicionamento para o ensaio com os CP's laminados. Por fim, na Figura 61 é possível notar o desenvolvimento do ensaio de flexão.

Figura 60 - Abertura do vão, posicionamento e início do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 – Ensaio de flexão.



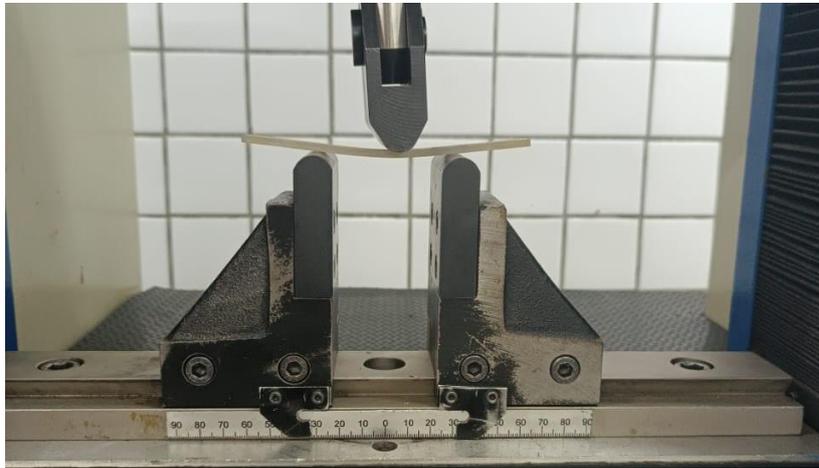
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.1.3. Ensaio de flexão nos CP's de resina

Para os ensaios dos corpos de prova da resina moldada utilizou-se, para definir os parâmetros do mesmo, a norma ASTM D 7264/D 7264 M. O comprimento de vão adotado foi de

51,2 mm e uma velocidade de 1 mm/min. A Figura 62, mostra os apoios posicionados e o corpo de prova alocado para o ensaio.

Figura 62 - Abertura do vão e início do ensaio nos CP's moldados de resina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.3.1.4. Ensaio de flexão nos CP's de espuma de PVC

Para os ensaios dos corpos de prova da espuma de PVC foi necessário recorrer a algumas adaptações. Pois, ao verificar-se a tensão de ruptura calculada do componente foi constatado, que a célula de carga disponível de 30 kN, não seria capaz de realizar a leitura dos dados referente a força. Uma vez que, a tensão de ruptura calculada foi de 1,4 Mpa. Ou seja, a força necessária para ocorrer a fratura do corpo de prova é de apenas 14 N.

Diante do exposto, para tornar o ensaio de flexão da espuma de PVC realizável, recorreu-se a uma elaboração de um sistema de aquisição de dados que é caracterizado da seguinte forma. Adotou-se, para a célula de carga, uma balança digital modelo SF - 400 com capacidade de mensurar até 10 kg. A balança é mostrada na Figura 63.

Figura 63 - Balança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo em seguida, com o auxílio da norma ASTM D 790 – 17, após delimitado o comprimento de vão, foram projetados os apoios com a abertura de vão estabelecida anteriormente. A posteriori, o cutelo também foi projetado e ambos os elementos foram modelados em um software CAD. Após o processo de modelagem dos elementos, realizou-se a impressão 3D tanto dos apoios quanto do cutelo. A Figura 64 e a Figura 65 mostram, respectivamente, o cutelo e os apoios impressos em 3D com o filamento de ABS.

Figura 64 - Cutelo fabricado por impressão 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65 - Apoio fabricado por impressão 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o término das impressões dos componentes, o apoio foi alocado na superfície da balança para mensurar a carga aplicada nos corpos de prova durante o ensaio. Para tal, utilizou-se uma máquina de ensaios universal. Com isso, o software da máquina de ensaios foi usado para registrar os pontos relacionados as deformações. Diante disso, para associar os pontos coletados referente as deformações dos corpos de prova com os pontos de carga, empregou-se uma máquina fotográfica com uma capacidade de 1 foto a cada 5 segundos. Ou seja, a cada 5 segundos, decorrido dos ensaios, a câmera registrava os dados de carga apresentados pela balança enquanto a deformação dos CP's era coletada pelo software da máquina. Dessa forma, tornou-se possível a associação entre os dados e viabilizou o ensaio de flexão na espuma de PVC. A Figura 66 e a Figura 67, exibem o sistema montado.

Figura 66 - Sistema montado para o ensaio de flexão nos CP's de espuma de PVC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

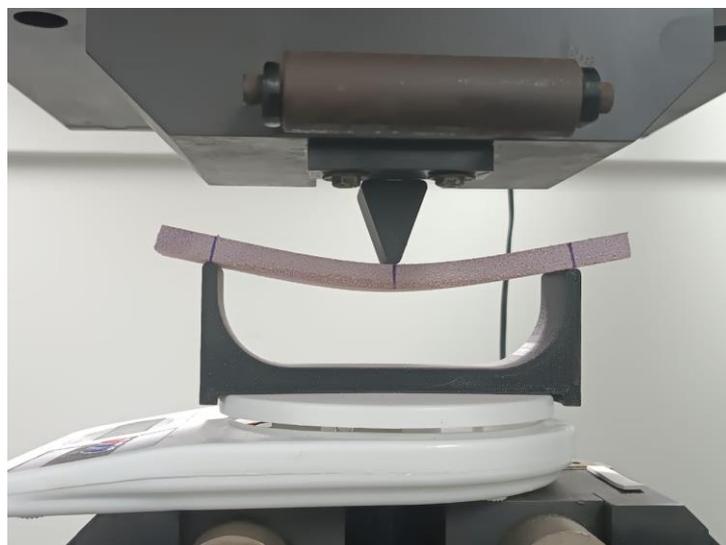
Figura 67 - Detalhes do sistema montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Figura 68, é possível observar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio e o posicionamento dele nos apoios. E na Figura 69, é exibido um registro realizado pela câmera em um dos ensaios.

Figura 68: Registro da execução do ensaio de flexão no CP's de espuma de PVC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, para o tratamento dos dados utilizou-se o software Excel e com a função PROCV os valores das deformações, a cada 5 segundos, foram resgatados e associados as cargas referentes. Dessa forma, possibilitando a construção dos gráficos para posteriores análises.

Figura 69: Registro realizado pela câmera.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4. RESULTADOS E DISCURSSÃO

### 4.1. Dimensões e massa dos corpos de prova

Na Tabela 11 são exibidos os valores das massas dos corpos de prova, assim como a média e o desvio-padrão para os valores mensurados.

Tabela 11 - Massa dos corpos de prova.

<b>Identificação dos corpos de prova</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>
<b>CP01_ESPUMA</b>	4		
<b>CP02_ESPUMA</b>	5		
<b>CP03_ESPUMA</b>	4	4,2	0,447213595
<b>CP04_ESPUMA</b>	4		
<b>CP05_ESPUMA</b>	4		
<b>CP1_RESINA</b>	4		
<b>CP2_RESINA</b>	4		
<b>CP3_RESINA</b>	3	3,6	0,547722558
<b>CP4_RESINA</b>	4		
<b>CP5_RESINA</b>	3		
<b>CP1_LAMINADO</b>	9		
<b>CP2_LAMINADO</b>	8		
<b>CP3_LAMINADO</b>	9	8,6	0,547722558
<b>CP4_LAMINADO</b>	9		
<b>CP5_LAMINADO</b>	8		
<b>CP1_SANDUICHE_2C</b>	21		
<b>CP2_SANDUICHE_2C</b>	21		
<b>CP3_SANDUICHE_2C</b>	21	20,8	0,447213595
<b>CP4_SANDUICHE_2C</b>	21		
<b>CP5_SANDUICHE_2C</b>	20		
<b>CP1_SANDUICHE_4C</b>	33		
<b>CP2_SANDUICHE_4C</b>	34		
<b>CP3_SANDUICHE_4C</b>	33	33,4	0,547722558
<b>CP4_SANDUICHE_4C</b>	33		
<b>CP5_SANDUICHE_4C</b>	34		

Fonte: Elaborado pelo autor.

As dimensões dos corpos de prova adotadas como base e os distanciamentos dos vãos para cada tipo de estrutura são exibidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros para os ensaios de flexão.

<b>Estrutura</b>	<b>Largura</b>	<b>Vão</b>	<b>Comprimento do CP</b>	<b>Espessura</b>
Resina	12,7	51,2	127	3,2
Espuma de PVC	40	150	200	10
Laminado	13	128	150	4
Sanduiches	40	150	200	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2. Propriedades mecânicas

Após realizar os ensaios de flexão foi possível obter-se a curva Tensão de flexão x deformação, dessa forma, possibilitando a obtenção, para cada corpo de prova ensaiado, a carga máxima, tensão de ruptura e a deformação máxima. Em relação as estruturas sanduiches, foram obtidos os seguintes parâmetros específicos: tensão de cisalhamento no núcleo, tensão nas faces, deflexão do sanduiche, rigidez a flexão do painel e a rigidez de cisalhamento do painel.

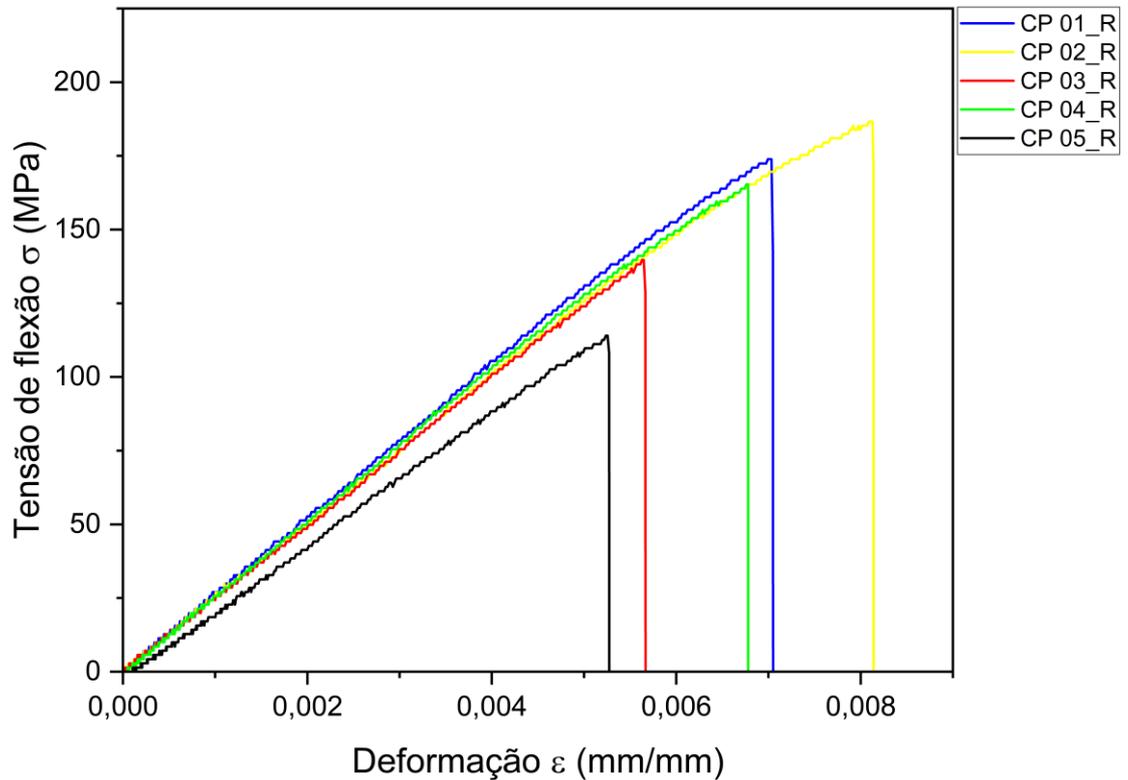
Primeiramente são apresentados e discutidos os resultados dos parâmetros em comum para todos os corpos de prova. Posteriormente, seguindo a mesma metodologia, a abordagem é realizada para as estruturas sanduiche. Diante disso, com o auxílio da análise de variância (ANOVA), os resultados obtidos nos ensaios foram correlacionados.

### 4.2.1. Tensão máxima de flexão e deformação máxima

#### 4.2.1.1. Resina

As curvas tensão de flexão vs deformação para os corpos de prova de resina poliéster são apresentadas no Gráfico 1. A carga, como já explicitado foi aplicada no meio da viga. Observa-se que o comportamento da curva é linear. Quanto aos resultados obtidos, o comportamento da curva já era o esperado. Pois, apresentam desempenho similar ao estudo realizado por Gama (2017).

Gráfico 1 - Tensão de flexão x deformação - resina poliéster.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se uma queda repentina da tensão no final da curva e os CP's apresentam uma baixa deformação. Diante disso, nota-se que a resina poliéster tende a se comportar como um material frágil. Na Tabela 13, são exibidos os principais resultados obtidos através do ensaio. É possível observar que a maior tensão máxima de flexão é apresentada pelo CP02 e assim como a deformação máxima. A resina, no geral, apresentou uma média de tensão máxima de flexão de 155,9042 MPa. A média da deformação máxima foi de 0,8140%. Por fim, as variações observadas são justificadas pelo processo de fabricação dos corpos de prova adotado. Pois, por se tratar de um processo manual as peças estão expostas a defeitos, principalmente, como vazios e formação de bolhas de acordo com os estudos de Te (2016) e Bittencourt (2015).

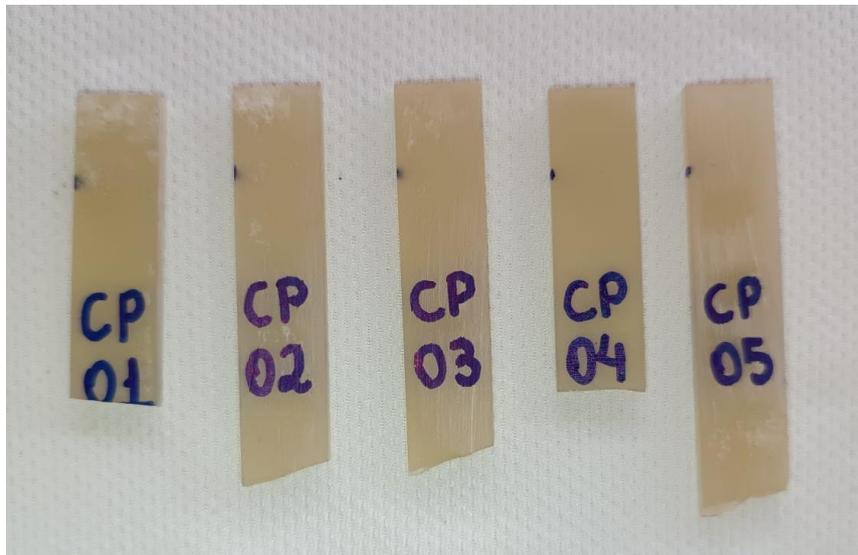
Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio de flexão para a resina poliéster.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Tensão máxima de flexão (Mpa)</b>	<b>Deformação máxima (%)</b>
<b>CP 01</b>	173,8608	0,7050
<b>CP 02</b>	186,6810	0,8140
<b>CP 03</b>	139,6593	0,5670
<b>CP 04</b>	165,3139	0,6780
<b>CP 05</b>	114,0059	0,5270
<b>Média</b>	155,9042	0,6582
<b>Desvio-padrão</b>	29,0584	0,1144

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 70, é possível observar as fraturas nos corpos de prova de resina após o ensaio de flexão realizado.

Figura 70 - Corpos de prova de resina após o ensaio.

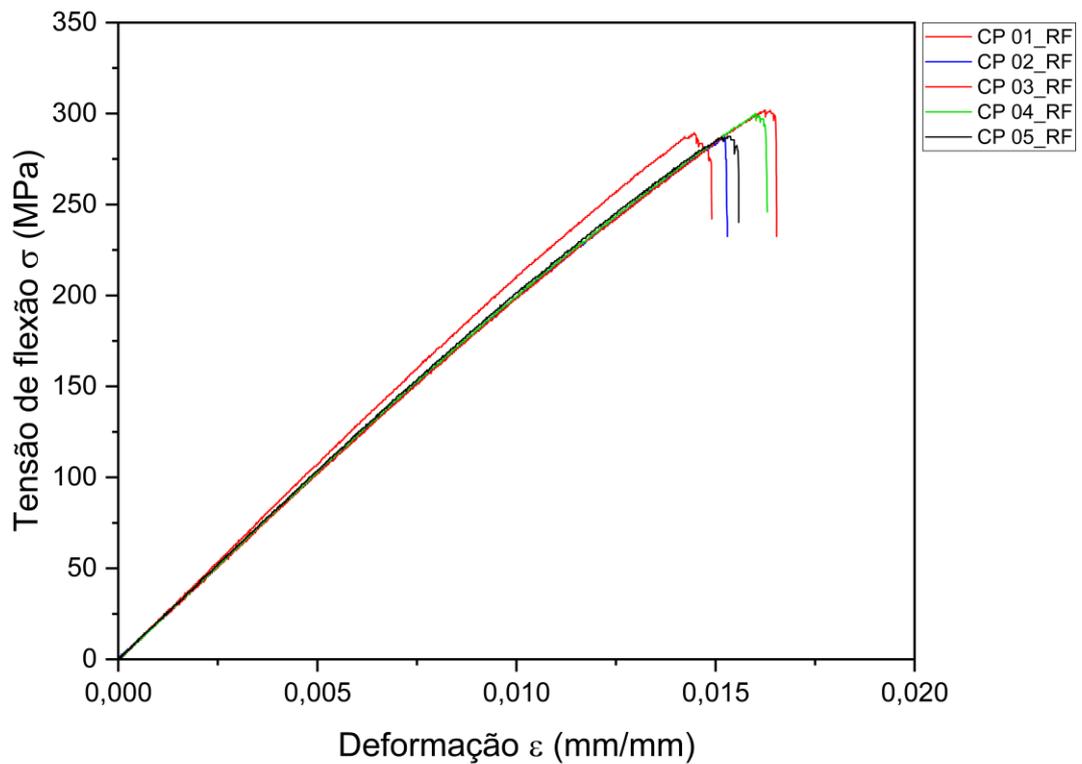


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.2. Laminado de fibra de vidro com matriz poliéster

As curvas de tensão de flexão e deformação são exibidas para os corpos de prova do laminado de fibra de vidro, tendo como matriz polimérica a resina poliéster no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Tensão de flexão x deformação - laminado de fibra de vidro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas apresentam um comportamento linear, sendo que na região final ocorre uma queda repentina da tensão de flexão indicando que o laminado tem uma tendência de se comportar como um material frágil. Na Tabela 14 os principais resultados, obtidos através do ensaio, são exibidos. Com isso, é possível observar que para a tensão máxima de flexão a média foi de 293,1987 MPa e a quanto para a deformação máxima a média corresponde a 1,6104 %.

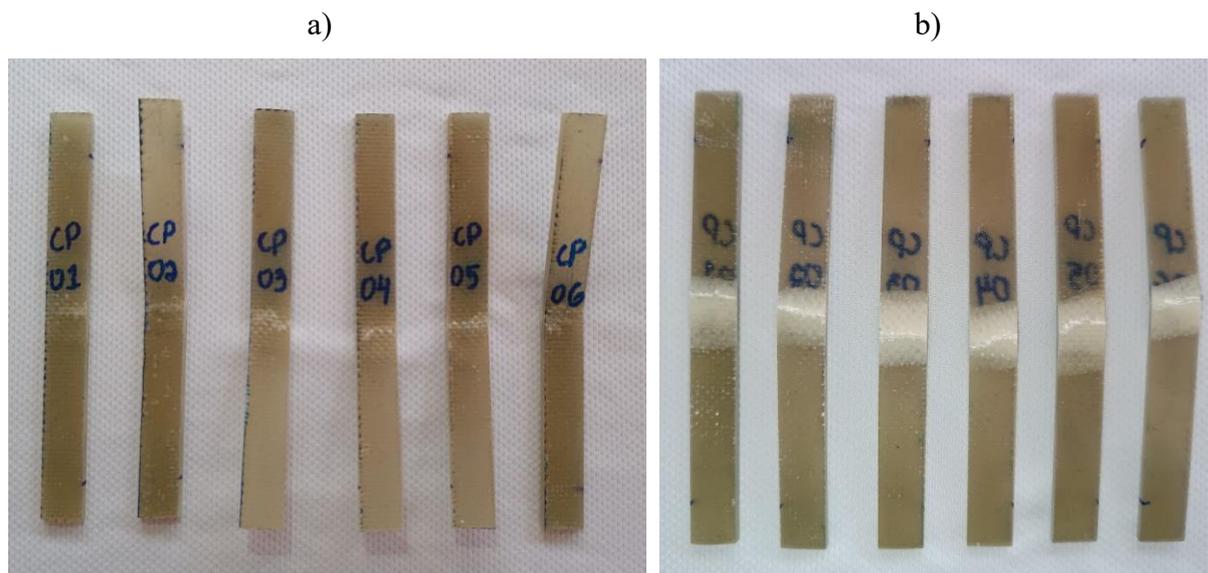
Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio de flexão para o laminado de fibra de vidro

Corpos de prova	Tensão máxima de flexão (Mpa)	Deformação máxima (%)
CP 01	289,3424	1,5200
CP 02	287,4142	1,5570
CP 03	301,8753	1,7230
CP 04	299,9471	1,6540
CP 05	287,4143	1,5980
<b>Média</b>	293,1987	1,6104
<b>Desvio-padrão</b>	7,1171	0,0802

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o CP 03 exibe os maiores valores quanto a tensão máxima de flexão e da deformação máxima, correspondendo a 301,8753 MPa e a 1,7230 % respectivamente. Na Figura 71 são exibidos os CP' após o ensaio.

Figura 71 - CP's após o ensaio: a) vista superior e b) vista inferior.

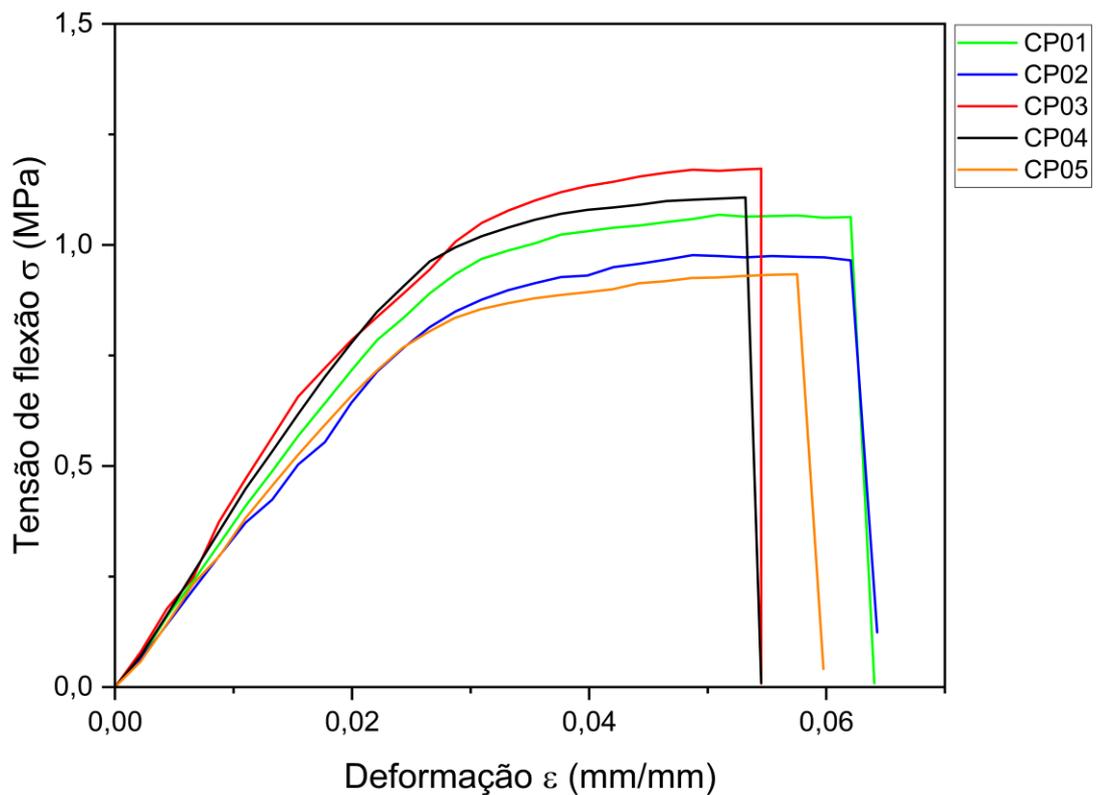


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.3 Espuma de PVC

As curvas características para os corpos de prova de espuma de PVC são apresentadas na Gráfico 3. A queda repentina da tensão de flexão na região final da curva

Gráfico 3 - Tensão de flexão x deformação - espuma de PVC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Tabela 15 são expostos os principais resultados obtidos no ensaio de flexão. Nota-se que, a tensão máxima de flexão e a deformação máxima tem como médias 1,045258 MPa e 0,05670206 (mm/mm), respectivamente.

Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio de flexão para a espuma de PVC.

Corpos de prova	Tensão máxima de flexão (Mpa)	Deformação máxima (%)
CP 01	1,0637	5,4314%
CP 02	0,9668	6,1997%
CP 03	1,1432	5,6602%
CP 04	1,1108	5,3165%
CP 05	0,9419	5,7433%
<b>Média</b>	1,0452	5,6702%
<b>Desvio-padrão</b>	0,0881	0,3420%

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações das tensões estão atreladas ao modo de como o material é constituído. Ou seja, no processo de fabricação das espumas um agente de insuflação é incorporado e quando aquecido, ele se decompõe e libera um gás. Dessa forma, as bolhas são geradas na massa na massa fluida de plástico. Porém, mesmo após o resfriamento as bolhas permanecem na estrutura e com isso dando origem a uma estrutura que se assemelha a uma esponja. Logo, com as variações dos vazios presentes na estrutura os parâmetros como tensão máxima de flexão e de deformação máxima são afetados (CORREA, 2010).

Por fim, observa-se que o CP 03 apresentou um maior desempenho quanto a tensão de flexão máxima que foi de 1,1432 MPa. Já o CP 02 apresentou a maior deformação máxima que foi de 6,1997%. Por fim, a Figura 72 exhibe os corpos de prova após os ensaios.

Figura 72 - CP's após o ensaio - a) vista superior e b) vista lateral.

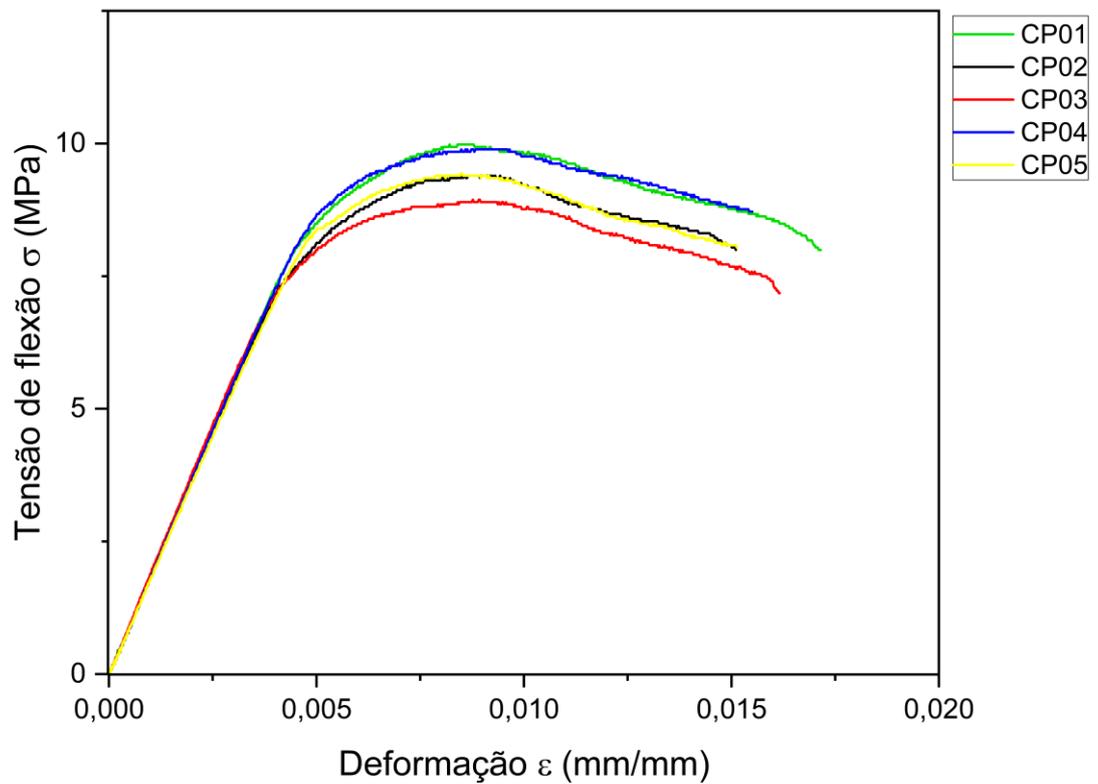


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.4. Sanduiche com 2 camadas de reforço

As curvas de tensão de flexão, para o sanduiche com 2 camadas de reforço, são exibidas no Gráfico .

Gráfico 4 - Tensão de flexão x deformação - sanduiche com 2 camadas de reforço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de tensão de flexão exibe um comportamento mais próximo a um material frágil. Por mais que tenha uma região de máxima tensão bem definida e que a mesma não seja a tensão de ruptura de fato, mas ambas são muito próximas.

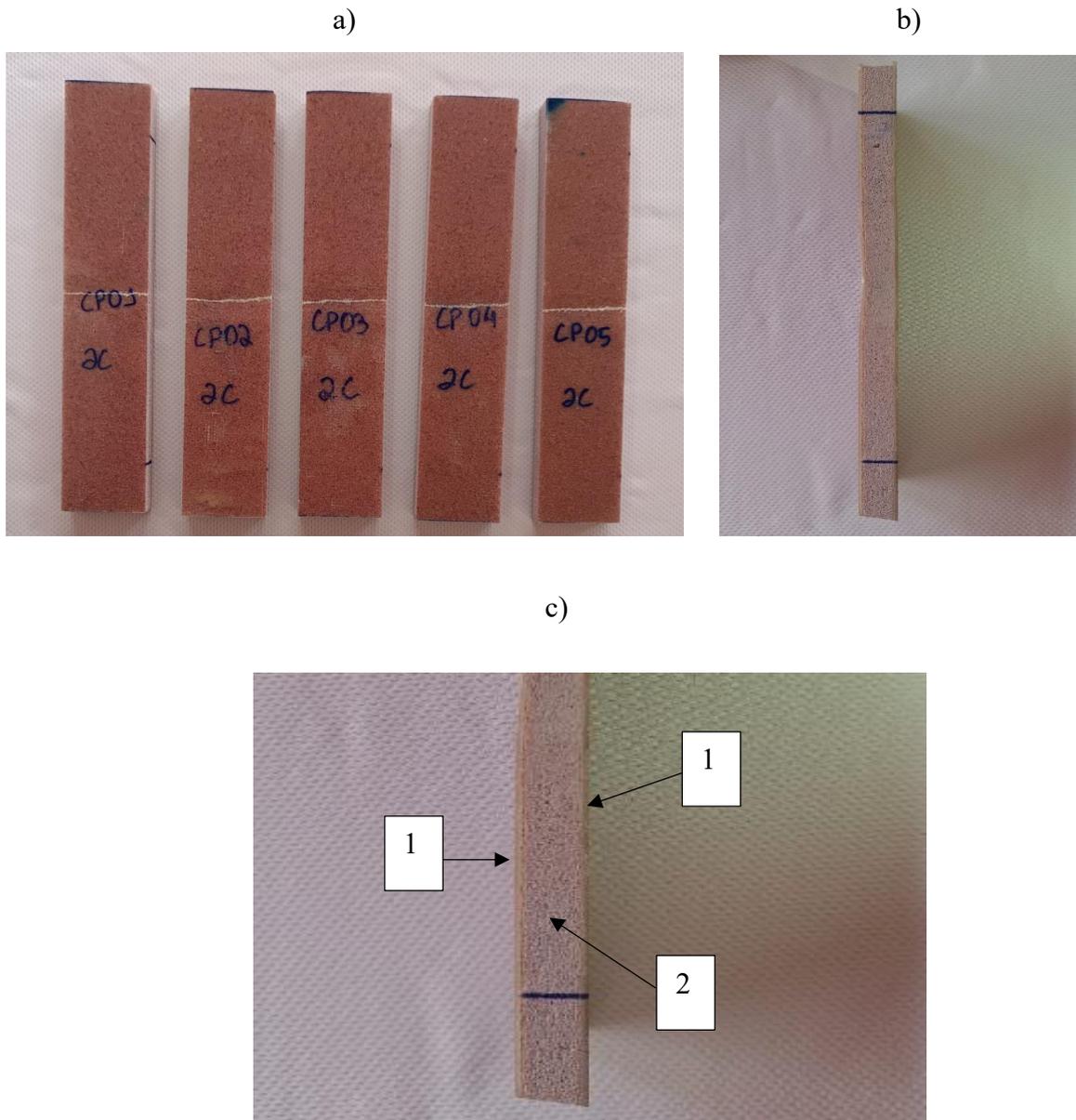
Tabela 16 - Dados obtidos no ensaio de flexão para o sanduíche com duas camadas de reforço.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Tensão máxima de flexão (Mpa)</b>	<b>Deformação máxima (mm/mm)</b>
<b>CP 01</b>	9,9808	1,7150
<b>CP 02</b>	9,4386	1,5130
<b>CP 03</b>	8,9421	1,6170
<b>CP 04</b>	9,8905	1,5500
<b>CP 05</b>	9,4386	1,5160
<b>Média</b>	9,5381	1,5822
<b>Desvio-padrão</b>	0,4169	0,0852

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 16 exhibe os resultados gerais para a estrutura sanduiche. Nota-se que a tensão máxima de flexão e a deformação máxima tem médias de 9,5381 MPa e de 1,5822 %, respectivamente. É visto que o CP 01 tem o melhor desempenho com uma tensão máxima de 9,9808 MPa e com uma deformação de 1,715 %. Na Figura 73 é possível observar os corpos de prova após a realização do ensaio de flexão. Pela Figura 73 – a), nota-se que a falha ocorreu na face superior e que houve um esmagamento do núcleo, como é exibido na Figura 73 – b). Por fim, na Figura 73 - c) o número 1 indica os reforços e o número 2 indica o núcleo estrutural.

Figura 73 - CP' do sanduiche após o ensaio - a) face superior, b) detalhe do modo de falha e c) descrição da estrutura.

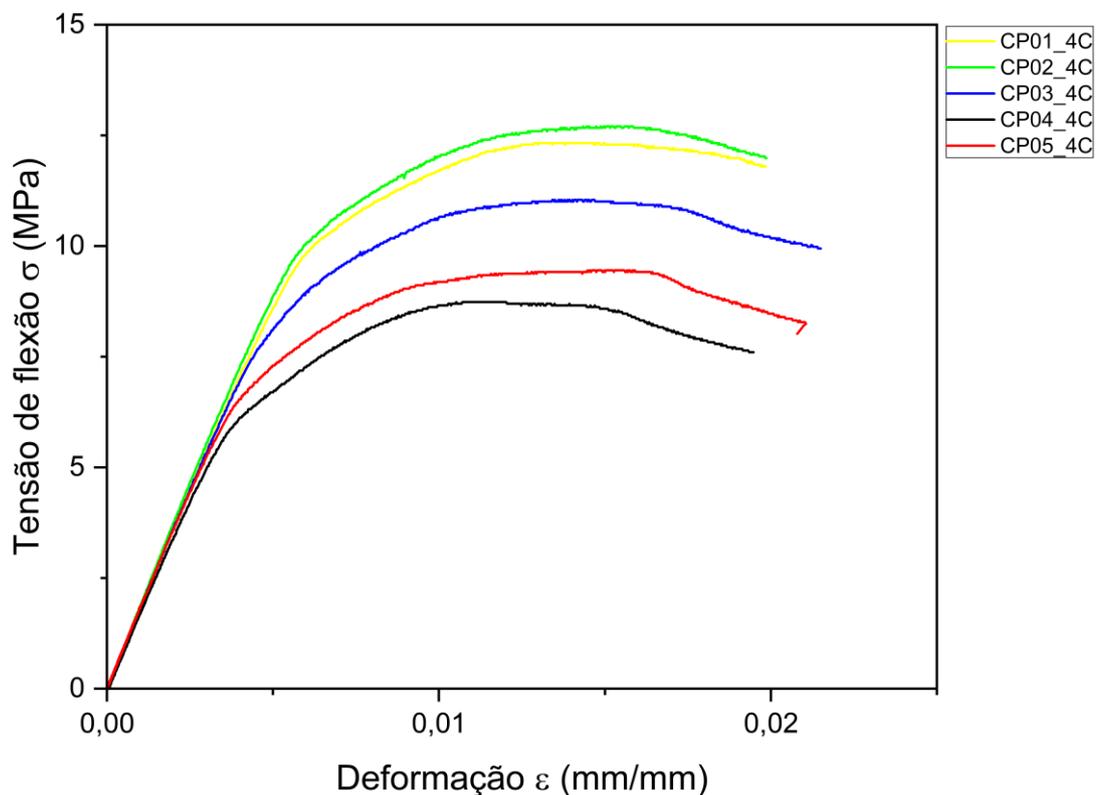


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.5. Sanduiche com 4 camadas de reforço

O Gráfico 5 exibe as curvas de tensão de flexão para os corpos de prova sanduiche reforçados com 4 camadas de fibra de vidro. Nele, nota-se um comportamento semelhante ao gráfico da estrutura sanduiche reforçado com 2 camadas de fibra. Logo, essa estrutura também apresenta um comportamento de um material frágil.

Gráfico 5 - Tensão de flexão x deformação - sanduiche com 4 camadas de reforço



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 17 expõe os resultados gerais obtidos para o sanduiche com quatro camadas de reforço. Nota-se que o CP 01 obteve o melhor desempenho quanto a tensão máxima de flexão, que foi de 12,32771 MPa. Quanto a deformação máxima o CP 03 se destacou exibindo um valor de 0,215 (mm/mm).

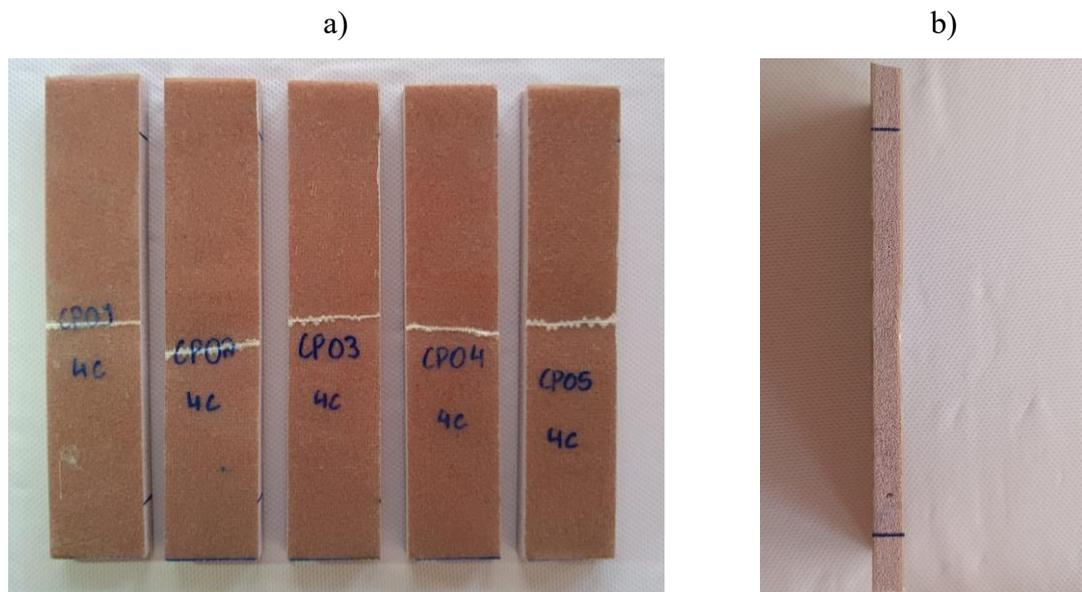
Tabela 17 - Dados obtidos no ensaio de flexão para o sanduíche com quatro camadas de reforço.

Corpos de prova	Tensão máxima de flexão (Mpa)	Deformação máxima (%)
CP 01	12,3277	1,9850%
CP 02	12,7057	1,9860%
CP 03	11,0421	2,1500%
CP 04	8,7352	1,9480%
CP 05	9,4538	2,1050%
<b>Média</b>	10,8529	2,0348%
<b>Desvio-padrão</b>	1,7382	0,0875%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A média para os parâmetros de tensão de flexão máxima e deformação máxima, são, respectivamente 10,8529 MPa e de 2,0348 %. Essa variação dos parâmetros estudados é atrelada ao processo de laminação manual, posicionamento dos corpos de prova nos apoios e pela constituição do núcleo. Na Figura 74, são exibidos os corpos de prova após o ensaio.

Figura 74 - CP's sanduíche após o ensaio - a) vista superior e b) detalhes da fratura.

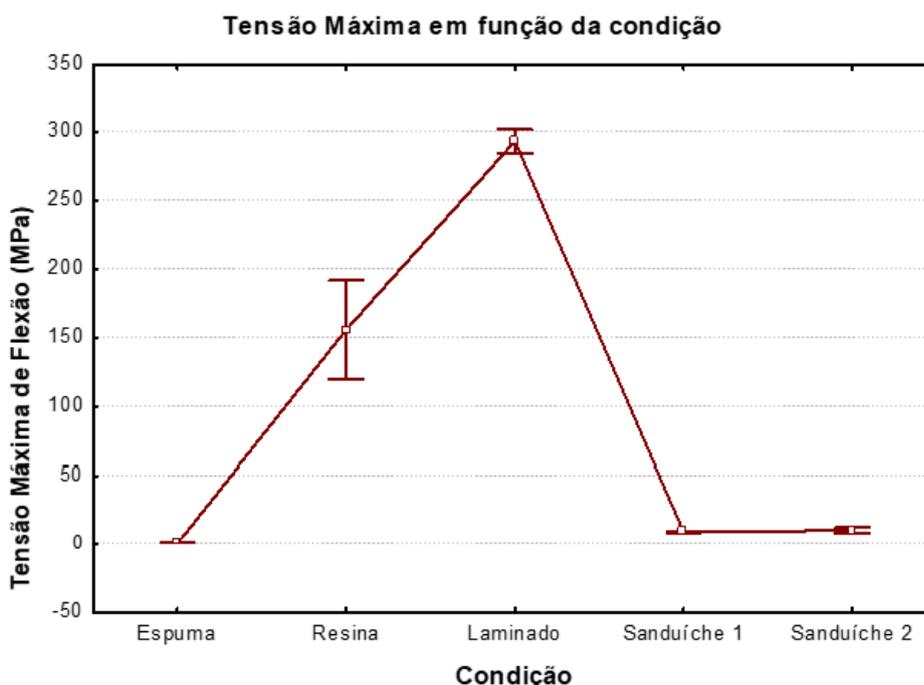


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.6. Análise geral da tensão máxima de flexão e deformação máxima

O objetivo desta análise, como já mencionado, é correlacionar as estruturas testadas para averiguar a influência da classe de cada estrutura na tensão de flexão e deformação máxima.

Gráfico 6 - Influência das condições na tensão máxima de flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto a tensão máxima de flexão, o Gráfico 6 corrobora que há uma variação significativa quando se compara somente a resina poliéster e o laminado de fibra de vidro. Essa variação é justificada pelo fato do laminado ser reforçado com fibra de vidro, que por sua vez, confere a estrutura uma maior resistência a flexão.

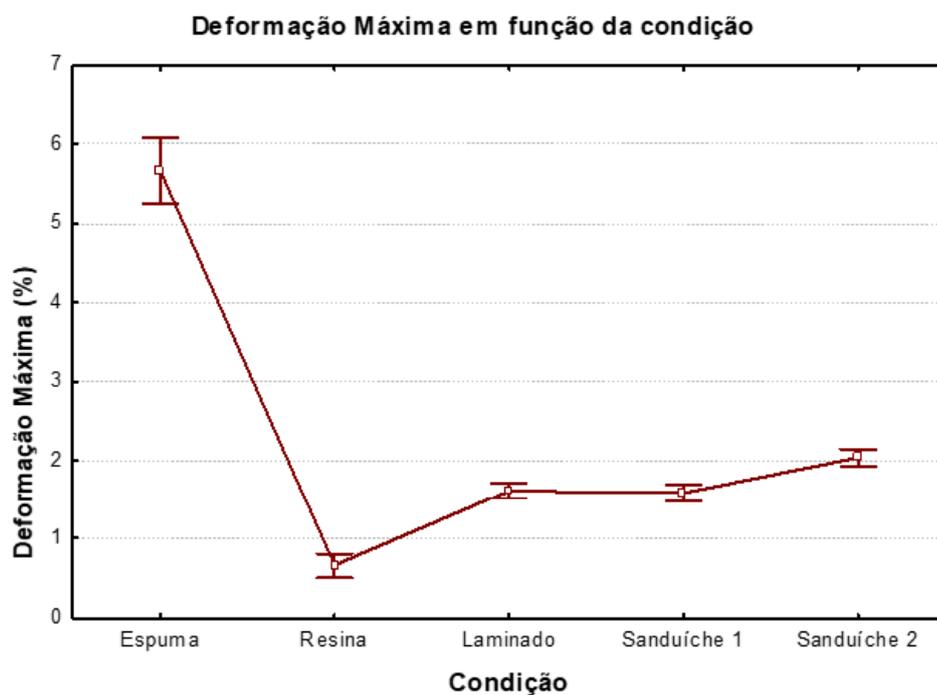
Quando se trata do laminado comparado a estrutura sanduíche, a tensão decai drasticamente. Isso ocorre por causa da forma construtiva das estruturas sanduíche, que é composta por um núcleo de baixa resistência a flexão e de baixa rigidez a flexão, com reforços de fibra de vidro que apresentam elevadas propriedades mecânicas e a matriz polimérica. Com isso, a estrutura resultante é a combinação das propriedades do núcleo, dos reforços e da matriz. Portanto, pelo Gráfico 6 é possível afirmar que o sanduíche 1, reforçado com 2 camadas de fibra de vidro em cada face, e o sanduíche 2, reforçado com 4 camadas de fibra de vidro, suportam tensões de flexão menores quando compara-se ao laminado de fibra de vidro, que

para atender as especificações de ensaios da norma ASTM D 7264, é constituído por 16 camadas do tecido de fibra de vidro. Em contrapartida, o número de camadas do laminado é muito superior em relação a estrutura do sanduiche e também a quantidade de resina presente no mesmo. Logo, tais fatores contribuem para a existência dessa diferença quando relacionados.

Em referência a variação da tensão máxima de flexão quando se compara o sanduiche 1 e o sanduiche 2, é possível afirmar que não houve uma mudança significativa. Pois, o motivo está atrelado ao fato de as duas estruturas possuírem o núcleo, tipo de reforço, variando apenas a quantidade de camadas, e a matriz polimérica iguais.

Por fim, há uma tendência da tensão de flexão decair quando se compara somente a espuma com a estrutura sanduiche. Visto que, no sanduiche, a estrutura é reforçada com tecido de fibra e as tensões tendem a ter menores magnitudes na espuma.

Gráfico 7 - Influência das condições na deformação máxima.



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 7, a influência das classes das estruturas é averiguada quanto ao parâmetro de deformação máxima. Percebe-se que a deformação máxima é impactada significativamente quando se correlaciona a resina poliéster com o laminado de fibra de vidro. Ou seja, o laminado apresenta uma deformação superior à da resina. Isso ocorre por causa do reforço de fibra.

Porém, a situação não é a mesma quando o laminado é associado as estruturas sanduiche.

Isto é, neste caso não houve uma alteração considerável na deformação máxima. Isso ocorre por causa da estrutura sanduiche ter como reforço a mesma fibra de vidro utilizada no laminado, já que no sanduiche, as propriedades do reforço e do núcleo são combinadas.

Quanto ao sanduiche 2, a estrutura apresenta uma tendência a maiores deformações em relação ao sanduiche 1. Contudo, não é possível tirar conclusões sobre a situação pois trata-se apenas de uma tendência.

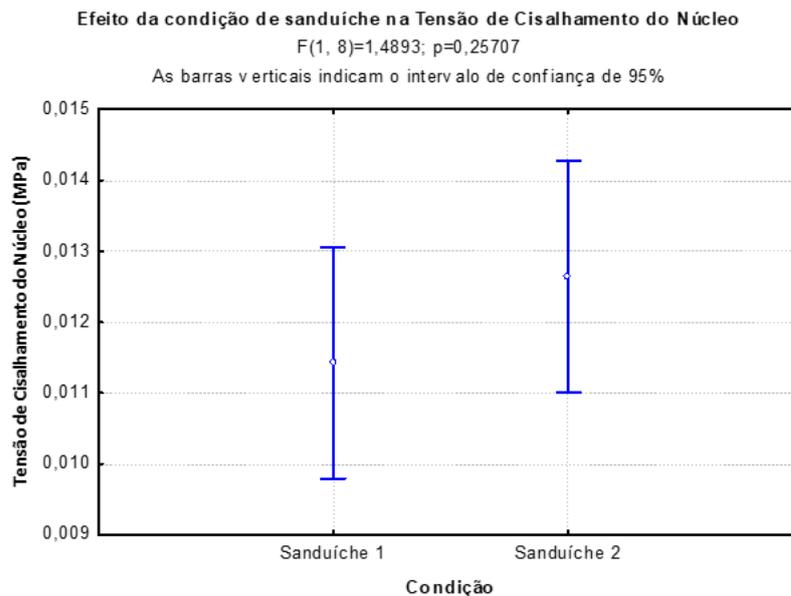
Por último, a espuma de PVC exibe uma elevada influência na deformação máxima em relação a todas as outras estruturas. Diante disso, pode-se afirmar que a espuma é responsável por conferir uma maior deformação nos painéis-sanduiche. E que a resina é a responsável pelo comportamento frágil dos componentes.

## 4.2.2. Análise dos parâmetros particulares dos compósitos sanduiche

### 4.2.2.1. Tensão de cisalhamento do núcleo

A correlação existente entre as estruturas sanduiches 1 e 2 e suas implicações na tensão de cisalhamento do núcleo é mostrado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Efeito dos sanduiche na tensão de cisalhamento do núcleo.



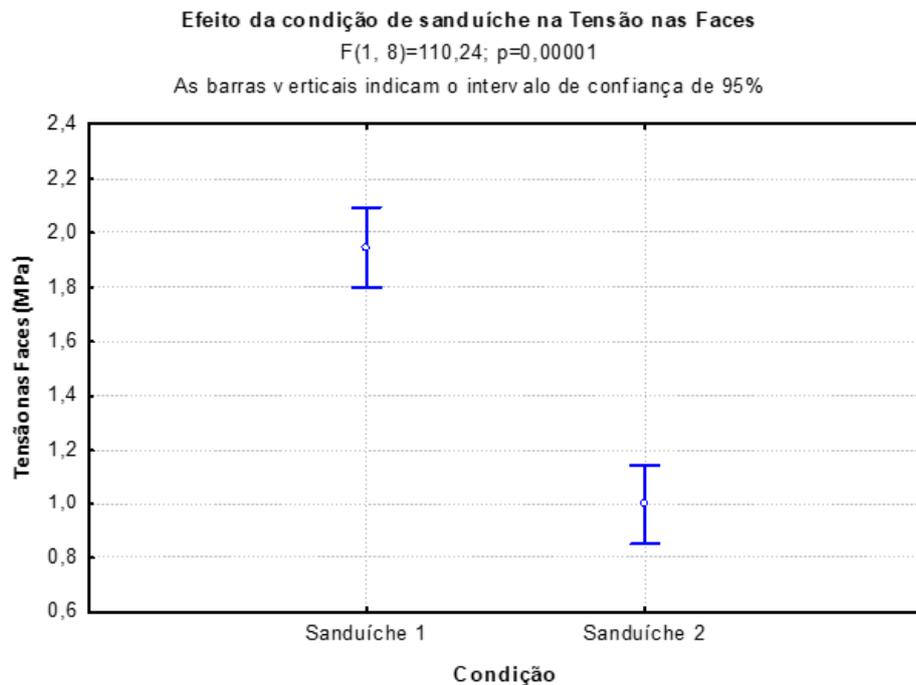
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante disso, o comportamento do gráfico explicita que não ocorreu uma mudança significativa na tensão de cisalhamento do núcleo quando se compara as estruturas dos sanduiches 1 e 2. Como já mencionado anteriormente, a diferença entre os compósitos sanduiche, no presente trabalho, é quantidade de camadas de reforços. Dito isto, ao analisar a equação 3 nota-se que os parâmetros que influenciam na tensão de cisalhamento do núcleo são a espessura, largura do corpo de prova e a espessura do núcleo. Portanto, a variação desse parâmetro não aconteceu pois não houveram mudanças no comprimento do corpo de prova, na largura e na espessura do núcleo ou nos materiais que constituem as estruturas que são os parâmetros

#### 4.2.2.2. Tensão nas faces

A correlação construída entre o sanduíche 1 e 2 com o parâmetro de tensão atuante nas faces das estruturas ensaiadas é mostrada no Gráfico 9.

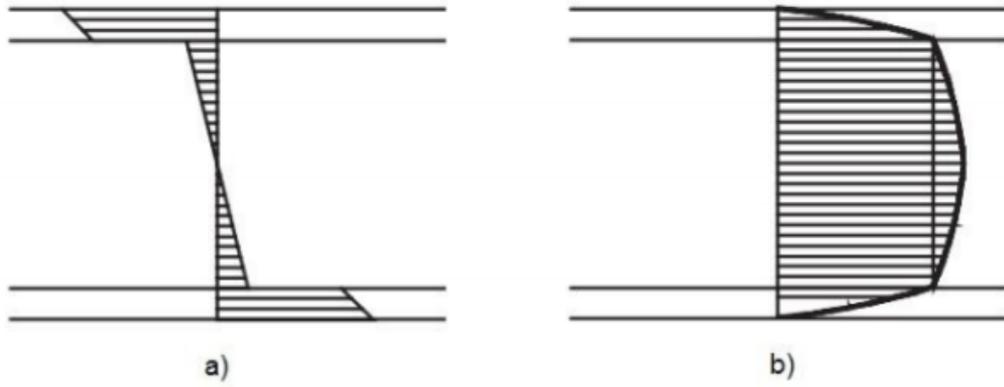
Gráfico 9 - Efeito dos sanduíche na tensão das faces.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o comportamento do gráfico, percebe-se a ocorrência de uma variação significativa das estruturas nas tensões atuantes nas faces do compósito. Ou seja, pelo Gráfico 9 é possível afirmar que a variação da quantidade de camadas de reforço nos compósitos sanduíche, tem influência na magnitude das tensões nas faces. Isso acontece devido ao aumento da espessura dos reforços acarretado pelo aumento da quantidade de camadas presentes na estrutura. Pois, na equação 4 o parâmetro  $t$ , espessura do reforço, evidencia que com o aumento da espessura do reforço e mantendo os demais parâmetros constantes, a tensão tende a decair, pois tem-se uma relação inversamente proporcional. E também dar-se pelo modo da distribuição de tensões da estrutura. A Figura 75, mostra uma representação de como ocorre essas distribuições.

Figura 75 - Distribuição de tensão - a) Tensões normais e  
b) tensões de cisalhamento.

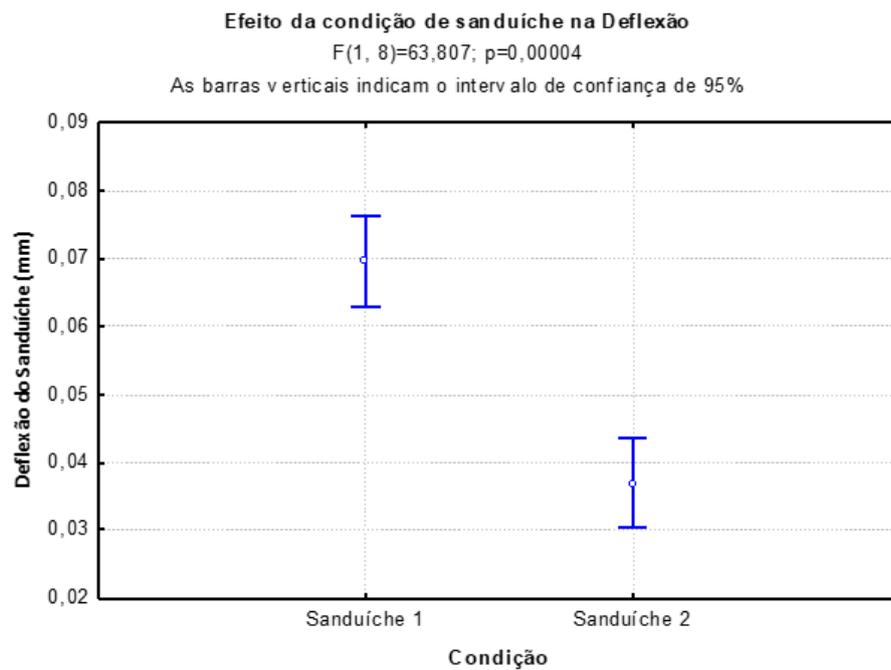


Fonte: Costa (2017).

#### 4.2.2.3. Deflexão do sanduiche e rigidez a flexão do painel

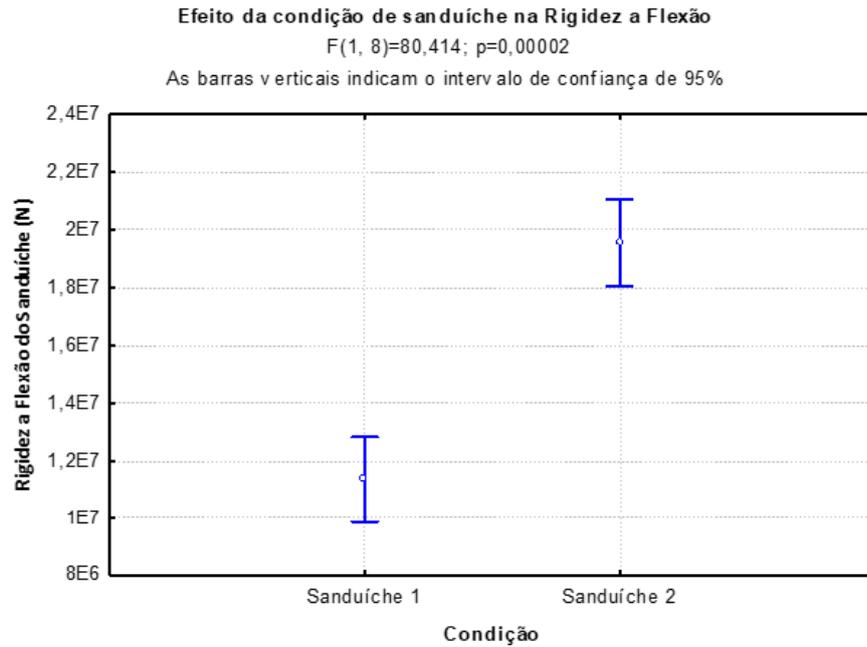
As correlações entre as estruturas sanduiches com a deformação e a rigidez a flexão dos painéis, respectivamente., são apresentadas no Gráfico 10 e no Gráfico 11.

Gráfico 10 - Efeito dos sanduiche na deflexão do painel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 - Efeito do sanduíche na rigidez a flexão.



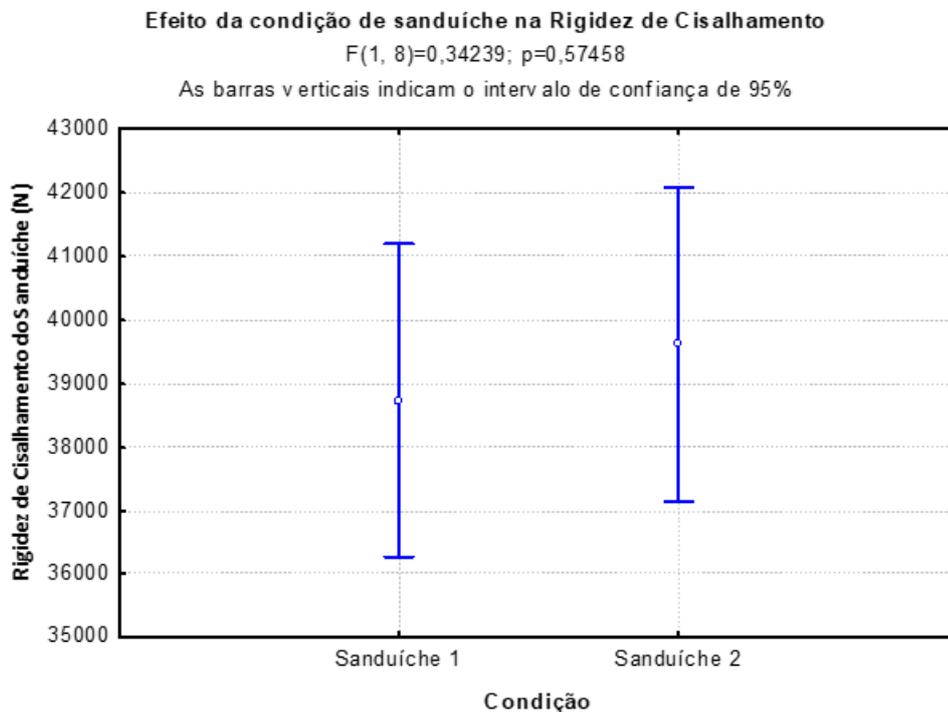
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os gráficos, é notório que a rigidez a flexão e a deformação são inversamente proporcionais. Ou seja, quando a rigidez a flexão do painel é elevada a deformação do mesmo é baixa e também é válido afirmar o inverso. Dito isto, a variação na quantidade de camadas de reforços nos sanduíches também afetam, de forma expressiva, nesses dois parâmetros mencionados. Este efeito está relacionado ao aumento da espessura do reforço que, por sua vez, aumenta significativamente a rigidez da estrutura quando se mantem o núcleo com parâmetros constantes. Pois, em concordância com Souza (2017) define-se a rigidez á flexão como a soma da rigidez a flexão das faces com a rigidez a flexão do núcleo. Portanto, corroborando a afirmativa estabelecida anteriormente.

#### 4.2.2.4. Rigidez de cisalhamento do painel

A correlação entre a rigidez ao cisalhamento do painel e os sanduíches em estudo é exibida no gráfico 12. É notório, pelo gráfico, que não ocorreu nenhuma influência da variação da quantidade de reforços nos sanduíches no parâmetro citado. Pois, a rigidez ao cisalhamento do painel está associada ao módulo de cisalhamento e a espessura do núcleo. Dessa forma, não houveram impactos no parâmetro pois o núcleo utilizado, em ambas estruturas, foi o mesmo e com espessuras constantes.

Gráfico 12 - Efeito do sanduíche na rigidez de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados que foram exibidos, anteriormente, caracterizam o comportamento dos corpos de prova constituídos apenas com resina poliéster, espuma de PVC, tecido de fibra com matriz poliéster e os compósitos sanduíche que apresentam condições distintas no tocante a variação da quantidade de reforço em cada estrutura, fabricados pelo método de laminação manual.

Ao observar os comportamentos das curvas tensão de flexão versus deformação, nota-se que há uma característica comum a todas as estruturas. Dito isto, a característica observada é o comportamento típico de materiais frágeis. Pois, há uma região nos gráficos na qual a tensão de flexão decai drasticamente.

Pode-se concluir, ao analisar os dados, que a resina poliéster possui a menor tolerância a deformação. O oposto acontece quando se menciona a espuma de PVC, pois, ela apresenta a maior taxa de deformação entre os materiais estudados. Observa-se também que o laminado de fibra de vidro suporta as maiores cargas de flexão, apresentando uma tensão máxima de flexão de 301,8753 Mpa.

Em relação aos compósitos sanduiches, pode-se concluir que a variação na quantidade de camadas de reforço na estrutura afeta diretamente nas tensões atuantes nas faces, na rigidez a flexão da estrutura e por fim, tem impactos significativos quando se menciona a deformação dos painéis.

Por fim, quanto ao processo de fabricação pode-se concluir que a laminação manual não é aplicável quando se trata da produção em escala e os defeitos, como as bolhas, possuem uma maior probabilidade de ocorrerem. Em contrapartida, o processo foi de fácil execução.

## 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, relacionados a presente pesquisa, as possíveis sugestões são listadas logo abaixo:

- I. Avaliar a influência da espessura do núcleo na rigidez a flexão do painel;
- II. Averiguar a influência da matriz da matriz epóxi nas propriedades estudadas no presente trabalho;
- III. Analisar a influência de núcleos não homogêneos nas tensões das faces;
- IV. Verificar a influência do processo de laminação a vácuo nas propriedades dos compósitos sanduiche.

## REFERÊNCIAS

AKOVALI, Güneri. **Handbook of composite**. 1. ed. Ankara: Rapra Technology Limited, 2001. 196 p. ISBN 1859572634.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 393 - 00**: Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. EUA: Astm, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 7264/D 7264M - 07**: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Eua: Astm, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 790 - 17**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Eua: Astm, 2017.

ANGRIZANI, Clarissa Coussirat. **Compósitos laminados híbridos de curauá/vidro: análise mecânica experimental e teórica**. 2011. 105 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ASILIEV, Valery V; MOROZOV, Evgeny V. **Mechanics and Analysis of Composite Materials**. Oxford: Elsevier, 2001. 418 p.

BITTENCOURT, Ana Paula Peixoto. **Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/poliéster**. 2015. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina., Joinville, 2015.

CALLISTER JUNIOR, William D; RETHWISH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2012. 845 p.

CARVALHO, Lais Rocha. **Fabricação e caracterização de estruturas sanduíche tipo colmeia com núcleo impresso por fusão e deposição de material termoplástico**. 2019. 148 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

CERCHIARO, Jorge Ruben. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

COMPOSITES, Hexcel. **HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY**. Eua: Hexcel Registered Trademark, 2000. 28 slides, color.

COSTA, João Manuel Guimarães e. **Análise de vigas laminadas compósitas à flexão**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Porto, 2017.

DIACENCO, Adriano Amaro. **MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS ESTRUTURAIS INCORPORANDO MATERIAL VISCOELÁSTICO PARA O CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO**. 2010.

81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais Para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

GAGLIARDO, Debora Pierini. **Análise de estruturas sanduíche:** parâmetros de projeto. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GAMA, Daniel Pereira Nunes. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche.** 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

GAMA, João Paulo de Freitas. **Compósitos poliméricos a base de tecido híbrido carbono/vidro:** tração e compressão uniaxiais. 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

Garcia, A.M. de A. **Análise do campo de deslocamentos de vigas sandwich à flexão de 3 e 4 pontos.** Dissertação em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2014, 63 p.

GONÇALVES, Kim Martineli Souza. **Análise numérica e experimental de falhas em juntas de materiais compósitos tipo single-lap fixadas por parafusos escareados.** 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

KUTZ, Myer. **Mechanical engineers' handbook.** 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 996 p. v. 1. ISBN 9781118907481.

PETRAS, Achilles. **Design of Sandwich Structures.** 1998. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia, Universidade de Cambridge, Cambridge, 1998.

SOUZA, Gilberto Pereira de. **Avaliação de critério de falhas de compósitos poliméricos reforçados aplicados a viga sob carregamento de flexão.** 2003. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

TE, Kwai Nan. **Estudos das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono e manufaturados pelos processos de laminação manual, infusão de resina e pré-impregnado.** 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

TITA, Volnei. **Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico.** São Carlos: Engenharia Aeronáutica - Usp, 2007. 71 p.

VENTURA, Ana Mafalda F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas.** Ciência & Tecnologia Dos Materiais, Lisboa, v. 21, ed. 3, 2009.