UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

EDUARDO SHOITI SATO

**Fabricação e Ensaaios Experimentais de Biocompósitos:
Estudo Comparativo visando Aplicações em Estruturas Aeronáuticas**

São Carlos

2018

EDUARDO SHOITI SATO

**Fabricação e Ensaaios Experimentais de Biocompósitos:
Estudo Comparativo visando Aplicações em Estruturas Aeronáuticas**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos,
da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Aeronáutica

Orientador: Prof. Assoc. Volnei Tita

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA DA
EESC-USP.

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S253f Sato, Eduardo Shoiti
Fabricação e Ensaios Experimentais de
Biocompósitos: Estudo Comparativo visando Aplicações em
Estruturas Aeronáuticas / Eduardo Shoiti Sato;
orientador Volnei Tita. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Aeronaves -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2018.

1. Materiais compósitos. 2. Biocompósitos. 3.
Poliuretana. 4. Fibra de vidro. 5. Fibra de algodão. 6.
Processo de fabricação. 7. Análises experimentais. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: **EDUARDO SHOITI SATO**

Título da dissertação: "Fabricação e ensaios experimentais de biocompósitos: estudo comparativo visando aplicações em estruturas aeronáuticas"

Data da defesa: 01/08/2018

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Volnei Tita**

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Dr. **Antônio Joaquim Mendes Ferreira**

(Universidade do Porto/UPORTO)

Prof. Associado **Antonio José Felix de Carvalho**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Resultado:

Aprovado

APROVADO

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Luís Fernando Costa Alberto**

*“Dedico este trabalho ao meu Mestre,
Ikeda Sensei, à minha família, minha
eterna companheira e todos meus amigos
e companheiros. ”*

AGRADECIMENTOS

Tenho plena ciência de que este pequeno espaço e alguns parágrafos não são suficientes para agradecer a todas as pessoas que contribuíram, não só para a realização deste trabalho, mas também para a minha formação em todos os aspectos, os quais me permitiram cumprir mais uma etapa.

Primeiramente, agradeço ao meu mestre, **Dr. Daisaku Ikeda**, quem me ensinou o verdadeiro caminho da revolução humana e mostrou que é possível transformar e vencer qualquer situação baseado na fé, ação corajosa e determinação.

Agradeço sinceramente aos meus pais, **Kiyoshi Sato** e **Noêmia Tizuko Nakaie Sato** que souberam com o diálogo, postura e sabedoria, mostrar-me o caminho da perseverança, honestidade e coragem. Agradeço profundamente todo o carinho, confiança e condições por todas as oportunidades proporcionadas sem poupar quaisquer esforços.

Ao meu irmão, **Leandro Yuji Sato**, por se fazer presente, mesmo em longínquas distâncias, pelo companheirismo e confiança em minha pessoa.

A minha companheira **Amanda Sayuri Guimarães** por todo amor, companheirismo e confiança dedicado à minha pessoa, estando inteiramente presente em mais uma etapa de minha vida. Agradeço também, a todos seus familiares, Braga Barbosa Guimarães, Alice Fukuyo Guimarães, Thais e Gustavo por todo apoio nesta fase.

Agradeço a toda minha **família**, a qual sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos para a materialização desta etapa.

Ao Professor **Volnei Tita** pela confiança e oportunidade dada neste presente trabalho. Agradeço sinceramente toda a experiência e conhecimento repassados, além de toda a sua paciência durante este processo.

Ao amigo e colega de trabalho **Marcos Vinícios Hiroshi Taguti** pela sincera amizade e paciência, bem como a transmissão de conhecimento e experiência.

A um grande companheiro e amigo, **Ricardo Shin-iti Miyamoto** pela sincera preocupação, amizade, companheirismo, direcionamentos e materialização de oportunidades.

Por fim, agradeço à Universidade de São Paulo pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho. Além disso, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela bolsa de pesquisa concedida.

“A verdadeira grandiosidade significa que, mesmo que tenham se esquecido do que fizeram pelos outros, nunca se esqueçam do que os outros fizeram por você e sempre façam o máximo para pagar suas dívidas de gratidão. Pessoas assim irradiam integridade, profundidade de caráter, um coração nobre e encanto.”

(Jossei Toda)

“Seriedade & Sinceridade”

“Jamais ser derrotado”

RESUMO

SATO, Eduardo Shoiti. **Fabricação e ensaios experimentais de biocompósitos: Estudo comparativo visando aplicações em estruturas aeronáuticas**. 2018. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A utilização de estruturas empregando materiais de fontes não-renováveis tem impactado o ambiente devido à dificuldade em sua reutilização e reciclagem. Por isso, vêm se buscando soluções em materiais obtidos de fontes renováveis, sendo estes muitas vezes referidos como biocompósitos. Assim, é estratégico entender melhor o comportamento destes materiais, bem como prever os mecanismos de falha, desenvolvendo modelos de materiais mais precisos que venham a diminuir o número de ensaios experimentais, melhorando a segurança, o tempo e a economia em projetos estruturais. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de um biocompósito fabricado a partir da poliuretana derivada do óleo de mamona reforçada com fibra de algodão. Ensaios experimentais de tração e flexão foram realizados a fim de avaliar o comportamento mecânico do novo biocompósito, comparando o mesmo com outros materiais compósitos, tais como: epóxi reforçada por fibra de vidro e por fibra de algodão, bem como a poliuretana reforçada por fibra de vidro. Foi utilizado o método DIC (Digital Image Correlation), o qual auxiliou nas análises do comportamento mecânico dos materiais investigados. Buscou-se também, estimar as frações mássicas e volumétricas dos compósitos fabricados. Dessa forma, foram realizados ensaios de termogravimetria (TGA – Termogravimetric Analysis) para os compósitos reforçados com fibras vegetais, e de degradação da matriz através de sua queima para compósitos reforçados com fibras sintéticas. Ademais, avaliou-se a qualidade da interação fibra-matriz a partir de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), verificando o modo de falha apresentado pelos compósitos, bem como a necessidade de desenvolver um processo para o tratamento superficial das fibras vegetais para maior adesão à poliuretana. Além disso, foi realizado um estudo comparativo em termos de comportamento mecânico do biocompósito frente a epóxi reforçada por fibra de vidro e por fibra de algodão, bem como a poliuretana reforçada por fibra de vidro e outros estudos da literatura. Concluiu-se que os compósitos reforçados por fibras de algodão devem ter reforços com tratamento superficial adequado a fim de que melhorem suas propriedades mecânicas e de que reduzam sua variabilidade em termos de respostas. Ou seja, isto é uma condição inicial necessária para que se vislumbre o emprego desse material no

segmento aeronáutico. Por fim, em função de requisitos aeronáuticos, em trabalhos futuros, deve-se realizar testes de toxidade e inflamabilidade considerando o emprego de aditivos. E, portanto, deverá novamente ser investigado o comportamento mecânico do biocompósito aditivado a fim de se avaliar como serão afetados os valores de módulo de elasticidade, máxima tensão e máxima deformação.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Biocompósitos, Poliuretana; Fibra de vidro, Fibra de algodão, Processo de Fabricação, Análises experimentais.

ABSTRACT

SATO, Eduardo Shoiti. **Manufacturing and experimental analyses of biocomposites: Comparative study focus on aeronautical structures applications.** 2018. 110p. Dissertation (Master) – Sao Carlos School of Engineering, Univesity of Sao Paulo, Sao Carlos, 2018.

The use of structures made of materials from non-renewable sources has impacted the environment due to the difficulty in their reuse and recycling. For this reason, solutions have been sought using materials obtained from renewable sources, which are often referred to as biocomposites. Thus, it is strategic to better understand the behavior of these materials, as well as to predict failure mechanisms, developing more accurate material models that will reduce the number of experimental tests, improving safety, time and economy in structural design. Thus, this work aims to study the mechanical behavior of a biocomposite made of polyurethane derived from castor oil reinforced by cotton fiber. Experimental tensile and flexural tests were performed to evaluate the mechanical behavior of the new biocomposite, comparing the same to other composite materials, such as epoxy reinforced by glass fiber and cotton fiber, as well as polyurethane reinforced by glass fiber. The DIC (Digital Image Correlation) method was used in order to aid the analysis of mechanical behavior of investigated materials. It was also sought to estimate the mass and volume ratios of manufactured composites. Thus, thermogravimetric (TGA) tests were performed for the composites reinforced by vegetal fibers, and matrix degradation through their firing for composites reinforced by synthetic fibers. In addition, the fiber-matrix interaction quality was evaluated by SEM (Scanning Electron Microscopy), verifying the failure mode presented by the composites, as well as the need to develop a process for the surface treatment of vegetal fibers for improving the adhesion to the polyurethane. In addition, a comparative study was carried out in terms of the mechanical behavior of the biocomposite against epoxy reinforced glass and cotton fiber, as well as polyurethane reinforced by glass fiber and other literature studies. It was concluded that composites reinforced by cotton fibers should have reinforcements with adequate surface treatment in order to improve their mechanical properties and to reduce its variability in terms of responses. Thus, this is an initial condition necessary for the use of this material in the aeronautical segment. Finally, due to aeronautical requirements, in future work, toxicity and flammability tests must be carried out considering the use of additives. Therefore, the

mechanical behavior of the biocomposite with additives should be again investigated in order to evaluate how the modulus of elasticity, maximum stress and strain values were affected.

Keywords: Composite materials, Biocomposites, Castor Oil, Glass fiber, Cotton fiber, Manufacturing process, Experimental analyses.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1 - Avião cargueiro Airbus A400M: asas fabricadas em compósito polimérico reforçado com fibra de carbono.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 1-2 - Classificação dos compósitos em função do reforço empregado.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1-3 - Classificação dos polímeros biodegradáveis segundo Averous e Boquillon (2004).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2-1 - Grupo epóxico.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2-2 - (a) Componentes do S-Class da Mercedes Benz fabricados com fibras naturais; (b) Audi A2.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-3 - (a) Intercalação do pré-polímero e agente de cura; (b) Aumento do peso molecular do polímero; (c) Gelificação e vitrificação; (d) Cura completa.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2-4 - (a) Hand-Lay-Up; (b) Wet-Lay-Up</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2-5 – Processo RTM.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2-6 – VARTM.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2-7 - Tecido Unidirecional (UD) de fibra de vidro.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2-8 - Medidas e marcações dos corpos-de-prova (Unidades: [mm])......</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-9 - (a) Serra de disco (b) Processo de corte a laser.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-10 – Processo de formação do polietileno, através de seu respectivo monômero.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2-11 – Temperatura e duração pós-cura na influência da cura de uma resina viniléster.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2-12 - (a) Detalhe do CDP; (b) Ensaio de tração.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2-13 – Máquina utilizada nos ensaios mecânicos realizados.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2-14 – Preparação de amostras para ensaios e análise por correlação de imagens.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2-15 - ROI selecionada para análise do software CORRELI: (a) Imagem de referência; (b) Campo de deslocamento na direção 1 do CDP deformado</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2-16 – Balança SHIMDZU</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2-17 - Disposição das amostras.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2-18 – Instrumento de análise termogravimétrico.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2-19 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a 0°.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2-20 – Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a 90°.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2-21 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a +/-45°.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2-22 - Tensão de cisalhamento versus distorção angular para o compósito de epóxi reforçado por fibra de vidro.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2-23 – Imagens dos laminados em epóxi reforçados por fibras de vidro orientadas à 0°, 90° e ±45° (da esquerda para direita).</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2-24 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2-25 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 90°.</i>	<i>43</i>

<i>Figura 2-26 – Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a $\pm 45^\circ$.</i>	44
<i>Figura 2-27 – Tensão de cisalhamento versus distorção angular para compósito epóxi reforçado por fibra de algodão.</i>	45
<i>Figura 2-28 - Curvas tensão-deformação de flexão para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.</i>	47
<i>Figura 2-29 - Curvas tensão-deformação de flexão para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a $\pm 45^\circ$.</i>	48
<i>Figura 2-30 – Análise termogravimétrica para fibras de algodão.</i>	49
<i>Figura 2-31 – Análise termogravimétrica para compósitos em epóxi reforçado por fibra de algodão.</i>	50
<i>Figura 2-32 – Picos analisados pelo método de deconvolução utilizado para estimar frações mássicas para o compósito de epóxi reforçado por fibra de algodão.</i>	51
<i>Figura 2-33 – Imagens dos laminados em epóxi reforçados por fibras de algodão orientadas à 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ (da direita para a esquerda).</i>	53
<i>Figura 2-34 – Comparação dos valores de máxima tensão à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão.</i>	55
<i>Figura 2-35 - Comparação dos valores de limite de deformação à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão.</i>	56
<i>Figura 2-36 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão.</i>	57
<i>Figura 2-37 – Comparação dos valores do coeficiente de Poisson para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão.</i>	57
<i>Figura 2-38 – (a) Compósito reforçado por fibra de vidro; (b) Compósito reforçado por fibra de algodão.</i>	59
<i>Figura 3-1 – Preparação do molde: Agente desmoldante</i>	63
<i>Figura 3-2 – Molde forrado com tecido peel ply.</i>	64
<i>Figura 3-3 – Primeira metade de volume de resina PU sendo vertida sobre o molde.</i>	64
<i>Figura 3-4–Distribuição da resina na área do molde.</i>	65
<i>Figura 3-5 – Empilhamento das camadas.</i>	65
<i>Figura 3-6–Aplicação da tela plástica.</i>	66
<i>Figura 3-7 – Fechamento da bolsa para vácuo.</i>	66
<i>Figura 3-8 – Vedação da bolsa de vácuo.</i>	67
<i>Figura 3-9 – Aplicação de vácuo.</i>	67
<i>Figura 3-10 – Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de vidro orientadas a 0°.</i>	73
<i>Figura 3-11 – Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de vidro orientadas a 90°.</i>	74
<i>Figura 3-12 – Curvas tensão-deformação de tração para poliuretana da mamona reforçada com fibra de vidro a $\pm 45^\circ$.</i>	75
<i>Figura 3-13 – Imagens dos laminados em PU reforçados por fibras de vidro, orientadas à 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ (da direita para a esquerda).</i>	78

<i>Figura 3-14 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.</i>	79
<i>Figura 3-15 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a 90°.</i>	80
<i>Figura 3-16 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a ±45°.</i>	81
<i>Figura 3-17 - Curvas tensão-deformação de flexão para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.</i>	82
<i>Figura 3-18 – Análise termogravimétrica para compósitos em PU.</i>	83
<i>Figura 3-19 – Picos analisados no método de deconvolução utilizado para estimar a fração mássica dos constituintes do compósito reforçado por fibra de algodão.</i>	84
<i>Figura 3-20 – Imagens dos laminados em PU reforçados por fibras de algodão.</i>	86
<i>Figura 3-21 – Comparação dos valores de máxima tensão à tração para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.</i>	87
<i>Figura 3-22 – Comparação dos valores de limite de deformação para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.</i>	88
<i>Figura 3-23 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.</i>	89
<i>Figura 4-1 – Comparação de valores de máxima tensão sob tração.</i>	91
<i>Figura 4-2 - Comparação de valores de máxima tensão sob tração (desconsiderando os resultados para os compósitos de epóxi reforçados por fibra de vidro a 0°).</i>	92
<i>Figura 4-3 – Comparação de valores de máxima deformação sob tração.</i>	94
<i>Figura 4-4 - Comparação de valores de máxima deformação sob tração (desconsiderando os resultados para PU pura).</i>	95
<i>Figura 4-5 - Comparação de valores de módulo de elasticidade sob tração.</i>	96
<i>Figura 4-6 - Comparação de valores de módulo de elasticidade sob tração (desconsiderando os resultados de epóxi reforçada por fibra de vidro a 0°).</i>	97
<i>Figura 4-7 – Comparação de valores de máxima tensão sob flexão 3-pontos.</i>	98
<i>Figura 4-8 - Comparação de valores de máxima deformação sob flexão 3-pontos.</i>	99
<i>Figura 4-9 - Comparação de valores módulo de elasticidade sob flexão 3-pontos.</i>	100

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2-1 - Dados dos CDPs de tração de epóxi reforçada com fibras de vidro.</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 2-2 – Dados dos CDPs de tração de epóxi reforçada com fibras de algodão.</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 2-3 -Dados dos CDPs de flexão 3-Pontos de epóxi reforçada com fibras de algodão.</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 2-4 - Resultados para o compósito de epóxi reforçada com fibras de vidro sob tração.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2-5 – Valores de frações volumétricas dos compósitos em fibra de vidro.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 2-6 - Resultados para o compósito de epóxi reforçado com fibras de algodão sob tração.</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 2-7 – Valores de referência de propriedades mecânicas referente ao compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro.</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 2-8 - Resultados para o compósito de epóxi reforçada com fibras de algodão sob flexão.</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 2-9 – Valores obtidos através do método de deconvolução para o compósito de epóxi reforçado por fibras de algodão.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 2-10 – Valores médios de resistência, limite de deformação, módulo de elasticidade à tração e coeficiente de Poisson: compósito de epóxi reforçado com fibra de vidro (FV) e algodão (FA).</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 3-1 – Geometria dos CDPs de tração de PU reforçada com fibras de vidro.</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 3-2 – Geometria dos CDPs de tração de PU reforçado com fibras de algodão.</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 3-3 – Geometria dos CDPs de flexão 3-pontos de PU reforçado com fibras de algodão.</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 3-4 – Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de vidro sob tração.</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 3-5 - Valores de frações volumétricas dos compósitos em fibra de vidro.</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 3-6 - Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de algodão sob tração.</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 3-7 - Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de algodão sob flexão 3-Pontos.</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 3-8 – Valores obtidos através do método de deconvolução para o compósito de PU reforçado por fibras de algodão.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 4-1 - Valores de tensão máxima utilizados para comparação.</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 4-2 - Valores de deformação máxima utilizados para comparação.</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 4-3 - Valores de módulo de elasticidade utilizados para comparação.</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 4-4 - Valores de tensão máxima à flexão utilizados para comparação.</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 4-5 - Valores de limite de deformação à flexão utilizados para comparação.</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 4-6 - Valores de módulo de elasticidade à flexão utilizados para comparação.</i>	<i>101</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{xx}	Momento de inércia de área	mm^4
T_g	Temperatura de transição vítrea	$^{\circ}C$
E	Módulo de elasticidade	GPa
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima	MPa
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima	%
X_T	Resistência à tração paralela à fibra	MPa
X'_T	Limite de deformação paralelo à fibra	%
E_{11}	Módulo de elasticidade na direção das fibras	GPa
ε_{22}	Deformação perpendicular à fibra	%
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano 1-2	
Y_T	Resistência à tração perpendicular à fibra	MPa
Y'_T	Limite de deformação perpendicular à fibra	%
E_{22}	Módulo de elasticidade perpendicular às fibras	GPa
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano 1-2	GPa
ν_f	Fração volumétrica de fibra	%
V_c	Volume do compósito	mm^3
M_f	Massa de fibra	g

ρ_f	Densidade da fibra	$\frac{g}{mm^3}$
ρ_m	Densidade da matriz	$\frac{g}{mm^3}$
V_m	Volume da matriz	mm^3
v_m	Fração volumétrica da matriz	%
m_m	Fração mássica da matriz	%
ρ_c	Densidade do compósito	$\frac{g}{mm^3}$
t	Espessura	mm
$\sigma_{máx}^f$	Máxima tensão de flexão	MPa
$\varepsilon_{máx}^f$	Máxima deformação de flexão	%
E^f	Módulo de elasticidade à flexão	GPa

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXI
SUMÁRIO	XXIII
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	6
2. COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI	7
2.1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS: PROCESSO DE FABRICAÇÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS	10
2.2.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO	10
2.2.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO	22
2.2.3. ENSAIO DE FLEXÃO 3-PONTOS	27
2.2.4. MEDIDAS DE FRAÇÃO MÁSSICA E VOLUMÉTRICA	27
2.2.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	30
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE VIDRO	31
2.3.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO	31
2.3.2. FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA OS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO	36

2.3.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO	39
2.4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE ALGODÃO	41
2.4.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO	41
2.4.2.	ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS	46
2.4.3.	FRAÇÕES MÁSSICAS PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO	49
2.4.4.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO	53
2.5.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
2.6.	CONCLUSÕES PARCIAIS	58
3.	<u>COMPÓSITOS DE RESINA POLIURETANA DERIVADA DO ÓLEO DA MAMONA</u>	61
3.1.	INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	61
3.2.	MATERIAIS E MÉTODOS: PROCESSO DE FABRICAÇÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS	62
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE VIDRO	73
3.3.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO	73
3.3.2.	FRAÇÃO MÁSSICA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO	76
3.3.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO	77
3.4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE ALGODÃO	78
3.4.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO	78
3.4.2.	ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS	81
3.4.3.	FRAÇÃO MÁSSICA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO	83
3.4.4.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO	85
3.5.	COMPARAÇÕES DE RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
3.6.	CONCLUSÕES PARCIAIS	89
4.	<u>COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES</u>	91
4.1.	ENSAIOS DE TRAÇÃO	91
4.2.	ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS	98
5.	<u>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</u>	102
6.	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	105

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

Pesquisas sobre os materiais compósitos iniciaram-se no início da década de 60, com o objetivo de obter um material rígido como o metal, mas de menor densidade (NIU, 1995). Além da reduzida massa específica, a indústria aeronáutica tem buscado cada vez mais por materiais que sejam resistentes, rígidos, com resistência à abrasão e ao impacto e, além disso, que não sofram corrosão com facilidade. Segundo Callister (2007), essa combinação de características pode ser obtida através dos compósitos, que os define como um material multifásico, visando à obtenção de melhores propriedades a partir do princípio de ação combinada. Devido às propriedades, tais como, resistência à corrosão, durabilidade e elevada taxa de resistência por peso, os compósitos reforçados por fibra de vidro têm sido utilizados em diversos setores como estruturas aeronáuticas (Figura 1-1), automotivas e marítimas, tubulação de pressão, etc (KOBAYASHI, 2012).

Figura 1-1 - Avião cargueiro Airbus A400M: asas fabricadas em compósito polimérico reforçado com fibra de carbono.

Fonte: Airbus Group (2015); Copyright Airbus Military S.L. (2006).

Os compósitos poliméricos, que utilizam a resina epóxi como matriz, são utilizados geralmente em aplicações que visam substituir o metal, a madeira e outros materiais tradicionais, mostrando ser eficazes na reparação de componentes metálicos e tubulações. Esses compósitos podem ser reforçados com fibras de vidro de alta resistência, carbono, kevlar, ou fibras de boro, que possuem grande potencial na indústria aeroespacial (AYAD, et al., 2012; SHAMSUDDOHA, et al., 2013; AHMED, et al., 2013; DAO, et al., 2013; AZEEZ et al., 2013; KANDARE et al., 2013).

Como evidenciado pela literatura, os compósitos são constituídos pelo aglomerante (fase contínua ou matriz) e pelo reforço (fase dispersa). O aglomerante tem como função manter os reforços unidos, transmitindo a estes o carregamento aplicado. Já os reforços têm como função suportar os carregamentos transmitidos pelo aglomerante. Com a vasta possibilidade de combinações, Callister (2007) classifica os materiais compósitos como: reforçados por partículas, reforçados por fibras e estruturais (Figura 1-2). Sendo que no presente trabalho será dada atenção aos compósitos estruturais laminados.

Figura 1-2 - Classificação dos compósitos em função do reforço empregado.

Fonte: Callister (2007).

A matriz dos compósitos fibrosos pode ser metálica, polimérica ou cerâmica. Em razão das resinas poliméricas apresentarem grande diversidade de aplicação e baixo custo, estas são imensamente utilizadas nas aplicações em compósitos. Os polímeros são subdivididos, quanto sua estrutura molecular, em resinas termoplásticas e termorrígidas. Os polímeros termoplásticos amolecem quando são aquecidos e endurecem quando resfriados. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos. Polipropileno, náilon, poliéter éter cetona (PEEK)

são alguns exemplos de polímeros termoplásticos (HERAKOVICH, 1998). Por outro lado, os polímeros termorrígidos, apresentam uma estrutura em rede, possuindo ligações cruzadas covalentes, entre cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações vinculam as cadeias umas às outras, resistindo assim, aos movimentos de vibração e de rotação. Dessa forma, apresentam maior resistência frente aos polímeros termoplásticos, e apenas um aquecimento até temperaturas excessivas (acima da temperatura de degradação) causará o rompimento dessas ligações cruzadas e degradação do polímero. Exemplos de resinas termorrígidas são as borrachas vulcanizadas, os epóxis e as resinas fenólicas (CALLISTER, 2007).

Como a maioria dos polímeros não são biodegradáveis e, além disso, requerem quantidades significativas de combustível fóssil para sua fabricação, sua utilização incorreta têm gerado sérios danos ao meio ambiente (SANTANA, 2009). Em se tratando de reforços, dentre os diversos tipos utilizados, vale ressaltar que a utilização dos compósitos na indústria aeronáutica limita-se geralmente aos compósitos reforçados por fibras sintéticas. Entretanto, nos últimos anos, os compósitos de fibras naturais de fontes renováveis (por exemplo, as fibras vegetais) têm surgido como nova alternativa. Isso ocorre porque os compósitos principalmente formados a partir de fibras sintéticas conduzem a limitações, por exemplo, a utilização de componentes diferentes em uma dada estrutura, dificultando sua reutilização e reciclagem, de modo que é preferível realizar a eliminação direta ou incineração da mesma. Tais ações provocam impactos ambientais seja na falta de espaço nos aterros e na preocupação com as emissões durante a incineração (ROZMAN, 2000; CHABBA, 2004).

Por conta da razão supracitada, há uma preocupação na utilização desses materiais devido aos custos elevados, dificuldades técnicas e impacto ambiental. Este último fator é um problema de importância fundamental e agrava-se pelo fato de que a produção dos polímeros empregados requer o consumo de recursos à base de petróleo, que são notoriamente não renováveis. Esses problemas tornaram-se ainda mais evidentes durante a década de 80 e durante os últimos anos tem conduzido pesquisas científicas a procurar novas alternativas capazes de substituir os compósitos poliméricos tradicionais. A busca por substitutos com menor impacto ambiental deu lugar a materiais que, muitas vezes, são referidos como “ecocompósitos” ou “biocompósitos” (CHABBA, 2004). Deve-se destacar que no presente trabalho, optou-se por utilizar a terminologia de biocompósito, para os compósitos que possuem tanto a matriz polimérica como o reforço por fibra advindos de fonte renovável.

Cronologicamente, as primeiras tentativas foram direcionadas à produção e caracterização de compósitos baseados em polímeros recicláveis (ex: poliolefinas) reforçados com reforços vegetais, isto é, fibras e partículas extraídas de plantas. Vários pontos fundamentam essa substituição, tais como, o uso de reforços vegetais no lugar dos tradicionais minerais permite uma redução considerável na utilização de polímeros não biodegradáveis, de fontes não-renováveis. Além disso, tais reforços são normalmente retirados de plantas relativamente abundantes e resultam em compósitos finais com menor peso específico (em comparação com os homólogos de carga mineral), permitindo a obtenção de boas propriedades em termos de isolamento térmico e acústico (JOSEPH, 1996; JOSEPH, 1999; NAIR, 2000; CANCHÉ-ESCAMILLA, 2002; JOSHI, 2004; SELKE, 2004). Alguns reforços vegetais conhecidos são a celulose, o algodão, o linho, o sisal, o kenaf, a juta e o cânhamo (RAJ, 1987-96; CHEN, 1994). Juntamente com os reforços, buscou-se a utilização de resinas originadas de polímeros biodegradáveis. Averous e Boquillon (2004) apresentam uma classificação dos polímeros biodegradáveis em quatro tipos de famílias (Figura 1-3). Com exceção da quarta família (produtos petroquímicos), a qual possui origem fóssil, as demais são obtidas a partir de fontes renováveis.

Figura 1-3 - Classificação dos polímeros biodegradáveis segundo Averous e Boquillon (2004)

Fonte: Averous, L., Boquillon, N. (2004).

Sob este foco, pesquisas têm sido realizadas utilizando biopolímeros e reforços naturais para a fabricação de biocompósitos, ou seja, compósitos que possuem tanto a matriz polimérica

como o reforço por fibra advindos de fonte renovável. Alvarez, et al., (2004) desenvolveu, em seu trabalho, compósitos com matriz termoplástica biodegradável nomeada MaterBi-Y reforçadas com fibras de sisal. O material que compõe a matriz é comercializado pela Novamont (Novara, Itália) e apresenta-se como uma combinação de um polímero baseado em 38% de amido, 38% de derivados de celulose, 3% de água e 21% de aditivos. Huda et al. (2008) verificaram em biocompósitos fabricados com PLA reforçados com kenaf, que o tratamento alcalino das fibras de kenaf, seguidos do tratamento com silano melhorou significativamente as propriedades mecânicas do biocompósito. Compósitos fabricados a partir de resina a base de óleo de soja reforçada com fibras de celulose em forma de folhas de papel obtidas a partir de caixas de papelão reciclado foram testados na construção da estrutura de telhados (DWEIB, et al., 2006). Em outros trabalhos, tem-se o desenvolvimento de compósitos de Policaprolactona (PCL) reforçada com fibras de linho, onde notou-se uma diminuição tanto das propriedades mecânicas, quanto da cristalinidade do biocompósito final; mas com o reforço de fibras de bambu, foi possível avaliar a resistência à umidade (ARBELAIZ, et al., 2006; SU & WU, 2010).

Devido aos avanços dados nesta área, os biocompósitos vêm sendo utilizados em diversas aplicações, tal como na indústria automobilística, aeroespacial, náutica, de embalagem e de construção, em situações que a estrutura não requisita uma elevada resistência e a falha não é catastrófica (ex: estruturas secundárias em aeronaves) (CARROLL, et al., 2001; ZINI, 2011; VERA, 2012). Sendo assim, ressalta-se que os compósitos biodegradáveis reforçados com fibras naturais minimizariam a preocupação em relação ao impacto ambiental, uma vez que este foi um dos principais motivos para o desenvolvimento desse tipo de material. Sabe-se que os aterros, onde se depositam os resíduos sólidos urbanos, representam a opção dominante em diversos países. Na Austrália, 70% dos resíduos são depositados em aterros sem pré-tratamento. Com processo de trituração, alguns destes biocompósitos podem ser facilmente eliminados no final da sua vida, sem prejudicar o ambiente, o que não é possível com compósitos de fibras sintéticas e matriz não biodegradável (LANER, 2012).

Em função do exposto, o presente trabalho abordará compósitos estruturais laminados, que são fabricados a partir de uma matriz poliuretana (PU) derivada do óleo da mamona reforçada com fibras vegetais de algodão. Todavia, visando comparar os resultados de comportamento mecânico obtidos para este biocompósito, outros compósitos também são investigados, tais como, epóxi/fibra de vidro, epóxi/fibra de algodão e poliuretana (PU) derivada do óleo da mamona/fibra de vidro. Particularmente, as comparações do biocompósito

com o compósito epóxi/fibra de vidro serão destacadas, pois este segundo material é de vasta aplicação em estruturas aeronáuticas secundárias.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar o comportamento mecânico de um novo biocompósito fabricado em poliuretana (PU) derivada do óleo da mamona reforçada por fibra de algodão, frente a outros materiais compósitos a base de resina epóxi reforçada com fibra de vidro ou fibra de algodão, bem como poliuretana (PU) derivada do óleo da mamona reforçada por fibra de vidro. Devido à amplitude do objetivo geral, o mesmo pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer um processo de fabricação visando obter amostras do novo biocompósito, bem como dos demais materiais compósitos;
- Realizar ensaios quase-estáticos dos corpos-de-prova fabricados, visando avaliar o comportamento mecânico dos materiais fabricados;
- Realizar um estudo comparativo detalhado entre os materiais obtidos, avaliando propriedades mecânicas, características físico-químicas, bem como frações volumétricas de fibras e vazios, principalmente confrontando os resultados obtidos do biocompósito com o do compósito epóxi/fibra de vidro, pois este segundo material é de vasta aplicação em estruturas aeronáuticas secundárias (por exemplo: estruturas de interior de avião);
- Realizar uma análise microscópica criteriosa, visando verificar a qualidade da interface fibra-matriz dos materiais obtidos, bem como os principais modos de falha.

2. COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI

2.1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma vez ressaltada a importância e a imensa gama de aplicações dos materiais compósitos, neste capítulo serão abordados os compósitos fabricados em resina epóxi e os reforços utilizados, sendo estes, a fibra de vidro e a fibra de algodão.

Resina Epóxi

Descobertas em 1909 por Prileschajew, as resinas epóxi são classificadas como polímeros termorrígidos, definidas como pré-polímeros de baixo peso molecular contendo mais de um grupo epóxido da forma (MAY, 1988; PARK, 2011) evidenciada na Figura 2-1.

Figura 2-1 - Grupo epóxido.

Fonte: Park, S.J., et al. (2011).

Estas resinas apresentam excelentes propriedades mecânicas, elevada adesão em diversos substratos, boas propriedades térmicas e químicas. Dessa forma, é utilizada em larga escala atuando tanto como matriz de materiais reforçados com fibras, quanto adesivos, revestimentos de alto desempenho e materiais de encapsulamento (PARK, et al., 2000; LI, et al., 2013; MOUSAVIFARD, et al., 2013; PHAM, et al., 2014). Por apresentar um comportamento frágil sob tração e devido a sua baixa resistência a iniciação e crescimento de trinca, sua utilização é limitada em diversas aplicações. Sendo assim, muitas pesquisas têm sido realizadas para melhorar as suas propriedades físicas utilizando agentes de reforço como as fibras sintéticas (carbono, vidro) e fibras vegetais (sisal, seda, linho).

Fibra de Vidro (FV)

A fibra de vidro é considerada o reforço mais comum para compósitos de matriz polimérica, pois apresenta vantagens que relacionam custos, propriedades mecânicas e químicas. Juntamente com a resina epóxi, a fibra de vidro forma compósitos poliméricos que já estão presentes no mercado há mais de cinquenta anos, substituindo materiais como madeira, aço e alumínio (FOLKES, 1992). Isso ocorre, pois o compósito reforçado com fibra de vidro apresenta menor custo em relação aos demais reforçados com fibra de carbono, além disso, apresenta boa resistência mecânica, leveza, resistência dielétrica e resistência à corrosão. Essas vantagens frente aos materiais tradicionais tornam os compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de vidro como sendo amplamente utilizados em aplicações industriais tais como: aeronáutica, naval, construção, artigos esportivos, eletrodomésticos, etc (MALLICK, 1997; HULL & CLYNE, 1996). No entanto, a eficácia do reforço depende da interação entre fibra-matriz, dado pela interface entre elas (FOLKES, 1992; PUKÁNSZKY, et al., 1995; YOSOYIMA, et al., 1990). Visando melhorar o contato entre fibra-matriz, a superfície da fibra de vidro deve passar por um tratamento com um agente de acoplamento. Os silanos organofuncionais são geralmente os agentes de acoplamento utilizados para melhorar a adesão interfacial dos materiais reforçados por fibra de vidro.

Fibra de Algodão (FA)

Alguns tipos de fibras de carbono, vidro, aramida e boro são comumente utilizadas como reforços produzindo compósitos com excelentes propriedades (MINSON, et al., 2014). Entretanto, além do elevado custo, a utilização em larga escala de compósitos de base polimérica reforçados com fibras sintéticas têm gerado problemas de eliminação (SATYANARAYANA, et al., 2009; BEGUM, 2013). Dessa forma, considerando quesitos como custo e biodegradabilidade, as fibras derivadas de plantas possuem grandes vantagens quando comparadas às fibras sintéticas (SATHISHKUMAR, 2012). Além disso, fatores como a crise energética; ausência de complexidade no processamento de fibras vegetais e sua abundância têm interessado pesquisadores no mundo inteiro. São exemplos de fibras derivadas de base vegetal o coco, o linho, o sisal, o ramí, a juta, o cânhamo, entre outras. De acordo com Passos (2005), tais aspectos cria uma competição entre os compósitos reforçados por fibras sintéticas (principalmente, fibras de vidro) e compósitos reforçados com fibras vegetais.

A indústria automotiva tem viabilizado a substituição de compósitos com reforços sintéticos por reforços vegetais, em razão da leveza e melhoria nas propriedades mecânicas, considerando a expectativa de redução de 40% do peso do veículo (DWEIB, 2004; BAJPAI, 2013). Sendo assim, aplicações como componentes do S-Class (Figura 2-2) e as portas do veículo E-Class da Mercedes-Benz na qual é constituída de resina epóxi e fibra de juta; o acabamento dos painéis do modelo A2 da Audi em poliuretano reforçada com uma combinação de fibras linho/sisal (Figura 2-2); o estepe constituído de PLA da cana de açúcar e batata doce reforçados com fibras de kenaf do Toyota RAUM-2013 são alguns exemplos da aplicação de compósitos de fibras naturais na área automobilística (SUDDLE, 2005; MOHANTY, 2005; STEWART, 2010). Dentre as fibras naturais utilizadas como reforço em compósitos, as fibras de algodão recebem atenção devido suas boas características mecânicas. MOHANTY (2005) ressalta a resistência das fibras de algodão à solução alcalina e sua capacidade em absorver água, o que ocasiona o aumento de sua resistência.

Figura 2-2 - (a) Componentes do S-Class da Mercedes Benz fabricados com fibras naturais; (b) Audi A2.

(a)

(b)

Fonte: Stewart, R. (2010).

Além do segmento automotivo, um estudo sobre compósitos de resina fenólica reforçados com fibras de algodão e sisal foi realizado por Vera (2012), no qual foi analisado o comportamento mecânico e de inflamabilidade de tais compósitos em estruturas aeronáuticas de interior. Apresentando um módulo de elasticidade à flexão de 2,52 GPa, observou-se um aumento de 55% (3,90 GPa) desse valor, após a adição de Alumina Trihidratada (ATH), como

aditivo ao compósito para cumprir requisitos aeronáuticos de inflamabilidade. Concluiu-se também que para o compósito com reforço de fibra de algodão, um incremento de 5,2% na espessura da estrutura aeronáutica investigada possibilitaria a substituição do compósito sintético.

Por fim, ressaltar deve-se destacar que normalmente as fibras vegetais passam por tratamento superficial para melhorar sua interação com a matriz polimérica. No entanto, no presente trabalho, os tecidos de fibra de algodão empregados não passaram por nenhum tipo de tratamento superficial antes de serem utilizados como reforços do compósito.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS: PROCESSO DE FABRICAÇÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.2.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processamento de laminados compósitos tem grande influência nas propriedades mecânicas dos mesmos e por isso, múltiplos fenômenos físicos e químicos devem ocorrer simultaneamente e em sequências apropriadas. Como objeto de pesquisa, desde meados da década de 80, existem vários métodos de fabricação para alcançar a consolidação plena do laminado, minimizando o teor de vazios em sua matriz polimérica, possibilitando assim, sua utilização em aplicações estruturais. A impregnação de tecidos ou fibras, visando à criação de um laminado fino é a abordagem mais amplamente aceita.

Vale ressaltar que os compósitos poliméricos podem também ser classificados a partir de sua resina como termoplásticos e termorrígidos, que possuem variações em seus processos de fabricação devido ao comportamento distinto das mesmas quando aquecidas. Os compósitos termorrígidos, em seu processo de cura, possuem a característica de desenvolver ligações químicas intercruzadas, formando uma rede. Com o aumento do tempo e da temperatura, essa rede se desenvolve de acordo com os passos ilustrados na Figura 2-3.

Figura 2-3 - (a) Intercalação do pré-polímero e agente de cura; (b) Aumento do peso molecular do polímero; (c) Gelificação e vitrificação; (d) Cura completa.

Fonte: Carlsson & Pipes (2007).

A vitrificação ocorre quando um polímero que se encontra em um estado líquido de alta viscosidade passa para um estado vítreo. Portanto, este processo deve ocorrer antes da cura completa da resina. Caso contrário, vazios poderão compor o laminado e as propriedades ótimas do polímero não serão alcançadas. Sendo assim, um processo de fabricação adequado, o qual considera as condições de ambiente, o tempo em gel da resina relacionado ao tempo de processamento do laminado é recomendado.

Os processos de *Hand-Lay-Up* (laminação manual) e *Wet-Lay-Up* (impregnação manual de resina) (Figura 2-4) são os processos de fabricação de laminados mais simples e antigos, que possuem baixo custo e não exigem investimentos em equipamento específicos. A técnica de *Hand-Lay-Up* baseia-se na superposição manual de camadas de fibras pré-impregnadas com resina ou não em um molde com a forma da peça desejada. Por outro lado, a técnica de *Wet-Lay-Up* consiste basicamente na impregnação de resina em tecido de fibra seco. Além do empilhamento das camadas, é feito o assentamento das fibras e remoção das bolhas de ar com pincel ou roletes. Aplicam-se várias camadas de reforço e resina até que se atinja a espessura necessária. A técnica de *Hand-Lay-Up* associada à técnica de *Wet-Lay-Up* é empregada principalmente em peças de grandes portes, fabricação de amostra para ensaios mecânicos padronizados e reparos de estruturas danificadas. Contudo, por ser uma técnica estritamente manual, não é recomendada para produção de grandes lotes. Além disso, são processos que exigem grande habilidade manual do operador, estando suscetível a erros.

Figura 2-4 - (a) *Hand-Lay-Up*; (b) *Wet-Lay-Up*

Fonte: Tita (2007).

Outra técnica utilizada para fabricação de compósitos laminados é o *Resin Transfer Molding* (RTM), (Figura 2-5). Este processo consiste, primeiramente, na colocação da fibra (reforço) em um molde de acordo com as orientações preferenciais do projeto. Em seguida, realiza-se o preenchimento do molde através da injeção de resina, com auxílio de um sistema de bombeamento, através de uma mangueira acoplada ao molde.

Figura 2-5 – Processo RTM.

Fonte: (Handbook of Composites. Editado por S.T. Peters. Publicado em 1998 por Chaman & Hall, Londres. ISB 412 540207).

Por conta dessa etapa, são usados polímeros termorrígidos de baixa viscosidade no processo RTM. Isso porque o fluxo do fluido através das fibras é governado pela Lei de Darcy, em que a velocidade do fluxo é igual ao produto do gradiente de pressão pela permeabilidade da fibra e o inverso da viscosidade da resina. Claramente, uma resina de menor viscosidade garante uma melhor taxa de fluxo, assim como um material mais permeável. A permeabilidade da fibra depende de sua fração volumétrica, por isso, quanto maior a percentagem em volume de fibra, menor será sua permeabilidade. Após a completa impregnação da fibra, ocorre o processo de cura, o qual tem início logo após a injeção da resina e ocorre mais rapidamente com patamares de temperaturas específicas para esse processo, os quais são dependentes do tipo de resina empregada. À medida que o processo de cura avança para a criação de uma rede de ligação transversal, sua viscosidade aumenta, em que possui ambas as propriedades viscosas e elásticas. Por fim, após o processo de resfriamento do molde, desmonta-se o mesmo, e faz-se a remoção da peça. No processo de preenchimento do molde e cura da resina, pode haver formação de gases, que se não liberados, podendo gerar vazios no laminado. Outras técnicas são utilizadas como solução, promovendo a remoção de ar.

No processamento de resinas termorrígidas, deve-se monitorar e controlar três variáveis importantes: tempo, pressão e temperatura. Na cura em autoclave, utiliza-se um vaso pressurizado, que aplica pressão e calor por um determinado tempo sob a peça colocada em uma bolsa de vácuo. Em geral, as autoclaves podem operar numa faixa de 68, 95 kPa (10 psi) a 2,07 MPa (300 psi), atingindo temperaturas acima de 420°C. Por outro lado, a técnica de *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM) é um exemplo de molde aberto RTM, comumente empregado como uma alternativa ao uso de autoclave (Figura 2-6). Neste processo de fabricação, a pressão atmosférica é utilizada para se atingir a junção e impregnação por vácuo do laminado. Para isso, com uma bomba de vácuo retira-se o ar de dentro da bolsa, criando uma diferença de pressão de aproximadamente 1atm em relação ao interior da bolsa e o ambiente, sendo suficiente para a impregnação total de grandes laminados e geometrias complexas.

Figura 2-6 – VARTM.

Fonte: Song. (2003).

No presente trabalho, foi utilizado o processo de infusão em bolsa de vácuo tanto para a fabricação dos laminados de resina epóxi reforçados com fibra de vidro, quanto dos laminados reforçados por fibra de algodão. Inicialmente, preparou-se o molde em uma base de vidro temperado e sobre este foi delimitado o perímetro da bolsa de vácuo com fita dupla face (Fita Selante Tape 9480-Y12), a qual atua como elemento de fechamento da bolsa. Foi aplicada cera a base de carnaúba (agente desmoldante) à superfície do vidro temperado, este servindo de base para a bolsa de vácuo. Essa cera foi aplicada com o intuito de facilitar a desmoldagem do laminado. No entanto, além disso, em seguida, colocou-se um tecido desmoldante (*Peel Ply* TR-85X) e, posteriormente, é que se iniciou o processo de empilhamento dos tecidos de reforço. No topo do laminado, adicionou-se mais uma camada de *Peel Ply* seguida de uma tela plástica (Iflux-E-110-M), que permite a percolação da resina. Finalmente, fecha-se a bolsa de vácuo com filme plástico (Flexnyl WP TB), verificando cuidadosamente se há ou não pontos de vazamentos. Então, liga-se a bomba de vácuo iniciando o processo de infusão da resina.

A resina epóxi (Araldite®) utilizada no presente trabalho é composta pela resina [1564 BR (85% m/m)] e pelo endurecedor [REN HY 150 BR (15% m/m)]. Já para o reforço, foram utilizados dois tipos: fibra de vidro WRU-140 (140 g/m²), a qual apresenta tecidos unidirecionais e bidirecionais, sendo proveniente da TexiglassTM e fibras de algodão, sem tratamento superficial, as quais foram fornecidas pela Fábrica de Toalhas São Carlos, apresentando-se em tecido unidirecional (com tramas de amarração no sentido transversal) com

gramatura de 151 g/m^2 . Após alguns testes, foi possível definir o melhor procedimento para o corte e empilhamento dos tecidos, que compreende em colar fita crepe para delimitar o tamanho do laminado ($320 \times 320 \text{ mm}$) e para o manuseamento do mesmo (Figura 2-7).

Figura 2-7 - Tecido Unidirecional (UD) de fibra de vidro.

Fonte: Próprio Autor.

Os laminados foram produzidos e ensaiados mecanicamente no Laboratório de Estruturas Aeronáuticas (LEA) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Em um primeiro momento, após a cura do material, que ocorreu em temperatura ambiente, foram obtidas placas apresentando dimensões de $300 \times 300 \times 1,2 \text{ mm}$, de comprimento, largura e espessura, respectivamente, com os seguintes empilhamentos: $[0^\circ]$, $[90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$. Vale ressaltar que os CDPs com empilhamentos a $\pm 45^\circ$ foram fabricados à partir de tecido bidirecional, enquanto que, os demais CDPs foram fabricados com tecido unidirecional. Procede-se, assim, o corte dos corpos-de-prova (CDPs) empregando uma serra de disco de corte adiamantado. A geometria (espessura, largura e comprimento) foi baseada na norma ASTM D3518 para a obtenção de CDPs orientados a 0° , 90° e $\pm 45^\circ$. Apesar da norma ASTM D3518 ser referência para o estudo do comportamento ao cisalhamento e haver a recomendação quanto a utilização da norma ASTM D3039 para as dimensões das amostras com fibras orientadas a 0° e 90° , tal estratégia consistiu em analisar o comportamento mecânico dos materiais, e não especificamente a determinação de suas propriedades. A ordem das marcações, onde as medições de largura e espessura foram realizadas estão referenciadas por 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 2-8).

Figura 2-8 - Medidas e marcações dos corpos-de-prova (Unidades: [mm]).

Fonte: Próprio Autor.

Foi utilizado também o processo de corte a laser dos CDPs, porém em virtude da queima localizada do material, esse processo não se mostrou eficaz. Por esse motivo, foi utilizado o sistema de corte a disco (Figura 2-9).

Figura 2-9 - (a) Serra de disco (b) Processo de corte a laser.

Fonte: Próprio Autor.

Todos os CDPs obtidos para o compósito fabricado a partir da resina epóxi reforçado com fibra de vidro são apresentados na Tabela 2-1. Para os compósitos em resina epóxi reforçados pela fibra de algodão, obteve-se tanto amostras para ensaios de tração (Tabela 2-2), quanto amostras de flexão (Tabela 2-3).

Tabela 2-1 - Dados dos CDPs de tração de epóxi reforçada com fibras de vidro.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área (mm²)
[0°]	1	24,65	24,30	24,70	24,55	0,85	0,85	0,85	0,85	20,87
	2	24,05	24,45	24,50	24,33	0,75	0,85	0,70	0,77	18,66
	3	14,85	14,55	14,45	14,62	1,00	1,05	1,05	1,03	15,10
	4	15,35	15,25	15,15	17,79	1,15	1,20	1,15	1,16	17,79
[90°]	1	24,35	25,20	25,30	24,95	0,65	0,70	0,70	0,68	17,05
	2	24,70	24,70	24,50	24,63	0,70	0,70	0,65	0,68	16,83
	3	24,20	24,65	24,90	24,58	1,95	1,90	1,90	1,92	47,12
	4	25,30	25,00	25,35	25,22	2,00	2,05	2,05	2,03	51,27
[±45°]	1	24,05	23,70	23,90	23,88	0,95	1,00	0,90	0,95	22,69
	2	24,60	25,15	24,80	24,85	0,70	0,80	0,75	0,75	18,64
	3	24,80	25,00	24,50	24,77	0,90	0,95	0,90	0,92	22,70
	4	24,40	25,00	26,00	25,13	2,20	2,15	2,10	2,15	25,13
	5	24,55	24,55	25,00	24,70	1,90	1,85	2,00	1,92	47,34

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2-2 – Dados dos CDPs de tração de epóxi reforçada com fibras de algodão.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área (mm ²)
[0°]	1	26,70	27,20	26,90	26,93	1,85	1,90	2,00	1,92	51,62
	2	26,90	27,30	24,45	26,22	1,90	1,80	1,95	1,88	49,37
	3	26,45	26,35	25,95	26,25	1,85	1,95	1,90	1,90	49,88
	4	25,70	25,70	25,75	25,72	2,00	2,00	2,10	2,03	52,29
	5	25,40	25,30	25,35	25,35	2,35	2,40	2,15	2,30	58,30
[90°]	1	26,25	25,25	25,00	25,50	1,95	1,95	1,90	1,93	49,30
	2	26,05	26,50	26,60	26,38	1,90	1,95	1,95	1,93	51,01
	3	28,70	29,85	28,90	29,15	1,90	1,95	1,95	1,93	56,36
	4	26,45	26,40	26,35	26,40	2,95	2,75	2,60	2,76	73,04
	5	30,00	28,80	28,40	29,06	2,00	1,90	1,90	1,93	56,19
[±45°]	1	27,30	27,90	27,50	27,57	1,90	1,90	1,95	1,92	52,84
	2	27,60	27,20	27,00	27,27	1,95	1,90	1,90	1,92	52,26
	3	26,60	26,50	26,60	26,57	1,95	1,90	1,90	1,92	50,92
	4	25,50	25,45	25,40	25,45	2,65	2,65	2,65	2,65	67,44

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2-3 -Dados dos CDPs de flexão 3-Pontos de epóxi reforçada com fibras de algodão.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	I _{xx} mm ⁴
[0°]	1	25,75	26,05	25,85	25,88	2,10	2,20	2,25	2,183	22,45
	2	25,8	25,9	25,75	25,82	2,15	2,10	2,95	2,40	29,74
	3	25,55	25,60	25,40	25,52	2,30	2,30	2,15	2,25	24,22
	4	25,60	25,85	25,55	25,67	2,40	2,30	2,20	2,30	26,02
[90°]	1	25,70	25,70	26,00	25,80	2,70	2,90	2,60	2,73	43,90
	2	25,95	26,00	26,05	26,00	2,60	2,70	2,85	2,72	43,44
	3	26,00	26,10	25,85	25,98	2,50	2,90	2,85	2,75	45,03
	4	26,00	26,00	25,80	25,93	2,45	2,80	2,70	2,65	40,21
[±45°]	1	24,50	24,95	25,00	24,82	2,50	2,70	2,70	2,63	37,76
	2	25,30	25,45	25,20	25,32	2,70	2,28	2,60	2,53	34,03
	3	25,10	25,00	25,05	25,05	2,60	2,70	2,40	2,57	35,30
	4	25,30	25,30	25,00	25,20	2,70	2,70	2,60	2,67	39,82

Fonte: Próprio Autor.

Processo de “Normalização”

Em função da escassez de alguns polímeros de fonte renovável, a síntese de polímeros sintéticos teve início há mais de um século. Por esta razão, a larga escala de produção desses compostos sintéticos levou à substituição de muitos materiais utilizados tradicionalmente. A melhora de suas propriedades tornou-se essencial e impulsionou pesquisas científicas durante as últimas décadas. Fontanille (2014) ressalta que esse constante desenvolvimento permite afirmar que “não há maus polímeros, apenas más aplicações”.

Os polímeros, quimicamente, são macromoléculas de elevada massa molecular constituídas por unidades básicas repetidas – monômeros – que se ligam entre si por ligações covalentes, num processo denominado polimerização.

Figura 2-10 – Processo de formação do polietileno, através de seu respectivo monômero.

Fonte: Natural and Synthetic Biomedical Polymers (2014).

A polimerização pode ocorrer por condensação ou adição (CHALLA, 1993). Há três classes de polímeros formados por condensação, sendo os poliuretanos um deles. No presente trabalho, uma das matrizes poliméricas dos compósitos será constituída por uma poliuretana (PU), sendo abordado apenas os processos das que são termorrígidas.

Numa polimerização por condensação os monômeros reagem entre si, liberando pequenas moléculas (geralmente água). O produto final desta reação depende dos grupos funcionais que reagem. Caso reaja um monômero-amina e um ácido, por condensação será formado uma amida e conseqüentemente ter-se-á uma poliamida (CHALLA, 1993).

Em polímeros termorrígidos, a cura consiste num processo de solidificação irreversível, dando origem a um polímero de elevada massa molecular. A polimerização do reticulado conduz à formação de uma rede tridimensional e sua cura pode ocorrer através do calor (cura térmica), radiação UV (cura UV) ou pela mistura de dois componentes (HORIE, K.; BARÓN, M.; FOX, R. et al., 2004). É possível avaliar a qualidade da cura por diferentes métodos. A análise mecânica dinâmica (*Dynamic Mechanical Analysis – DMA*) e a calorimetria diferencial

de varrimento (*Differential Scanning Calorimetry – DSC*) são alguns exemplos de métodos utilizados nessa medição, além da Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), a qual avalia qualitativamente a evolução da cura (ACHILIAS et al., 2012)

O processo de pós-cura de um polímero relaciona-se com o grau de interligação da resina, o qual depende de inúmeras variáveis, quando curadas a temperatura ambiente. Dentre as mais importantes, destacam-se a taxa de liberação de radicais livres nas várias fases do processo, a arquitetura molecular do polímero e o perfil de temperatura durante a cura. O excesso de radicais livres bloqueia a interligação nas fases de indução e propagação. Além disso, Carvalho (2002) ressalta a pouca interligação de resinas rígidas, quando curadas em temperatura ambiente, ainda mais na fase de vitrificação, que deixa muitas ligações sem interligar. A diminuição de radicais pode ser dada em função da temperatura e espessura do laminado e por este motivo, faz-se necessário a pós-cura do material para completar a interligação, resultando na melhoria de seu desempenho.

A utilização de fontes externas de calor, a qual tem o objetivo de manter os laminados aquecidos durante um tempo específico, caracteriza o processo de pós-cura. Para entender como este processo auxilia na melhoria da cura e consequentemente no desempenho do material, faz-se necessário lembrar que a vitrificação “congela” a resina e praticamente cessa o avanço de interligação das cadeias, sendo que a cura continua através da difusão molecular, a qual é caracterizado por um processo lento. Dessa forma, caso a massa seja aquecida acima de um ponto crítico – temperatura vítrea (T_g) – as interligações são retomadas e continuam até estabilizar em outro processo de vitrificação. Este processo ocorre sucessivamente, até a cura plena.

Sendo assim, nota-se que o grau de interligação depende da duração e da temperatura de pós-cura, como mostra a Figura 2-11.

Figura 2-11 – Temperatura e duração pós-cura na influência da cura de uma resina viniléster.

<i>Temperatura de pós-cura</i>	<i>Duração da Pós-cura</i>	<i>HDT</i>	<i>T_{gp}</i>	<i>Grau de interligação (%)</i>	<i>Grau de Cura (%)</i>
<i>25C</i>	<i>5 horas</i>	<i>41</i>	<i>34</i>	<i>32</i>	<i>74</i>
	<i>1 dia</i>	<i>46</i>	<i>40</i>	<i>38</i>	<i>77</i>
	<i>2 dias</i>	<i>48</i>	<i>43</i>	<i>41</i>	<i>81</i>
	<i>7 dias</i>	<i>51</i>	<i>47</i>	<i>45</i>	<i>82</i>
	<i>27 dias</i>	<i>53</i>	<i>51</i>	<i>49</i>	<i>89</i>
<i>65 C</i>	<i>5 horas</i>	<i>82</i>	<i>76</i>	<i>72</i>	<i>95</i>
	<i>1 dia</i>	<i>89</i>	<i>82</i>	<i>78</i>	<i>96</i>
	<i>2 dias</i>	<i>90</i>	<i>83</i>	<i>79</i>	<i>97</i>
	<i>7 dias</i>	<i>93</i>	<i>84</i>	<i>80</i>	<i>98</i>
	<i>27 dias</i>	<i>95</i>	<i>88</i>	<i>84</i>	<i>98</i>
<i>82 C</i>	<i>5 horas</i>	<i>98</i>	<i>100</i>	<i>95</i>	<i>99</i>
	<i>1 dia</i>	<i>102</i>	<i>100</i>	<i>95</i>	<i>100</i>
	<i>2 dias</i>	<i>103</i>	<i>100</i>	<i>95</i>	<i>100</i>
	<i>7 dias</i>	<i>106</i>	<i>100</i>	<i>95</i>	<i>100</i>
	<i>27 dias</i>	<i>108</i>	<i>105</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>150 C</i>	<i>2 horas</i>	<i>108</i>	<i>105</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

Fonte: Cura e Pós-cura de Resinas Poliéster e Viniéster, Belo Horizonte, 2002

Portanto, os compósitos investigados, em alguns casos, passaram por um processo de “normalização”, que consiste num processo de pós-cura padronizado, após a cura em temperatura ambiente, a fim de garantir que os corpos-de-prova (CDP) estudados possuam níveis compatíveis de grau de cura.

Para evitar a degradação tanto da fibra de algodão, quanto da matriz que constituem o compósito, buscou-se temperaturas à serem utilizadas como base para a determinação da temperatura a ser utilizada no processo de “Normalização”.

Para a resina epóxi utilizada, consta em sua ficha técnica uma temperatura de transição vítrea, T_g , de 140 à 145 °C. Já para a PU, Silva (2003) trabalhou com compósitos formados pela

resina reforçados com fibras vegetais e utilizou a análise térmica dinâmico mecânica (DMTA), obtendo uma T_g em relação ao poliuretano, de 84 °C. Sabendo que as temperaturas de degradação das fibras sintética (vidro) e, principalmente, vegetal (algodão) são maiores que obtido pelas resinas, foi utilizada a temperatura de 60 °C – 80% do valor da temperatura mínima – durante o processo de “normalização”, em uma estufa nas dependências do LEA.

2.2.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Com a obtenção das amostras, foi possível realizar ensaios mecânicos quase-estáticos de tração com velocidade de 2,0 milímetros por minuto, utilizando uma máquina universal de ensaios – EMIC – com capacidade de 100kN. (Figura 2-12). Portanto, algumas curvas de força-deslocamento foram obtidas e utilizadas para o levantamento de curvas tensão-deformação

Figura 2-12 - (a) Detalhe do CDP; (b) Ensaio de tração.

Fonte: Próprio Autor.

Ensaio adicionais de tração foram realizados em CDPs com empilhamentos $[0^\circ]_5$, $[90^\circ]_5$ e $[\pm 45]_{24}$, empregando uma máquina universal de ensaios – INSTRON® 5900 (Figura 2-13) –

com uma taxa de aquisição de dados igual a 2,5 kHz. Para estes testes, foi utilizada a técnica de correlação de imagens, empregando o programa CORRELI-Q4, com o objetivo de capturar as deformações transversais e longitudinais.

Figura 2-13 – Máquina utilizada nos ensaios mecânicos realizados.

Fonte: Próprio Autor.

CORRELI-Q4 – Técnica de correlação de imagem digital

A análise dos campos de deslocamentos provenientes dos ensaios mecânicos é um parâmetro fundamental e possibilita a ponte entre o experimento e a simulação computacional (RASTOGI, 2000). De fato, na Mecânica dos Sólidos, os ensaios constituem a primeira parte das análises e possibilitam a extração das propriedades mecânicas, assim como a avaliação dos parâmetros advindos das relações constitutivas (LAGARDE, 2000). Com uma descrição dos campos de deslocamentos, torna-se possível a redução de ruídos ou incertezas no processo de identificação de parâmetros, bem como uma observação mais precisa da resposta do material.

Por este motivo, visando reduzir ruídos e incertezas, foi utilizado um *software* de Correlação de Imagem Digital (*Digital Image Correlation – DIC*), na qual a aquisição do campo de deslocamentos é vinculada a uma análise via elementos finitos. Dessa forma, os campos de deslocamentos são descritos a partir da função de forma de um dado elemento finito (ZIENKIEWICZ, 1989). Visando o aperfeiçoamento da técnica e melhores resultados, uma regularização espacial foi proposta por Horn e Schunck (1981).

Dessa forma, na versão utilizada do programa CORRELI-Q4, o campo de deslocamentos satisfaz diretamente a continuidade. Em sua aplicação direta, a conservação do fluxo óptico apresenta-se como um problema não-linear, expressado em termos de maximização de um produto de correlação quando o deslocamento, mesmo que particionado pelas imagens, é constante.

A técnica Q4-DIC

Para descrever a técnica Q4-DIC é necessário entender tópicos importantes, tais como seu princípio, as funções de forma do elemento, e o método de obtenção dos resultados por interpolação.

Na técnica Q4-DIC utiliza-se uma abordagem a qual não se aplica apenas as funções de forma de elementos finitos, mas a uma ampla classe de funções. Apesar de Roux (2006) e Hild (2006) abordarem casos dessa ampla classe de funções, a discussão se restringirá nas funções de forma Q4P1, as quais fornecem uma ferramenta versátil para análises de diferentes problemas mecânicos e ideal para a modelagem em elementos finitos.

Princípio do DIC com uma base de descolamento arbitrário

Dada duas imagens, a qual uma se refere ao estado original e a outra de uma superfície deformada de um material submetido a um carregamento conhecido. Uma imagem é uma função escalar de uma coordenada espacial que fornece o nível de cinza em cada ponto (*pixel*). Cada imagem, dos estados de referência e deformado são respectivamente $f(x)$ e $g(x)$. $u(x)$ representa o campo de deslocamentos gerado entre as imagens. O procedimento utilizado é semelhante ao procedimento de Rayleigh-Ritz, frequentemente empregado em análises elásticas, com a diferença de que a formulação variacional está associada à conservação do fluxo óptico e não ao Princípio dos Trabalhos Virtuais.

Caso particular: Função de forma Q4

Uma ampla variedade de funções de forma poderia ser considerada. Denntre essas, as funções de forma de elementos finitos são particularmente atrativas, pois promovem interfaces entre as medidas do campo de deslocamento e um modelo numérico, a qual está também baseado em relações constitutivas. Sendo a imagem particionada em *pixels*, torna-se apropriado a escolha de um elemento finito retangular. Dessa forma, o elemento Q4 é mapeado por um quadrado $[0,1]^2$ e suas funções básicas são expressas por: $(1 - x)(1 - y)$, $x(1 - y)$, $(1 - x)y$ e xy .

Interpolação Sub-Pixel

No tratamento de imagens, em razão dos deslocamentos espaciais, são utilizados gradientes (∇) para sua discretização. Schreier (2000) propôs uma *spline* cúbica, a qual diz ser apropriada e precisa. Contudo, na técnica Q4-DIC foi considerada a decomposição de Fourier, a qual fornece um mapeamento por uma função interpoladora de todos os valores de $f(x)$. Tal mapeamento define um valor para cada nível de cinza, em qualquer ponto. Por conveniência, o algoritmo utiliza a Transformação Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*), a qual permite cálculos mais rápidos. No entanto, ao empregar uma FFT, assumi-se implicitamente uma periodicidade sob um intervalo finito, gerando falsos valores nas proximidades das bordas. Para reduzir esse efeito de borda, cada zona de interesse (*Region of Interest - ROI*) é ampliada e utilizada na FFT para estimar os gradientes. Uma vez que os gradientes foram obtidos, a ROI

original é desconsiderada da ampliada e, dessa forma, a região com mais oscilações concentradas é omitida da análise.

Por fim, o uso demasiado do método da expansão de Taylor exige que o deslocamento em relação ao comprimento de correlação da textura seja pequeno o suficiente, e para isso uma abordagem multi-escala é utilizada.

Visto isso, para a aplicação do programa CORRELI-Q4, foi necessário realizar uma preparação prévia dos corpos-de-prova, mediante as condições pré-estabelecidas no método. Portanto, empregando tinta *spray* nas cores branca e preta, buscou-se o nível de cinza requerido para análise com a presença dos referidos *pixels* (Figura 2-14).

Figura 2-14 – Preparação de amostras para ensaios e análise por correlação de imagens.

Fonte: Próprio Autor.

Uma máquina fotográfica Canon, modelo EOS Rebel T6i equipada com uma lente Macro EF 100 mm - f 2,8 USM, foi utilizado para a captura das imagens. Fotos foram armazenadas a cada cinco segundos para serem posteriormente analisadas com a aplicação do programa CORRELI-Q4. Como descrito previamente, o *software* gera o campo de deformações a partir dos campos de deslocamentos, que podem ser obtidos através das fotos. A Figura 2-15 mostra a ROI selecionada pelo usuário para análise e o campo de deformação na direção 1, criado a partir dele.

Figura 2-15 - ROI selecionada para análise do *software* CORRELI: (a) Imagem de referência; (b) Campo de deslocamento na direção 1 do CDP deformado

Fonte: Próprio Autor.

2.2.3. ENSAIO DE FLEXÃO 3-PONTOS

Ensaaios experimentais monotônicos de flexão 3-pontos foram realizados, seguindo a norma ASTM-D790. Tanto a fabricação quanto os ensaios mecânicos ocorreram no Laboratório de Estruturas Aeronáuticas (LEA), ou seja, empregando também uma máquina universal de ensaios – INSTRON® 5900. As amostras foram cortadas, possuindo 250 mm de comprimento, sendo que a realização dos ensaios de flexão possibilitou determinar o Módulo de Elasticidade à flexão, bem como valores máximos de tensão. Deve-se destacar que as amostras foram ensaiadas até um deslocamento de aproximadamente 30 mm do travessão da máquina.

2.2.4. MEDIDAS DE FRAÇÃO MÁSSICA E VOLUMÉTRICA

Método de queima da matriz

Logo após os ensaios de tração, amostras foram cortadas para se quantificar as frações mássicas e volumétricas de reforço nos corpos de prova.

Para os CDPs reforçados por fibra de vidro, foi adotado o método de queima de resina, regido pela norma ASTM-D2584. Com geometria retangular e dimensões de 10x10 milímetros,

as amostras foram devidamente pesadas em uma balança SHIMADZU - modelo AUW220D – com precisão de até quatro casas decimais e catalogadas extraindo assim dados para futuros cálculos.

Figura 2-16 – Balança SHIMDZU

Fonte: Próprio Autor.

Dispostas em uma base cerâmica as amostras foram levadas a um forno para o processo de queima, sendo aquecidas desde a temperatura ambiente até um valor máximo de 600°C, sob uma razão de aquecimento de 10°C por minuto. Após atingir a temperatura máxima, as amostras foram mantidas na referida temperatura por um período de 5 horas. O forno foi desligado e aguardou-se até o seu completo resfriamento. Uma vez que ocorreu a queima da matriz, as fibras remanescentes foram pesadas novamente, obtendo-se assim a massa de fibras.

Figura 2-17 - Disposição das amostras

Fonte: Próprio Autor.

Análise Termogravimétrica (TGA)

O método da queima de resina que foi adotado para os compósitos em fibra de vidro, não é viável, quando se trata de fibras vegetais, uma vez que estas se degradam juntamente com a matriz. Sendo assim, foi realizado o ensaio de termogravimetria nos compósitos reforçados por fibras de algodão, com o intuito de medir sua fração mássica.

As amostras foram ensaiadas com equipamento da PerkinElmer, modelo PyrisTM 1 TGA (Figura 2-18) a uma taxa de 10°C/min, sob ar sintético, iniciando a uma temperatura de 25°C até atingir a temperatura final de 700°C. Para se obter um volume representativo, atendendo as dimensões requeridas pelo equipamento, as amostras foram submergidas em nitrogênio líquido e, só então, fraturadas em pequenos pedaços para os ensaios.

Figura 2-18 – Instrumento de análise termogravimétrico

Fonte: Próprio Autor.

2.2.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um dos instrumentos mais versáteis para observação e análise de microestruturas e suas características, que compõem os materiais compósitos.

Presume-se que a ideia inicial da Microscopia Eletrônica de Varredura, surgiu em 1927 com a patente do químico alemão Hugo Stintzing. Com o objetivo de se determinar a dimensão de pequenas partículas não acessíveis aos microscópicos óticos, tal contribuição propunha irradiar uma amostra com feixes de elétrons, posicionando-a transversalmente em relação ao mesmo. A intensidade da interação entre o raio e a amostra devia ser medida por um dispositivo

de alta sensibilidade, o qual exibiria a imagem a partir dos raios refletidos em um tubo eletrônico. Contudo, o método proposto não foi capaz de gerar uma imagem ampliada.

Em 1935, H. Knoll adicionou um segundo feixe de elétrons, que analisado em conjunto com o primeiro, conseguia amplificar a resposta do sinal. Tal contribuição originou o primeiro trabalho reconhecido, que descrevia o conceito de um MEV. Finalmente, em 1942, o primeiro MEV foi construído e usado por Vladimir Kosma Zworykin.

Tendo como princípio utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, a fim de explorar a superfície de uma dada amostra, o MEV realiza tal análise pontualmente, por linhas sucessivas e transmite o sinal a uma tela catódica, perfeitamente sincronizada com o feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe é capaz de varrer toda a superfície da amostra. A interação do feixe incidente e a superfície da amostra gera o sinal da imagem.

Neste trabalho, com a colaboração da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), foram realizadas análises via microscopia eletrônica de varredura nas amostras fraturadas nos ensaios mecânicos, buscando verificar o grau de interação fibra-matriz e o modo de falha apresentado pelos compósitos. Vale destacar que para a análise de falha, os CDPs foram previamente preparados e cortados a 1 cm de distância da superfície de falha.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE VIDRO

2.3.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios quase-estáticos de tração foram realizados a fim de verificar o comportamento mecânico do material compósito fabricado. Além disso, com base nas curvas tensão-deformação, obtém-se o módulo de elasticidade (E), bem como os valores máximos de tensão e deformação ($\sigma_{m\acute{a}x}, \epsilon_{m\acute{a}x}$).

Figura 2-19 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a 0°.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 2-19, a qual exibe os resultados de alguns dos corpos-de-prova com fibras orientadas a 0°, evidencia um comportamento elástico linear e frágil. Além disso, fica demonstrada a diferença entre os valores obtidos pelo deslocamento do travessão da máquina e pelo *software* de correlação de imagens (DIC). Para o travessão da máquina, o maior valor de tensão atingiu 797,74 MPa e a máxima deformação é em torno de 4,5%. Para os CDPs ensaiados via DIC, a resistência à tração (X_T) paralela à fibra apresentou um valor médio de 775,26 MPa. Quanto ao limite de deformação (X'_T) via DIC, tem-se um valor médio de 2,28%, com uma variação de 0,04%.

O módulo de elasticidade paralelo à direção das fibras E_{11} foi obtido por um ajuste linear da porção inicial linear da curva tensão-deformação. A norma ASTM D3039 estabelece selecionar uma faixa entre 0,1 % até 0,3% de deformação. Caso o material falhe antes dos 0,6% de deformação, recomenda-se utilizar de 25% a 50% do valor final. Sendo assim, foi selecionada a porção linear como recomendado pela norma, e em seguida, realizou-se o ajuste para cada curva, obtendo-se um valor médio de 18,50 GPa, variando 1,48 GPa, pelo deslocamento do travessão da máquina. Para uma medida com maior precisão do deslocamento do corpo-de-prova via DIC, tem-se um módulo de elasticidade médio de $38,60 \pm 0,76$ GPa.

Com a utilização do *software* de correlação de imagens, pode-se medir a deformação na direção perpendicular a fibra (ε_{22}), sendo possível obter o coeficiente de Poisson (ν_{12}) para o compósito. Neste caso, o valor médio obtido através dos resultados das amostras foi 0,23.

Figura 2-20 – Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a 90°.

Fonte: Próprio Autor.

As curvas tensão-deformação das amostras com fibras orientadas a 90° são apresentadas na Figura 2-20, exibindo também uma resposta frágil ligeiramente não-linear. Assim como os CDPs com fibras a 0°, os ensaios foram realizados, contudo alguns resultados foram descartados devido aos desvios muito elevados nos valores. Apesar disso, houve uma certa similaridade no comportamento dos CDPs. Para ensaios, empregando o travessão da máquina, a tensão máxima e a máxima deformação foram apresentadas pelo CDP 01, sendo estes valores 127,45 MPa e 2,77%, respectivamente. Quanto a resistência à tração perpendicular às fibras (Y_T), foi obtido o valor médio de 117,65 MPa, havendo uma variação de 13,86 MPa. Quanto ao limite de deformação perpendicular às fibras (Y'_T), foi obtido um valor médio de $2,68 \pm 0,12\%$ via travessão da máquina e de $1,23 \pm 0,08\%$ via DIC. Os valores médios, $6,08 \pm 1,14$ GPa e $13,61 \pm 0,94$ GPa obtidos via travessão da máquina e pelo *software* de DIC representam o módulo de elasticidade perpendicular às fibras (E_{22}).

Como era esperado, as amostras orientadas à 0° ou à 90° apresentaram um comportamento mais frágil, quando comparadas com os CDPs orientados a $\pm 45^\circ$, que forneceu um valor de tensão máxima igual a 83,73 MPa e de deformação máxima igual a 16,71% para carregamento de tração com medidas via travessão da máquina (Figura 2-21), bem como uma resposta dúctil altamente não-linear. O valor médio para a resistência à tração e seu limite de deformação foram de $83,72 \pm 0,014$ MPa e $13,13 \pm 5,055\%$, respectivamente. O maior valor do módulo de elasticidade para as amostras orientadas à $\pm 45^\circ$ foi de 7,31 GPa, apresentado pelo CDP 02, provendo uma resposta mais rígida perante os demais CDPs. O valor médio do módulo de elasticidade para as amostras foi de 7,14 GPa, variando 0,24 GPa entre seus valores mínimo e máximo.

Assim como nos ensaios do compósito com fibras paralelas à tração via DIC, obteve-se os valores de deformação (ε_{22}) para os CDPs com fibras orientadas à 90° , e calculou-se o coeficiente de Poisson (ν_{21}), o qual apresentou o valor de 0,072.

Figura 2-21 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibra de vidro a $\pm 45^\circ$.

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 2-4, verifica-se os valores referentes a tensão e deformação máxima e módulo de elasticidade ($\sigma_{m\acute{a}x}$, $\epsilon_{m\acute{a}x}$ e E) de tração, para o compósito de epóxi reforçado com fibras de vidro.

Tabela 2-4 - Resultados para o compósito de epóxi reforçada com fibras de vidro sob tração.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (DIC)	E [GPa]	E [GPa] (DIC)
[0°]	1	797,74	4,37	2,31	19,55	38,06
	2	752,78	4,59	2,25	17,45	39,14
[90°]	1	127,45	2,77	1,29	5,28	12,95
	2	107,85	2,60	1,17	6,89	14,28
[±45°]	1	83,73	16,71	9,56	3,36	6,97
	2	82,89	15,17	5,25	4,37	7,31

Fonte: Próprio Autor.

Deve-se destacar que os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade a [±45°] são menores do que a [90°], devido à diferença entre os tecidos utilizados na fabricação dos respectivos CDPs. No caso dos CDPs a [90°], a trama do tecido possui algumas fibras orientadas não somente a 0°, mas também a 90° como evidencia a Figura 2-7. A não utilização do mesmo tecido de fibra de vidro para todos os CDPs, deve-se a dificuldade em obter CDPs a +/-45° balanceados e simétricos em função da maioria dos fios estarem alinhada a 0° e uma minoria a 90°. Além disso, como será visto mais a frente, os CDPs à +/-45° possuem fração volumétrica de fibra inferior aos demais CDPs.

A partir dos dados obtidos dos ensaios de tração dos corpos de prova com orientação [±45°], obteve-se a curva tensão de cisalhamento (τ_{12}) em função da distorção angular (γ_{12}). Com base nas respostas desses CDPs via DIC, foi calculado o módulo de cisalhamento (G_{12}) de 2,67 GPa, que corresponde ao coeficiente angular da parcela elástica da curva (Figura 2-22).

Figura 2-22 - Tensão de cisalhamento versus distorção angular para o compósito de epóxi reforçado por fibra de vidro.

Fonte: Próprio Autor.

2.3.2. FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA OS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Como mencionado, após os ensaios, foram retiradas pequenas amostras das placas com o intuito de investigar a fração volumétrica de fibra, matriz e de vazios do compósito produzido. As amostras foram pesadas e levadas a um forno para degradar a matriz conforme descrito anteriormente. Por isso, apenas as fibras restaram após a permanência do compósito no forno. Assim, as fibras resultantes foram pesadas para determinação de sua massa e da massa da matriz que fora degradada. Com os valores de massa e volume das amostras, foi determinada a densidade do compósito, bem como as frações volumétricas da fibra e da matriz polimérica empregando as equações de (1) a (12) mostradas a seguir.

Sendo a fração volumétrica de fibra (v_f) dada pela Equação (1) e sabendo que o volume do compósito (V_c) e a densidade da fibra (ρ_f) são representadas por (2) e (3):

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (1)$$

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (2)$$

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} \quad (3)$$

Admitindo a hipótese de que há uma perfeita interface entre fibras e matriz, bem como ausência de vazios, da Regra das Misturas, tem-se:

$$v_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (4)$$

Realizando as operações matemáticas, obtém-se a Equação (5):

$$v_f = \frac{\rho_m \cdot M_f}{\rho_f \cdot M_m + \rho_m \cdot M_f} \quad (5)$$

Já para a matriz, considerando o volume de matriz polimérica (V_m), da Equação (6)

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} \quad (6)$$

Sabendo que a fração volumétrica de matriz polimérica (v_m), a volume do compósito e a fração mássica da matriz (m_m) são representadas pelas Equações (7), (8) e (9), respectivamente:

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (7)$$

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_c} \quad (8)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (9)$$

Combinando as equações acima tem-se:

$$v_m = \frac{\frac{M_m}{\rho_m}}{\frac{M_c}{\rho_c}} \quad (10)$$

$$v_m = \frac{m_m M_c \rho_c}{M_c \rho_m} \quad (11)$$

Dessa forma

$$v_m = \frac{\rho_c \cdot m_m}{\rho_m} \quad (12)$$

Onde:

v_f – fração volumétrica de fibra;

ρ_m – densidade da matriz polimérica;

M_f – massa de fibra;

ρ_f – densidade da fibra;

M_m – massa da matriz polimérica;

v_m – fração volumétrica de matriz polimérica;

ρ_c – densidade do compósito;

m_m – fração mássica da matriz polimérica.

Os valores obtidos após os cálculos são apresentados na Tabela 2-5.

Tabela 2-5 – Valores de frações volumétricas dos compósitos em fibra de vidro.

Orientação	Amostra	t (*) [mm]	Área [mm ²]	Massa do compósito [g]	Massa da fibra [g]	Massa da matriz [g]	Densidade compósito [kg/m ³]	Volume compósito [mm ³]	v_f [%]
[0°]	1	1,20	98,193	0,212	0,137	0,075	1799,442	117,831	45,679
	2	1,10	117,150	0,240	0,166	0,074	1859,621	128,865	50,407
	3	1,05	113,120	0,232	0,165	0,067	1955,193	118,776	54,312
	4	1,15	113,775	0,251	0,161	0,090	1921,565	130,841	48,330
	5	1,15	113,775	0,237	0,167	0,070	1809,674	130,841	49,945
[90°]	1	2,000	117,700	0,428	0,325	0,103	1819,711	235,400	54,131
	2	2,050	115,500	0,428	0,324	0,104	1808,046	236,775	53,662
	3	2,000	115,995	0,434	0,327	0,107	1869,262	231,990	55,288
	4	2,000	111,605	0,419	0,313	0,106	1878,142	223,210	54,921
	5	2,050	100,000	0,377	0,298	0,079	1841,122	205,000	57,083
[±45°]	1	2,000	112,875	0,312	0,206	0,106	1382,680	225,750	35,846
	2	2,100	106,483	0,305	0,198	0,107	1362,486	223,613	34,661
	3	2,000	124,073	0,338	0,226	0,112	1363,517	248,145	35,681
	4	2,000	117,935	0,329	0,218	0,111	1396,914	235,870	36,304
	5	2,050	106,425	0,301	0,198	0,103	1377,542	218,171	35,505

(*) espessura

Fonte: Próprio Autor.

Como descrito anteriormente, os laminados orientados a $\pm 45^\circ$ foram fabricados com tecido bidirecional de menor gramatura do que o tecido utilizado nos laminados de 0° e 90° . Sendo assim, verifica-se uma fração volumétrica menor no compósito a $\pm 45^\circ$ frente aos demais laminados.

2.3.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Foram obtidas micrografias com ampliação de até 1200x, as quais são apresentadas na Figura 2-23, referente aos laminados em epóxi reforçados com fibra de vidro.

Figura 2-23 – Imagens dos laminados em epóxi reforçados por fibras de vidro orientadas à 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ (da esquerda para direita).

Fonte: Próprio Autor.

Como esperado, verifica-se que houve uma boa adesão fibra-matriz, uma vez que é possível observar grumos da matriz presentes nas fibras de vidro. Isso se deve ao fato das fibras utilizadas na fabricação dos compósitos serem tratadas com silano, que de acordo com Arun prakash (2016), o composto 3-amino-opropilmetoxisilano torna-se o agente de acoplamento entre os componentes fibra-matriz. Esse tipo de tratamento induz a reação química entre fibra e matriz polimérica, o que proporciona melhor adesão entre ambos, influenciando na melhora das propriedades mecânicas como resistência à tração e à flexão.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE ALGODÃO

2.4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Analogamente aos compósitos de epóxi reforçados com fibra de vidro, foram realizados ensaios de tração nos compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de algodão, possibilitando estudar seu comportamento mecânico e a determinação de algumas propriedades mecânicas.

Para os corpos-de-prova de tração, na Figura 2-24, tem-se as curvas tensão-deformação com as fibras orientadas a 0° , sendo que o CDP 04 apresentou o maior valor de máxima tensão de 88 MPa para ensaios empregando o travessão da máquina.

Figura 2-24 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 0° .

Fonte: Próprio Autor.

Além disso, diferentemente dos compósitos de epóxi reforçados com fibra de vidro, o referido material apresentou uma resposta não-linear e dúctil. Os ensaios empregando o

travessão da máquina demonstraram que a média dos valores de resistência à tração paralela à fibra (X_T) e dos limites de deformação (X'_T) são de 83,07 MPa e 4,28%, respectivamente. O CDP 02 exibiu um comportamento mais rígido perante as outras amostras, sendo verificado um módulo de elasticidade (E_{11}) de 4,85 GPa via travessão da máquina. Ademais, o coeficiente de Poisson (ν_{12}) obtido via DIC para o compósito em resina epóxi com fibras de algodão foi de 0,48.

Para os CDPs com as fibras orientadas a 90° , as curvas tensão-deformação são mostradas na Figura 2-25. Apesar de realizar testes em cinco amostras, alguns resultados foram excluídos, devido a uma variação muito alta. Além disso, para esta orientação de fibra, o material novamente apresenta uma resposta não-linear e dúctil.

Os ensaios empregando o travessão da máquina demonstraram que os valores de tensão máxima e deformação máxima foram, respectivamente, 17,08 MPa e 1,67%. A média da resistência à tração (Y_T) foi de 15,08 MPa com uma variação de 2,82 MPa e para o limite de deformação (Y'_T) de 1,31%, sendo seu desvio de 0,51%. O módulo de elasticidade perpendicular às fibras (E_{22}) apresentou, de acordo com os ensaios via travessão da máquina, uma média de 2,02 GPa. Deve-se destacar que esse valor teve um aumento para 2,83 GPa para medidas realizada através do *software* de correlação de imagens. Ademais, via DIC, o coeficiente de Poisson (ν_{21}) obtido apresentou o valor de 0,25.

Figura 2-25 - Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 90°.

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 2-26, são apresentadas as curvas tensão-deformação dos compósitos fabricados com as fibras orientadas à $\pm 45^\circ$, que também apresenta uma resposta não-linear e dúctil. O valor de tensão e deformação máxima são de 60,85 MPa e 4,91%, respectivamente, ambos apresentados pelo CDP 03 e obtidos via travessão da máquina. O valor médio da máxima tensão obtido foi de $55,54 \pm 4,69$ MPa, enquanto que para o limite de deformação, o valor médio atingiu $4,50 \pm 0,36\%$. Empregando a técnica de correlação de imagens, o valor médio do módulo de elasticidade é de 3,27 GPa com desvio padrão de 0,54 GPa. O CDP 01 apresentou um comportamento mais rígido quando comparado aos demais. Deve-se destacar que mesmo para ensaios empregando DIC, alguns resultados discrepantes, que causavam desvios muito elevados, foram descartados.

Figura 2-26 – Curvas tensão-deformação de tração para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a $\pm 45^\circ$.

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 2-6 são apresentados os resultados dos ensaios de tração obtidos para o compósito de resina epóxi reforçado com fibra de algodão.

Tabela 2-6 - Resultados para o compósito de epóxi reforçado com fibras de algodão sob tração.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (DIC)	E [GPa]	E [GPa] (DIC)
[0°]	1	80,36	4,64	-	4,10	-
	2	88,00	4,85	-	4,85	-
	3	80,85	4,82	-	4,49	-
	4	83,90	4,37	2,60	4,88	9,93
	5	76,01	3,97	2,30	4,34	6,81
[90°]	1	13,09	0,95	-	1,84	-
	2	17,08	1,67	1,08	2,21	2,83
[±45°]	1	51,95	4,21	-	3,79	-
	2	53,82	4,39	-	3,30	-
	3	60,85	4,91	-	2,72	-

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de módulo de elasticidade para os CDPs a 90° são próximos dos valores a $\pm 45^\circ$, devido à presença de fibras de amarração posicionadas na direção transversal do tecido UD de fibra de algodão.

Foi calculado o módulo de cisalhamento (G_{12}) de 1,56 GPa, a partir do coeficiente angular da parcela elástica da curva de tensão de cisalhamento versus distorção angular obtida via DIC (Figura 2-27).

Figura 2-27 – Tensão de cisalhamento versus distorção angular para compósito epóxi reforçado por fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Por fim, Herakovich (1997) apresenta valores de Pegoretti *et al.* (2001), que realizou um estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos reforçados por fibras de vidro. Juntamente com Adams (2003), os referidos pesquisadores obtiveram valores de módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson, que estão apresentados na Tabela 2-10, aos quais são comparados com os valores obtidos no presente trabalho. Verifica-se que praticamente para todos os valores há uma reduzida divergência entre os resultados. Apenas para o módulo de cisalhamento é que se verifica uma certa discrepância. Isto pode ser justificado devido à dificuldade em se fabricar os CDPs com empilhamento $\pm 45^\circ$. Isto demonstra que o processo de fabricação realizado em laboratório produz CDPs de qualidade aceitável. Portanto, as variações abruptas de respostas encontradas em ensaios estão relacionadas a erros de medidas e/ou a aspectos inerentes aos constituintes do próprio material compósito. Isto ocorre principalmente com os compósitos reforçados por fibras de algodão,

haja vista que as mesmas são de origem vegetal e, portanto, possuem variações inerentes em sua formação. Porém, com base no conhecimento do presente autor, devido à originalidade deste material (resina epóxi reforçada por fibra de algodão), não há valores na literatura para realizar uma comparação.

Tabela 2-7 – Valores de referência de propriedades mecânicas referente ao compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro

Propriedades	Unidade	Pegoretti, A et al. (2001)	Adams, F. D. (2003)	Presente trabalho
Módulo de Elasticidade paralelo à fibra (E_{11})	GPa	40,0	43,0	38,6
Módulo de Elasticidade perpendicular à fibra E_{22}	GPa	11,00	9,70	12,95
Módulo de Cisalhamento para o plano 1-2 (G_{12})	GPa	4,20	6,20	2,67
Coefficiente de Poisson no plano 1-2 (ν_{12})	-	0,26	0,26	0,23
Coefficiente de Poisson no plano 2-1 (ν_{21})	-	0,070	-	0,072
Fração volumétrica de fibra	%	60,00	60,00	52,38

Fonte: Próprio Autor.

2.4.2. ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS

Seguindo a norma ASTM D790, foram realizados ensaios de flexão 3-pontos, e as curvas tensão-deformação foram levantadas a fim de analisar o comportamento do compósito frente à solicitação de flexão, visando obter a máxima tensão de flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}^f$), a máxima deformação de flexão ($\varepsilon_{m\acute{a}x}^f$) e o módulo de elasticidade à flexão (E^f).

A Figura 2-28 representa as curvas tensão-deformação, para a solicitação de flexão de compósitos constituídos por resina epóxi reforçados com fibras de algodão orientadas a 0°. Vale ressaltar que todas as amostras exibem um comportamento similar entre si. O valor médio do módulo de elasticidade à flexão foi de 34,38 GPa com um desvio padrão de 1,14 GPa. O valor médio da tensão máxima de flexão é de 219,22 MPa, enquanto que o valor médio da deformação

máxima de flexão é de 1,93%. Além disso, como era esperado, todos os CDPs apresentam respostas altamente não-lineares e dúcteis.

Figura 2-28 - Curvas tensão-deformação de flexão para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.

Fonte: Próprio Autor.

Analogamente às amostras com fibras orientadas a 0°, os corpos-de-prova à $\pm 45^\circ$ (Figura 2-29) apresentaram um comportamento similar entre si e valores próximos de módulo de elasticidade à flexão. O CDP 02 demonstrou o maior valor de módulo de elasticidade com 27,81 GPa, sendo que o valor médio foi de 24,98 GPa.

Figura 2-29 - Curvas tensão-deformação de flexão para epóxi reforçada com fibras de algodão orientadas a $\pm 45^\circ$.

Fonte: Próprio Autor.

O valor médio da tensão máxima de flexão foi de 182,05 MPa e o valor médio de deformação máxima de flexão foi de 2,31% como mostra a Tabela 2-8.

Tabela 2-8 - Resultados para o compósito de epóxi reforçada com fibras de algodão sob flexão.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{máx}^f$ [MPa]	Média e Desvio Padrão	$\epsilon_{máx}^f$ (%)	Média e Desvio Padrão	E^f [GPa]	Média e Desvio Padrão
[0°]	1	203,07	219,22	1,71	1,93	35,67	34,38
	3	238,23	±	2,042	±	33,96	±
	4	216,35	17,75	2,041	0,19	33,52	1,14
[±45]	1	183,75	182,05	2,23	2,31	24,80	24,98
	2	199,80	±	2,36	±	27,81	±
	3	173,66	13,04	2,25	0,08	24,24	±
	4	170,99		2,40		23,10	2,01

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se um elevado desvio padrão nos laminados, em ambas as orientações. Pode-se dizer que essa divergência no comportamento é uma característica inerente às fibras vegetais, fazendo com que o valor de máxima tensão a 0° se aproxime do valor de $\pm 45^\circ$.

2.4.3. FRAÇÕES MÁSSICAS PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO

Assim como mencionado, com o objetivo de se medir frações mássicas para compósitos em fibra de algodão, foram realizados ensaios termogravimétricos, na qual obteve-se resultados que descrevem a degradação do material, representado pela perda de sua massa, em função da temperatura. Deve-se destacar que, inicialmente, foi realizado o ensaio apenas para a fibra de algodão (Figura 2-30) com o objetivo de identificar o pico de temperatura suportada pelo material até o início de sua degradação.

Figura 2-30 – Análise termogravimétrica para fibras de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

O primeiro estágio encontra-se na faixa entre 0° a 100°C com a perda de aproximadamente 5% de massa, referente a presença de água. O segundo estágio vem acompanhado de uma mudança, a qual o pico se encontra em seu ponto máximo, 346,04°C e representa a temperatura em que a variação é máxima no processo. Após a perda de água inicial, a degradação do algodão ocorreu em uma etapa na faixa de temperatura de 218,70°C até

405,75°C, com perda de 64,50% de sua massa. Nota-se uma segunda fase entre 372,32°C a 580,77°C com perda de 28,75% em massa e, finalmente, um resíduo de 1,37%.

A Figura 2-31 exibe os resultados para os ensaios realizados nos compósitos em resina epóxi reforçado por fibra de algodão.

Figura 2-31 – Análise termogravimétrica para compósitos em epóxi reforçado por fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

A fabricante, PerkinElmer, realizou uma caracterização de diversos polímeros pelo ensaio de TGA e verificou no processo de degradação da resina epóxi a perda de 57% de massa, quando esta atingiu 440°C. Nos ensaios realizados nos compósitos em resina epóxi reforçado com fibra de algodão, verificou-se a perda de 57% de massa, quando esta atingiu 388,49°C.

Inicialmente, após a primeira fase de perda de água do material, observou-se a presença de dois picos mais evidentes (359,18°C e 388,49°C) na curva da derivada da massa, os quais foram utilizados para a reprodução da curva experimental e, consequentemente, da estimativa das curvas que descrevem a mesma. Estas, por sua vez, representam a presença de dois tipos de materiais distintos. Diante as temperaturas presentes na curva, observa-se que o primeiro pico se aproxima da temperatura apresentada pela fibra de algodão. Ademais, como dito

anteriormente, a temperatura máxima de degradação apenas da resina epóxi, aproxima-se do segundo pico, obtido no ensaio de TGA.

Na tentativa de se estimar as frações mássicas dos constituintes (fibra e matriz polimérica) para os compósitos reforçados por fibra de algodão, foi utilizado o método de deconvolução (Figura 2-32).

Figura 2-32 – Picos analisados pelo método de deconvolução utilizado para estimar frações mássicas para o compósito de epóxi reforçado por fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Utilizando a Regra das Misturas, verifica-se que a fração volumétrica de fibras é dada pela equação (13)

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (13)$$

Sabendo que o volume do compósito, o volume da matriz e o volume de fibra são representados pelas equações (14), (15) e (16) assumindo ausência de vazios, tem-se respectivamente:

$$V_c = V_m + V_f \quad (14)$$

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} \quad (15)$$

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} \quad (16)$$

Dessa forma:

$$v_f = \frac{V_f}{\frac{M_m}{\rho_m} + \frac{M_f}{\rho_f}} \quad (17)$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} = \frac{V_f}{V_m + V_f} = \frac{V_f}{\frac{M_m}{\rho_m} + \frac{M_f}{\rho_f}} \quad (18)$$

Dividindo pela M_c (massa de compósito), tem-se:

$$v_f = \frac{\frac{V_f}{M_c}}{\frac{M_m}{\rho_m M_c} + \frac{M_f}{\rho_f M_c}} = \frac{\frac{M_f}{\rho_f M_c}}{\frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_f}{\rho_f}} = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_f}{\rho_f}} \quad (19)$$

Dessa forma, foi possível estimar a fração volumétrica de fibra dos compósitos reforçados com algodão apresentadas na Tabela 2-9. Para obter as frações mássicas dos materiais, foi realizado uma estimativa presente em cada curva, através do cálculo de suas áreas.

Tabela 2-9 – Valores obtidos através do método de deconvolução para o compósito de epóxi reforçado por fibras de algodão.

Pico	Área da curva reproduzida	Área em relação a cada pico	Fração mássica [%]	v_f [%]
1	838,21	375,85	44,84	40,08
2		471,98	56,31	

Fonte: Próprio Autor.

Através do método de deconvolução utilizado, foi possível uma representação de 97% da curva obtida experimentalmente, além de estimar as frações de mássicas e volumétricas de fibra para o compósito de resina epóxi reforçado com fibra de algodão.

2.4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFOÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO

Na Figura 2-33 é possível observar as imagens obtidas a partir dos laminados de 0°, 90° e +/-45°, ampliadas em até 1200x.

Figura 2-33 – Imagens dos laminados em epóxi reforçados por fibras de algodão orientadas à 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ (da direita para a esquerda).

Fonte: Próprio Autor.

Assim como nos compósitos reforçados por fibra de vidro, as análises via MEV foram realizadas e micrografias foram obtidas para os compósitos em epóxi reforçados com fibra de algodão. Nas imagens, observa-se que as fibras não estão organizadamente orientadas.

Diferentemente dos compósitos reforçados por fibras de vidro, os compósitos reforçados por fibras de algodão não tiveram o processo de tratamento superficial para as fibras e, nota-se assim que quase não houve interação fibra-matriz, uma vez que não há presença de grumos ao redor das fibras. Além disso, é possível notar cavidades, as quais denotam efeito de *pull-out* das fibras, ou seja, como estas tivessem sido “arrancadas” com o carregamento imposto ao corpo de prova, evidenciando a falta de adesão fibra-matriz.

2.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segue uma comparação dos resultados dos compósitos fabricados em epóxi reforçado por fibra de vidro com o reforçado por fibra de algodão.

Os valores máximos de tensão à tração são apresentados na Figura 2-34, a qual deixa evidente a divergência nos resultados entre as diferentes fibras. Para todas as orientações, o compósito em fibra de vidro se apresentou comportamento superior frente ao compósito em fibra de algodão. Essa resposta se deve, em parte, a maior interação fibra-matriz nos compósitos reforçados com fibra de vidro, uma vez que estas receberam tratamento superficial, como foi observado nas imagens obtidas pelo MEV. Além das propriedades mecânicas da fibra de vidro serem superiores às propriedades da fibra de algodão.

Figura 2-34 – Comparação dos valores de máxima tensão à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Os valores para os limites de deformação são apresentados pela Figura 2-35. Vale ressaltar que há pequenas diferença nos valores entre os resultados obtidos via travessão da máquina e empregando DIC-CORRELI. Verifica-se, inclusive, que alguns CDPs ensaiados via correlação de imagens apresentaram valores inferiores aos medidos diretamente pelo travessão da máquina. Como já foi mencionado, o DIC permite obter um deslocamento local da amostra, o que descarta possíveis escorregamentos e folgas presentes nos equipamentos de ensaios. Os valores do limite de deformação mostram também um comportamento característico de cada compósito, tendo maior deformação quando as fibras estão orientadas a $\pm 45^\circ$, e valores menores, quando as fibras estão orientadas à 90° .

Figura 2-35 - Comparação dos valores de limite de deformação à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão

Fonte: Próprio Autor.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios dos compósitos de ambas as fibras são apresentados pela Figura 2-36. Como o cálculo foi baseado nos resultados dos limites de deformação adquiridos com o método DIC-CORRELI, é possível observar valores superiores em todos os casos quando comparados com os obtidos pelo travessão.

Figura 2-36 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade à tração para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão

Fonte: Próprio Autor.

Por fim, a Figura 2-37 exibe os valores do coeficiente de Poisson obtidos para ambos os compósitos obtidos via DIC.

Figura 2-37 – Comparação dos valores do coeficiente de Poisson para compósitos de resina epóxi reforçado por fibra de vidro e algodão

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2-10 – Valores médios de resistência, limite de deformação, módulo de elasticidade à tração e coeficiente de Poisson: compósito de epóxi reforçado com fibra de vidro (FV) e algodão (FA).

Reforço	Orientação	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\epsilon_{11}^{máx}$ [%]	E [GPa]	ν_{12}	ν_{21}
FV	[0°]	775,26	2,28	38,06	0,21	-
	[90°]	117,65	1,23	13,62	-	0,077
	[±45°]	83,29	7,41	7,14		
FA	[0°]	79,95	2,6	8,37	0,48	-
	[90°]	14,13	1,19	2,10	-	0,12
	[±45°]	49,31	2,41	3,77	-	-

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de módulo de elasticidade para os CDPs a 90° são próximos dos valores a +/45°, devido a diferença das fibras utilizadas na fabricação dos compósitos (UD e BD).

Já nos ensaios de flexão 3-pontos, houve repetibilidade de resposta para o compósito reforçado por fibras de algodão orientadas a 0°, sendo que os resultados de resistência, módulo de elasticidade à flexão e limite de deformação apresentam reduzidos valores de desvio padrão.

Sideridis & Papadopoulos (2003) realizaram ensaios mecânicos de flexão 3-pontos para estudar propriedades de flexão e cisalhamento em compósitos fabricados por epóxi e fibra de vidro unidirecional. Diversas orientações de fibras foram fabricadas como 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° e propriedades como máxima deformação (ϵ^f), máxima tensão à flexão (σ^f) e módulo de elasticidade à flexão (E^f) foram levantadas. Os laminados a 0° apresentaram deformações de 2,33% e módulo de elasticidade de 41,02 GPa variando 12% e 16%, respectivamente, que são similares aos resultados obtidos no presente trabalho. Diante dos valores confrontados, pode-se verificar que o compósito em fibra de algodão apresenta uma boa resposta mecânica sob flexão.

2.6. CONCLUSÕES PARCIAIS

Tendo como objetivo estudar e caracterizar os compósitos de resina epóxi reforçados por fibras de vidro e de algodão, foram realizados ensaios de tração e flexão 3-pontos para não somente obter propriedades mecânicas, mas também avaliar o comportamento mecânico desses materiais. Além disso, foram realizados ensaios a fim de se obter medidas de fração mássica e/ou volumétrica de fibra, bem como análises via microscopia eletrônica de varredura para verificar os modos de falha dos compósitos investigados.

Na análise dos resultados obtidos pela fibra sintética (fibra de vidro) e vegetal (fibra de algodão), nota-se que os valores de resistência à tração dos laminados orientados à 0° (X_T) e 90° (Y_T) apresentam uma diferença média de dez vezes. Enquanto que suas deformações possuem praticamente os mesmos valores para ambas as fibras. Além disso, observa-se que o módulo de elasticidade pode chegar a uma diferença de cinco vezes, quando comparados aos resultados para os diferentes reforços. Com base nas análises via MEV, verifica-se que não houve uma boa interação fibra-matriz nos compósitos reforçados por fibras de algodão, uma vez que estas não foram tratadas, facilitando assim a ocorrência de *pull-out*.

Com relação aos ensaios de flexão, apesar dos valores superiores dos laminados fabricados com fibras sintéticas, nota-se que há uma pequena diferença em relação ao compósito em reforço com fibra vegetal, o que demonstra ser um material promissor.

Com relação ao compósito fabricado com fibras de algodão orientadas a 90° , observou-se nos ensaios realizados uma grande divergência entre o comportamento das amostras, não sendo possível discutir os resultados.

Figura 2-38 – (a) Compósito reforçado por fibra de vidro; (b) Compósito reforçado por fibra de algodão

Fonte: Próprio Autor.

Em suma, os compósitos de resina epóxi reforçados por fibras de algodão devem ter reforços que recebam tratamento superficial adequado a fim de que melhorem suas propriedades mecânicas e de que reduzam sua variabilidade em termos de respostas. Ou seja,

isto é uma condição inicial necessária para se vislumbre o emprego desse material no segmento aeronáutico.

3. COMPÓSITOS DE RESINA POLIURETANA DERIVADA DO ÓLEO DA MAMONA

3.1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de estudar o comportamento de compósitos frente a solicitações e esforços mecânicos, que possam ser aplicados de forma a não prejudicar o meio ambiente, este capítulo abordará tópicos referentes aos compósitos fabricados com resina poliuretana (PU), reforçados por fibra de vidro e algodão. De forma sucinta, serão apresentadas informações somente sobre a PU, uma vez que já fora feita uma abordagem para os demais materiais, no capítulo 2.

Poliuretana do óleo da mamona (*Ricinus communis* L.)

A mamona (*Ricinus communis* L.) pertencente à família Euphorbiaceae de região tropical e apresenta um potencial econômico e estratégico do país, devido sua abundância em território brasileiro (SAVY, 2001). Sendo o terceiro maior exportador de óleo de mamona do mundo, o Brasil compartilha a liderança com a Índia (em primeiro lugar) em seguida da China (FAOSTAT, 2011; BAUDDH, 2014). Como planta, encaixa-se como opção de materiais biodegradáveis, de fonte renovável.

Estudo experimental com coelhos demonstrou que seu óleo, extraído pela prensagem de suas sementes, apresenta fácil processabilidade, excelentes propriedades estruturais, ausência de vapores irritantes e de reações inflamatórias do tipo corpo estranho, baixa hidrofília, pouca aderência bacteriana, tornando-o assim um material de excelente biocompatibilidade e perfeita interação com o organismo (IGNÁCIO, et al., 1997)

Com alto teor de ácido ricinoleico, o óleo de rícino é constituído por três pontos de funcionalidade, sendo eles: o grupo carboxílico, o ponto de insaturação e o grupo hidroxilo. Essa estrutura única lhe confere maior versatilidade, quando comparado a outros óleos vegetais e se adequa em sua utilização para a fabricação de elastômeros de poliuretana (QUIPENG, et al.,

1990). Devido aos baixos valores de hidroxila e a presença de hidroxilas secundárias, a poliuretana apresenta um lento tempo de cura e alta inflamabilidade (BASER & KHAKHAR, 1993; PAN, et al., 2008). Assim, suas aplicações para materiais estruturais são, portanto, limitadas (JIA, 2006; CLEMITSON, 2008).

Dessa forma, estudos foram realizados pelo Instituto de Indústria Química de Produtos Florestais da China para melhorar as propriedades de resistência térmica. Essa melhoria consistiu em modificar a estrutura da poliuretana durante sua síntese, adicionando um anel de benzeno, o qual proporcionou maior estabilidade térmica e diminuição da taxa de liberação de calor e perda de massa das amostras (ZHANG, et al., 2014).

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS: PROCESSO DE FABRICAÇÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Assim como a resina epóxi, o biopolímero da mamona é um bi-componente, por sua vez, formado por pré-polímero e poliol. O poliol é sintetizado a partir do óleo da mamona, enquanto que o pré-polímero a partir do difenilmetano diisocianato (MDI) e pré-polimerizado com um poliol também do óleo da mamona (SILVESTRE, 2001). Durante o processo de mistura dos componentes, percebe-se que sua reação com a umidade do meio libera CO₂, gerando assim, bolhas durante o processo, o que afeta a qualidade do compósito final. Por isso, o procedimento de obtenção das amostras de compósito em poliuretana derivada de óleo de mamona (PU) foi realizado em sala com monitoramento de umidade (40% de umidade relativa do ar) e temperatura. Além disso, uma bomba de vácuo foi utilizada no processo de cura. A grande dificuldade foi manipular o biopolímero e as fibras em um tempo curto, sendo que em 20 minutos tem-se o início da polimerização (tempo de gel).

A PU, que foi gentilmente doada pela empresa Poliquil Araraquara Polímeros Químicos Ltda (Araraquara – Brasil), é composta pelo pré-polímero [329 L (59% m/m)] e poliol [471 (41% m/m)]. Foram utilizados os reforços de fibra de vidro WRU-140 (140 g/m²) proveniente da TexiglassTM e fibra de algodão (151 g/m²), que foram fornecidos pela Fábrica de Toalhas São Carlos, ou seja, os mesmos reforços utilizados nos compósitos de epóxi. Portanto,

novamente, a fibra de algodão não passou por nenhum tratamento superficial antes de ser utilizada na fabricação dos compósitos laminados.

Para a fabricação dos laminados em poliuretana (PU) derivada do óleo de mamona reforçados com fibra de vidro ou algodão foram feitas algumas pequenas modificações no processo de infusão anteriormente apresentado para os laminados em resina epóxi. Houve a preparação de uma bolsa de vácuo, empregando fita selante dupla face. No entanto, inicialmente, aplica-se cera no molde de vidro e, em seguida, faz-se a acomodação do tecido desmoldante. Verti-se no molde metade da quantidade total da resina PU a ser aplicada e, então, faz-se o empilhamento dos tecidos de fibra de vidro ou de fibra de algodão. Após o processo de empilhamento, a segunda metade do volume de resina é aplicada sobre a pilha de tecidos. Por fim, aplica-se mais uma camada de tecido desmoldante e, então, a tela plástica, que permite a percolação da resina. A fim de se apresentar melhor o processo de fabricação, segue abaixo o detalhamento de cada fase:

- a) **Preparo do molde:** limpa-se a base de vidro temperado e sobre ela é delimitado o perímetro da bolsa de vácuo com fita dupla face, que será utilizado para o fechamento e vedação da referida bolsa;
- b) **Agente desmoldante:** Aplica-se cera a base de carnaúba, que atua como agente desmoldante, impedindo que o laminado final fique aderido ao vidro (Figura 3-2).

Figura 3-1 – Preparação do molde: Agente desmoldante

Fonte: Próprio Autor.

- c) **Forramento da base do molde:** Em seguida, coloca-se o tecido desmoldante (*Peel Ply*) (Figura 3-2);

Figura 3-2 – Molde forrado com tecido peel ply.

Fonte: Próprio Autor.

- d) **Aplicação da resina:** Após o preparo da resina em suas devidas proporções, verti-se a primeira metade do volume de resina de PU no molde, sendo que a segunda metade é vertida somente após ocorrer o empilhamento completo de todas as camadas de tecido de reforço (Figura 3-3);

Figura 3-3 – Primeira metade de volume de resina PU sendo vertida sobre o molde.

Fonte: Próprio Autor.

- e) **Wet-Lay-Up:** Distribui-se a resina em todo o tecido de reforço com auxílio de uma espátula como feito no processo de *Wet-Lay-Up* (Figura 3-4);

Figura 3-4–Distribuição da resina na área do molde.

Fonte: Próprio Autor.

- f) **Empilhamento das camadas:** Empilha-se sobre o molde as camadas de tecido de reforço de acordo com o estabelecido no projeto (Figura 3-5);

Figura 3-5 – Empilhamento das camadas.

Fonte: Próprio Autor.

- g) **Tela plástica:** Realizado o empilhamento, coloca-se mais uma camada de *Peel Ply*, seguida de uma tela plástica, que permite a percolação da resina. (Figura 3-6);

Figura 3-6–Aplicação da tela plástica.

Fonte: Próprio Autor.

- h) **Fechamento da bolsa:** Fecha-se a bolsa com o plástico para a aplicação do vácuo (Figura 3-7);

Figura 3-7 – Fechamento da bolsa para vácuo.

Fonte: Próprio Autor.

- i) **Vedação da bolsa:** A vedação da bolsa se dá por meio da fita dupla face para que não haja entrada de ar e saída de resina, promovendo o vácuo no interior da bolsa (Figura 3-8);

Figura 3-8 – Vedação da bolsa de vácuo.

Fonte: Próprio Autor.

- j) **Aplicação do vácuo:** Vácuo é aplicado através de um tubo em espiral, que se encontra no interior da bolsa, ligado a uma bomba de vácuo. Este tubo em espiral é posicionado em um dos lados do molde, no qual o ar é retirado da mesma, através de uma mangueira conectada a bomba (Figura 3-9).

Figura 3-9 – Aplicação de vácuo.

Fonte: Próprio Autor.

A cura das placas fabricadas em PU reforçadas ocorreu em temperatura ambiente, sendo que foram empregadas dez camadas de reforço e os seguintes empilhamentos: $[0^\circ]$, $[90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$. Vale ressaltar que os CDPs com empilhamentos a $\pm 45^\circ$, neste caso, foram fabricados à partir do mesmo tecido unidirecional. Em virtude da dificuldade de se trabalhar com o empilhamento de tecidos cortados a $\pm 45^\circ$, para as placas fabricadas posteriormente, optou-se pelo empilhamento a $0^\circ/90^\circ$, rotacionando-os no momento do corte.

Assim como os compósitos de epóxi, os laminados fabricados com a PU foram cortados em dimensões apresentadas na Figura 2-8. A ordem das marcações, onde as medições de largura e espessura foram realizadas estão referenciadas por 1, 2 e 3, respectivamente.

A Tabela 3-1, traz os valores das dimensões das amostras em PU reforçadas por fibra de vidro, enquanto que a Tabela 3-2 e a Tabela 3-3 trazem os valores das dimensões dos corpos-de-prova de PU reforçados com fibra de algodão obtidos após o corte.

Tabela 3-1 – Geometria dos CDPs de tração de PU reforçada com fibras de vidro.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área (mm ²)
[0°]	1	24,60	24,95	25,00	24,85	0,70	0,70	0,65	0,68	16,98
	2	25,75	25,25	24,70	25,23	0,65	0,70	0,65	0,67	16,82
	3	24,65	24,00	23,50	24,05	0,65	0,70	0,65	0,67	16,03
	4	24,65	24,50	24,50	24,55	1,30	1,60	1,60	1,50	36,83
	5	23,70	24,25	24,70	24,22	1,30	1,30	1,30	1,30	31,48
[90°]	1	25,10	25,45	25,50	25,35	0,70	0,65	0,65	0,67	16,90
	2	25,95	26,10	26,40	26,15	0,70	0,65	0,70	0,68	17,87
	3	25,85	26,00	26,10	25,98	1,45	1,40	1,40	1,42	36,81
	4	25,85	25,75	24,85	25,48	1,35	1,35	1,30	1,33	33,98
[±45°]	1	24,80	25,00	25,50	25,10	0,70	0,70	0,70	0,70	17,57
	2	26,10	25,40	25,00	25,50	0,70	0,70	0,70	0,70	17,85
	3	26,80	27,25	27,40	27,15	0,70	0,70	0,70	0,70	19,01
	4	24,00	24,05	24,00	24,02	1,15	1,20	1,20	1,18	28,42
	5	24,75	24,55	24,30	24,53	1,25	1,35	1,30	1,30	31,89

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3-2 – Geometria dos CDPs de tração de PU reforçado com fibras de algodão.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área (mm ²)
[0°]	4	26,25	26,05	26,25	26,18	2,20	2,35	2,20	2,25	58,91
	5	25,65	26,40	26,90	26,32	2,40	2,20	2,20	2,27	59,65
	6	26,70	26,90	26,30	26,63	2,50	2,30	2,45	2,42	64,36
[90°]	3	25,60	25,65	26,10	25,78	2,15	2,25	2,30	2,23	57,58
	4	26,60	26,25	25,40	26,08	2,30	2,25	2,10	2,22	57,82
	5	26,60	26,15	25,70	26,15	2,35	2,20	2,40	2,32	60,58
[±45°]	3	25,90	25,70	25,60	25,73	2,20	2,25	2,35	2,27	58,33
	4	26,05	26,50	26,60	26,38	2,20	2,25	2,20	2,22	58,48
	5	25,95	25,90	25,85	25,90	2,25	2,30	2,25	2,27	58,71

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3-3 – Geometria dos CDPs de flexão 3-pontos de PU reforçado com fibras de algodão.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Ixx mm⁴
[0°]	1	25,50	25,55	25,50	25,52	4,70	4,75	4,95	4,80	235,16
	2	25,80	25,85	25,75	25,80	4,95	4,85	4,75	4,85	245,28
	3	25,50	25,45	25,40	25,45	5,30	5,10	5,00	5,13	286,88
	4	25,75	25,75	25,75	25,75	4,50	4,50	4,60	4,53	199,91

Fonte: Próprio Autor.

Processo de “Normalização”

Os compósitos em poliuretana, pelos mesmos motivos dos compósitos em epóxi, passaram também pelo processo de “normalização” a fim de garantir que os corpos-de-prova estudados possuam níveis compatíveis de grau de cura.

Para evitar a degradação tanto da fibra, quanto da matriz, buscou-se temperaturas à serem utilizadas como base para a determinação da temperatura a ser utilizada no processo de “normalização”. Como já mencionado, para a PU, SILVA (2003) estudou compósitos formados pela resina PU reforçados com fibras vegetais, e utilizou a análise térmica dinâmico mecânica (DMTA), obtendo uma T_g de 84°C para a poliuretana. Por isso, foi utilizada a temperatura de 60 °C – 80% do valor da temperatura mínima – durante o processo de pós-cura, em uma estufa nas dependências do LEA (Laboratório de Estruturas Aeronáuticas – EESC/USP).

Ensaio de Tração

Realizou-se ensaios mecânicos quase-estáticos de tração com velocidade de 2,0 milímetros por minuto, utilizando uma máquina universal de ensaios – EMIC – com capacidade de 100kN. (Figura 2-12), para CDPs de flexão e alguns de tração. Ensaio adicional de tração foram realizados em CDPs com empilhamentos $[0^\circ]_{10}$, $[90^\circ]_{10}$ e $[\pm 45^\circ]_{10}$, utilizando a técnica DIC-CORRELI. Tais ensaios foram realizados em uma máquina universal INSTRON® 5900 (Figura 2-13) com uma taxa de aquisição de 2,5 kHz. Com base nos resultados dos ensaios de tração pode-se obter as curvas tensão-deformação, observando-se, assim, não somente o comportamento mecânico das amostras, mas também o módulo de elasticidade e os valores de máxima tensão e máxima deformação.

Ensaio de Flexão

Assim como para os compósitos em resina epóxi, ensaios experimentais monotônicos de flexão 3-pontos também foram realizados para os CDPs de PU, seguindo também a norma ASTM-D790, sendo que as amostras foram cortadas com 250 mm de comprimento. Os resultados dos ensaios de flexão permitiram determinar o módulo de elasticidade à flexão, bem como valores máximos de tensão. Cabe ressaltar que as amostras foram ensaiadas até um deslocamento de aproximadamente 30 mm do travessão da máquina.

Medidas de Fração Mássica e Volumétrica

Logo após os ensaios de tração, amostras dos CDPs em PU reforçadas por fibra de vidro também foram cortadas e levadas a um forno para a queima da matriz, a fim de medir as frações mássicas e volumétricas de fibra nos corpos de prova.

Dispondo da mesma geometria, de dimensões de 10x10 milímetros, as amostras foram devidamente pesadas em uma balança SHIMADZU – modelo AUW220D – e catalogadas extraindo assim dados para futuros cálculos.

Dispostas em uma base cerâmica, as amostras foram levadas ao forno, sendo aquecidas desde a temperatura ambiente até um valor máximo de 600°C, sob uma razão de aquecimento de 10°C por minuto. Após atingir a temperatura máxima, as amostras foram mantidas na mesma por um período de 5 horas. O forno foi desligado e aguardou-se até o seu completo resfriamento. Uma vez que ocorrera a queima da matriz, as fibras remanescentes foram pesadas novamente, obtendo-se assim a massa de fibras.

Análise Termogravimétrica (TGA)

Assim como nos compósitos em epóxi, o método da queima de resina adotado para os compósitos em fibra de vidro, não é viável, quando se trata de fibras vegetais. Assim, foi realizado o ensaio de termogravimetria nos compósitos reforçados por fibras de algodão, com o intuito de medir sua fração mássica.

As amostras foram também ensaiadas com equipamento da PerkinElmer, modelo PyrisTM 1 TGA (Figura 2-18) a uma taxa de 10°C/min, sob ar artificial, iniciando a uma temperatura de 25°C até atingir a temperatura final de 700°C. Para se obter um volume representativo, atendendo as dimensões requeridas pelo equipamento, as amostras foram submergidas em nitrogênio líquido e, só então, fraturadas para os ensaios.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE VIDRO

3.3.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Assim como nos compósitos fabricados em resina epóxi, foram realizados ensaios de tração nos compósitos em PU com o método de correlação de imagens. Dessa forma, a resposta medida via DIC pode ser comparada com os gráficos obtidos diretamente da máquina de ensaios.

Os compósitos com fibras orientadas a 0° (Figura 3-10) apresentaram, via travessão da máquina, uma tensão máxima de 569,67 MPa e deformação máxima de 4,66%. Além disso, verifica-se uma resposta linear elástica e frágil, ou seja, governada pela fibra de vidro.

Figura 3-10 – Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de vidro orientadas a 0° .

Fonte: Próprio Autor.

No caso dos CDPs medidos via DIC, os valores médios de resistência à tração (X_T) e seu limite de deformação (X'_T) foram de $502,70 \pm 90,54$ MPa e $1,86 \pm 0,32\%$, respectivamente. O

módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{11}) obtido via travessão da máquina foi de 15,51 GPa, ao passo que via DIC-CORRELI, obteve-se um valor médio de 29,41 GPa, tendo uma variação de 0,17 GPa.

Com os valores de deformação ε_{22} foi possível calcular o coeficiente de Poisson de 0,25, empregando a técnica de DIC. Infelizmente, alguns ensaios tiveram de ser descartados, devido ao alto desvio padrão gerado.

A Figura 3-11 mostra as curvas tensão-deformação para os compósitos com fibras orientadas a 90° , sendo que o CDP 01 apresentou o maior valor de tensão, chegando a 101,57 MPa e maior nível de deformação (3,05%) via medida experimental pelo travessão da máquina. Assim como nos compósitos de epóxi, verifica-se uma resposta elástica e frágil e ligeiramente não linear. Para os CDPs medidos via DIC, o valor médio de resistência à tração perpendicular às fibras (Y_T) atingiu $97,85 \pm 5,22$ MPa, enquanto que o valor médio do limite de deformação (Y'_T) foi de $1,67 \pm 0,18\%$. O valor médio do módulo de elasticidade perpendicular às fibras (E_{22}), obtido via DIC, foi de 6,73 GPa, com um desvio padrão de 0,035 GPa.

Figura 3-11 – Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de vidro orientadas a 90° .

Fonte: Próprio Autor.

Para os compósitos com empilhamento a $\pm 45^\circ$ (Figura 3-12), o CDP 02 apresentou, via travessão da máquina, o maior valor de máxima tensão (84,67 MPa) e deformação (20,06%). Neste caso, verifica-se uma resposta altamente não linear e dúctil por parte do material. Com os valores de tensão e deformação máxima de cada amostra calculados a partir da análise por correlação de imagens, obteve-se os valores médios de $82,46 \pm 2,93$ MPa e $13,06 \pm 6,63\%$. Nota-se que os CDPs com essa orientação tiveram uma grande deformação, frente aos compósitos fabricados e analisados, atingindo pouco mais de 20% de deformação, como apresentado pelo CDP 05. Apesar das curvas não apresentarem uma faixa de linearidade bem definida, após a análise de cada curva, obteve-se um valor médio do módulo de elasticidade de 5,18 GPa, com um desvio padrão de 0,092 GPa.

Figura 3-12 – Curvas tensão-deformação de tração para poliuretana da mamona reforçada com fibra de vidro a $\pm 45^\circ$.

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 3-4 são apresentados os resultados obtidos do referido compósito.

Tabela 3-4 – Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de vidro sob tração.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (DIC)	E [GPa]	E [GPa] (DIC)
[0°]	1	446,11	3,92	1,64	15,51	29,29
	2	569,67	4,66	2,09	13,06	29,53
[90°]	1	101,57	3,05	1,80	3,72	6,71
	2	98,05	2,63	1,54	4,00	6,76
[±45°]	1	80,39	13,00	6,52	5,24	5,30
	2	84,67	20,06	15,90	5,11	4,73

Os resultados de tensão máxima e de módulo de elasticidade a $\pm 45^\circ$ são menores do que a 90° , pois buscou-se fabricar os CDPs usando o mesmo tecido unidirecional. Porém cabe ressaltar, que este tecido possui fibras transversais que garantem uma certa resistência e rigidez a 90° . Além disso, tais fibras dificultam a laminação balanceada e simétrica para obter CDPs a $\pm 45^\circ$. Ademais, logo a seguir, será visto que os CDPs a 90° possuem um maior valor de fração volumétrica de fibra do que os CDPs a $\pm 45^\circ$.

3.3.2. FRAÇÃO MÁSSICA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Assim como nos compósitos em resina epóxi, foi feita a degradação da matriz através da queima pelo forno e encontrado os valores apresentados na Tabela 3-5.

Com as medidas de cada amostra e suas respectivas massas, através da Equação (12) foi possível obter as frações volumétricas de fibra, a qual nos compósitos em resina PU apresentou uma média de 43%.

Para os valores de vazios, seriam necessárias novas análises, empregando outras técnicas (degradação da matriz por processos químicos, técnica de queima da matriz ou microscopia óptica). A técnica de degradação da matriz por meios químicos segue a norma ASTM 3171 e consiste em dissolver a matriz polimérica em solução composta por ácido nítrico, sendo este, utilizado para dissolver compósitos de matriz em epóxi. Já o método de queima, normalizado pela ASTM D 2584 é utilizado para compósitos fabricados com fibras de vidro, as quais resistem a temperatura de degradação da matriz (500 a 600°C). Todavia, as referidas técnicas não foram aplicadas no presente trabalho.

Tabela 3-5 - Valores de frações volumétricas dos compósitos em fibra de vidro.

Orientação	Amostra	t (*) [mm]	Área [mm ²]	Massa do compósito [g]	Massa da fibra [g]	Massa da matriz [g]	Densidade compósito [kg/m ³]	Volume compósito [mm ³]	v_f [%]
[0°]	1	1,40	116,518	0,243	0,166	0,077	1489,292	163,125	39,977
	2	1,60	127,690	0,288	0,180	0,108	1409,224	204,304	34,468
	3	1,50	120,375	0,254	0,170	0,084	1405,829	180,563	36,996
	4	1,50	98,280	0,212	0,136	0,076	1438,204	147,420	36,087
	5	1,50	104,500	0,224	0,134	0,090	1427,943	156,750	33,469
[90°]	1	1,40	136,875	0,322	0,240	0,082	1680,104	191,625	49,013
	2	1,30	130,103	0,279	0,207	0,072	1648,582	169,133	47,975
	3	1,45	122,760	0,297	0,220	0,077	1668,127	178,002	48,477
	4	1,40	139,150	0,321	0,237	0,084	1649,607	194,810	47,801
	5	1,35	130,000	0,287	0,208	0,079	1637,778	175,500	46,545
[+/-45°]	1	1,25	100,880	0,194	0,141	0,053	1540,285	126,100	43,887
	2	1,20	113,760	0,219	0,158	0,061	1602,277	136,512	45,325
	3	1,20	111,293	0,210	0,152	0,058	1574,005	133,551	44,680
	4	1,30	98,913	0,197	0,139	0,058	1528,235	128,586	42,367
	5	1,20	100,913	0,192	0,138	0,054	1583,963	121,095	44,606

(*) espessura

Fonte: Próprio Autor.

3.3.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

A partir do MEV realizado nos compósitos em PU reforçados por fibra de vidro (Figura 3-13), verifica-se o mesmo comportamento apresentado pelos laminados fabricados em epóxi, ou seja, o efeito do tratamento superficial das fibras que possibilita grande quantidade de grumos ao redor das fibras, demonstrando uma boa interação entre fibra e matriz.

Figura 3-13 – Imagens dos laminados em PU reforçados por fibras de vidro, orientadas à 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ (da direita para a esquerda).

Fonte: Próprio Autor.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: REFORÇO EM FIBRA DE ALGODÃO

3.4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para os corpos-de-prova de tração com fibras orientadas a 0° (Figura 3-14), nota-se que os valores de tensão e deformação máximas são 64,16 MPa e 7,48%, dadas pelos CDPs 05 e 06, respectivamente, medidos via travessão da máquina. Neste caso, diferentemente do reforço com fibra de vidro, tem-se uma resposta não linear e dúctil, que é governada pela fibra de algodão. Para os CDPs avaliados via travessão da máquina, o valor médio de resistência à tração paralela à fibra (X_T) é de 61,47 MPa e o valor médio do limite de deformação (X'_T) é de 6,99%. O valor médio do módulo de elasticidade do biocompósito na direção das fibras é de 2,50 GPa, sendo que o CDP 05 apresentou o maior resultado.

Figura 3-14 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a 0°.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3-15 apresenta as curvas dos biocompósitos com fibras orientadas a 90°. Nota-se que a tensão máxima é de 8,92 MPa e a deformação máxima é de 7,81%, são ambas do CDP 03 medido via travessão da máquina. O valor médio da resistência à tração perpendicular à fibra (Y_T) atingiu 8,34 MPa, enquanto que o valor médio do limite de deformação (Y'_T) é de 6,83%, medido via travessão da máquina. Assim, como as fibras a 0°, o comportamento entre as curvas do biocompósito com fibras a 90° foram similares. O valor médio do módulo elástico (E_{22}) foi de 0,61 GPa, sendo que o CDP 04 apresentou a maior resultado.

Figura 3-15 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a 90°.

Fonte: Próprio Autor.

O empilhamento a $\pm 45^\circ$ (Figura 3-16) apresentou valores bem elevados de deformação quando comparados com os demais empilhamentos, ressaltando um comportamento dúctil e altamente não linear por parte do material. Para os valores de deformação máxima, as amostras reforçadas com fibras a $\pm 45^\circ$ se destacam frente as demais, com valores que atingem aproximadamente 16%. A parcela linear de todas as amostras coincidiu, apresentando uma média de 1,21 GPa, sendo que a amostra de maior resultado foi o CDP 03, com 1,35 GPa.

Figura 3-16 - Curvas tensão-deformação de tração para PU reforçada com fibras de algodão orientadas a $\pm 45^\circ$.

Fonte: Próprio Autor.

São apresentados os resultados obtidos do biocompósito na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 - Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de algodão sob tração.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Média e Desvio Padrão	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	Média e Desvio Padrão	E (GPa)	Média e Desvio Padrão
[0°]	4	62,52	61,47	6,51	6,99	2,63	2,50
	5	64,16	±	6,98	±	2,66	±
	6	57,72	3,35	7,48	0,48	2,20	0,26
[90°]	3	8,92	8,34	7,81	6,83	0,62	0,61
	4	8,50	±	6,45	±	0,64	±
	5	7,58	0,68	6,22	0,86	0,56	0,04
[±45°]	3	27,082	27,91	11,91	13,01	1,35	1,21
	4	25,20	±	11,25	±	1,19	±
	5	31,45	3,21	15,87	2,49	1,10	0,13

3.4.2. ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS

Além dos CDPs de tração, foram ensaiados corpos-de-prova de flexão 3-pontos para o biocompósito com fibras orientadas a 0°. Os resultados de flexão apresentaram uma boa

convergência e similaridade entre as curvas, com relação ao seu comportamento mecânico tem-se também uma resposta dúctil e não-linear. A Figura 3-17 demonstra que o valor máximo de tensão à flexão atingiu 90,41 MPa, enquanto que a amostra se deformou até 6,51%. Além disso, tais valores não apresentaram grandes variações de uma amostra para outra. As curvas também demonstram um comportamento mecânico característico e coincidem entre si. Dessa forma, o valor médio dos módulos de elasticidade à flexão entre os corpos-de-prova foi de 5,38 GPa e apresentou um baixo desvio padrão de 0,18 GPa.

Figura 3-17 - Curvas tensão-deformação de flexão para PU reforçada com fibrasde algodão orientadas a 0°.

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados dos ensaios de flexão, tais como máxima tensão de flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}^f$), máxima deformação de flexão ($\varepsilon_{m\acute{a}x}^f$) e o módulo de elasticidade à flexão (E^f) do biocompósito são apresentados na Tabela 3-7

Tabela 3-7 - Resultados para o compósito de PU reforçada com fibras de algodão sob flexão 3-Pontos.

Empilhamento	CDP	$\sigma_{m\acute{a}x}^f$ [MPa]	Média e Desvio Padrão	$\epsilon_{m\acute{a}x}^f$ [%]	Média e Desvio Padrão	E^f [GPa]	Média e Desvio Padrão
[0°] ₅	1	90,41		6,11		5,33	
	2	87,80	88 ±	6,37	6,22 ±	5,55	5,38 ±
	3	89,53	2,74	6,51	0,264	5,14	0,18
	4	84,21		5,92		5,50	

Fonte: Próprio Autor.

3.4.3. FRAÇÃO MÁSSICA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO

Assim como realizado para os compósitos reforçados por fibra de vidro, foram feitas análises termogravimétricas, a fim de se medir a fração mássica de constituintes (fibra e matriz polimérica) dos compósitos reforçados por fibra de algodão. Os resultados descrevem a degradação do material, representado pela perda de sua massa, em função da temperatura. A Figura 3-18 exibe os resultados para os ensaios realizados nos compósitos em resina PU.

Figura 3-18 – Análise termogravimétrica para compósitos em PU.

Fonte: Próprio Autor.

Após a fase inicial, de perda de água, inicia-se o processo de degradação do compósito. Quando, aproximadamente 12% de sua massa é perdida, há o primeiro pico (349,98°C), temperatura esta que se aproxima da temperatura máxima do algodão (346,04°C). Em seguida, dois picos mais evidentes são apresentados nas temperaturas 410,72°C e 463,28°C. O segundo pico da curva se encontra quando há 37,86% de massa existente no compósito, o terceiro pico encontra-se em 27,12% de massa.

Azevedo *et al.* (2009) realizou a caracterização de poliuretana derivada do óleo da mamona, sendo um dos ensaios, o ensaio de termogravimetria. Neste estudo, verificou-se que há duas etapas no processo de degradação da poliuretana. A primeira – aproximadamente 385°C – é referente ao rompimento das ligações uretanais, enquanto que a segunda etapa – 472°C – refere-se a decomposição das ligações ésteres presentes no polioli.

Assim como nos compósitos fabricados em resina epóxi, para os laminados reforçados por fibra de algodão, foi utilizado o método de deconvolução (Figura 3-19) para obtenção da fração mássica do mesmo.

Figura 3-19 – Picos analisados no método de deconvolução utilizado para estimar a fração mássica dos constituintes do compósito reforçado por fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Observou-se, diferentemente do compósito em epóxi, três picos na curva da derivada da massa, que foram utilizados para a representação da curva experimental e das curvas que a descrevem.

Foi realizado uma estimativa das frações mássicas dos materiais presente em cada curva, através do cálculo de suas áreas, as quais são apresentadas na Tabela 3-8

Tabela 3-8 – Valores obtidos através do método de deconvolução para o compósito de PU reforçado por fibras de algodão.

Pico	Área da curva reproduzida	Área em relação a cada pico	Fração mássica [%]	v_f [%]
1	860,53	421,15	48,94	40,22
2		218,02	25,33	
3		307,85	35,77	

Fonte: Próprio Autor.

3.4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO

A Figura 3-20 exibe as imagens obtidas via MEV dos compósitos em PU reforçado por fibra de algodão. É possível observar poucos resquícios de resina presentes nas fibras, ressaltando a necessidade de um tratamento superficial para as mesmas, assim como realizado nas fibras de vidro. Além disso, nas imagens aumentadas em 350x, nota-se que as fibras foram arrancadas com facilidade da matriz, demonstrando uma fraca interação fibra-matriz. Para este caso, a análise MEV foi realizada apenas para verificar a interação fibra-matriz.

Figura 3-20 – Imagens dos laminados em PU reforçados por fibras de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

3.5. COMPARAÇÕES DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas as comparações dos resultados obtidos diretamente do travessão da máquina para os compósitos fabricados em PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.

Na Figura 3-21 são apresentados os resultados de máxima tensão à tração. Como esperado, os laminados com fibras orientadas à 0° apresentaram os maiores valores de tensão, enquanto que os compósitos com fibras à 45° , valores inferiores em relação aos demais laminados.

Figura 3-21 – Comparação dos valores de máxima tensão à tração para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados dos limites de deformação (Figura 3-22) da PU reforçada por fibra de vidro (FV), assim como nos compósitos fabricados em resina epóxi, apresentaram maior deformação para os compósitos com fibras à 45°. Assim, também como nos compósitos em epóxi, os demais CDPs (0° e 90°) apresentaram valores próximos entre si para uma mesma orientação de fibras, e observou-se uma menor deformação nos valores obtidos com fibra de algodão.

Figura 3-22 – Comparação dos valores de limite de deformação para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

Com os resultados de tensão e deformação, foi possível obter os módulos de elasticidade dos laminados fabricados (Figura 3-23).

Figura 3-23 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade para compósitos de resina PU reforçado por fibra de vidro e fibra de algodão.

Fonte: Próprio Autor.

3.6. CONCLUSÕES PARCIAIS

Com relação aos resultados de tração, a substituição das fibras de vidro por fibras de algodão como reforço dos compósitos fabricado com PU demonstrou uma diminuição da tensão máxima e o aumento significativo da deformação, uma característica mais dúctil para todas as amostras avaliadas. Houve uma certa repetibilidade nos resultados obtidos, apresentando poucas diferenças nos valores de máxima tensão, módulo de elasticidade e limite de deformação. A introdução do reforço a 0° demonstra um aumento significativo da máxima tensão à tração em relação à PU com fibras orientadas a 90°. Isto pode ser verificado nos resultados dos CDPs com fibras orientadas à 0° (61,47 MPa) frente aos CDPs com fibras orientadas a 90° (8,34 MPa). Contudo, o mesmo não pode ser afirmado para o módulo de elasticidade, que por sua vez, apresentou um aumento muito pequeno.

Os compósitos fabricados com PU reforçada por fibras de vidro orientadas a 0° e a 90° apresentaram comportamento frágil. No caso das fibras orientadas a 0°, tem-se uma resposta governada pelo reforço, que para as fibras de vidro contribui significativamente com o aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade do compósito. Costa (2007) e Taguti (2016)

estudaram o comportamento da poliuretana pura, e obtiveram valores entre 31,38 MPa e 37,6 MPa para a máxima tensão à tração. Sendo assim, visto que a máxima tensão da PU reforçada com fibra de vidro é de 507,89 MPa para fibras direcionadas à 0° , concluí-se que o reforço melhorou o desempenho da poliuretana.

O comportamento do compósito com fibras de algodão à $\pm 45^\circ$ apresenta uma característica mais dúctil, possuindo menores valores de tensão máxima, módulo de elasticidade e elevados limites de deformação. Como já visto nos trabalhos com a poliuretana, esta apresentou uma tensão máxima de 37,6 MPa e valores médios de deformação de 17%. Assim como foi possível observar no compósito de PU reforçado com fibra de vidro, o reforço com as fibras de algodão melhorou os valores de máxima tensão e módulo de elasticidade. Houve uma redução do limite de deformação, uma vez que o biocompósito apresentou valores médios de 6,99% para as fibras orientadas a 0° e 13,01% para as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$.

Com relação aos resultados de flexão 3-pontos, as amostras apresentaram um comportamento não-linear e dúctil. Costa (2007) também realizou ensaios de flexão na PU pura, e obteve um módulo de elasticidade à flexão de 1,22 GPa. Taguti (2016) realizou também ensaios de flexão na PU pura, sendo que as amostras atingiram uma tensão máxima à flexão em média de 45 MPa, com um limite de deformação de 8% e um módulo de elasticidade à flexão de 1,21 GPa. No presente trabalho, os valores médios de máxima tensão à flexão foram de 88 MPa, com um limite de deformação de 6,22% e módulo de elasticidade à flexão de 5,38 GPa. Portanto, pode-se concluir que o reforço contribuiu com o aumento da máxima tensão e do módulo de elasticidade, apresentando um comportamento menos dúctil frente as amostras de PU pura.

4. COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

A Figura 4-1 exibe os níveis máximos de tensão obtidos dos ensaios dos compósitos fabricados, incluindo também outros resultados da literatura como da PU pura (TAGUTI, 2016) e compósitos de resina fenólica reforçados com fibras curtas de algodão e fibras curtas de sisal (VERA, 2012).

Figura 4-1 – Comparação de valores de máxima tensão sob tração.

Fonte: Próprio Autor.

Como esperado, os menores valores são apresentados pelos laminados com fibras orientadas à 90°. Isso deve-se ao fato de que nesta direção quase não há atuação da fibra como reforço do compósito. Além disso, constata-se que a fibra de vidro promove valores mais elevados de máxima tensão à tração em comparação à fibra de algodão. Ademais, o referido gráfico revela que o compósito de PU reforçada com fibra de vidro é promissor uma vez que fornece resultados não muito distantes dos obtidos para epóxi com fibra de vidro. Por outro

lado, os compósitos reforçados com fibra de algodão demonstram resultados muito inferiores ao material de referência, que é a epóxi reforçada por fibra de vidro. Isto evidencia que a fibra de algodão, inicialmente, necessita de um tratamento superficial para melhorar a adesão com a matriz e, assim, ter um compósito com mais potencial de aplicação no segmento aeronáutico. No entanto, a Figura 4-2 traz alguns resultados promissores, pois, removendo os valores referentes aos laminados reforçados por fibra de vidro à 0° (Figura 4-2), nota-se que a PU reforçada com fibras nas demais direções (90° e +/-45°) apresentou maiores tensões em relação a PU pura. Dessa forma, houve contribuição na adição do reforço. Já em relação à fibra de algodão, percebe-se que o reforço atua no laminado de PU na direção paralela ao carregamento (compósitos com fibras orientadas a 0°), contudo apresenta uma resposta inferior à PU pura com reforços a 90° e +/-45°. O mesmo ocorre para o compósito em epóxi e fibra de algodão à 90°. Os resultados de tensão máxima do laminado a +/-45° e 90° são menores do que a PU pura, pois buscou-se fabricar os CDPs usando o mesmo tecido unidirecional. Porém cabe ressaltar, que este tecido possui fibras transversais que garantem uma certa resistência e rigidez a 90°. Além disso, tais fibras dificultam a laminação balanceada e simétrica para obter CDPs a +/-45°. Foi visto também que os CDPs a 90° possuem o maior valor de fração volumétrica de fibra.

Figura 4-2 - Comparação de valores de máxima tensão sob tração (desconsiderando os resultados para os compósitos de epóxi reforçados por fibra de vidro a 0°).

Fonte: Próprio Autor.

O resultado mais relevante da Figura 4-2 consiste na comparação de PU com fibras de algodão a 0° e resina fenólica com fibras curtas de sisal, pois em seu trabalho de Mestrado, VERA (2012) demonstrou que uma estrutura de interior de avião (compartimento de manuais) poderia ser fabricada em resina fenólica com fibras curtas de sisal. Para tal, a estrutura deveria ter a espessura de parede aumentada e, assim, seria possível ter margem de segurança positiva para certificação. Neste caso, então, poder-se-ia utilizar PU com fibras de algodão a 0°, obtendo assim uma geometria até mais fina e, portanto, uma estrutura mais leve. No entanto, cabe ainda fazer uma investigação quanto a aspectos de inflamabilidade e de toxicidade. Haja vista que a resina fenólica cumpre estes requisitos, mas a fibra de algodão e a PU não, sendo assim necessário o emprego de aditivos ao material.

Os valores referentes a tensão máxima obtidos nos respectivos materiais estudados e fornecidos pela literatura podem ser visualizados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Valores de tensão máxima utilizados para comparação.

Material		$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]
PU pura (Taguti, 2015)		$37,60 \pm 2,31$
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)		$29,96 \pm 1,67$
Fenólica-Sisal (Vera, 2012)		$24,76 \pm 3,40$
E-FV	[0°]	$775,26 \pm 31,79$
	[90°]	$117,65 \pm 13,86$
	[±45°]	$83,72 \pm 0,014$
PU-FV	[0°]	$502,70 \pm 90,54$
	[90°]	$97,85 \pm 5,22$
	[±45°]	$82,46 \pm 2,93$
E-FA	[0°]	$79,96 \pm 5,58$
	[90°]	$15,08 \pm 2,82$
	[±45°]	$55,54 \pm 4,69$
PU-FA	[0°]	$61,47 \pm 3,35$
	[90°]	$8,34 \pm 0,68$
	[±45°]	$27,91 \pm 3,21$

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4-3 apresenta os valores máximos de deformações dos compósitos fabricados bem como resultados da literatura. Os compósitos fabricados com PU apresentam um comportamento mais dúctil do que os compósitos a base de resina epóxi para todos os empilhamentos investigados, exceto no laminado reforçado com fibras de vidro orientadas à 0°. Verifica-se no geral que a PU pura apresenta o maior valor de deformação devido ao comportamento mais dúctil frente a resina epóxi.

Figura 4-3 – Comparação de valores de máxima deformação sob tração.

Fonte: Próprio Autor.

Desconsiderando os resultados para PU pura, os compósitos em poliuretano geralmente apresentam o maior limite de deformação em relação aos demais (Figura 4-4). No entanto, para a fibra de vidro, os valores máximos de deformação foram geralmente do compósito em epóxi.

Figura 4-4 - Comparação de valores de máxima deformação sob tração (desconsiderando os resultados para PU pura).

Fonte: Próprio Autor.

Os valores referentes ao limite de deformação podem ser visualizados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Valores de deformação máxima utilizados para comparação.

Material		$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)
PU pura (Taguti, 2015)		$18,00 \pm 0,31$
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)		$1,22 \pm 0,16$
Fenólica-Sisal (Vera, 2012)		$0,89 \pm 0,14$
E-FV	[0°]	$2,28 \pm 0,04$
	[90°]	$1,23 \pm 0,08$
	[±45°]	$13,13 \pm 5,06$
PU-FV	[0°]	$1,86 \pm 0,32$
	[90°]	$1,67 \pm 0,18$
	[±45°]	$13,06 \pm 6,63$
E-FA	[0°]	$2,45 \pm 0,21$
	[90°]	$1,31 \pm 0,51$
	[±45°]	$4,50 \pm 0,36$
PU-FA	[0°]	$6,99 \pm 0,48$
	[90°]	$6,83 \pm 0,86$
	[±45°]	$13,01 \pm 2,49$

Fonte: Próprio Autor.

Os valores do módulo de elasticidade dos compósitos fabricados, bem como resultados da literatura são apresentados na Figura 4-5. Pode-se notar que os compósitos de epóxi sempre apresentam valores superiores ao de poliuretano. Verifica-se que tanto o reforço em fibra de vidro, quanto em fibra de algodão garantiram à PU valores mais elevados para o módulo de elasticidade.

Figura 4-5 - Comparação de valores de módulo de elasticidade sob tração.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4-6, apresenta os módulos de elasticidade após os resultados de epóxi reforçada por fibra de vidro à 0° serem removidos. Os valores para os demais empilhamentos apresentam o comportamento esperado dos compósitos em epóxi em relação à PU, pois possuem uma característica mais rígida.

Figura 4-6 - Comparação de valores de módulo de elasticidade sob tração (desconsiderando os resultados de epóxi reforçada por fibra de vidro à 0°).

Fonte: Próprio Autor.

Os valores referentes ao módulo de elasticidade podem ser visualizados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Valores de módulo de elasticidade utilizados para comparação.

Material		E [GPa]
PU pura (Taguti, 2015)		1,28 ± 0,04
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)		4,96 ± 0,23
Fenólica-Sisal (Vera, 2012)		6,19 ± 0,39
E-FV	[0°]	38,60 ± 0,76
	[90°]	13,61 ± 0,94
	[±45°]	7,14 ± 0,24
PU-FV	[0°]	29,41 ± 0,17
	[90°]	6,73 ± 0,035
	[±45°]	5,18 ± 0,092
E-FA	[0°]	8,37 ± 2,21
	[90°]	2,83 ± 0,17
	[±45°]	3,27 ± 0,53
PU-FA	[0°]	2,50 ± 0,26
	[90°]	0,61 ± 0,04
	[±45°]	1,21 ± 0,13

Fonte: Próprio Autor.

4.2. ENSAIOS DE FLEXÃO 3-PONTOS

A Figura 4-7 apresenta a comparação das máximas tensões à flexão obtidas para as amostras fabricadas, bem como para resultados da literatura. Vera (2012) realizou estudos em compósitos de resina fenólica reforçada por fibras curtas de algodão e sisal, que passaram por um processo de aditivação de Alumina trihidratada (ATH), visando atender requisitos aeronáuticos de inflamabilidade para estruturas de interior de aviões. Como era esperado, Vera (2012) detectou uma redução no valor da máxima tensão quando houve o acréscimo de aditivo. Portanto, todos os resultados obtidos por Vera (2012), que tiveram o objetivo de demonstrar a viabilidade da utilização dos respectivos materiais em aeronaves, ficam abaixo dos apresentados no presente trabalho. Deve-se destacar que mesmo empregando PU reforçada com fibra de algodão é possível ainda obter resultados superiores em termos de máxima tensão sob flexão 3-pontos. No entanto, deve-se ainda ser feito um estudo sobre problemas de inflamabilidade e toxicidade para o referido biocompósito.

Figura 4-7 – Comparação de valores de máxima tensão sob flexão 3-pontos.

Fonte: Próprio Autor.

Os valores referentes a tensão máxima à flexão podem ser visualizados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Valores de tensão máxima à flexão utilizados para comparação.

Material		$\sigma_{m\acute{a}x}^f$ [MPa]
PU pura (Taguti, 2015)		$6,23 \pm 0,35$
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)		$69,1 \pm 11,25$
Fenólica-Sisal (Vera, 2012)		$68,99 \pm 11,3$
Fenólica-Algodão (ATH)		$38,34 \pm 4,88$
Fenólica-Sisal (ATH)		$31,34 \pm 3,73$
E-FA	[0°]	$219,22 \pm 17,75$
	[±45°]	$182,05 \pm 13,04$
PU-FA		$88,00 \pm 2,74$

Fonte: Próprio Autor.

Por outro lado, a Figura 4-8 exibe os valores médios referentes aos limites de deformação, nos quais os compósitos constituídos pela poliuretana da mamona apresentam uma deformação três vezes maior em relação ao compósito de resina epóxi. Novamente, a PU pura se destacou apresentando o maior limite de deformação à flexão. Ademais, verifica-se que a PU reforçada com fibra de algodão possui resultados superiores em termos de máxima deformação sob flexão 3-pontos quando comparada com os materiais estudados por Vera (2012).

Figura 4-8 - Comparação de valores de máxima deformação sob flexão 3-pontos.

Fonte: Próprio Autor.

Os valores referentes ao limite de deformação podem ser visualizados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Valores de limite de deformação à flexão utilizados para comparação.

Material	$\epsilon_{m\acute{a}x}^f$ (%)
PU pura (Taguti, 2015)	$7,57 \pm 0,29$
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)	$4,03 \pm 0,53$
FenólicaSisal (Vera, 2012)	$3,10 \pm 0,49$
Fenólica-Algodão (ATH)	$3,82 \pm 0,66$
Fenólica-Sisal (ATH)	$5,45 \pm 0,10$
E-FA	$1,93 \pm 0,19$
	$[\pm 45^\circ]$
PU-FA	$6,22 \pm 0,26$
	$[0^\circ]$

Fonte: Próprio Autor.

Para o módulo de elasticidade à flexão, tem-se que a Figura 4-9 traz resultados dos compósitos fabricados e da literatura. Neste caso, a ação do aditivo utilizado nos compósitos de resina fenólica, promoveu um aumento do módulo de elasticidade como demonstrado por Vera (2012). Mesmo assim, verifica-se que os compósitos produzidos no presente trabalho apresentam resposta superior, inclusive o biocompósito de PU reforçado com fibra de algodão apresenta módulo de elasticidade superior ao dos materiais estudados por Vera (2012).

Figura 4-9 - Comparação de valores módulo de elasticidade sob flexão 3-pontos.

Fonte: Próprio Autor.

Os valores referentes de módulo de elasticidade à flexão podem ser visualizados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 - Valores de módulo de elasticidade à flexão utilizados para comparação.

Material		E^f [GPa]
PU pura (Taguti, 2015)		$1,22 \pm 0,16$
Fenólica-Algodão (Vera, 2012)		$2,52 \pm 0,44$
Fenólica-Sisal (Vera, 2012)		$3,13 \pm 0,47$
Fenólica-Algodão (ATH)		$3,90 \pm 0,32$
Fenólica-Sisal (ATH)		$3,63 \pm 0,36$
E-FA	[0°]	$34,38 \pm 1,14$
	[±45°]	$24,98 \pm 2,01$
PU-FA	[0°]	$5,38 \pm 0,18$

Fonte: Próprio Autor.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com relação aos compósitos de resina epóxi reforçados com fibra sintética (fibra de vidro) e vegetal (fibra de algodão), nota-se que os valores de resistência à tração dos laminados orientados à 0° e 90° apresentam uma diferença média de dez vezes. Enquanto que suas deformações possuem praticamente os mesmos valores para ambas as fibras. Além disso, observa-se que o módulo de elasticidade pode chegar a uma diferença de cinco vezes, quando comparados aos resultados para os diferentes reforços. Com base nas análises via MEV, verifica-se que não houve uma boa interação fibra-matriz nos compósitos reforçados por fibras de algodão, uma vez que estas não foram tratadas, facilitando assim a ocorrência de *pull-out*. Já nos ensaios de flexão 3-pontos, houve repetibilidade de resposta para o compósito reforçado por fibras de algodão orientadas a 0°, sendo que os resultados de resistência, módulo de elasticidade à flexão e limite de deformação apresentam reduzidos valores de desvio padrão. Com relação ao compósito fabricado com fibras de algodão orientadas a 90°, observou-se nos ensaios realizados uma grande divergência entre o comportamento das amostras, não sendo possível discutir os resultados. Conclui-se assim que os compósitos de resina epóxi reforçados por fibras de algodão devem ter reforços com tratamento superficial adequado a fim de que melhorem suas propriedades mecânicas e de que reduzam sua variabilidade em termos de respostas. Ou seja, isto é uma condição inicial necessária para que se vislumbre o emprego desse material no segmento aeronáutico.

Com relação aos compósitos de resina poliuretana reforçados com fibra sintética (fibra de vidro) e vegetal (fibra de algodão), tem-se que as amostras com fibras orientadas a 0° e a 90° apresentaram comportamento frágil. No caso das fibras orientadas a 0°, tem-se uma resposta governada pelo reforço, onde as fibras de vidro contribuem significativamente com o aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade do compósito. O comportamento do compósito com fibras de algodão à $\pm 45^\circ$ apresenta uma característica mais dúctil, possuindo menores valores de tensão máxima, módulo de elasticidade e elevados limites de deformação. Portanto, assim como foi possível observar no compósito de PU reforçado com fibra de vidro, o reforço com as fibras de algodão melhorou os valores de máxima tensão e módulo de elasticidade.

Com relação às comparações entre os compósitos de resina epóxi e poliuretana, como esperado, os menores valores são apresentados pelos laminados com fibras orientadas à 90°.

Isso deve-se ao fato de que nesta direção quase não há atuação da fibra como reforço do compósito. Além disso, constata-se que a fibra de vidro promove valores mais elevados de resistência máxima tensão à tração, em comparação à fibra de algodão. Ademais, os resultados relevam que o compósito de PU reforçado com fibra de vidro é promissor uma vez que fornece resultados não muito distantes dos obtidos para epóxi com fibra de vidro. Por outro lado, os compósitos reforçados com fibra de algodão demonstram resultados muito inferiores ao material de referência, que é a epóxi reforçada por fibra de vidro. Novamente, conclui-se que que a fibra de algodão, inicialmente, necessita de um tratamento superficial para melhorar a adesão com a matriz e, assim, ter um compósito com mais potencial de aplicação no segmento aeronáutico. No entanto, o resultado mais relevante consiste na comparação de PU com fibras de algodão a 0° e resina fenólica com fibras curtas de sisal (VERA, 2012). Neste caso, então, poder-se-ia utilizar PU com fibras de algodão a 0°, obtendo assim uma geometria até mais fina e, portanto, uma estrutura mais leve que VERA (2012). No entanto, cabe ainda fazer uma investigação quanto a aspectos de inflamabilidade e de toxicidade. Haja vista que a resina fenólica cumpre estes requisitos, mas a fibra de algodão e a PU não, sendo assim necessário o emprego de aditivos ao material. Além disso, para o módulo de elasticidade à flexão, tem-se que os compósitos produzidos no presente trabalho apresentam resposta superior aos estudados por VERA (2012), inclusive o biocompósito de PU reforçado com fibra de algodão.

Considerando as conclusões supracitadas, constata-se que em trabalhos futuros deve-se explorar não somente diferentes tipos de tratamento superficiais para a fibra de algodão ter melhor interação com a resina epóxi e a poliuretana, mas também deve-se realizar testes de toxicidade e inflamabilidade. Além disso, deverá novamente ser investigado o comportamento mecânico dos materiais aditivados a fim de se avaliar o quanto foram afetados os valores de módulo de elasticidade, máxima tensão e deformação máxima. Por fim, deve-se propor novos processos de fabricação, que podem ser similares aos utilizados no presente trabalho, uma vez que os mesmos conseguiram produzir corpos-de-prova satisfatórios para o estudo proposto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, K.; NIZAMI, S. S.; RAZA, N. Z. Characteristics of natural rubber hybrid composites based on marble sludge/carbon black and marble sludge/rice husk derived silica. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 19, n. 4, p. 1169-1176, 2013.

ALVAREZ, V. A. et al. Melt rheological behavior of starch-based matrix composites reinforced with short sisal fibers. **Polymer Engineering and Science**, v. 44, n. 10, p. 1907-1914, 2004.

ALVAREZ, V. A.; KENNY, J. M.; VAZQUEZ, A. Creep behavior of biocomposites based on sisal fiber reinforced cellulose derivatives/starch blends. **Polymer Composites**, v. 25, n. 3, p. 280-288, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039-00**. Standart test method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2006.

_____. **ASTM D790-03**. Standart test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforce Plastics and Electrical Insulating Materials, 2006.

ARBELAIZ, A. et al. Mechanical properties of short flax fibre bundle/poly (epsilon-caprolactone) composites: Influence of matrix modification and fibre content. **Carbohydrate Polymers**, v. 64, n. 2, p. 224-232, 2006.

AVEROUS, L.; BOQUILLON, N. Biocomposites based on plasticized starch: thermal and mechanical behaviours. **Carbohydrate Polymers**, v. 56, n. 2, p. 111-122, 2004.

AYAD, M. M.; ABU EL-NASR, A.; STEJSKAL, J. Kinetics and isotherm studies of methylene blue adsorption onto polyaniline nanotubes base/silica composite. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 18, n. 6, p. 1964-1969, 2012.

AZEEZ, A. A. et al. Epoxy clay nanocomposites - processing, properties and applications: A review. **Composites Part B - Engineering**, v. 45, n. 1, p. 308-320, 2013.

CHABBA, S.; NETRAVALI, A. N. 'Green' composites using modified soy protein concentrate resin and flax fabrics and yarns. **Jsme International Journal Series a-Solid Mechanics and Material Engineering**, v. 47, n. 4, p. 556-560, 2004.

BAJPAI P.K., SINGH, I. Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 32, p. 1569-1576, 2013.

CALLISTER, W. D (2007). **Material science and engineering: an introduction**. 7ª Ed: John Wiley and Sons, Inc.

CANCHE-ESCAMILLA, G. et al. Flexural, impact and compressive properties of a rigid-thermoplastic matrix/cellulose fiber reinforced composites. **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 33, n. 4, p. 539-549, 2002.

CARROLL, D. R. et al. Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. **Resources Conservation and Recycling**, v. 31, n. 3, p. 241-251, Mar 2001.

CHAB SELKE, S. E.; WICHMAN, I. Wood fiber/polyolefin composites. **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 321-326, 2004.

CHEN, H. L.; PORTER, R. S. Composite of polyethylene and kenaf, a natural cellulose fiber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 54, n. 11, p. 1781-1783, Dec 1994.

COSTA, R. R. C. **Aplicabilidade de modelos construtivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímero**. 171 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DAO, D. Q., et al. Determination of characteristic parameters for the thermal decomposition of epoxy resin/carbon fibre composites in cone calorimeter. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 19, p. 8167-8178, Jun 2013.

DWEIB M.A., HU B., O'DONNELL A., et al. All natural composite sandwich beams for structural applications. **Composite Structures**, v. 63, p. 147-157, 2004.

DWEIB, M. A., et al. Bio-based composite roof structure: Manufacturing and processing issues. **Composite Structures**, v. 74, n. 4, p. 379-388, Aug 2006.

FOLKES, M.J. Multicomponent Polymer Systems; Miles, I.S., Rostami, S., Eds.; **Longman Scientific and Technical**: Essex, UK, 1992; Chapter 8, 1992.

HUDA, M. S., et al. Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly (lactic acid) (PLA) and kenaf fibers. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 2, p. 424-432, Feb 2008.

HULL, D., CLYNE, T.W. **An Introduction to Composite Materials**, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1996.

IGNÁCIO, H; MAZZER, N; BARBIERI, C.H. e CHIERICE, G.O. Estudo sobre a aplicabilidade médica da poliuretana derivada da mamona. **Resenha Ortopédica**, n. 6, 1996.

JENSEN B.J., et al. Fiber metal laminates made by the VARTM process, 2009.

JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v. 59, n. 11, p. 1625-1640, 1999.

JOSHI, S. V. et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber-reinforced composites? **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 371-376, 2004.

KANDARE, E.; KANDOLA, B. K.; MYLER, P. Evaluating the influence of varied fire-retardant surface coatings on post-heat flexural properties of glass/epoxy composites. **Fire Safety Journal**, v. 58, p. 112-120, May 2013.

KOBAYASHI, S.; KAWAHARA, M. Effects of stacking thickness on the damage behavior in CFRP composite cylinders subjected to out-of-plane loading. **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 1, p. 231-237, Jan 2012.

LANER, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 498-512, Mar 2012.

LI, Y., BADRINARAYANAN, P., KESSLER, M.R. **Polymer** **54**, 2013.

LIU, W. J. et al. 'Green' composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: fabrication and properties evaluation. **Polymer**, v. 46, n. 8, p. 2710-2721, Mar 2005.

MALLICK, P.K. **Fiber Reinforced Composites. Materials, Manufacturing and Design**; Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 1997.

MISNON, M.L., Islam M.M., Epaarachchi J.A., et al. Potentiality of utilizing natural textile materials for engineering composites applications. **Materials and Design**, v. 59, p. 359-368, 2014.

MOHANTY A.K., Misra M., Drzal T.L., et al. **Natural fibers, biopolymers and biocomposites: An introduction.** In: Mohanty AK, Misra M, Drzal TL, editors. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC Press 2005, p. 1-36.

MOSAVIFARD S.M., NOURI, P.M., ATTAR, M.M., RAMEZANZADEH, B. (2013) J. Ind. Eng. Chem. 19 (2013) 1031.

NAIR, K. C. M. et al. (2000) Rheological behavior of short sisal fiber-reinforced polystyrene composites. **Composites Part a-Applied Science and Manufacturing**, v. 31, n. 11, p. 1231-1240, 2000. ISSN 1359-835X.

NIU, M. C.Y. **Composite airframe structures: practice design information and data.** Adaso Adastra Engineering Center, 1992.

PARK, S.J., KIM, M.H., LEE, J.R., CHOI, S., COLLOID, J. **Interface Sci.** 208, 2000.

PHAM, V.H.; KIM, H.T., HÁ, Y.W., JEONG, H.T., JUNG, M.Y., KO, B.S., HWANG, Y.J., CHUNG, J. (2014) **Ind. Eng. Chem.** 20, 2014.

PUKÁNSZKY, B., MAURER-FRANS, BOODE, H.J. Impact testing of polypropylene blends and composites. **Polym. Eng. Sci.** p. 35, 1962–1971, 1995.

RAJ, R. G. et al. Compounding of cellulose fibers with polypropylene – Effect of fiber treatment on dispersion in the polymer matrix. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 38, n. 11, p. 1987-1996, Dec 1989.

ROZMAN, H. D. et al. The effect of coupling agents on the mechanical and physical properties of oil palm empty fruit bunch-polypropylene composites. **Polymer International**, v. 49, n. 11, p. 1273-1278, Nov 2000.

SANTANA, M. C. **Impacto ambiental causado pelo descarte de embalagens plásticas – Gerenciamento e riscos.** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, 2009.

SATHISHKUMAR T.P., Navaneethakrishnan P., Shankar S. Tensile and flexural properties of snake grass natural fiber reinforced isophthallic polyester composites. **Composite Science and Technology**, v. 72, p. 1183-1190, 2012.

SATYANARAYANA K.G., Arizaga G.G.C., Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers: An overview. **Progress in Polymer Science**, v. 34, p. 982-1021, 2009.

SAVY FILHO, A. Mamoneira: técnicas de cultivo. **O Agrônômico**, n. 53, v.1, p.16-17, 2001.

SHAMSUDDOHA, M. et al. Characterisation of mechanical and thermal properties of epoxy grouts for composite repair of steel pipelines. **Materials & Design**, v. 52, p. 315-327, Dec 2013.

STEWART R. Automotive composites offer lighter solutions. **Reinforced Plastics**, v. 2, p. 22-28, 2010.

SU, S. K.; WU, C. S. The Processing and Characterization of Polyester/Natural Fiber Composites. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 49, n. 10, p. 1022-1029, 2010.

SUDDER B., Evans W. **Natural fiber composites in automotive applications**. In: Mohanty AK, Misra M, Drzal TL, editors. Natural fibers, biopolymers and biocomposites, CRC Press 2005, p. 231-259.

TAGUTI, M. V. H.; SATO, E. S.; COSTA, R. R. C.; DOMICIANO S. M.; VIEIRA, A. F. C.; TITA, V. (2016), Tensile, compression and flexural tests on castor oil polyurethane reinforced with calcium carbonate. **Brazilian Conference on Composite Materials**, Gramado. Anais do BCCM3, 2016.

VERA, R. V. **Estruturas Aeronáuticas de Interior em Compósito Natural: Fabricação, Análise Estrutural e de Inflamabilidade**, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

YOSOYIMA, R; MORIMOTO, K.; SUSUKI, T.; NAKAJIMA, A.; IKADA, Y. **Adhesion and Bonding in Composites**; Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 1990.

ZINI, E.; SCANDOLA, M. Green Composites: An Overview. **Polymer Composites**, v. 32, n. 12, p. 1905-1915, Dec 2011.

HORIE, K.; BARÓN, M.; FOX, R.; HE, J.; HESS, M.; KAHOVEC, J.; KITAYAMA, T.; KUBISA, P.; MARÉCHAL, E.; MORMANN, W. Definitions of terms relating to reactions of polymers and to functional polymeric materials (IUPAC Recommendations 2003). **Pure Appl. Chem.**, v. 76, n. 4, p. 889-906, 2004.