

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

JOSE LEANDRO CORREIA ALVES

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LAMINADOS DE COMPÓSITOS  
POLIMÉRICOS HÍBRIDOS DE FIBRAS DE JUTA A PARTIR DE LAMINADOS DE  
FIBRAS DE VIDRO UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS**

Sorocaba  
2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIENCIA DOS MATERIAIS

JOSE LEANDRO CORREIA ALVES

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LAMINADOS DE COMPÓSITOS  
POLIMÉRICOS HÍBRIDOS DE FIBRAS DE JUTA A PARTIR DE LAMINADOS DE  
FIBRAS DE VIDRO UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientação: Prof. Dr. Jane Maria Faulstich de Paiva

Sorocaba  
2017

Alves, Jose Leandro Correia

Obteção e caracterização de laminados de compósitos poliméricos híbridos de fibras de juta a partir de laminados de fibra de vidro utilizados na fabricação de pás eólicas / Jose Leandro Correia Alves. -- 2017.  
103 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Jane Maria Faulstich de Paiva

Banca examinadora: Jane Maria Faulstich de Paiva, Vagner Roberto Botaro, Elisabete Frollini

Bibliografia

1. Compósito. 2. Compósito híbrido. 3. Ensaio de materiais. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

### Relatório de Defesa de Dissertação Candidato: José Leandro Correia Alves

Aos 29/05/2017, às 13:00, realizou-se na Universidade Federal de São Carlos, nas formas e termos do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, a defesa de dissertação de mestrado sob o título: Obtenção e Caracterização de Laminados de Compósitos Poliméricos Híbridos de Fibras de Juta a partir de Laminados de Fibras de vidro utilizados na Fabricação de Pás Eólicas, apresentada pelo candidato José Leandro Correia Alves. Ao final dos trabalhos, a banca examinadora reuniu-se em sessão reservada para o julgamento, tendo os membros chegado ao seguinte resultado:

#### Participantes da Banca

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva  
Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro  
Prof. Dr. Elisabete Frollini

Função	Instituição
Presidente	UFSCar
Titular	UFSCar
Titular	USP

Conceito
APROVADO
APROVADO
APROVADO

Resultado Final: APROVADO

#### Parecer da Comissão Julgadora\*:

1) O aluno domina a metodologia científica?  
2) Se o aluno domina o objeto de pesquisa escolhido, considerando o enfoque na área de ciência dos materiais.  
Com as alternativas: ( ) Sim ( ) atendeu parcialmente

Encerrada a sessão reservada, o presidente informou ao público presente o resultado. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada e, para constar, eu, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jane Maria Faulstich de Paiva, representante do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, lavrei o presente relatório, assinado por mim e pelos membros da banca examinadora.

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro

Prof. Dr. Elisabete Frollini

Representante do PPG: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jane Maria Faulstich de Paiva

(x) Não houve alteração no título da dissertação. ( ) Houve. O novo título passa a ser:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



#### Observações:

- Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.
- Para gozar dos direitos do título de Mestre ou Doutor em Ciência dos Materiais, o candidato ainda precisa ter sua dissertação ou tese homologada pelo Conselho de Pós-Graduação da UFSCar.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela maneira simples e correta de me educar.

À orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jane Maria Faulstich de Paiva, pela atenção dedicada ao longo do trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM) pela oportunidade.

À Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba pela estrutura oferecida para o progresso das minhas habilidades necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

À empresa Tecsis S.A por me proporcionar tempo e estrutura para desenvolvimento de parte do trabalho.

Ao MSc. Caetano Martinez pelas orientações que contribuíram direta e indiretamente para o meu crescimento ao longo deste trabalho.

À Roberta Ranielle pela ajuda com as análises de DMTA no Laboratório de Pesquisa em Materiais (FINEP 2) da Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba.

## RESUMO

Nos últimos anos, devido ao crescente consumo de compósitos de fibras sintéticas com matriz termorrígida, várias alternativas têm sido buscadas a fim de minimizar os impactos gerados tanto pelo descarte desse material ao fim de sua vida útil, quanto pela grande dependência de derivados de recursos não renováveis, como o petróleo para a produção das matérias-primas. Como uma das alternativas de introduzir na área de compósitos, materiais que tenham menores impactos ambientais, as fibras naturais têm recebido atenção de pesquisadores. Assim, neste trabalho foram moldados pelo processo de infusão à vácuo, compósitos de laminados híbridos através da utilização de tecidos de fibras de juta e tecidos estruturais de fibras de vidro com matriz de resina epóxi. A qualidade dos laminados foi analisada por meio da determinação da fração mássica de fibra e por análise térmica de *DSC (Differential Scanning Calorimetry)* e *DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis)*. Foi possível moldar laminados híbridos pelo processo de infusão com fração de fibra em cerca de 60%. Os laminados híbridos apresentaram uma redução na densidade de 20% em relação aos compósitos contendo somente fibras de vidro. Em relação às propriedades mecânicas, os compósitos laminados foram caracterizados através dos ensaios de tração, compressão e cisalhamento interlaminar (ILSS). Entre os laminados híbridos, os melhores resultados de propriedades de tração, como resistência e módulo de elasticidade foram alcançados pelos laminados com ambas as fibras orientadas a  $0/90^\circ$  (H0/90), com valor de tensão máxima próximo a 200 MPa, enquanto que para as orientações  $\pm 45^\circ$  (H45 e H45/0/90) os valores foram próximos de 68 e 84 MPa, respectivamente. No caso, pode ser destacado o laminado híbrido H45, cuja resistência a tração (83,9 MPa) não apresentou mudanças significativas com a introdução das fibras de juta (com acréscimo de 60% na espessura) quando comparado ao laminado de fibras de vidro (84,5 MPa) com mesma orientação. A melhor resistência à compressão também foi apresentada pelos laminados orientados a  $0/90^\circ$  (H0/90) com valores próximos a 150 MPa, enquanto os laminados a  $\pm 45^\circ$  (H45 e H45/0/90) apresentaram os valores de 90 MPa. Em relação à resistência ao cisalhamento interlaminar, entre os laminados híbridos, a variação entre as orientações foi menor, 25 MPa para a direção  $0/90^\circ$  e, 23MPa e 21MPa para os laminados H45 e H45//0/90, respectivamente. Assim, as propriedades mecânicas foram influenciadas significativamente pela orientação das

camadas nos laminados e pela-introdução das fibras de juta. Desta forma, conclui-se que a significativa redução de algumas propriedades possivelmente invalida a utilização das configurações híbridas estudadas para aplicações estruturais nas pás eólicas. No entanto, as configurações de laminados híbridos, desenvolvidas e analisadas neste trabalho podem ser aplicadas para moldar componentes em compósitos para peças não estruturais ou com menores requisitos de resistência, como para o segmento automotivo, e ainda com possibilidades de melhorias.

Palavras-chave: Compósitos híbridos, fibras de vidro, fibras de juta, laminado biaxial.

## ABSTRACT

At last years due to increasing use of composite materials of synthetic fibers with thermosetting matrix, several alternative have been sought trying to minimize the impacts generated by both the dispose of this material at the end of their useful life and by its heavy dependency of non-renewable resources as petroleum based products for the production of raw materials. As alternative to introduce composites materials that have least environmentally impact natural fibers have drawn attention of researchers. In this work the aim is to manufacture by vacuum infusion process, composite laminates hybrid adding woven jute fiber in structural weaving fiberglass with epoxy resin matrix. The quality of laminate was analyzed by fiber weight fraction determining and thermal analysis by DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) and DMTA (*Dynamic Mechanical Thermal Analysis*). It was possible to manufacture hybrids laminates by vacuum infusion with fiber fraction in about 60%. Hybrids laminates presented had a reduction of density of 20% with relation to the glass reinforced plastic. Regarding to mechanical properties, the laminates were characterized by tensile, compression and ILSS testing. With respect to hybrid laminates, the better results of tensile properties such as strength and young's modulus was achieved by the laminates with fiber oriented in  $0/90^\circ$  (H0/90) with maximum strength value near to 200 MPa, while for orientation  $\pm 45^\circ$  (H45 e H45/0/90) the strength results were 68 MPa and 84 MPa, respectively. In this case can be highlighted the hybrid laminate H45, whose tensile strength (83,9 MPa) has not present significant changes with the introduction of jute fiber (with increase of 60% its thickness) compared with glass reinforced plastic (84,5 MPa) for the same fiber orientation. For compressive strength the best result was presented by the laminates H0/90 (fibers in  $0/90^\circ$ ) as well, with values close to 150 MPa while the laminates to  $\pm 45^\circ$  (H45 e H45/0/90) presented values of 90 MPa. Regarding to ILSS the variation of strength was smaller, 25 MPa to direction  $0/90^\circ$  and 23 MPa and 21 MPa to H45 and H45//0/90 laminates, respectively. Therefore, mechanical properties were significantly influenced by plies orientation in the laminates and by the hybridization with jute fibers.

In this way can be concluded that the significant reduction of some properties possibly invalidates the use of the hybrid configurations studied for structural applications as well as to wind turbines. However, the hybrid laminate configurations developed and analyzed in this work can be applied to mold components in composites for non-structural parts or with lower resistance requirements, such as for the automotive segment, and with possibilities for improvement.

Keywords: Hybrid composites, glass fiber, jute fiber, biaxial laminate.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iii
<b>RESUMO</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>SUMARIO</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES</b> .....	xvii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 - OBJETIVO.....	4
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
2.1 – COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	6
2.2 – COMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS COM FIBRA NATURAL.....	8
2.3 – FIBRAS VEGETAIS.....	11
2.3.1 - Fibras de Juta.....	12
2.4 – FIBRAS DE VIDRO.....	15
2.5 – RESINA EPÓXI.....	16
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	18
3.1 – MATERIAIS.....	18
3.1.1 Escolha dos Tecidos de Fibra de Vidro.....	18
3.1.2 Seleção da Fibra de Juta.....	19
3.1.3 Matriz Polimérica utilizada.....	23
3.2 - NOMENCLATURA E IDENTIFICAÇÃO DOS LAMINADOS.....	25
3.3 – OBTENÇÃO DOS PAINÉIS LAMINADOS.....	25
3.4 – DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO MÁSSICA DE FIBRA.....	30
3.5 - DETERMINAÇÃO DA TG PELA ANÁLISE TÉRMICA DE DSC.....	31
3.6 - DETERMINAÇÃO DA TG PELA ANÁLISE TÉRMICA DE DMTA.....	32
3.7 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO MECÂNICO	33
3.8 - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
3.9 - ENSAIO DE SHORT BEAM (ILSS).....	37
3.10 - ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	39

<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
4.1 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAINÉIS LAMINADOS.....	41
4.1.1 Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da matriz utilizada na fabricação dos laminados.....	44
4.1.2 Densidade dos laminados .....	48
4.1.3 Fração mássica de fibra dos laminados ( $FWF$ ) .....	49
4.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	50
4.2.1 Ensaio de Tração de laminados com fibras de vidro e fibras de juta orientadas a $0^\circ/90^\circ$ (G0/90 e H0/90) .....	50
4.2.2 Ensaio de Tração de laminados contendo fibras de vidro e fibras de juta orientadas em $\pm 45^\circ$ (G45 e H45) e $\pm 45^\circ$ com $0^\circ/90^\circ$ (H45//0/90.....	54
4.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SHORT BEAM.....	59
4.3.1 Ensaio de Short Beam para determinação da Tensão de Cisalhamento Interlaminar nos laminados G0/90 e H0/90.....	59
4.3.2 Ensaio de Short Beam para determinação da Tensão de Cisalhamento Interlaminar nos laminados G45, H45 e H45//0/90.....	63
4.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	68
4.4.1 Ensaio de Compressão dos laminados G0/90 e H0/90.....	68
4.4.2 Ensaio de Compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90....	71
4.5 - RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS LAMINADOS.....	77
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO</b> .....	79
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	81
<b>ANEXOS</b> .....	93

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Previsão de crescimento no consumo de matérias primas para materiais compósitos até 2018.....	2
<b>Figura 1.2</b> – Estimativa do mercado de materiais compósitos nos EUA por segmento de aplicação.....	2
<b>Figura 1.3</b> – Capacidade energética global e estimativa total (em massa) de materiais compósitos no setor de pás eólicas até 2030.....	3
<b>Figura 2.1</b> – Classificação dos compósitos poliméricos.....	8
<b>Figura 2.2</b> – Classificação das fibras naturais.....	12
<b>Figura 2.3</b> – Ilustração da estrutura e organização de cadeias de celulose em uma parede vegetal.....	14
<b>Figura 2.4</b> - Estrutura química de uma resina epóxi do tipo DGEBA com destaque para os grupos químicos oxiranos e hidroxila.....	14
<b>Figura 2.5</b> – Formação dos meros de DGEBF (a) e DGEBA (b) e respectivas estruturas químicas.....	17
<b>Figura 3.1</b> – Imagem e esquema indicando a orientação de eixos no tecido de fibras de vidro Biaxial $\pm 45^\circ$ .....	19
<b>Figura 3.2</b> – Imagens das 5 amostras de fibras de juta e de sisal. ....	20
<b>Figura 3.3</b> – (a) Construção <i>non-woven</i> (tecidos de fibras costuradas uma sobre a outra) (b). Construção <i>woven</i> (trama e urdume se entrelaçam). ....	20
<b>Figura 3.4</b> – Imagens das vistas de secções longitudinais da tela de sisal (a), tecido de sisal (b) e tecido de juta (C), feitas em microscópio digital, apresentando as medições de ângulo de deformação das fibras e de espessura total do tecido. ....	21
<b>Figura 3.5</b> - Imagens das vistas de secções longitudinais de 1 tela de sisal (a), de 1 tecido de sisal entre camadas de fibra de vidro (b) e de 2 camadas de juta (c), após o processo de infusão, feitas em microscópio digital. A imagem “b” mostra ainda, indicado pela seta, a deformação em $13,2^\circ$ da camada de fibra de vidro. ....	22
<b>Figura 3.6</b> - Imagem do tecido de juta do tipo <i>woven</i> . ....	23
<b>Figura 3.7</b> – Fotografias mostrando os aspectos da mistura de agentes de cura (endurecedores RIMH134/137) e da resina epóxi (RIM135). ....	24

<b>Figura 3.8</b> - Exemplificação da identificação dos corpos de prova com todas as camadas na mesma orientação.....	25
<b>Figura 3.9</b> - Exemplificação da identificação dos corpos de prova híbridos com camadas em diferentes orientações. ....	25
<b>Figura 3.10</b> – Fluxograma das etapas desde a fabricação até os ensaios.....	26
<b>Figura 3.11</b> – Fotografias da montagem dos laminados híbridos mostrando o alinhamento das camadas. Nas imagens “a” e “b” as setas indicam a orientação das fibras de Juta e de Vidro. ....	27
<b>Figura 3.12</b> - Esquema da montagem do processo de infusão assistido por vácuo, vista em corte (a) e vista superior simplificada (b). ....	28
<b>Figura 3.13</b> - Curva de um ciclo de infusão, cura e pós cura dos laminados.....	29
<b>Figura 3.14</b> - Configuração dos laminados referência (somente com fibra de vidro biaxial) e dos laminados híbridos em estudo.....	29
<b>Figura 3.15</b> - Processo de calcinação: pesagem (a), queima em mufla da parte orgânica (b), resfriamento (c), somente fibra após queima da parte orgânica (d)..	31
<b>Figura 3.16</b> – Fotografia de algumas amostras dos laminados híbridos e de fibras de vidro para ensaio de DMTA. Vista frontal (a) e vista lateral (b).....	32
<b>Figura 3.17</b> - Painel laminado híbrido (a) e laminado de fibra de vidro (b) com esboço para corte dos corpos de prova. ....	33
<b>Figura 3.18</b> - Painel laminado de fibras de vidro com <i>tabs</i> colados com configuração para ensaio de tração (a); e painel de laminado híbrido com <i>tabs</i> colados com configuração para ensaio de compressão (b). ....	34
<b>Figura 3.19</b> - Corpos de prova preparados para os ensaios de tração.....	34
<b>Figura 3.20</b> - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração conforme norma ISO 527-4. Vista frontal (a) e vista lateral (b). ....	35
<b>Figura 3.21</b> - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios compressão conforme norma ISO 14126. Vista frontal (a) e vista lateral (b). ....	35
<b>Figura 3.22</b> - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de Short Beam pela norma ISO 14130. Vista frontal (a) e vista lateral (b). ....	36
<b>Figura 3.23</b> - Posições de medição de largura e espessura dos corpos de prova. Vista frontal (a) e vista lateral (b). ....	37
<b>Figura 3.24</b> - Nomenclatura dos ensaios com relação entre a direção da carga em tração e a orientação das fibras. ....	37

<b>Figura 3.25</b> – Configuração ilustrativa de um ensaio de Short Beam mostrando também os possíveis planos de deformação do laminado (1,2 e 3).....	38
<b>Figura 3.26</b> – Modos de falha válidos em um ensaio de compressão de acordo com ISO14130. ....	39
<b>Figura 3.27.</b> Vistas da montagem do corpo de prova no dispositivo IITRI (a, b, c). Posicionamento do dispositivo na máquina adaptada com duas bases (d).....	40
<b>Figura 4.1</b> – Foto de um painel de laminado híbrido de aproximadamente 700mm x 350mm, isento de defeitos do tipo tecido semi-impregnado ou não impregnado (“seco”). ....	42
<b>Figura 4.2</b> – Foto da superfície de um painel de laminado híbrido mostrando, através das setas, as linhas de costura totalmente retas (a e b). A foto “b” com ampliação de 23,5x.....	42
<b>Figura 4.3</b> – Foto da extremidade (rebarba) de um painel de laminado híbrido. A seta indica o que seria o desalinhamento da fibra de juta, e ao lado é possível observar fibras de Juta alinhadas. ....	43
<b>Figura 4.4</b> – Imagens de microscópio digital da superfície dos laminados híbridos ampliados 23x. ....	43
<b>Figura 4.5</b> – Imagens de microscópio digital de duas secções de laminados híbridos ampliados 23.5x (a) e 40.7x (b). ....	44
<b>Figura 4.6</b> – Módulo de armazenamento por DMTA para todas 5 classes de laminados. ....	46
<b>Figura 4.7</b> – Curvas de <i>Tan delta</i> ( <i>Tg</i> ) para todas 5 classes de laminados.....	46
<b>Figura 4.8</b> - Gráfico com os valores de <i>Tg</i> da matriz obtidos pelas técnicas de DSC e DMA.....	47
<b>Figura 4.9</b> – Valores de densidade dos laminados de híbridos moldados comparados com um laminado de fibras de vidro. ....	48
<b>Figura 4.10</b> - Gráfico com os valores de <i>FWF</i> encontrados nos laminados híbridos e nos laminados de fibras de vidro. ....	50
<b>Figura 4.11</b> - Curvas dos valores médios de tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração dos laminados: (a) contendo somente fibras de vidro; e (b) do laminado híbrido com camadas orientadas em 0°/90°.....	52
<b>Figura 4.12</b> - Corpos de prova de laminado de fibra de vidro (G0/90) fraturados após ensaio de tração. ....	53

<b>Figura 4.13</b> - Corpos de prova de laminado híbrido (H0/90) fraturados após ensaio de tração. ....	53
<b>Figura 4.14</b> - Corpo de prova com várias fibras de vidro delaminadas longitudinalmente ao longo de sua área útil.....	54
<b>Figura 4.15</b> - Representação das curvas de valores médios de tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração das três classes de laminados.....	56
<b>Figura 4.16</b> - Corpos de prova de laminados G45 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionada em $\pm 45^\circ$ (b).....	57
<b>Figura 4.17</b> - Corpos de prova de laminado H45 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionada em $\pm 45^\circ$ (b).....	57
<b>Figura 4.18</b> - Corpos de prova de laminado H45//0/90 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionadas próximo de $45^\circ$ com menor deformação local (b). ....	58
<b>Figura 4.19</b> - Resultados das propriedades de tração (resistência e deformação) para cinco configurações dos laminados.....	58
<b>Figura 4.20</b> - Resultados da propriedade de módulo de elasticidade para as cinco configurações dos laminados.....	59
<b>Figura 4.21</b> – Curvas do ensaio de <i>Short Beam</i> para o laminado biaxial de fibra de vidro G0/90 e híbrido H0/90. ....	61
<b>Figura 4.22</b> – Corpos de prova, após ensaio, do laminado G0/90, lado da aplicação da carga (a), e lado dos apoios (b). As setas indicam as regiões com delaminações. ....	61
<b>Figura 4.23</b> – Corpos de prova, após ensaios <i>Short Beam</i> , do laminado híbrido H0/90, lado da aplicação da carga (a), e lado dos apoios (b). As setas indicam as regiões com delaminações. ....	62
<b>Figura 4.24</b> – Imagens de microscopia ótica de um corpo de prova do laminado G0/90 (a); e de um corpo de prova do laminado híbrido (b); mostrando as falhas entre as camadas. Vistas da lateral dos corpos de prova. ....	62
<b>Figura 4.25</b> – Curvas do ensaio de <i>Short Beam</i> para o laminado biaxial de fibras de vidro G45 e híbridos H45 e H45//0/90. ....	64
<b>Figura 4.26</b> – Corpos de prova, após ensaio, do laminado G45, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b), as setas indicam as regiões com delaminações. ....	65

<b>Figura 4.27</b> – Corpos de prova, após ensaio, do laminado H45, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b); as setas indicam as regiões com delaminações.....	65
<b>Figura 4.28</b> – Corpos de prova, após ensaio, do laminado H45//0/90, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b); as setas indicam as regiões com delaminações. ....	66
<b>Figura 4.29</b> – Imagens de microscopia ótica de um corpo de prova do laminado G45 (a), dos corpos de prova de laminados híbridos H45, 7 (b) e H45//0/90, 3 (c), mostrando as falhas entre as camadas. Vistas da lateral dos corpos de prova. ....	66
<b>Figura 4.30</b> – Resultados dos ensaios de Cisalhamento Interlaminar <i>Short Beam</i> para as 5 classes de laminados.....	67
<b>Figura 4.31</b> - Curvas do ensaio de Compressão dos laminados G0/90 e H0/90...	69
<b>Figura 4.32</b> – Falha dos laminados G0/90 (a). Detalhe da fratura (b). Modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (c).....	69
<b>Figura 4.33</b> – Laminados H0/90 com falha após ensaio. Vista frontal (a), vista lateral (b) e modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (c).....	70
<b>Figura 4.34</b> – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova de laminados híbridos: número 6 (a) e 2 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova. ....	71
<b>Figura 4.35</b> - Curvas dos ensaios de compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90. ....	72
<b>Figura 4.36</b> – Corpos de prova G45 fraturado (a) e modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (b). ....	73
<b>Figura 4.37</b> – Corpos de prova H45 fraturado (a) e modo de falha ocorrido de acordo com a norma ISO14126 (b). ....	74
<b>Figura 4.38</b> – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova híbrido número 10 (a) e 9 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova.....	74
<b>Figura 4.39</b> – Corpos de prova H45//0/90 fraturado.....	75
<b>Figura 4.40</b> – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova híbrido número 4 (a) e 7 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova.....	75
<b>Figura 4.41</b> – Resultados dos ensaios de compressão para as 5 classes de laminados.....	76

<b>Figura 4.42</b> – Resumo das propriedades mecânicas analisadas.....	77
<b>Figura 4.43</b> – Ampliação dos resultados de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar (ILSS) .....	78

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais comparadas às fibras de vidro.....	10
<b>Tabela 2.2</b> - Composição da fibra de juta.....	13
<b>Tabela 2.3</b> - Algumas propriedades mecânicas e densidade das fibras naturais com destaque para os dois tipos de fibras utilizadas nesse trabalho. ....	15
<b>Tabela 2.4</b> - Composição da fibra de vidro do tipo E. ....	16
<b>Tabela 2.5</b> - Algumas propriedades mecânicas dos principais polímeros termorrígidos. ....	17
<b>Tabela 3.1</b> - Especificação dos tecidos Biax 995g/m <sup>2</sup> e 800g/m <sup>2</sup> .....	18
<b>Tabela 3.2</b> - Construção do tecido de juta de gramatura 450g/m <sup>2</sup> .....	23
<b>Tabela 3.3</b> - Propriedades da resina epóxi de infusão (RIM 135) e dos endurecedores rápido (RIMH134) e lento (RIMH 137).....	24
<b>Tabela 3.4</b> - Orientação das camadas em cada painel de laminado e o número de camadas constituintes. ....	26
<b>Tabela 3.5</b> - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração, Short e compressão. ....	35
<b>Tabela 4.1</b> - Valores de tensão máxima ( $\sigma_T$ ), módulo (E) e deformação ( $\epsilon$ ) do laminado de fibras de vidro (G0/90) e do laminado híbrido (H0/90) com a mesma orientação. ....	51
<b>Tabela 4.3</b> – Resultado de ILSS para as duas classes de laminado.....	60
<b>Tabela 4.4</b> - Resultado de ILSS para as três classes de laminado.....	64
<b>Tabela 4.5</b> – Resultado da tensão em compressão para laminados G0/90 e H0/90. ....	68
<b>Tabela 4.6</b> – Resultado da resistência à compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90. ....	72

**LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações**

GL - *Germanischer Lloyd*

CAGR - *Compound Annual Growth Rate*

GWEC - *Global Wind Energy Council*

MPa - Megapascal

GPa – Gigapascal

DGEBA – Diglicidil éter do bisfenol A

DGEBF - Diglicidil éter do bisfenol F

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ISO – *International Organization for Standardization*

ILSS - *Interlaminar Shear Strength*

HDT - Temperatura de deflexão térmica

FWF – *Fibre Weight Fraction*

CDP – Corpo de prova

CDPS – Corpos de prova

DSC – *Differential Scanning Calorimetry*

DMTA – *Dynamic Mechanical Thermal Analysis*

T<sub>g</sub> – Temperatura de transição vítrea

VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*

IITRI - *Illinois Institute of Technology Research Institute*

RTM – *Resin Transfer Molding*

$\sigma_T$  – Tensão em tração

$\sigma_c$  – Tensão em Compressão

E - Módulo de elasticidade

E<sub>T</sub> - Módulo de elasticidade em tração

E<sub>c</sub> - Módulo de elasticidade em compressão

E' - Módulo de armazenamento

E'' - Módulo de perda

$\epsilon$  - Deformação

Hz - *Hertz*

$\mu\text{m}$  - Micrómetro

kN - *kilonewton*

S<sub>12</sub> – Tensão de cisalhamento no plano ortogonal 1 e 2

$S_{13}$  – Tensão de cisalhamento no plano ortogonal 1 e 3

$S_{23}$  – Tensão de cisalhamento no plano ortogonal 2 e 3

$G_{12}$  – Módulo de cisalhamento no plano ortogonal 1 e 2

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

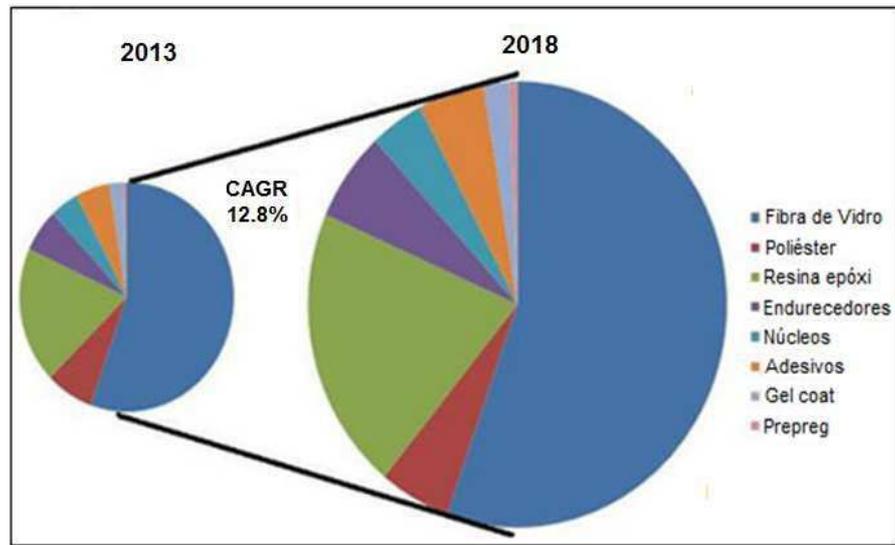
#### 1.1 Considerações Iniciais

Os compósitos têm representado nas últimas décadas um dos maiores avanços tecnológicos em escala global, alcançando os mais diversos setores da indústria, desde os compósitos de alto desempenho, como os que são utilizados pelo setor aeroespacial, aeronáutico, até os mais simples, como os de design de interior de automóveis, passando pelos equipamentos esportivos, indústria automotiva, naval, construção civil, energia, petróleo e gás e muitas outras (SHAH *et. al.*, 2013; MARINUCCI, 2011).

O simples fato de misturar dois materiais física e quimicamente distintos, e a partir disso obter um produto com boas propriedades mecânicas, resistente quimicamente e bem mais leve que alguns materiais convencionais, como metais e concreto, por exemplo, tem propiciado ao mercado novas aplicações. Para atender essa nova demanda, a produção de fibras de vidro, fibras de carbono e resinas do tipo termorrígidas, que são as principais matérias primas para a produção de compósitos de matriz polimérica termorrígida, tem aumentado enormemente (HASSAN *et. al.*, 2016; MASUELLI, 2013).

Tomando como base um mercado relativamente recente no consumo de compósito, como o setor de energia eólica, a *Global Wind Energy Council* (fórum internacionalmente creditado para o setor de energia eólica) estima que o consumo de matérias-primas para o segmento de energia eólica, por exemplo, tenha um CAGR (abreviação em inglês para *Compound Annual Growth Rate*, que é uma medida de crescimento esperado de um determinado mercado dentro de períodos específicos de tempo) de crescimento de 12,8% até 2018, como mostrado na Figura 1.1 (GWEC, 2013). No mercado global, somente a produção de fibras de vidro é esperado um CAGR de crescimento de 4,5% de 2016 a 2022 (MAZUMDAR *et. al.*, 2017).

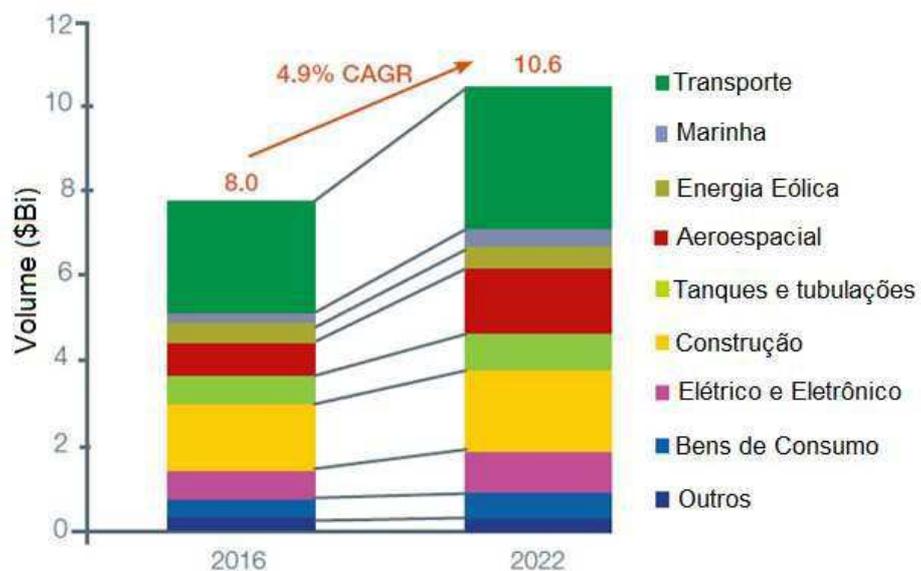
Figura 1.1 – Previsão de crescimento no consumo de matérias primas para materiais compósitos até 2018.



Fonte: GWEC, 2013.

Considerável crescimento ainda pode ser visto tomando como base apenas o mercado americano de materiais compósitos, que prevê contínuo aumento no consumo desses materiais até o ano de 2022, como representado na Figura 1.2 (MAZUMDAR et. al., 2017).

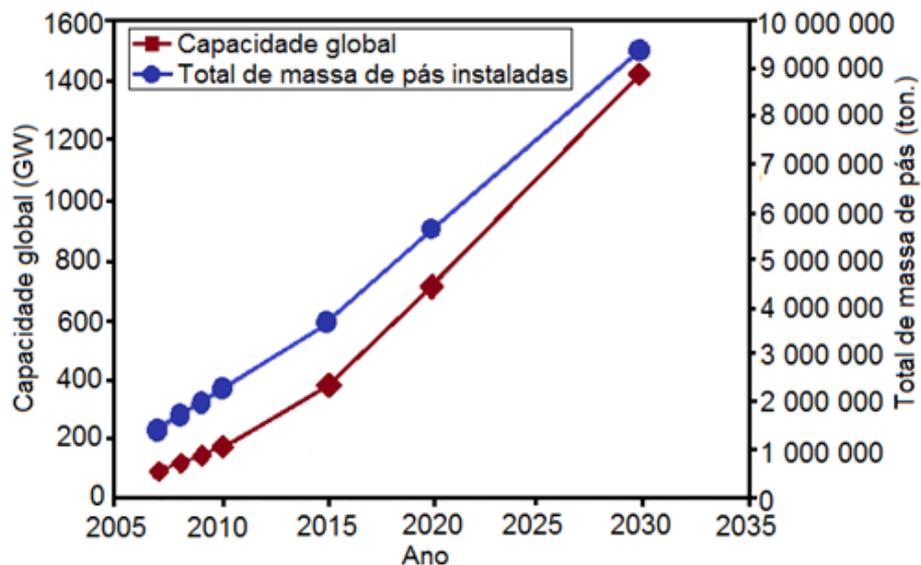
Figura 1.2 – Estimativa do mercado de materiais compósitos nos EUA por segmento de aplicação.



Fonte: MAZUMDAR et. al., 2017

Esse cenário revela o constante aumento no consumo dos compósitos e, conseqüentemente, das matérias primas que tem se tornado um grande inconveniente ambiental tanto pela não reciclabilidade dos materiais compósitos de alto desempenho, quanto por serem materiais provenientes de fontes não renováveis, como as matrizes poliméricas derivadas do petróleo e as fibras de vidro, por exemplo, provenientes de óxidos de silício, alumínio e de outros minerais (OMRANI *et. al.*, 2016; WALLENBERGER, BIGHAM, 2010). Ainda, com base em dados do setor de energia eólica estima-se que até 2030, ocorrerá um crescimento de mais de 9 000 000 de toneladas de massa de pás instaladas (Figura 1.3), e o descarte de mais de 1 000 000 de toneladas de compósitos devido ao fim da vida útil de alguns dos componentes que são utilizados nos aerogeradores (ABDELLAOUI, 2015; PAPADAKIS *et. al.*, 2010).

Figura 1.3 – Capacidade energética global e estimativa total (em massa) de materiais compósitos no setor de pás eólicas até 2030.



Fonte: PAPADAKIS *et. al.*, 2010

Nesse contexto, frente aos crescentes apelos ambientais, tem aumentado o interesse de pesquisadores na busca por materiais de reforço que diminuam os impactos causados ao meio ambiente, não somente com o descarte dos materiais compósitos após o fim da vida útil, mas também em toda a cadeia de produção das fibras, como a extração dos minerais para a produção das matérias primas, a manufatura das fibras e aplicação que geram consideráveis volumes de resíduos

(MITTAL *et. al.*, 2016; CORBIERE-NICOLLIER, *et. al.*, 2011). As fibras de origem natural, em substituição às fibras sintéticas, convencionais e estruturais (vidro, carbono, etc), têm sido exploradas cada vez mais e hoje já ocupam uma porção do mercado de compósitos com a substituição parcial das fibras de vidro, por exemplo. (MITTAL *et. al.*, 2016).

No entanto, as inferiores propriedades mecânicas como, por exemplo, a resistência a tração, apresentadas pelas fibras naturais frente às convencionais e sintéticas como as fibras de vidro e de carbono, dificulta uma maior produção de compósitos reforçados com fibras naturais. Porém, algumas aplicações permitem a combinação de fibras sintéticas com fibras naturais, sem que as propriedades desejadas sejam significativamente afetadas. Esse material, formado pela mistura de duas fibras distintas aglutinadas pela mesma matriz polimérica, é comumente chamado de compósito híbrido. Os compósitos híbridos são de maior interesse para as aplicações que devem apresentar um mínimo requisito estrutural, uma vez que as fibras sintéticas ainda continuam a desempenhar uma importante e significativa função nas propriedades mecânicas do material final (AHMED, 2008; SANJAY *et. al.*, 2015; PIRES, 2009)

Dentro deste contexto, neste trabalho foi realizado um estudo do comportamento mecânico de compósitos de fibras de vidro, utilizados na indústria eólica, com a introdução de fibra natural de juta, na moldagem de laminados híbridos biaxiais; buscando conhecer a influência das fibras de juta em diferentes configurações, nas propriedades mecânicas dos laminados produzidos.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho foi contribuir com o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de compósitos híbridos de fibras vegetais com fibra de vidro, utilizando materiais e processo de fabricação de compósitos já estabelecidos pela indústria de fabricação de pás eólicas.

Os objetivos específicos foram:

- Fabricar laminados híbridos de tecido de fibras de vidro com tecido de fibras de juta, pelo processo de infusão assistida por vácuo, alterando a orientações de suas camadas.

- Caracterizar as propriedades mecânicas dos diferentes laminados através dos ensaios de tração, de compressão e de cisalhamento interlaminar, visando detectar possíveis aplicações.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Compósitos Poliméricos

Compósitos podem ser definidos como uma classe de materiais constituídos pela combinação de dois ou mais diferentes componentes. Algumas características particulares diferem os compósitos dos demais materiais multicomponentes convencionais, primeiramente porque seus constituintes se apresentam imiscíveis em uma escala macroscópica, segundo, ambos os elementos apresentam uma nítida disparidade em suas propriedades química e/ou física e, por último, o compósito formado, promovido por compatibilidade química, possui determinadas propriedades relativamente elevadas quando comparadas às de seus componentes individuais (SANJAY, 2015; CAMPBELL, 2004; REZENDE, 2011).

O desenvolvimento dessa classe de materiais tem se tornado mais conhecido nos últimos anos devido à inclusão de diversos materiais sintéticos na formação tanto da matriz quanto do reforço em estruturas modernas como aeronaves, automóveis, entre outros, mas sabe-se que o conceito de compósito está presente desde milhares de anos antes das primeiras civilizações. Pode-se citar como exemplos de compósitos naturais a madeira, ossos e dentes e, ainda materiais produzidos pelo homem como argilas combinadas com bambu, e blocos de concreto. Várias construções antigas com materiais naturais foram o ponto de partida para se chegar ao conhecimento atual na área de materiais compósitos (PARDINI; NETO, 2006, HARRIS, 1999).

Duas fases claramente distintas constituem os compósitos: a fase contínua representada por uma matriz cerâmica, metálica ou polimérica e uma segunda fase, comumente conhecida como reforço, que pode ser partículas ou fibras nas formas curtas ou contínuas (MARINUCCI, 2011; CAMPBELL, 2004). Em alguns casos, como as fibras de vidro, devido ao caráter inorgânico do reforço e a natureza orgânica da matriz, é necessária a adição de um componente químico de acoplamento (ou compatibilizante), para a formação de uma fase específica chamada de interface (SPERANZINI *et. al.*, 2016; KIM; MAI, 1998). Tal componente químico apresenta em sua estrutura alguns grupos químicos que irão se ligar à

superfície da fibra, e diferentes grupos químicos que irão se ligar à uma matriz polimérica, por exemplo, promovendo assim a compatibilidade entre os dois materiais, de modo que os esforços aplicados sejam distribuídos uniformemente para o reforço através da matriz (CECH *et al.*, 2013; TRINDADE *et. al.*, 2008; WENBIN *et. al.*, 2016).

O compósito polimérico é uma classe específica dentro dos materiais compósitos, que podem ser formados por uma matriz polimérica termoplástica, ou por uma matriz termorrígida, que pode ser uma resina epóxi, fenólica, poliéster ou viniléster reforçada por fibras, geralmente, sintéticas (ABDELLAOUI, *et. al.*, 2015). As fibras mais utilizadas comercialmente são as fibras de vidro, carbono e aramida (PAIVA, SANTOS, REZENDE, 2009). Há aplicações ainda que demandam a combinação entre algumas delas, e são os denominados compósitos híbridos (ABDELLAOUI, *et. al.*, 2015; KALANTARI *et. al.*, 2016).

Uma das grandes vantagens dos compósitos poliméricos em relação aos materiais convencionais está relacionada, principalmente, às elevadas resistência mecânica e rigidez específica, o que significa que uma unidade de massa de um compósito possui propriedades mecânicas superiores ou no mínimo iguais à mesma unidade de massa de um material metálico, por exemplo. Outras atraentes características são a leveza, boa resistência à fadiga e ao desgaste, além de proporcionar flexibilidade de moldagem nas mais complexas peças durante a fabricação, seja na quantidade de material ou na geometria (MASUELLI, 2013; REZENDE, 2011, SWOLFS *et. al.*, 2014).

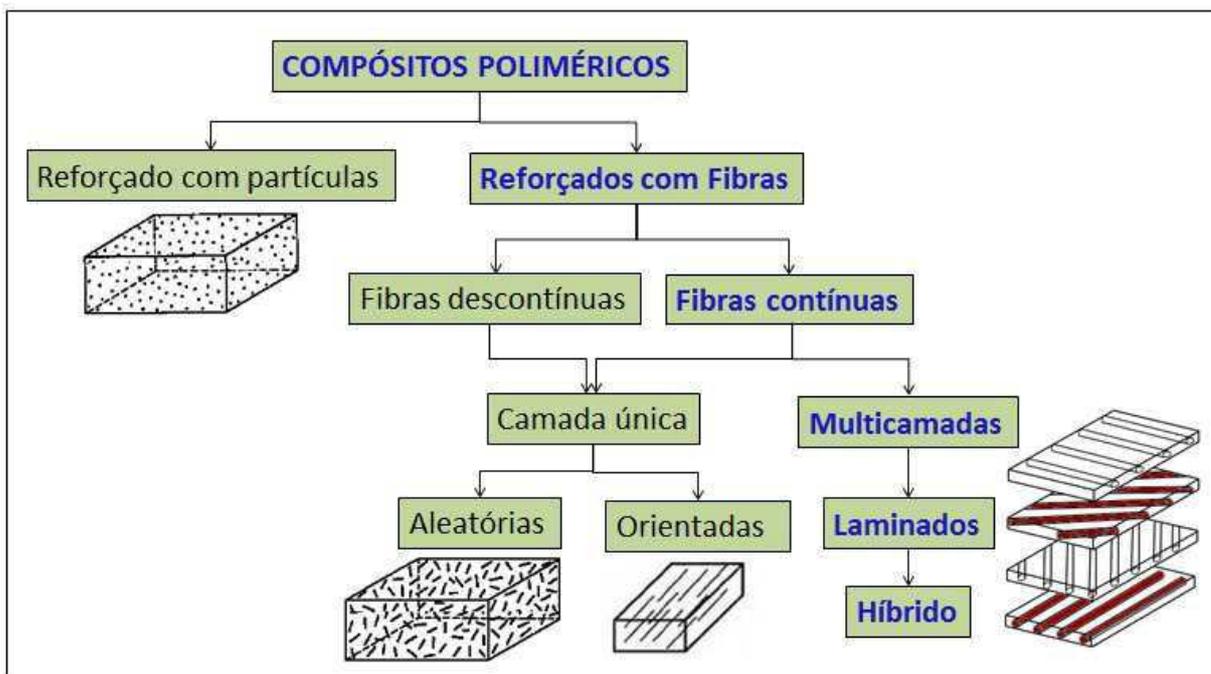
O tipo de reforço e matriz, a interface entre eles, a fração mássica de fibra, o tamanho e forma das fibras e, principalmente, a orientação do reforço são as características primordiais que determinam a resistência mecânica do compósito (FARHANA, 2016; MORTAZAVIAN; FATEMI, 2015). Fibras curtas, distribuídas aleatoriamente dentro da matriz, levam a um compósito com resistência similar em qualquer direção; essa particularidade denomina-se de isotropia. Já os constituídos por fibras contínuas, normalmente orientadas na direção do carregamento, apresentam resistência muito superior aos compósitos isotrópicos em uma direção específica; essa característica é denominada anisotropia. (VALLITTU, 2015, MARINUCCI, 2011).

Os reforços de fibras curtas ou de fibras contínuas distribuídas aleatoriamente, comumente são aplicados como monocamada de compósitos,

enquanto que os compósitos formados por fibras contínuas orientadas, na maioria das aplicações formam os denominados laminados, que podem conter fibras contínuas com direção única (laminado unidirecional) e “lâminas” orientadas em duas direções (laminado bidirecional) (PARDINI; NETO, 2006; BRAGA; MAGALHÃES 2015).

Dependendo da aplicação, pode haver a combinação dessas “lâminas” levando a formação de um laminado com diferentes orientações. A Figura 2.1 mostra uma classificação básica dos compósitos poliméricos quanto às diversas configurações de forma, tamanho, orientação e quantidade dos reforços na formação de uma “lâmina” ou de um laminado (MARINUCCI, 2011; RIOS, 2012). Na Figura 2.1 está também, em destaque (cor azul), a configuração do reforço utilizado neste trabalho.

Figura 2.1 – Classificação dos compósitos poliméricos.



Fonte: Adaptado de MARINUCCI, 2011; NOSSA, 2011.

## 2.2 Compósitos Poliméricos Híbridos com Fibra Natural

No cenário de novas tecnologias de materiais, quando se trata de compósitos, na maioria dos casos, logo se imagina os compósitos poliméricos estruturais com fibras sintéticas, como as fibras de vidro e de carbono, devido às altas performances

e pela inserção nos setores mais avançados de pesquisa e aplicação desses novos materiais, como o setor aeroespacial, aeronáutico, de energia, de petróleo e automobilístico (CAMPBELL, 2010; PAIVA, SANTOS, REZENDE, 2009; OPELT *et al.*, 2017).

Há alguns anos, devido ao crescente consumo dos compósitos e aos questionamentos ambientais em relação aos compósitos de fibras sintéticas que têm se tornado temas de relevância internacional, pesquisadores vêm utilizando fibras naturais, visando substituição total ou parcial das fibras sintéticas na fabricação de compósitos, tanto por ser opção tecnicamente viável em determinadas aplicações, quanto por minimizar os impactos gerados ao meio ambiente (DARROS, PAIVA, 2015; HOSOKAWA *et al.*, 2017; PAPADAKIS *et al.*, 2010; ABDELLAOUI, 2015, SANJAY *et al.*, 2015;).

Dentre as várias publicações, alguns autores têm relacionado à aplicação das fibras naturais às questões ambientais de biodegradação das fibras, bem como a reciclabilidade do compósito (ABDELLAOUI, 2015; BRAGA, MAGALHÃES, 2015; HAAMEEM *et al.*, 2016; HOSOKAWA *et al.*, 2017; SABA, *et al.* 2015; HOSSAIN *et al.* 2013; SANJAY *et al.*, 2015). No entanto, é importante considerar basicamente dois aspectos quando se trata de uso de fibras naturais com o intuito de minimizar os impactos ambientais. O primeiro é que se tratando de compósitos com fibras naturais em uma matriz termorrígida, os processos de reciclagem ainda são difíceis, pois há dificuldade de separação do polímero das fibras, bem como a impossibilidade de reciclagem do polímero termorrígido. Nesse contexto, uma das vantagens, considerando a reciclagem mecânica de compósito com fibra natural, é a redução do atrito nos equipamentos pela ausência ou redução de fibras sintéticas (DEPPA, *et al.* 2011; GILMORE, 2013, SANJAY, 2015). O segundo aspecto, mostra as vantagens no uso das fibras naturais em compósitos em um contexto mais amplo, em que os impactos gerados ao meio ambiente pelos compósitos e seus produtos não devem ser considerados apenas após o fim da sua vida útil. No caso, deve ser considerada toda a cadeia de produção, começando pela redução na quantidade de fibra sintética produzida, a introdução de fibras naturais, redução dos gastos com energia e com tecnologia dos processos de fabricação das fibras, questões de saúde e segurança ocupacional durante a fabricação dos compósitos, até o próprio descarte do produto (KU, 2011; SANJAY, 2015, JOSHI, 2004).

Fibras naturais vegetais apresentam algumas vantagens frente às fibras sintéticas convencionais como baixo custo, baixa densidade, comparável resistência específica, não abrasiva durante o processamento, recurso renovável e biodegradável (RAMESH *et al.*, 2013). No entanto, uma das significativas desvantagens dos compósitos de fibras naturais são os inferiores valores de propriedades mecânicas quando comparados com os de fibra sintética, como mostra a Tabela 2.1, o que faz do uso de compósito contendo somente fibra natural não ser interessante para boa parte das aplicações, principalmente quando o material é exposto a esforços mais severos (MUTHUVEL *et al.*, 2013). Assim, fibras naturais podem ser combinadas com fibras sintéticas utilizando-se de uma matriz compatível com ambas às fibras, como as resinas epóxi, com o objetivo de obter um material compósito com propriedades mecânicas satisfatórias e economicamente mais viável (SANJAY *et al.*, 2015; MUTHUVEL *et al.*, 2013).

Tabela 2.1 - Algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais comparadas às fibras de vidro.

<b>Fibra</b>	<b>Resistência máx. à tração [MPa]</b>	<b>Módulo E [GPa]</b>	<b>Deformação [%]</b>
Bambu	140-230	11-17	-
Cânhamo/ <i>hemp</i>	690	70	1,6
Linho/ <i>flax</i>	345-1035	27,60	2,70-3,20
<b>Juta</b>	<b>393-773</b>	<b>26,50</b>	<b>1.30</b>
Sisal	511-635	9,40-22	2,0-2,50
<i>Ramie</i>	560	24,50	2,5
<b>Vidro E*</b>	<b>2400</b>	<b>73</b>	<b>3</b>

\*Fibra de vidro usada como referência para comparação.

Fonte: DEHURY, 2013; ONUAGULUCHI, BANTHIA 2016.

Em vista do cenário em que 87% dos 8,7 milhões de toneladas da produção de compósitos poliméricos é representado por compósito com fibras de vidro, pesquisadores perceberam nesse nicho uma extensa oportunidade para a introdução das fibras naturais vegetais (SHAH, 2013). Pensando nesse aspecto, estudos vêm sendo desenvolvidos com a hibridização de compósitos de fibra natural com fibra sintética, a fim de encontrar configurações e composições dos laminados que ofereçam propriedades mecânicas e térmicas satisfatórias. O setor automotivo é um dos ramos da indústria que mais tem investido no desenvolvimento de

compósitos com fibras naturais e híbridos visando a substituição dos compósitos com fibras sintéticas (MANSOR *et al.*, 2013; KORONIS *et al.*, 2013).

Estudos com compósito híbrido contendo duas camadas de fibras de juta e três camadas de fibras de vidro em matriz poliéster, em comparação ao laminado com cinco camadas de fibras de vidro, mostraram resultados significativos, principalmente, em resistência a tração com 104 MPa comparado com 106 MPa do laminado com fibras de vidro, respectivamente (HASSAN, 2016). Outro estudo mostrou que dentre uma variedade de fibras naturais, a fibra de Kenaf se mostrou viável na moldagem de compósito híbrido com fibras de vidro no *design* de uma alavanca do freio de mão de automóveis (MANSOR *et al.*, 2013).

Pesquisas realizadas com fibras de linho (*flax fiber*) em matriz epóxi na fabricação de pás de pequena escala para turbina eólica, mostraram viabilidade na substituição de fibras de vidro por fibras de linho (SHAH *et al.*, 2013). Outras referências práticas de aplicações de compósitos naturais e híbridos são citadas na literatura (MANSOR *et al.*, 2013; TAMBYRAJAH, 2015) como, por exemplo, automóveis da empresa *Mercedez Benz*, que incorporou no painel das portas do veículo *A-Class* materiais compósitos de fibras de juta e resina epóxi. No mesmo segmento, a empresa *Audi* utilizou em seu veículo *A2*, um compósito híbrido de fibras de linho e sisal com resina poliuretana, além de outras fibras vegetais nos modelos *A3*, *A4*, *A6*, *Avant*, *A8*. A *BMW* investiu na aplicação da tecnologia de *prepregs* de fibras naturais em seu *sedan Serie 7* (OMRANI *et al.*, 2016; MANSOR *et al.*, 2013; TAMBYRAJAH, 2015). A *Toyota* fez o uso de compósitos com fibras vegetais nos painéis das portas, assentos e tampas de cobertura do *step* de seus carros *Brevis*, *Harrier*, *Celsior* e *Raum* (OMRANI *et al.*, 2016).

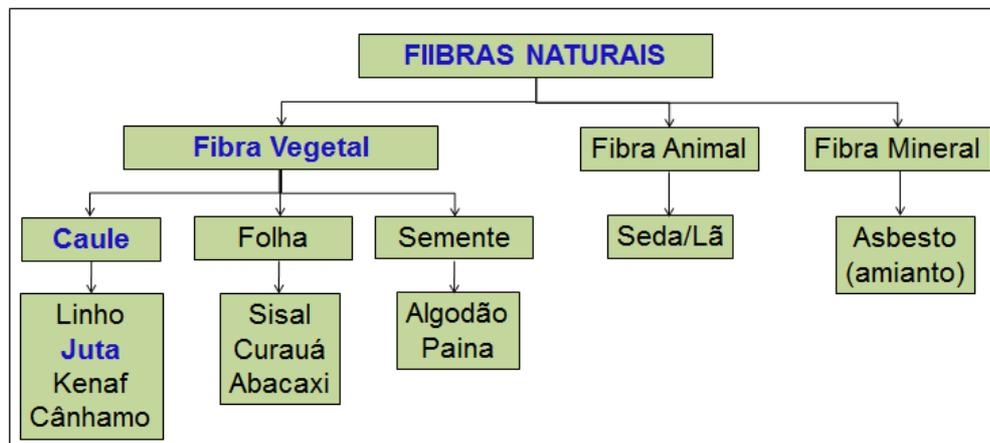
### 2.3 Fibras Vegetais

As fibras naturais estão abundantemente presentes na natureza nas mais diferentes formas com origem a partir de vegetais, animais e minerais. Podem-se citar como exemplos de fibras provenientes de animais, as sedas e lãs, como fibras minerais, o asbesto ou amianto, e como fibras vegetais têm-se, desde as folhas como as de sisal, até os caules de onde são extraídas as fibras de linho, cânhamo, juta e muitas outras. A Figura 2.2 mostra uma resumida classificação das fibras naturais, com destaque para a fibra de juta utilizada nesse trabalho. Várias destas

fibras já são utilizadas desde as antigas civilizações, como as fibras vegetais que eram utilizadas na produção de cordas e de cestos para o transporte de alimentos (MOHANTY et al., 2002).

As fibras vegetais têm se destacado entre as demais fibras devido a possibilidade de sua utilização como reforço em materiais compósitos, como já tem sido aplicado desde a antiguidade na construção de casas de pau-a-pique e, concomitantemente, por apresentar algumas vantagens em relação a algumas fibras sintéticas, como as fibras de vidro e de carbono. Algumas dessas vantagens são, baixa densidade das fibras vegetais, por exemplo, fibra de Juta com  $1,4 \text{ g/cm}^3$  e fibra de Vidro com  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , baixo custo (o preço por quilo de algumas fibras naturais varia de 0,6 a 2 dólares, já as fibras de vidro variam de 1,6 a 20 dólares), a atoxicidade e biodegradabilidade. Essa última propriedade tem recebido destaque devido às questões ambientais relacionados à crescente produção de materiais não reciclados, como as fibras sintéticas (PAIVA et al., 1999; SHAH, 2013; OMRANI, 2016; SILVA, 2010; PIRES, 2009).

Figura 2.2 – Classificação das fibras naturais.



Fonte: Adaptado de SANJAY et al., 2015; PIRES, 2009.

### 2.3.1 Fibra de Juta

A fibra de juta é uma das mais presentes no mercado de fibras naturais, atrás somente das fibras de algodão, e também a que possui menor custo. As duas espécies de juta mais comercializadas são a *Corchorus Capsularis* e a *Corchorus Olitorius* (KHAN; KHAN, 2015).

As fibras de juta são abundantes no sul da Ásia, responsável por mais de 90% da produção mundial da fibra. No Brasil, a produção de juta está concentrada na região amazônica por oferecer condições favoráveis ao desenvolvimento da planta, que chega a crescer cerca de 3 a 4m de altura. A composição química da fibra de juta é apresentada na Tabela 2.2 (PIRES, 2009; KHAN; KHAN 2015).

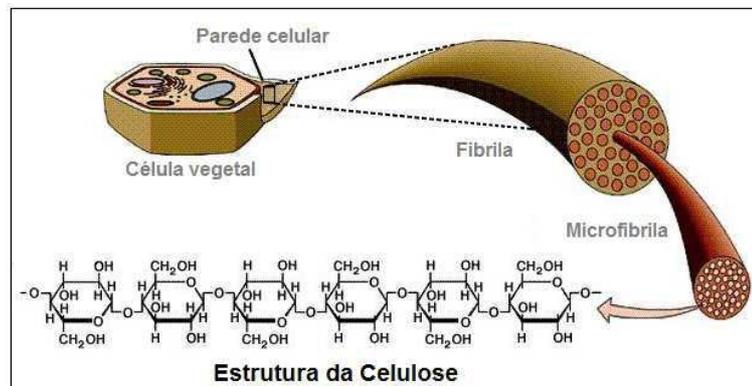
Tabela 2.2 Composição da fibra de juta

<b>Composição da Fibra de Juta (em massa)</b>	
Celulose	61 - 71%
Hemicelulose	13.6 - 20.4%
Lignina	12 - 13%
Pectina	~0.2%
Umidade	~12.6%
Cera	~0.5%

Fonte: KHAN, 2015

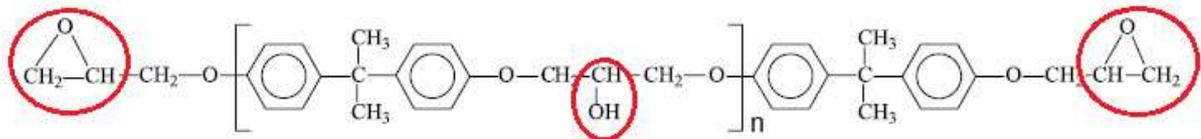
A estrutura química da celulose, apresentada na Figura 2.3, presente nas plantas apresenta um elevado número de grupos de hidroxilas o que a torna um material particularmente hidrofílico. Esta característica possui efeitos deletérios quando estas fibras são incorporadas à matrizes apolares; nessa condição tem-se a necessidade da aplicação de tratamentos na superfície das fibras para melhor promover a compatibilidade entre ambos os materiais. Por outro lado, a ampla aplicação de matriz de resina epóxi, quando se trabalha com fibras vegetais, se dá pela compatibilidade de grupos epóxidos ou oxiranos da resina epóxi (Figura 2.4) com as hidroxilas das fibras vegetais, devido à similaridade na polaridade de suas moléculas (FERREIRA, *et al.*, 2016, KHAN, 2015; MUSTATA *et. al.*, 2015; BOUVET *et. al.*, 2016).

Figura 2.3 – Ilustração da estrutura e organização de cadeias de celulose em uma parede vegetal.



Fonte: Disponível em [goo.gl/wWNP3m](http://goo.gl/wWNP3m)

Figura 2.4 - Estrutura química de uma resina epóxi do tipo DGEBA com destaque para os grupos químicos oxiranos e hidroxila.



Fonte: MUSTATA, 2015

Dentre as fibras naturais comercialmente distribuídas, a fibra de juta está entre as mais disponíveis no mercado internacional. Assim como quase todas as fibras naturais, as propriedades das fibras de juta estão dentro de certo intervalo, devido à variação em sua composição química que é diretamente influenciada pelas condições nas quais são cultivadas, como o tipo de solo e o clima. Tais condições devem ser levadas em consideração quando há algum tipo de comparação mais estreita de propriedade para uma mesma fibra. (KOMURIAH, 2014; KHAN; KHAN, 2015).

A Tabela 2.3 apresenta algumas propriedades mecânicas e densidade das fibras naturais mais comumente estudadas. Na tabela está presente também propriedades da fibra de vidro, como condição de referência.

Tabela 2.3 - Algumas propriedades mecânicas e densidade das fibras naturais com destaque para os dois tipos de fibras utilizadas nesse trabalho.

<b>Propriedades Físicas de Fibras Naturais</b>				
<b>Fibra</b>	<b>Densidade g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Resistencia a tração [MPa]</b>	<b>Módulo E [GPa]</b>	<b>Deformação [%]</b>
Bamboo	1,25	290	17	-
Curauá	1,4	500-1150	11,8	3,7-4,3
Linho	1,4	800-1500	60-80	1,2-1,6
<b>Juta</b>	<b>1,48</b>	<b>410-780</b>	<b>26.5</b>	<b>1,9</b>
Kenaf	-	930	53	1,6
Sisal	1,34	610-720	9-24	2-3
<b>*Vidro E</b>	<b>2,55</b>	<b>2400</b>	<b>73</b>	<b>3</b>

\*Fibra sintética.

Fonte: Adaptado de SANJAY, 2015.

## 2.4 Fibras de Vidro

Fibras de vidro são pequenos filamentos contínuos de diâmetro de até 19 µm, que são produzidos a partir do vidro fundido, em temperaturas superiores a 1400°C, que possui uma composição química estreitamente controlada de modo a obter do vidro a melhor relação custo/propriedades química e, principalmente, mecânica. O seu baixo custo está relacionado com a abundante fonte de matéria prima utilizado na fabricação do vidro, como a sílica, calcário, óxido de alumínio e outros minerais (GROOVER, 2010; WALLENBERGER *et. al.*, 2001; YURDAKUL, *et. al.*, 2015).

Dentre as principais fibras sintéticas utilizadas na fabricação de compósitos como as fibras de carbono, aramida e boro, as fibras de vidro têm um notório destaque no mercado devido à combinação de boas propriedades mecânicas e baixo custo. Por exemplo, comparando com as fibras de carbono, a resistência à tração de alguns tipos de fibra de vidro é cerca de 20% mais baixa, e seu preço por quilo é aproximadamente 70 a 90% menor, dependendo do tipo de fibra de vidro (GUITIÉRREZ, 2013; MALLICK, 2008; LEZZI *et. al.*, 2014).

Existem no mercado diferentes composições de fibras de vidro que são específicas para determinadas aplicações, como o vidro S, que possui maior rigidez, vidro A e C que apresenta boa resistência química, vidros R, quando se requer elevado módulo elástico e o vidro E, o mais utilizado pela indústria em todo o mundo por possuir propriedade intermediária aos citados anteriormente aliados ao custo

reduzido (MARINUCCI, 2011; WALLENBERGER *et. al.*, 2001; YURDAKUL, *et. al.*, 2015).

A Tabela 2.4 apresenta os principais constituintes da fibra de vidro do tipo E, que também foi utilizada neste trabalho; outros elementos são adicionados à composição, como agentes de acoplamento ou *sizing* de tratamento superficial, porém não revelados devido a ser propriedade intelectual dos fabricantes de fibras.

Tabela 2.4 - Composição da fibra de vidro do tipo E.

<b>Composição da Fibra de Vidro E</b>	
<b>[% em peso]</b>	
SiO <sub>2</sub>	55.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.8
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3
MgO	3.3
CaO	18.7

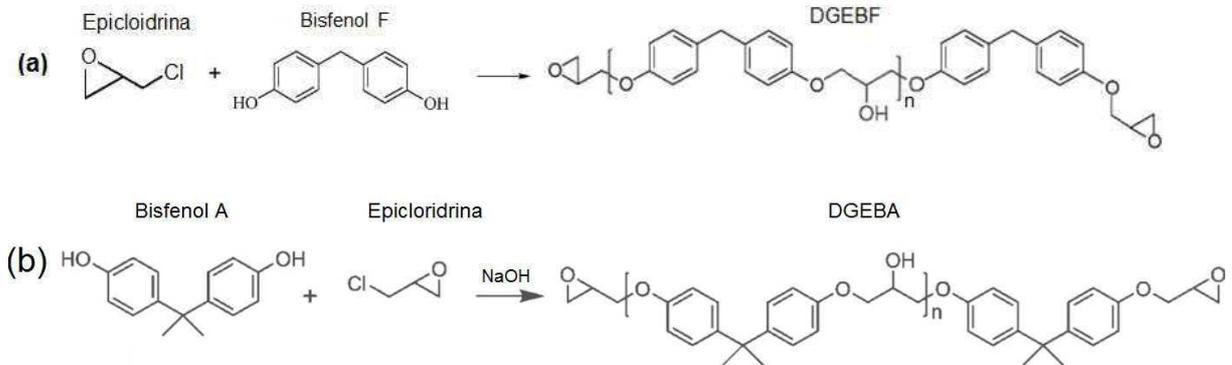
Fonte: PARDINI, 2006.

## 2.5 Resina Epóxi

Normalmente, quando se trata de matrizes para compósitos poliméricos estruturais, as resinas termorrígidas são as mais empregadas, dentre elas, destacam-se as resinas epóxi, poliéster, fenólica, viniléster e outras (XIA, 2014; McCOY *et. al.*, 2016; HAAMEEM *et. al.*, 2016; MARINUCCI, 2011; TURCSAN, MESZAROS, 2017).

Algumas resinas epóxi são obtidas pela reação de epícloridina com bisfenol e que apresenta na extremidade da cadeia um ciclo epoxídico (um anel de três átomos, onde um oxigênio está ligado a dois átomos de carbono). Nessa reação, pode-se obter a resina epóxi DGEBA (diglicidil éter do bisfenol A) ou DGEBF (diglicidil éter do bisfenol F), dependendo de qual bisfenol foi utilizado, como mostra a Figura 2.5 (LIPKE *et. al.*, 2016, VILCHEZ *et. al.*, 2001, POUSTKOV *et. al.*, 2004; TACK *et. al.*, 2008; MA, *et. al.*, 2015)

Figura 2.5 – Formação dos meros de DGEBF (a) e DGEBA (b) e respectivas estruturas químicas.



FONTES: TACK *et. al.*, 2008; MA *et. al.*, 2015.

As resinas epóxi só se tornam matrizes termorrígidas com a introdução de moléculas que reajam com os anéis epóxi presentes nas extremidades da cadeia. Essas moléculas reagentes podem ser do tipo amina ou anidrido e irão promover abertura do anel dando origem a um processo de reticulação das cadeias poliméricas, formando uma estrutura com elevada densidade de ligações cruzadas. Este processo também é denominado de cura, uma reação exotérmica que pode ocorrer com ou sem a aplicação de calor (ALONSO, 2013, LIPKE *et. al.*, 2016, COSTA *et. al.*, 1999).

A formação dessa rede tridimensional rígida na resina epóxi tem como consequência boas propriedades mecânicas, boa estabilidade térmica, com baixo grau de contração (Tabela 2.5), características estas que a destaca em relação às demais resinas do tipo termorrígida, além de um menor custo (COSTA *et. al.*, 1999; BARROS, 2011).

Tabela 2.5 - Algumas propriedades mecânicas dos principais polímeros termorrígidos.

Resina	Resistencia à tração [MPa]	Módulo E [GPa]	Deformação [%]	HDT [°C]	Contração na cura (%)
Fenólica	28-90	2,8-4,8	0,4-1,0	-	-
Epóxi	35-140	2,8-4,1	2,7	110	1,0-5,0
Poliéster	35-104	3,0-3,5	1,2-3,3	80	5,0-10,0
Viniléster	73-80	3,0-3,5	4,0	100	6,0-9,0

HDT: temperatura de deflexão térmica

FONTES: RATNA, 2009; CARNEIRO 2008.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

No presente estudo, para a fabricação dos laminados foram utilizados materiais (exceto a fibra de juta) certificados pela *Germanischer Lloyd* (GL é um órgão internacional de certificação de turbinas eólicas) para a fabricação de compósitos estruturais, como o tecido de fibras de vidro e a resina epóxi.

##### 3.1.1 Seleção dos tecidos de fibras de Vidro

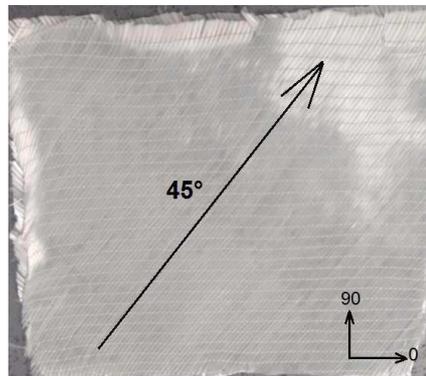
Os tecidos de fibras de vidro usados foram do tipo Biaxial não tramado, costurado com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$  mantidas por fios de costura de poliéster (abreviado por PES pelas fabricantes de tecido) e de gramaturas  $995\text{g/m}^2$  e  $800\text{g/m}^2$ . Esses tecidos são comerciais, e o tratamento superficial das fibras é nomeado de SE1500 pelo fabricante. As fibras e os tecidos foram fabricados pela Owens Corning Brazil.

A escolha dos tecidos de fibras de vidro Biaxial  $\pm 45^\circ$  (Figura 3.1) se deve à sua grande utilização para fabricação de compósitos estruturais, justificado por conceitos técnicos de engenharia e *design*. A especificação de cada um destes materiais é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificação dos tecidos Biax  $995\text{g/m}^2$  e  $800\text{g/m}^2$ .

Biax $995\text{g/m}^2$				Biax $800\text{g/m}^2$			
Material	Orientação	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Tolerância	Material	Orientação	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Tolerância
Vidro E	+45°	476	5%	Vidro E	+45°	401	5%
Vidro E	90°	30	5%	Vidro E	90°	21	5%
Vidro E	0°	2	5%	Vidro E	-45°	401	5%
Vidro E	-45°	476	5%	<sup>1</sup> PES		6	5%
<sup>1</sup> PES		11	5%				

Figura 3.1 – Imagem e esquema indicando a orientação de eixos no tecido de fibras de vidro Biaxial  $\pm 45^\circ$ .

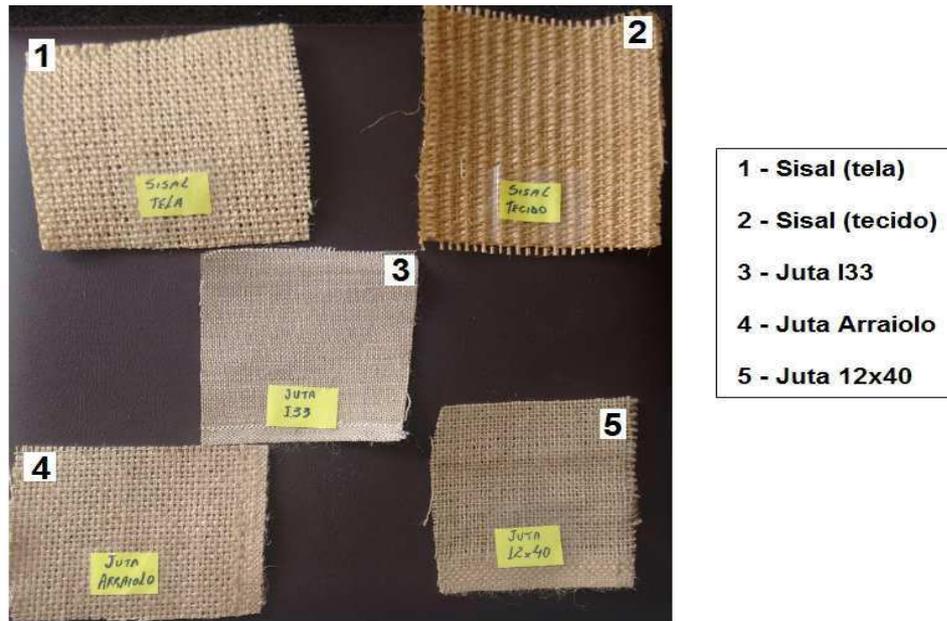


### 3.1.2 Seleção do tecido de fibras de juta

Até a escolha do tecido de juta utilizado, algumas etapas antecedentes foram analisadas. No caso, a fase inicial definiu-se pela busca de fibras vegetais que já estivessem em forma de tecido. No Brasil foram encontradas duas empresas de fabricação de telas e tecidos de fibras vegetais, a APAEB Sisal, que processa fibras de Sisal, instalada na Bahia e a Castanhal Indústria Têxtil, que processa fibras de Juta, localizada no Pará.

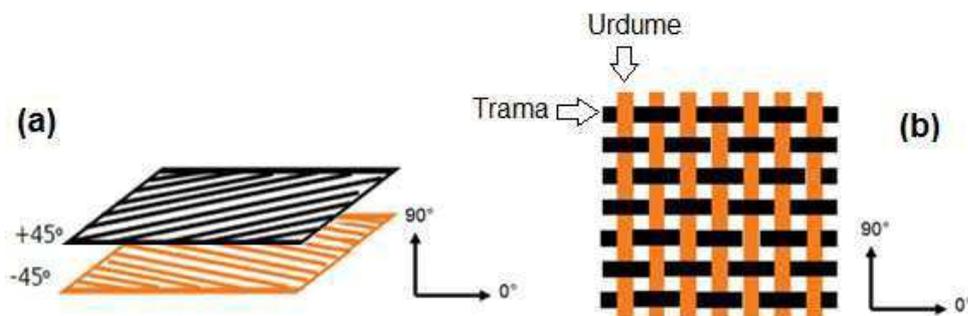
Foram obtidas duas amostras de tecidos de Sisal e três de tecidos de fibras de Juta, cada uma delas com diferentes configurações, como mostra a Figura 3.2. Por análise visual foram descartadas duas opções das de fibra de Juta (3 e 5 da Figura 3.2), uma delas por possuir trama de outro material e, a segunda devido ao não balanceamento das suas fibras nas direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

Figura 3.2 – Imagens das 5 amostras de fibras de juta e de sisal.



A construção têxtil de todas as amostras é do tipo *woven*. Nessa construção trama e urdume se entrelaçam de maneira não aleatória, diferentemente da maioria dos tecidos de fibras de vidro que possuem construção do tipo *non-woven*, ou seja, formado pela sobreposição em plano paralelo de dois ou mais tecidos que não se cruzam (NASSEH, 2011). A Figura 3.3 mostra de maneira simples a diferença entre essas duas construções.

Figura 3.3 – (a) Construção *non-woven* (tecidos de fibras costuradas uma sobre a outra) (b). Construção *woven* (trama e urdume se entrelaçam).

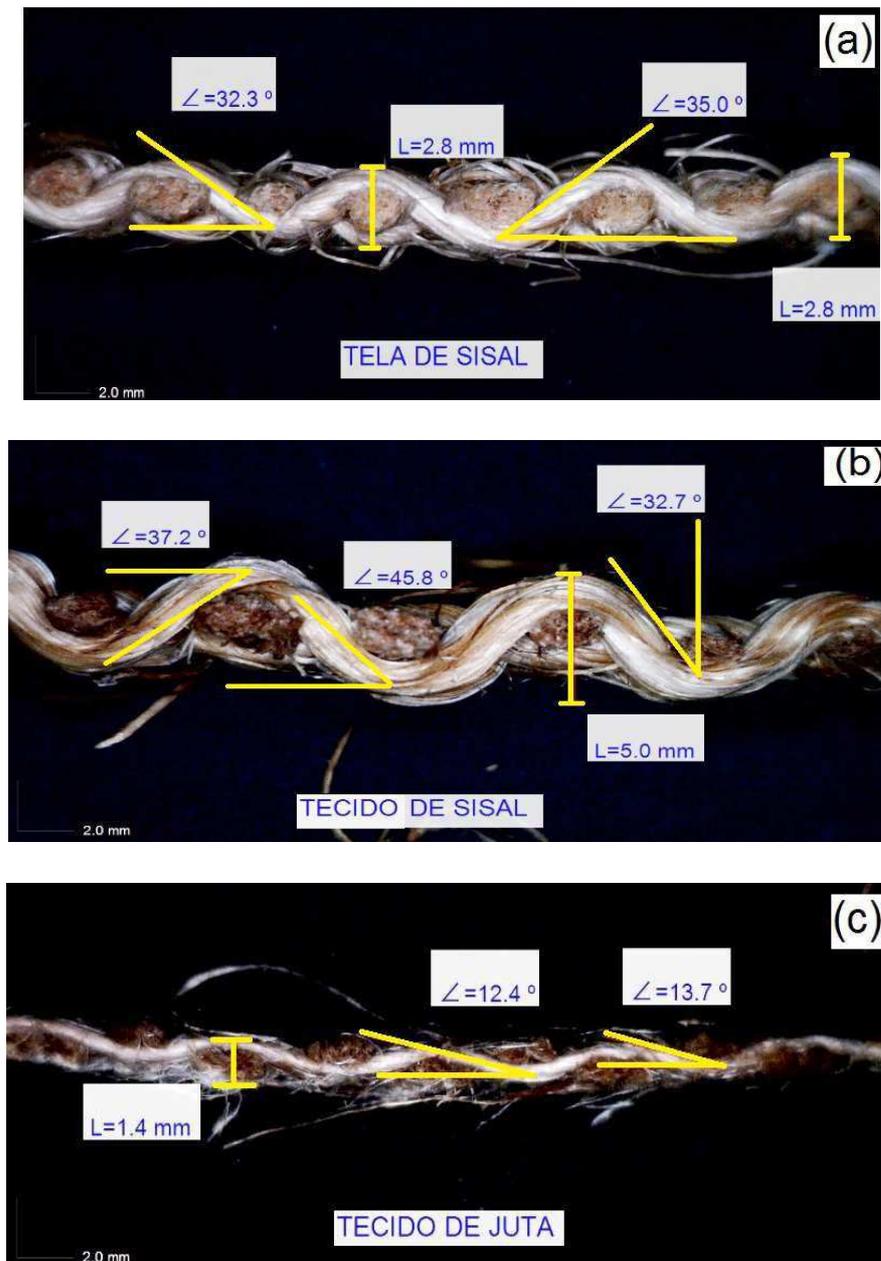


FONTE: Adaptado de TAMBYRAJAH, 2015.

Assim, as duas amostras de sisal e a amostra de juta passaram por uma análise de sua construção, uma vez que tecidos do tipo *woven* tem suas fibras deformadas, tornando-as não lineares e, assim, podendo causar uma redução em

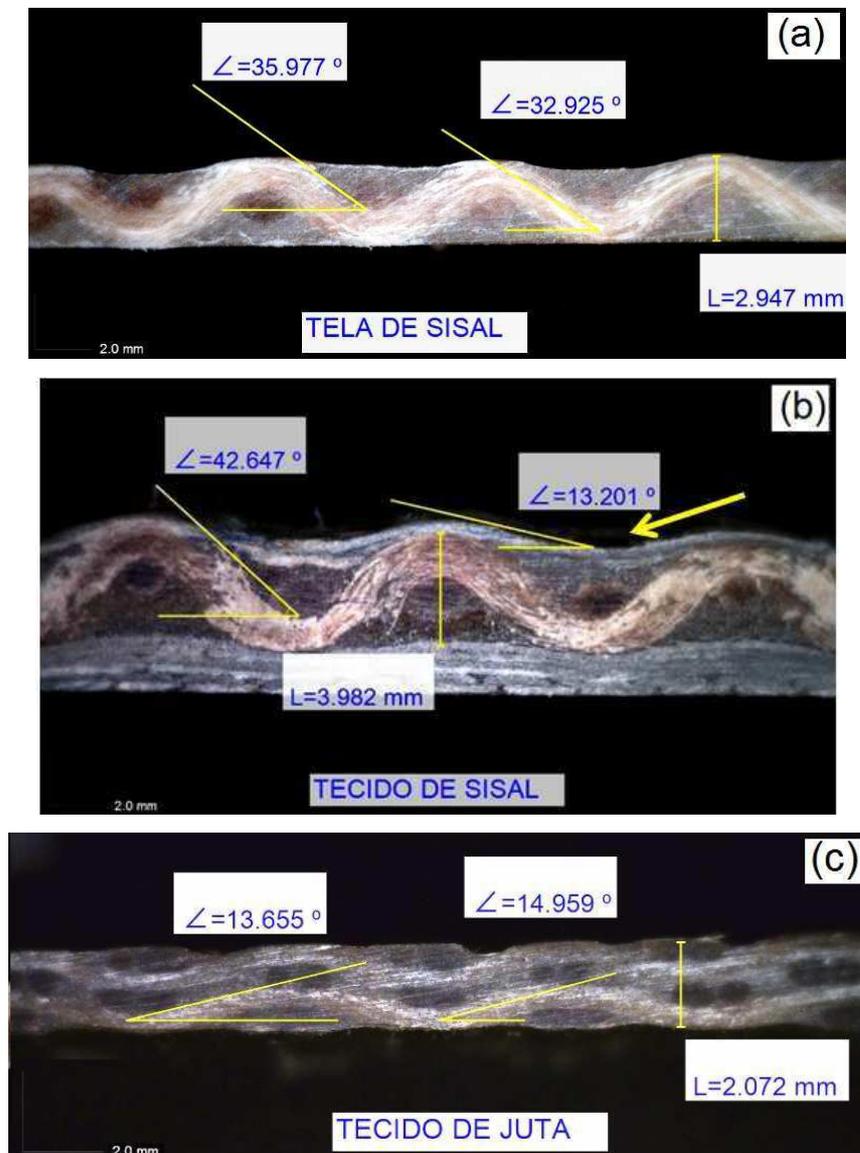
sua resistência (MAGNUSSEN, 2011; MOBASHER, 2011; SAIMAN, 2014). A análise foi feita utilizando-se de um microscópio digital acoplado a um software de captura e análise de imagem. Assim, foram realizadas as medições do ângulo de deformação das fibras, bem como a espessura do tecido, como apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Imagens das vistas de secções longitudinais da tela de sisal (a), tecido de sisal (b) e tecido de juta (c), feitas em microscópio digital, apresentando as medições de ângulo de deformação das fibras e de espessura total do tecido.



A partir dessas análises, foram descartadas as amostras de fibras de sisal, devido apresentarem uma elevada deformação de suas fibras, mesmo após impregnadas com resina epóxi, como mostra a Figura 3.5. Este tipo de deformação, provavelmente, também influenciaria ou seria transmitida às fibras de vidro durante a fabricação do laminado híbrido como mostra a Figura 3.4b (indicado pela seta), afetando a resistência do laminado como um todo.

Figura 3.5 - Imagens das vistas de secções longitudinais de 1 tela de sisal (a), de 1 tecido de sisal entre camadas de fibra de vidro (b) e de 2 camadas de juta (c), após o processo de infusão, feitas em microscópio digital. A imagem “b” mostra ainda, indicado pela seta, a deformação em  $13,2^\circ$  da camada de fibra de vidro.



Assim, o tecido definido foi o de fibras de Juta do tipo *woven* com gramatura de 450g/m<sup>2</sup>, balanceado, com aproximadamente 50% das fibras orientadas em 0° e os outros 50% das fibras orientadas a 90°. Sua construção é apresentada na Tabela 3.2 e sua imagem está mostrada na Figura 3.6.

Tabela 3.2: Construção do tecido de juta de gramatura 450g/m<sup>2</sup>.

Juta 450g/m <sup>2</sup>			
Material	Orientação	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Tolerância
Juta	0°/90°	450	-

Figura 3.6 - Imagem do tecido de juta do tipo *woven*.



### 3.1.3 Matriz polimérica utilizada

O sistema de resina polimérica utilizado foi uma resina epóxi do tipo DGEBA (Diglicidil Éter de bisfenol A), específica para processos de infusão. Esse sistema é composto pela resina Epikote MGS RIM 135 e agentes de cura a base de aminas (Epikure RIMH 134 e RIMH 137), da fabricante Hexion, com algumas de suas propriedades mostradas na Tabela 3.3.

Como apresentado na Tabela 3.3, o agente de cura RIMH134 (rápido) possui teores de amina um pouco maior que o RIMH137 (lento), levando à um curto *pot life* (tempo de uso do sistema após a mistura), enquanto o RIMH137 possui um *pot life*

maior, a mistura dos dois agentes permite um controle, dependendo da necessidade do processo, na reatividade do sistema até o ponto de gel.

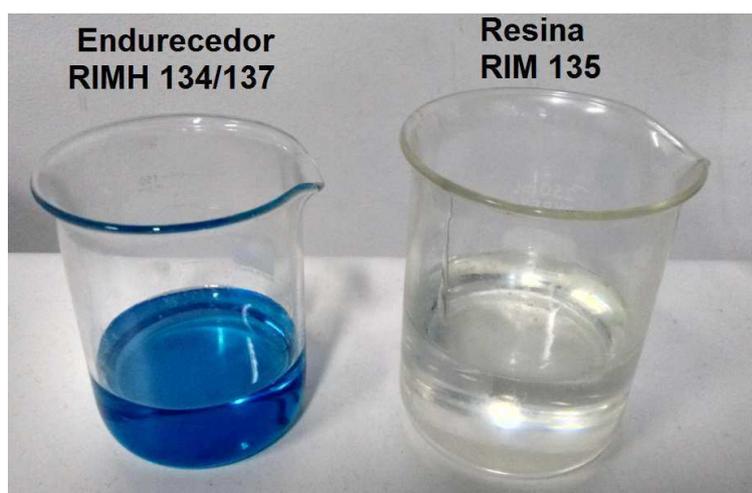
A mistura dos agentes de cura (endurecedores) foi feita na proporção de 80% em massa de endurecedor lento e 20% em massa de endurecedor rápido. A mistura dessa composição na matriz de resina epóxi foi realizada conforme o *Data Sheet* do fornecedor (seção Anexos) na proporção de 100 partes em peso de resina epóxi e 30 partes em peso de endurecedor com 2 partes de tolerância.

Tabela 3.3 - Propriedades da resina epóxi de infusão (RIM 135) e dos endurecedores rápido (RIMH134) e lento (RIMH 137).

Resina de Infusão RIM135		Endurecedor RIMH134 e 137	
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	1,13 - 1,17	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	0,93 – 1,00    0,93 – 0,98
Viscosidade [mPas]	700 - 1100	Viscosidade [mPas]	10 - 80            10 - 50
Epoxi Equivalente [g/equivalente]	166 - 185	Valor de Amina [mgKOH/g]	550 - 700        400 - 600
Valor de Epoxi	0,54 – 0,60	Índice de Refração	1,4900            1,5000
Índice de Refração	1,548 – 1,552		

Fonte: EPIKOTE™ Resin MGS® RIM 135 *Technical Data Sheet* – Hexion, 2006.

Figura 3.7 – Fotografias mostrando os aspectos da mistura de agentes de cura (endurecedores RIMH134/137) e da resina epóxi (RIM135).



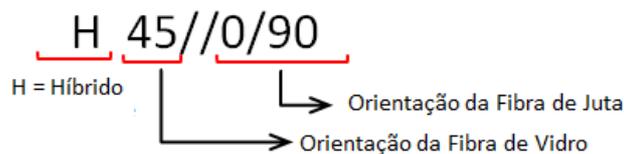
### 3.2 Nomenclatura e identificação dos laminados

Para facilitar o entendimento do presente trabalho, a nomenclatura dos corpos de prova das diferentes classes de configuração está descrita por uma letra que representa se o laminado contém somente de fibras de vidro ou se é um laminado híbrido, seguido pela orientação das camadas, conforme exemplo mostrado nas Figuras 3.8 e 3.9.

Figura 3.8 - Exemplificação da identificação dos corpos de prova com todas as camadas na mesma orientação.



Figura 3.9 - Exemplificação da identificação dos corpos de prova híbridos com camadas em diferentes orientações.

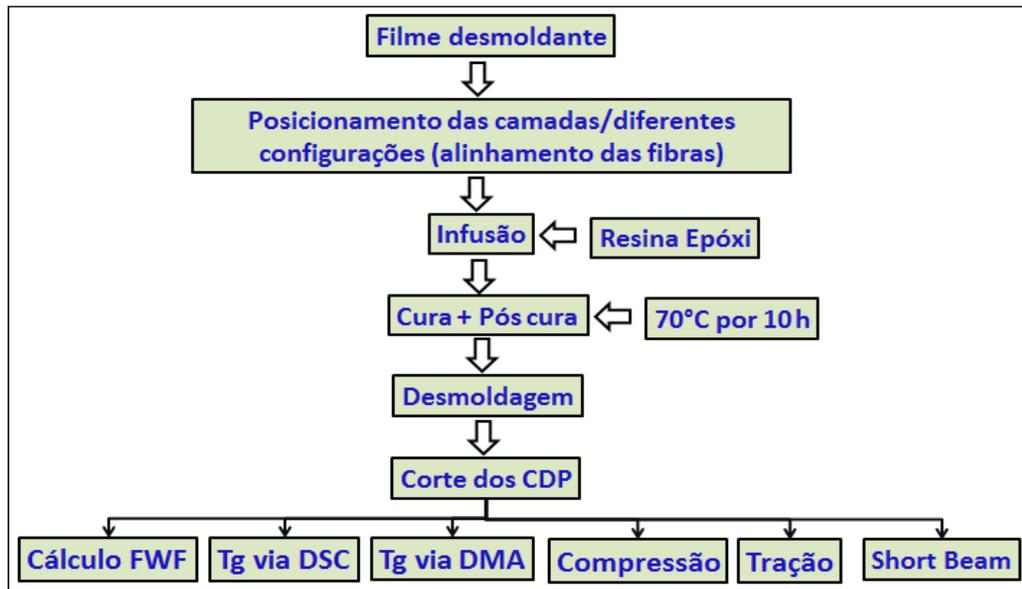


Para os laminados somente de fibra de vidro com 2 e 5 camadas a abreviação na identificação se dá por “2C” e “5C”, respectivamente.

### 3.3 Obtenção dos painéis laminados

O fluxograma das etapas descritas posteriormente pode ser visto na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Fluxograma das etapas desde a fabricação até os ensaios.



Os painéis laminados foram fabricados sobre uma mesa metálica plana de aproximadamente 2m x 5m, com um sistema de aquecimento de controle integrado. Foi aplicado, primeiramente, um filme desmoldante sobre a mesa. Em seguida, foram posicionados os tecidos de fibras de vidro e de fibras de juta, mantendo o alinhamento e a orientação das fibras dentro das configurações conforme pré-estabelecidas na Tabela 3.4. Para os laminados híbridos biaxiais a configuração estabelecida na Tabela 3.4 representa um percentual em massa de aproximadamente 68,7% de fibras de vidro e 31,3% de fibras de juta.

Tabela 3.4 - Orientação das camadas em cada painel de laminado e o número de camadas constituintes.

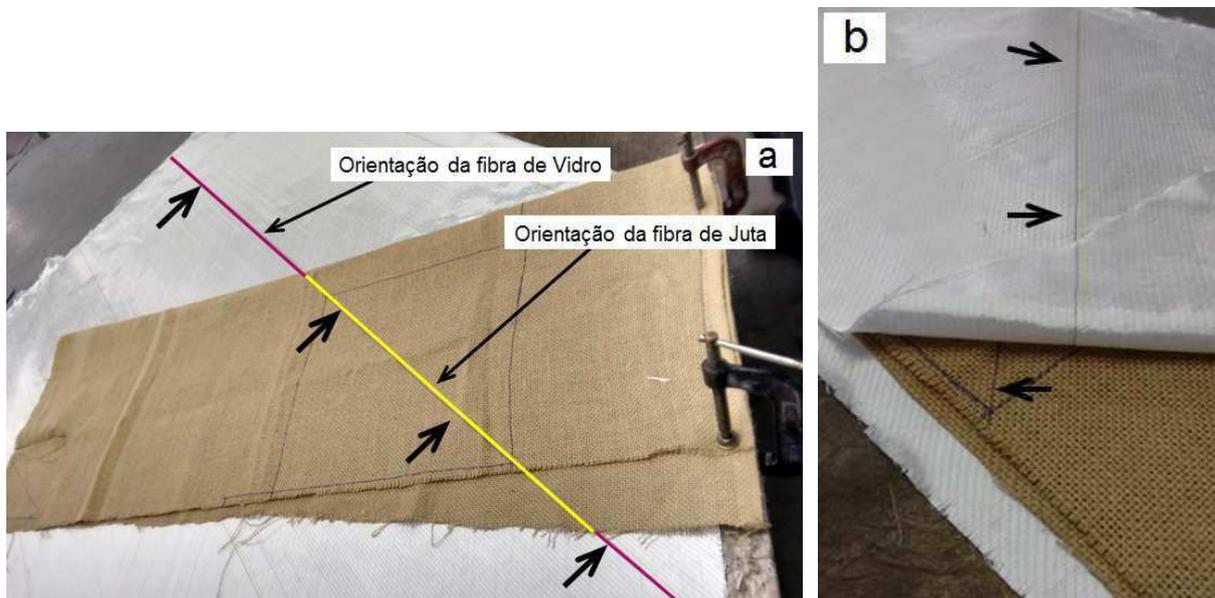
<b>Orientação das fibras das camadas (laminados assimétricos).</b>					
<b>Identificação dos Laminados</b>	<b>Biax</b>	<b>Juta</b>	<b>Juta</b>	<b>Biax</b>	<b>Nº de camadas</b>
H45	±45°	±45°	±45°	±45°	4
H0/90	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°	4
H45//0/90	±45°	0°/90°	0°/90°	±45°	4
*G45	±45°	-	-	±45°	2
*G0/90	0°/90°	-	-	0°/90°	2
*G45	±45°	-	-	±45°	**5
*G0/90	0°/90°	-	-	0°/90°	**5

\*Laminados de fibra de vidro usado como referência.

\*\* Foram utilizados 5 camadas de Biax para alcançar a mesma espessura dos laminados híbridos para os ensaios de Short Beam e Compressão.

As linhas de costura de identificação do tecido biaxial que são orientadas em  $0^\circ/90^\circ$  e linhas traçadas no tecido de juta, além de um gabarito, foram utilizadas durante a montagem das camadas para garantir o correto posicionamento das respectivas fibras nas diferentes orientações conforme definidas na Tabela 3.4. Um desses recursos está mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Fotografias da montagem dos laminados híbridos mostrando o alinhamento das camadas. Nas imagens “a” e “b” as setas indicam a orientação das fibras de Juta e de Vidro.



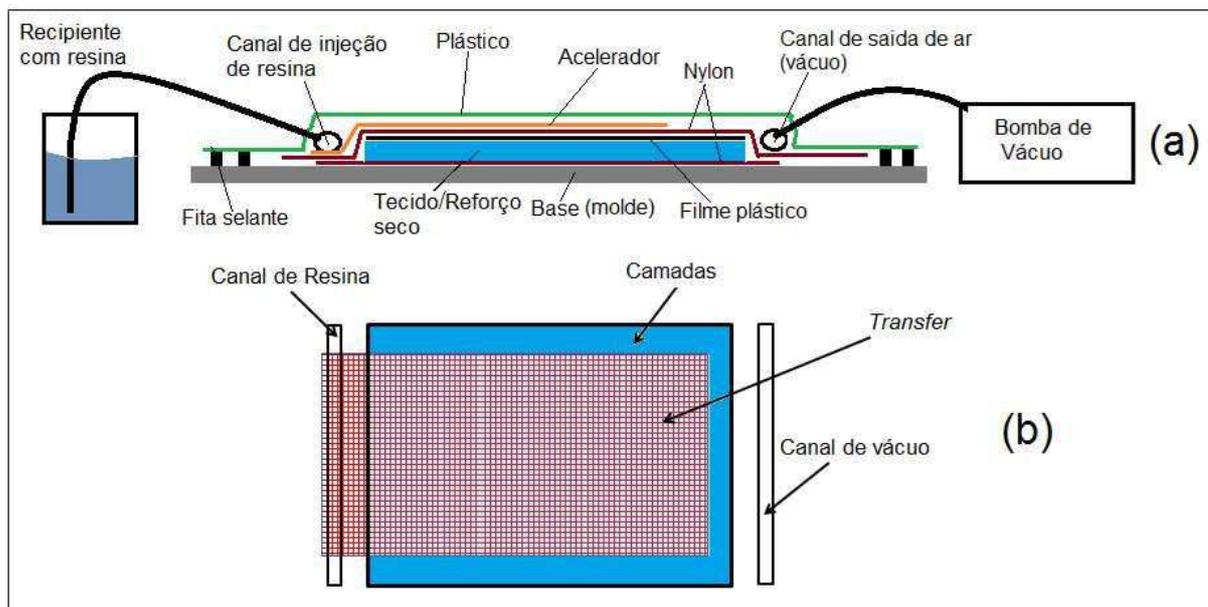
Para cada tipo de laminado, as camadas de tecidos foram pesadas antes da fabricação de modo a determinar a fração em massa de fibra (*fibre weight fraction - FWF*), ou seja, o percentual de fibra presente no laminado, uma vez que para laminados com fibra natural não é possível a determinação do *FWF* por calcinação ou digestão ácida devido a natureza orgânica da fibra de juta que seria deteriorada.

O processo de impregnação das fibras utilizado foi o processo de infusão a vácuo (VARTM). Essa tecnologia já é utilizada pelas indústrias automotiva, naval, eólica e aeroespacial. Consiste basicamente em colocar o material que se deseja impregnar sobre um molde (ou mesa de moldagem), incluindo alguns materiais secundários que irão auxiliar na impregnação, como filme plástico perfurado, tela de infusão vazada (conhecido como *transfer* ou *infusion mesh*), fitas selantes, plástico de vácuo entre outros. Posteriormente, o ar é removido do interior do laminado, com auxílio de uma bomba de vácuo e, por diferença de pressão, a resina é transferida

para o sistema montado sobre o molde, impregnando as fibras e possibilitando a formação do laminado. As vantagens dessa técnica em relação as demais técnicas de impregnação de fibras como: o RTM (*Resin Transfer Molding*), laminação manual ou *hand lay up*, *spray up* e outras, é a possibilidade de fabricação de peças que podem chegar a 100m de comprimento, com considerável rapidez de processamento combinada com adequada razão fibra/resina, alcançando valores de até 60% em volume, além de baixa porcentagem de vazios (LOPES, 2009, NASSEH, 2000; NAJAFI, 2012; VERMA, 2013).

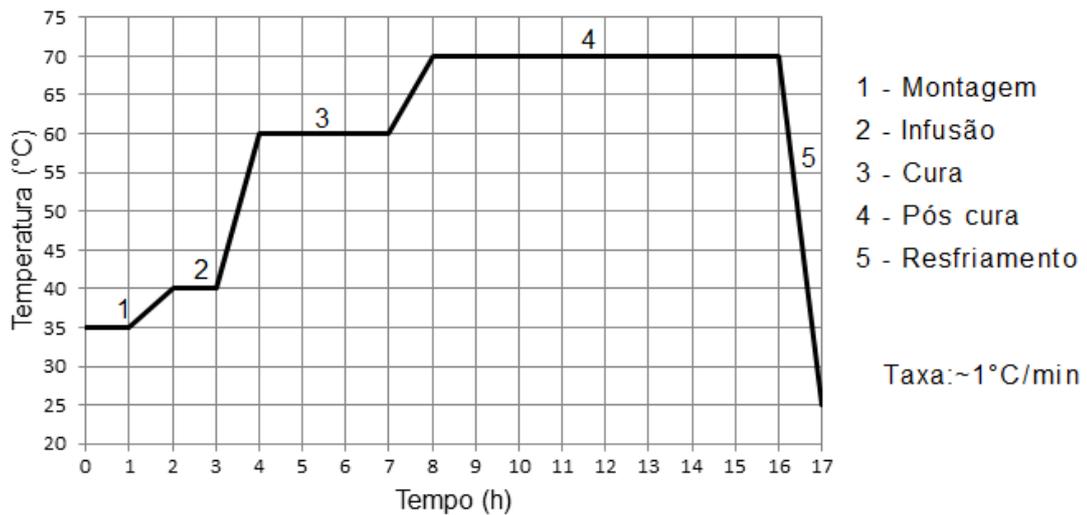
Na fabricação dos laminados, um tecido de *nylon* foi posicionado na parte inferior (em contato com a mesa/molde) e outra na parte superior do laminado (após posicionar todas as camadas) de modo a promover rugosidade para colagem dos *tabs* (nomenclatura usada para pequenas peças de laminados colados nas extremidades longitudinais dos corpos de prova). Em seguida, foram posicionados um filme plástico perfurado e o *transfer* (espécie de tela para distribuir uniformemente a resina durante a moldagem). Esse sistema foi fechado com um filme plástico de vácuo para possibilitar a retirada de ar, criando a condição de vácuo no sistema com pressão de -920 a -940mbar, com auxílio de uma bomba de vácuo. A montagem está ilustrada na Figura 3.12, bem como o sistema de infusão assistida por vácuo, processo utilizado para a fabricação de compósitos.

Figura 3.12 - Esquema da montagem do processo de infusão assistido por vácuo, vista em corte (a) e vista superior simplificada (b).



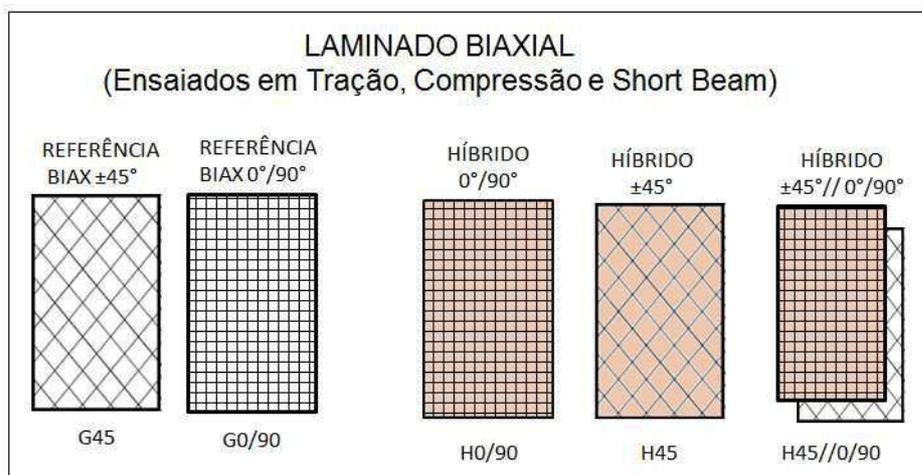
O ciclo de temperatura aplicado para a fabricação de laminados é mostrado na Figura 3.13. Esse ciclo de moldagem é semelhante aos ciclos aplicados na indústria. Na Figura 3.13 também estão representados o tempo e a temperatura aplicados durante a montagem das camadas, durante a cura e o ciclo de pós cura do laminado.

Figura 3.13 - Curva de um ciclo de infusão, cura e pós cura dos laminados.



Assim, foram moldadas 5 classes de laminados com diferentes orientações cada uma tomando como referência laminados Biaxial  $\pm 45^\circ$ , conforme mostrado na Figura 3.14. Destes painéis foram extraídos os vários espécimes para as análises e ensaios mecânicos.

Figura 3.14 - Configuração dos laminados referência (somente com fibra de vidro biaxial) e dos laminados híbridos em estudo.



### 3.4 Determinação da fração em massa de fibra (FWF)

Os valores de fração em massa de fibra (*FWF*) foram calculados de duas maneiras. Para os laminados híbridos foi utilizada a Equação 3.1, através dos pesos (massas) das camadas antes e após a fabricação do painel. Para os laminados somente com fibras de vidro o *FWF* foi determinado também pela Equação 3.1 e por calcinação utilizando-se da Equação 3.2, de modo a verificar se o método da Equação 3.1 refletiria valores próximos do obtido por calcinação, por este ser um método mais preciso.

As amostras para calcinação foram de aproximadamente 40mm x 40mm, de acordo com a norma ASTM D2584:2008. Nessa análise, cadinhos são pesados vazios e suas massas registradas; em seguida, as amostras são colocadas dentro de cada um deles e assim registradas as massas iniciais. Levam-se os cadinhos para uma mufla, aquecendo-os a 625°C por 1h e 30 minutos. Após este tempo, os cadinhos são resfriados até temperatura ambiente em um dessecador. Pesa-se e registra-se a respectiva massa (peso 2). Posteriormente, os cadinhos ainda com as amostras são levados novamente à mufla, com o mesmo ciclo de tempo e temperatura feito inicialmente. Esse processo deve ser repetido até que a diferença entre o peso final e o peso 2 seja menor que 0,1%. Assim, com o peso final e inicial, aplica-se a Equação 3.2 e determina-se a fração em massa de fibra do laminado.

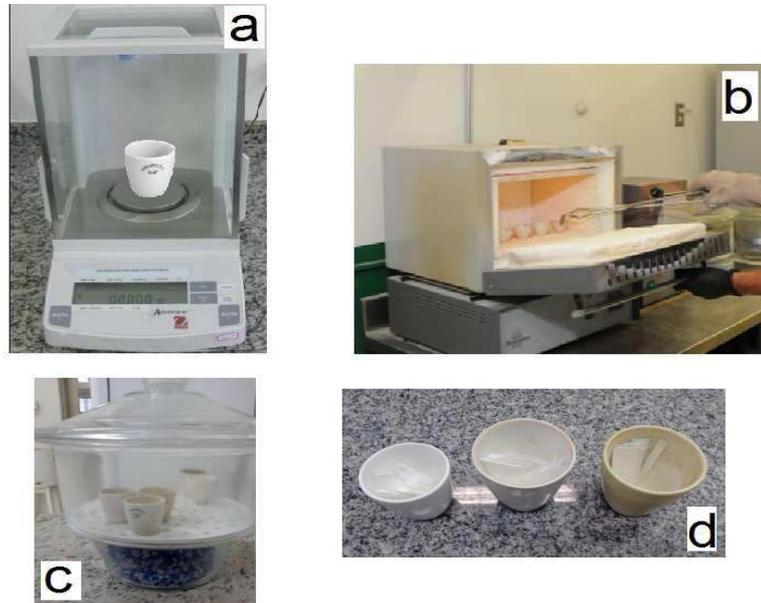
Equação para determinação do *FWF* dos laminados pela massa das camadas e do laminado.

$$\text{FWF \%} = \frac{\text{Massa das Fibras}}{\text{Massa do laminado}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Equação para determinação do *FWF* por calcinação.

$$\text{FWF \%} = \frac{\text{Massa inicial} - \text{massa final}}{\text{Massa inicial}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Figura 3.15 - Processo de calcinação: pesagem (a), queima em mufla da parte orgânica (b), resfriamento (c), somente fibra após queima da parte orgânica (d).



### 3.5 Determinação da $T_g$ da matriz epóxi pela análise térmica de DSC

A análise de DSC foi realizada no Laboratório de Ensaios da empresa Tecsis S.A, utilizando um equipamento da marca *Netzsch*, modelo DSC 200 F3 Maia.

Nessa técnica, submete-se uma amostra e uma referência à um programa controlado de tempo e temperatura, e por meio de sensores e termopares precisos é mensurada a diferença da energia térmica fornecida entre ambos os materiais (CANEVAROLO, 2003).

De cada um dos laminados fabricados foram extraídas pequenas amostras de aproximadamente 5mm x 5mm, conforme norma ASTM D3417/D3418. As amostras utilizadas para a análise de DSC apresentaram massa variando de 4,0 a 5,0mg.

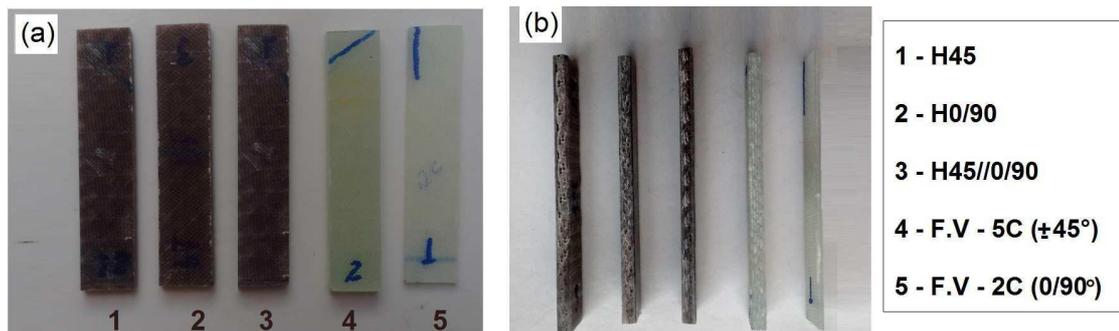
A análise foi realizada até atingir a temperatura de 200 °C a uma razão de aquecimento de 20 °C/min com posterior resfriamento com gás Nitrogênio numa vazão de 20mL/min, a uma razão de resfriamento de 40 °C/min.

### 3.6 Determinação da $T_g$ da matriz epóxi pela análise térmica de DMTA

De cada um dos laminados foram extraídas amostras para análise da temperatura de transição vítrea da matriz polimérica por DMTA (Análise Térmica Dinâmico-Mecânica). Essa análise foi realizada de acordo com a norma ASTM D7028:2007, e tomando como referência o trabalho de Paiva *et. al.*, 2006.

As amostras de laminados foram cortadas nas dimensões de 64mm de comprimento por 13mm de largura com 3,35mm de espessura para os laminados híbridos e os de fibra de vidro com 5 camadas. Para o laminado de 2 camadas de Biax a espessura foi de 1,5mm com largura e comprimento iguais as demais. As amostras utilizadas no ensaio de DMTA estão mostradas na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Fotografia de algumas amostras dos laminados híbridos e de fibras de vidro para ensaio de DMTA. Vista frontal (a) e vista lateral (b).



A análise de DMTA foi realizada no Laboratório de Pesquisa em Materiais (FINEP 2) da Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba, utilizando um equipamento da marca TA Instruments, modelo DMA Q800.

Inicialmente, uma amostra de teste foi analisada de modo a conhecer o comportamento do material frente aos parâmetros adotados (frequência de 1 Hz, amplitude de oscilação de 10  $\mu\text{m}$ , razão de aquecimento 3  $^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  e intervalo de temperatura da ambiente até 250  $^\circ\text{C}$ ). A curva de DMTA obtida na análise da amostra de teste está mostrada na seção “Anexos”. Como as curvas do módulo de perda, de armazenamento e tan delta na amostra de teste se estabilizaram em seus valores mais baixos a partir de 150 $^\circ\text{C}$  e, a  $T_g$  da matriz epóxi para a aplicação a qual se destina possui valor de até 100  $^\circ\text{C}$ , segundo *Data Sheet* (Anexo C). Assim, para as demais amostras foi adotado o intervalo de temperatura de até 160  $^\circ\text{C}$ . A razão

de aquecimento também foi alterada de 3°C/min para 5°C/min. Todas estas alterações estão de acordo com a ASTM D7820.

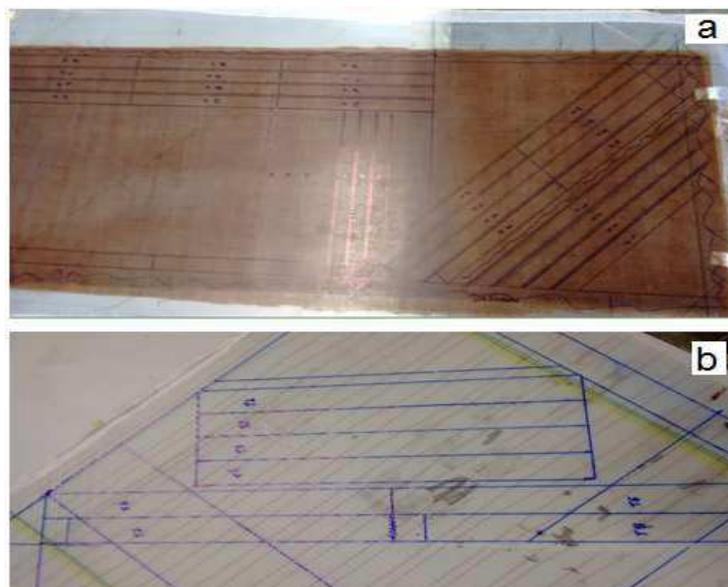
Portanto, as amostras foram submetidas à solicitação mecânica do tipo flexão na garra do tipo *dual cantilever*, com frequência de 1 Hz, amplitude de oscilação de 10  $\mu\text{m}$ , razão de aquecimento 5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  e intervalo da temperatura ambiente até 160  $^{\circ}\text{C}$ , conforme a norma ASTM D7820.

### 3.7 Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos

Após obter todos os painéis laminados, destes foram extraídos os corpos de prova (cdps) para os ensaios mecânicos. Os corpos de prova foram cortados com disco de corte diamantado. As dimensões dos corpos de prova seguiram as normas para ensaio de Tração (ISO 527-4:1997), Compressão (ISO 14126:1999) e Cisalhamento Interlaminar do tipo *Short Beam* (ISO 14129:1997).

De um mesmo painel foi possível obter corpos de prova em diferentes orientações para uma mesma configuração de camadas. Por exemplo, para laminados híbridos com todas as camadas orientadas a 0° e 90° foi possível obter os corpos de prova com a orientação 0° e 90° e  $\pm 45^{\circ}$  apenas alterando a direção de corte do corpo de prova. Um exemplo é mostrado na Figura 3.17a e 3.17b.

Figura 3.17 - Painel laminado híbrido (a) e laminado de fibra de vidro (b) com esboço para corte dos corpos de prova.



A dimensão de 50mm em toda a perimetria do painel foi descartada de modo a eliminar possíveis camadas deformadas e desalinhadas.

Após o corte, nos laminados de tração e compressão foram colados *tabs* em suas extremidades longitudinais com adesivo Loctite 496. Os *tabs* são pequenos laminados que, além de auxiliar o posicionamento dos corpos de prova na máquina são utilizados, principalmente, para evitar danos no corpo de prova causados pela força de agarramento das garras da máquina de ensaios mecânicos. Os *tabs* foram fabricados com duas camadas de Biax 989, utilizando o mesmo sistema de resina que os laminados em estudo.

Figura 3.18 - Painel laminado de fibras de vidro com *tabs* colados com configuração para ensaio de tração (a); e painel de laminado híbrido com *tabs* colados com configuração para ensaio de compressão (b).

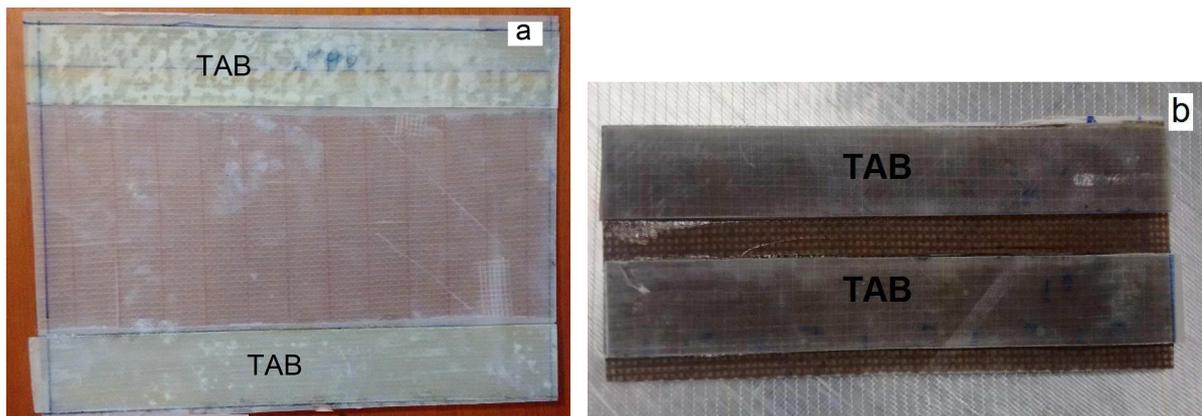
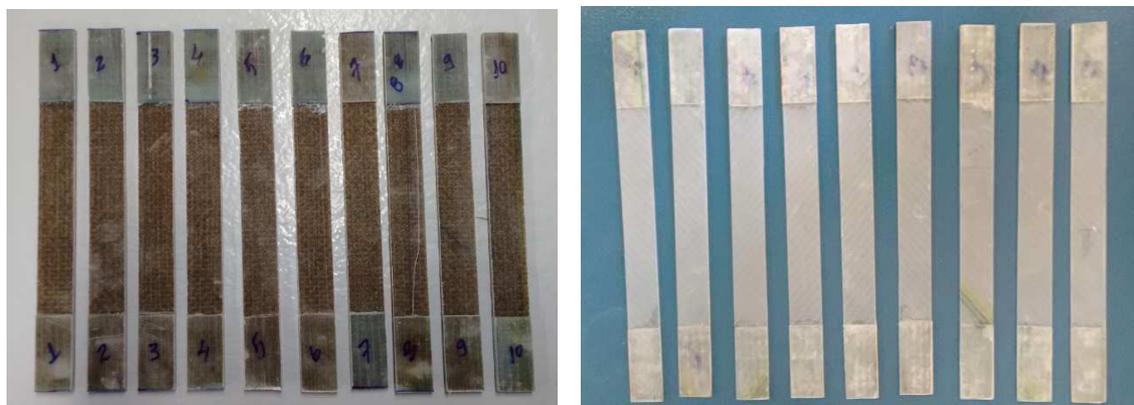


Figura 3.19 - Corpos de prova preparados para os ensaios de tração.



Na Tabela 3.5 e nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 estão representados, resumidamente, as dimensões dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de

Tração, Compressão e Cisalhamento Interlaminar do tipo *Short Beam*, respectivamente.

Tabela 3.5 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração, compressão e *short beam*.

Norma	Ensaio	Compr. [mm]	Larg.[mm]	Espessura [mm]
ISO 527-4	Tração	250	25	1.55 (F. Vidro) 3.35 (Híbrido)
ISO 14126	Compressão	110	10	3,35
ISO 14130	<i>Short Beam</i>	35	17	3,35

Figura 3.20 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração conforme norma ISO 527-4. Vista frontal (a) e vista lateral (b).

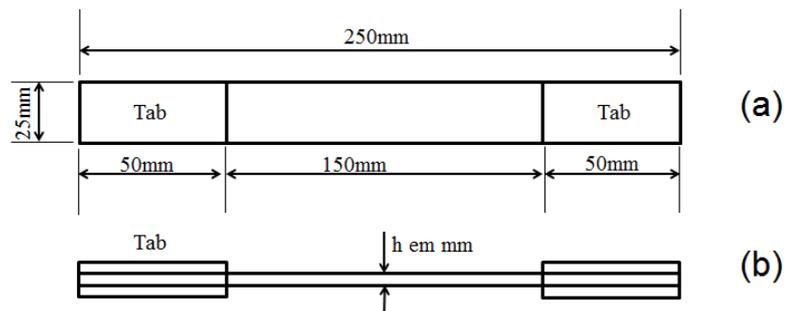


Figura 3.21 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios compressão conforme norma ISO 14126. Vista frontal (a) e vista lateral (b).

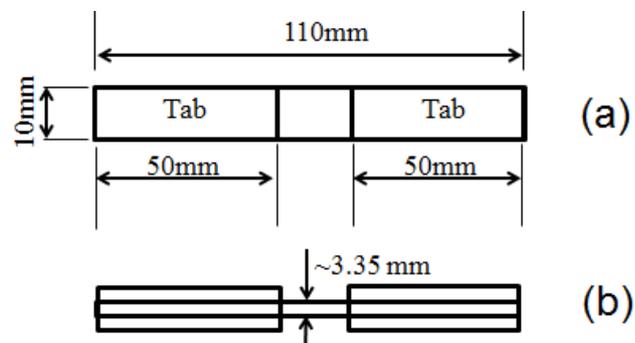
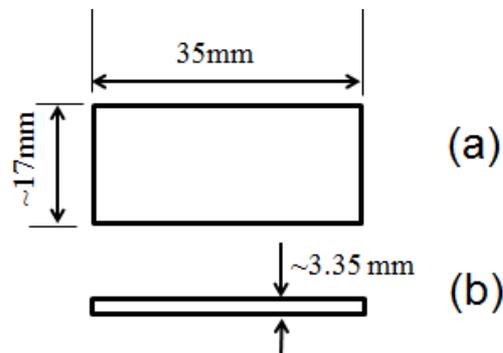


Figura 3.22 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de Short Beam pela norma ISO 14130. Vista frontal (a) e vista lateral (b).



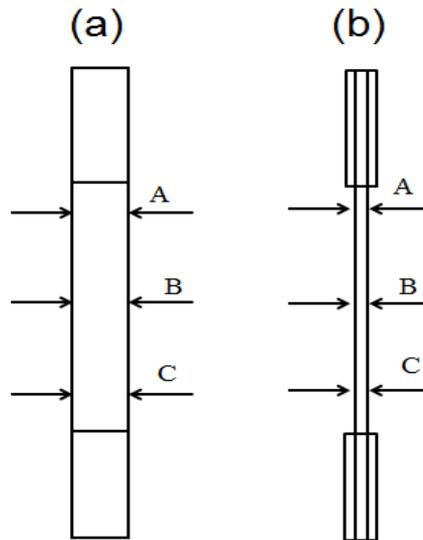
### 3.8 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um dos testes mais comuns aplicado à materiais, através dele, é possível determinar a resistência do material, que está sendo ensaiado, à uma carga axial. Pode-se determinar, também, o módulo elástico, a deformação e o coeficiente de *Poisson* (CALLISTER, 2012; MARINUCCI, 2011).

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ISO 527-4. Os ensaios foram realizados em dois equipamentos diferentes. Apenas os corpos de prova dos laminados de fibras de vidro e dos híbridos com fibras de ambos os materiais orientadas a 0°/90° foram realizados em máquina universal da marca Emic DL30000 com capacidade máxima de 300 kN na UFSCar-Campus Sorocaba. Os demais corpos de prova para ensaio de tração foram realizados na empresa Tecsis S.A utilizando uma máquina de tração universal Emic DL10000 e célula de carga, ambas com 100 kN de capacidade máxima. Buscou-se não mesclar ensaios em ambas as máquinas de modo a evitar possíveis interferências de equipamento nos resultados dos ensaios. As velocidades dos ensaios foram de 2mm/min.

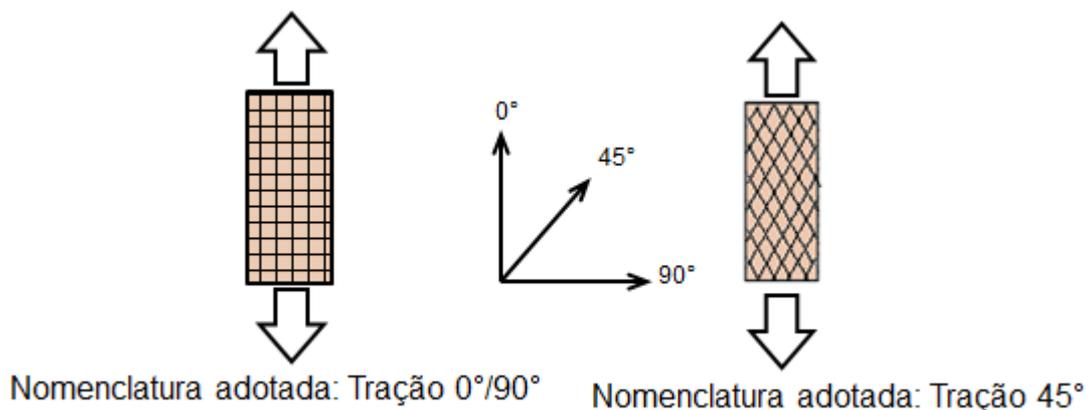
As medidas de dimensão e secção de cada corpo de prova foram realizadas em 3 pontos ao longo da largura e espessura da seção de teste, e foi considerada a média como dado de entrada no software para determinação da área de secção transversal. A Figura 3.23 mostra as três posições de medição (A, B e C). As espessuras obtidas para os laminados biaxiais foram de 1,55mm para laminado de fibra de vidro e 3,35mm para o laminado híbrido. A largura para todos os corpos de prova ficou entre 24,5mm e 25,5mm (variação de 0,5mm conforme a norma ISO 527-4).

Figura 3.23 - Posições de medição de largura e espessura dos corpos de prova. Vista frontal (a) e vista lateral (b).



Para os ensaios de tração adotou-se nomear a direção do esforço no ensaio considerando a orientação das fibras nos corpos de prova, como mostrados na Figura 3.24.

Figura 3.24 - Nomenclatura dos ensaios com relação entre a direção da carga em tração e a orientação das fibras.



### 3.9 Ensaio de Cisalhamento Interlaminar do tipo *Short Beam* (ILSS)

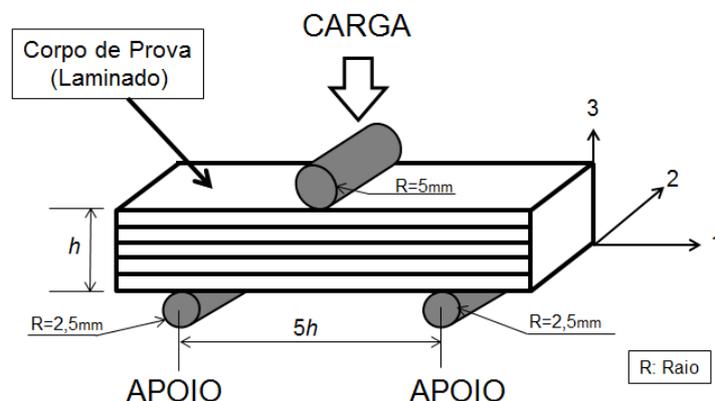
Como os compósitos normalmente são formados por empilhamento de camadas, nessa condição existe região entre os laminados (interlaminar) composta

fundamentalmente pela matriz, cuja sua resistência é crucial na resistência do laminado como um todo (GONÇALVES *et. al.*, 2009; UNAL, BASAL, 2002).

A determinação da tensão de cisalhamento interlaminar (do inglês *Interlaminar Shear Strength – ILSS*) na indústria de compósitos é determinada, frequentemente, pelo método *V-Notched Beam* ou *Short Beam Shear*. Através desses ensaios é possível determinar a tensão de cisalhamento interlaminar aparente de laminados, ou seja, a resistência da interface entre camadas em um laminado (CREEMERS, 2010; ALMEIDA, 2015). Por se tratar de laminado anisotrópico, é válido destacar que o cisalhamento interlaminar tem ocorrência predominante nos planos ortogonais 1-3 ( $S_{13}$ ) ou 2-3 ( $S_{23}$ ), dependendo do método de ensaio ou direção do empilhamento, diferentemente do cisalhamento no plano (*In-plane shear*), cujas ações estão nos planos 1-2 ( $S_{12}$  e  $G_{12}$ ) (GROHMAN, 2015; PONIZIL, 2015).

Nesse trabalho, foi utilizado o método de ensaio do tipo Short Beam, para determinação da tensão de cisalhamento interlaminar ( $S_{13}$ ), conforme a norma ISO14130. Esse ensaio foi realizado em uma máquina universal Emic DL10000, com 100 kN de capacidade máxima, utilizando-se de um acessório específico para ensaio do tipo Short Beam. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 1mm/min. A Figura 3.25 ilustra esquematicamente um ensaio de Short Beam.

Figura 3.25 – Configuração ilustrativa de um ensaio de Short Beam mostrando também os possíveis planos de deformação do laminado (1,2 e 3).



### 3.10 Ensaio de Compressão

A avaliação de propriedades por meio dos ensaios de compressão em compósitos é uma das mais aplicadas devido a importância do conhecimento do comportamento do material sobre um carregamento compressivo (LEE, 1999).

No caso dos ensaios de tração paralelos à fibra, o resultado é diretamente determinado pela resistência da fibra. No ensaio de compressão soma-se a essa propriedade, a resistência da matriz, a interface fibra-matriz e o empilhamento das camadas (YANG *et. al.*, 2000).

Alguns autores consideram o ensaio de compressão muito complexo devido a grande sensibilidade do teste à discretas perturbações no laminado como: desalinhamento das fibras, porosidade, posicionamento do corpo de prova no dispositivo que pode gerar, entre outros defeitos, a flambagem. (ELHAJJAR, SHAMS, 2014; YANG *et. al.*, 2000; KYRIAKIDES *et. al.*, 1995).

Os modos de falha em compressão podem variar de acordo a orientação das fibras. Mas, de maneira geral, são caracterizados por: delaminação ou separação longitudinal, micro flambagem da fibra conduzindo à dobra local, esmagamento das fibras, e falha na matriz (PRABHAKAR *et. al.*, 2012; ELHAJJAR, SHAMS, 2014). A norma para o ensaio de compressão, ISO14130, utilizada nesse trabalho descreve alguns modos de falhas válidos como mostra a Figura 3.26.

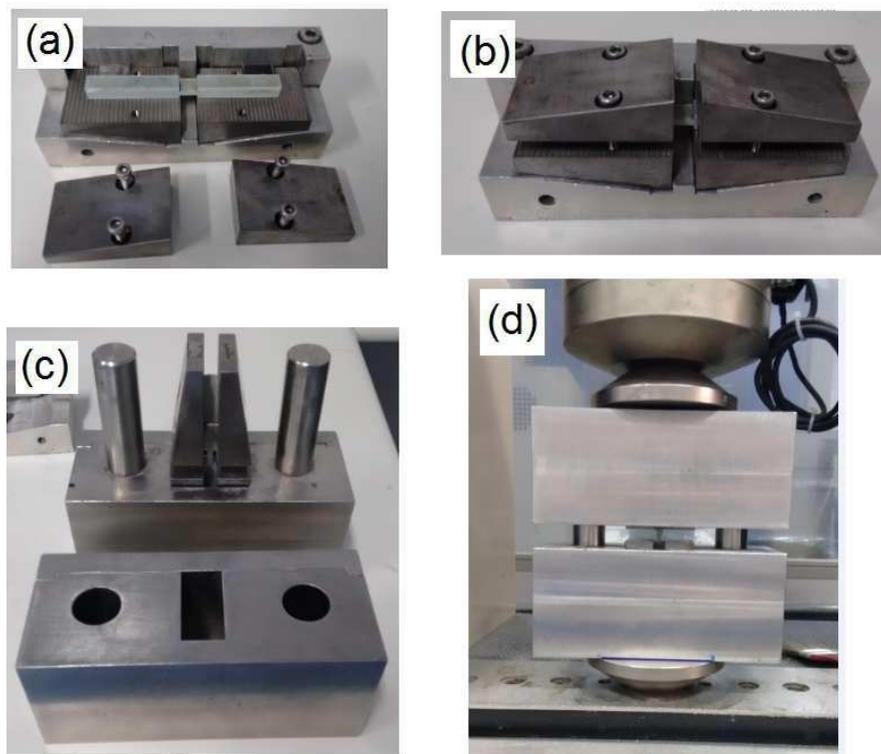
Figura 3.26 – Modos de falha válidos em um ensaio de compressão de acordo com ISO14130.



Fonte: ISO 14130:1999

Dentre os ensaios estáticos, as medições em um ensaio de compressão é uma das mais sensíveis a qualquer variação na montagem do corpo de prova. Assim, foi utilizado o dispositivo IITRI, pois permite minimizar possíveis variações na montagem. Esse dispositivo foi usado em uma máquina universal Emic DL10000 com 100 kN de capacidade máxima, adaptada para receber o dispositivo, como mostra a Figura 3.27. A velocidade de ensaio foi de 1mm/min.

Figura 3.27. Vistas da montagem do corpo de prova no dispositivo IITRI (a, b, c). Posicionamento do dispositivo na máquina adaptada com duas bases (d).



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais dos ensaios de caracterização dos laminados. Inicialmente estão descritas algumas análises que foram realizadas para caracterizar a qualidade dos laminados antes dos ensaios mecânicos, como a determinação da fração mássica de fibra e a temperatura de transição vítrea da matriz. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios de Tração, Compressão, e Cisalhamento Interlaminar (ILSS) pelo método de *Short Beam* para os laminados Biaxiais híbridos e referenciais.

#### 4.1 Avaliação da qualidade dos painéis laminados

Após a fabricação dos painéis foi feita uma análise visual dos laminados de modo a verificar se existiam defeitos do tipo material não impregnado ou semi-impregnado, desalinhamento das fibras, bolhas de ar (vazios em alta concentração), entre outros. Estes são alguns dos defeitos que podem ser encontrados em laminados, gerados em função de alguma instabilidade do processo, manuseio ou de defeitos nas matérias-primas e que podem influenciar negativamente no desempenho mecânico do compósito (SHAH, 2013; GRIFFIN; MALKIN, 2011; RIDDLER *et. al.*, 2012).

Alguns estudos encontrados na literatura mostram o efeito deletério do desalinhamento de fibras dentro do plano (CAIRNS *et. al.*, 2016) e fora do plano nas propriedades de tração e compressão de compósitos com perda de até 50% da tensão (ELHAJJAR *et. al.*, 2014; ALTMANN *et. al.*, 2015). Outros estudos mostram a influência de vazios encapsulados em laminados com redução de rigidez, resistência à tração, com redução de 15% em resistência e a cada 1% de volume de vazios perde-se em 1,5% em módulo transversal (DONG, 2016) e nas propriedades de compressão (LIEBIG *et. al.*, 2015), tal influência também foi estudada em laminados com fibra naturais (LI; LI; MA, 2015).

Nos laminados fabricados não foram encontrados defeitos do tipo tecido não impregnado ou semi-impregnado, que podem ser percebidos visualmente a olho nu, como apresentado na Figura 4.1. Também não foram encontrados desalinhamentos

significativos das fibras tanto das de vidro como das de Juta. Essa análise também foi feita visualmente a olho nu, tomando como referência as linhas de costura de poliéster do tecido de fibra de vidro (Figura 4.2), que não ficam translúcidas com a impregnação. E no caso das fibras de juta podem ser percebidas facilmente após a impregnação pela coloração marrom (Figura 4.3).

Figura 4.1 – Foto de um painel de laminado híbrido de aproximadamente 700mm x 350mm, isento de defeitos do tipo tecido semi-impregnado ou não impregnado (“seco”).



Figura 4.2 – Foto da superfície de um painel de laminado híbrido mostrando, através das setas, as linhas de costura totalmente retas (a e b). A foto “b” com ampliação de 23,5x.

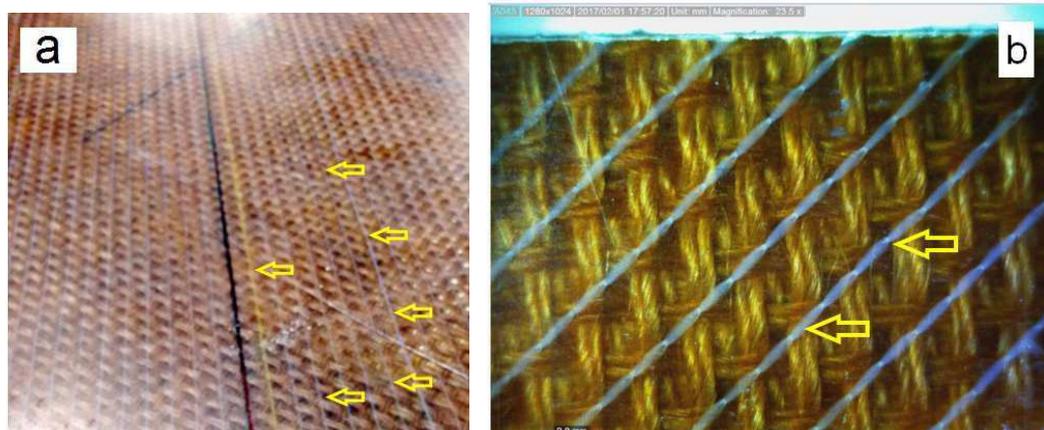
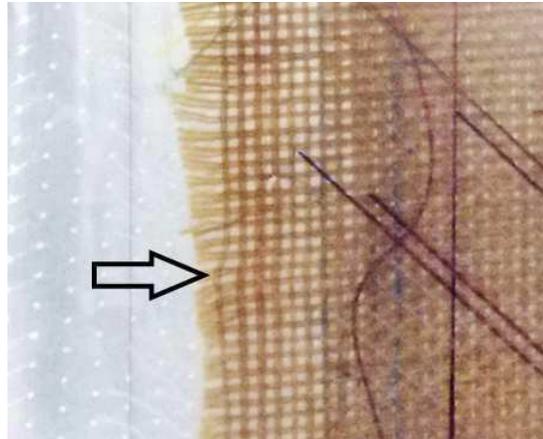


Figura 4.3 – Foto da extremidade (rebarba) de um painel de laminado híbrido. A seta indica o que seria o desalinhamento da fibra de juta, e ao lado é possível observar fibras de Juta alinhadas.



O desalinhamento da fibra de Juta (exemplificado na Figura 4.3) tem ocorrência na extremidade de um painel, também chamado de rebarba. É comum ocorrer este tipo de defeito na extremidade devido às fibras “secas” não serem fixas nessa região. Por esse motivo, em todos os painéis produzidos foram descartados, aproximadamente, 50mm ao longo do perímetro do painel, no momento do corte dos corpos de prova.

Os possíveis vazios presentes nos laminados não foram mensurados. No entanto, foi realizada uma análise da superfície do laminado utilizando um microscópio digital. Algumas das regiões analisadas são mostradas nas Figuras 4.4 e 4.5, que revelam a ausência de porosidade, por apresentar superfícies nítidas de resina. Porém, micro porosidades podem não ser reveladas.

Figura 4.4 – Imagens de microscópio digital da superfície dos laminados híbridos ampliados 23x.

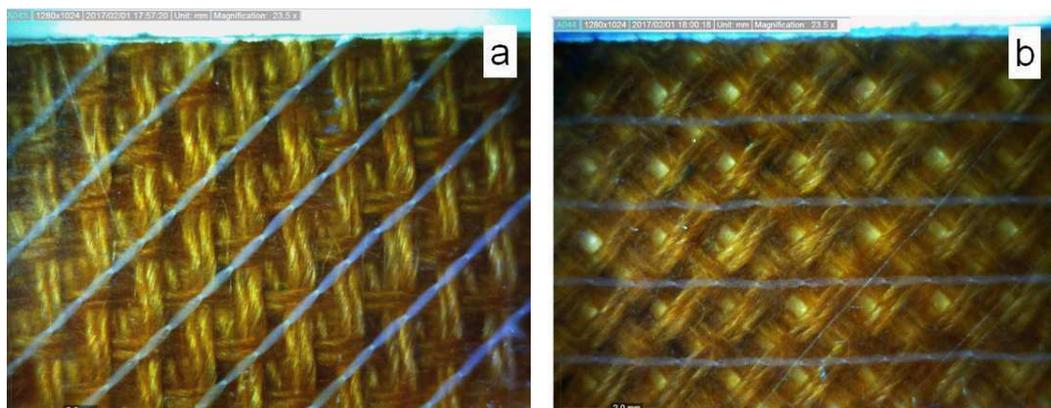
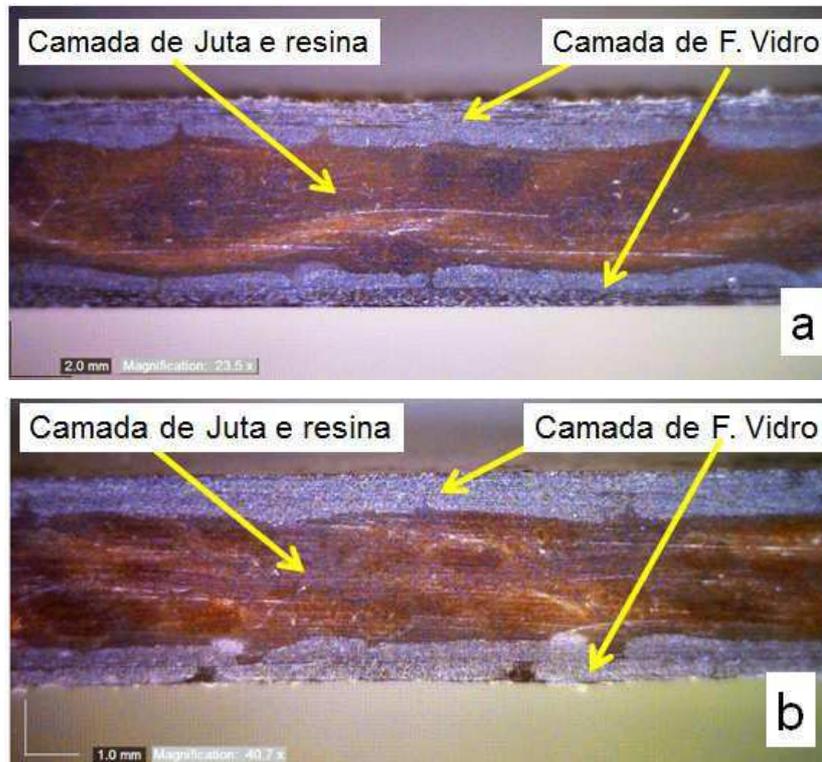


Figura 4.5 – Imagens de microscópio digital de duas secções de laminados híbridos ampliados 23.5x (a) e 40.7x (b).



#### 4.1.1 Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da matriz utilizada na fabricação dos laminados

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da matriz utilizada nos painéis laminados foi determinada por dois métodos, Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e a Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMTA).

Foi analisada apenas uma amostra de cada painel devido a determinação da  $T_g$  também ter sido realizada por DSC.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 estão plotadas todas as curvas do módulo de armazenamento ( $E'$ ) e  $\tan$  delta ( $\tan \delta = E''/E'$ ), respectivamente, de todos as 5 classes de laminados. As curvas individuais, incluindo módulo de perda ( $E''$ ), estão disponíveis na seção Anexos.

Na Figura 4.6, nota-se uma variação nos valores do módulo de armazenamento, isso se deve, possivelmente, às configurações dos laminados fabricados que possuem diferenças em seu empilhamento, espessura, tipo de

reforço, orientação das fibras, fração de fibras, além da tolerância, que é passível, na proporção resina/endurecedor (SABA *et. al.*, 2016; COBAN *et. al.*, 2010; MARGEM *et. al.*, 2010; ROMANZINI *et. al.*, 2013). Tomando a temperatura de 40°C como uma referência, para explicar as variações no valor de  $E'$  ocorridas nesse ponto, destaca-se, pelo maior módulo de armazenamento, o laminado de fibra de vidro com 2 camadas (F.V – 2C), esse fato pode estar associado à maior fração de fibra (FWF de 75%). Essa relação, maior  $E'$  com aumento da fração de fibra foi estudada em compósitos por Romanzini (2013), Ornaghi (2010) e Margem (2010) que atribuíram o fato à maior rigidez do compósito pela restrição da mobilidade dos segmentos de cadeias da matriz com o alto teor de fibras, essa mesma particularidade leva a menores valores de  $\tan \delta$  para o mesmo laminado como mostra a Figura 4.7. Considerando apenas o fato do teor de fibra, essa justificativa deveria se estender às demais amostras, no entanto, isso não ocorreu devido a influência de outros fatores no comportamento viscoelástico do laminado, como a orientação da fibra, conferido ao laminado H0/90 o segundo maior módulo de armazenamento, onde ambas as fibras estão orientadas na direção 0° e 90°. Já as fibras orientadas a 0° na direção *span* do ensaio, conferem ao laminado um maior aumento na resistência à flexão, esse mesmo comportamento foi analisado nos trabalhos reportados na literatura (COBAN *et. al.*, 2010; DUC, BOURBAN, MANSON, 2014). Coban *et. al.* (2010) também mostrou que laminados com orientações de suas fibras convergindo para a direção perpendicular à direção *span* de ensaio, tendem a apresentar menores valores de  $E'$ , isso pode ser observado na Figura 4.6, onde o laminado com todas as fibras orientadas a 45° (H45) apresentou o menor módulo de armazenamento.

Como consequência, configurações diferentes levam à variação na relação entre a capacidade de armazenar a energia aplicada e a dissipação dessa energia, refletida através da intensidade dos picos de  $\tan \delta$ , como mostrado na Figura 4.7 (SABA *et. al.*, 2016; COBAN *et. al.*, 2010).

Os resultados dos valores de  $T_g$  por DMTA, dos laminados, são mostrados juntamente com os resultados dos valores de  $T_g$  obtidos por DSC na Figura 4.8. As curvas das análises de DMTA estão disponíveis na seção Anexos.

Figura 4.6 – Módulo de armazenamento por DMTA para todas 5 classes de laminados.

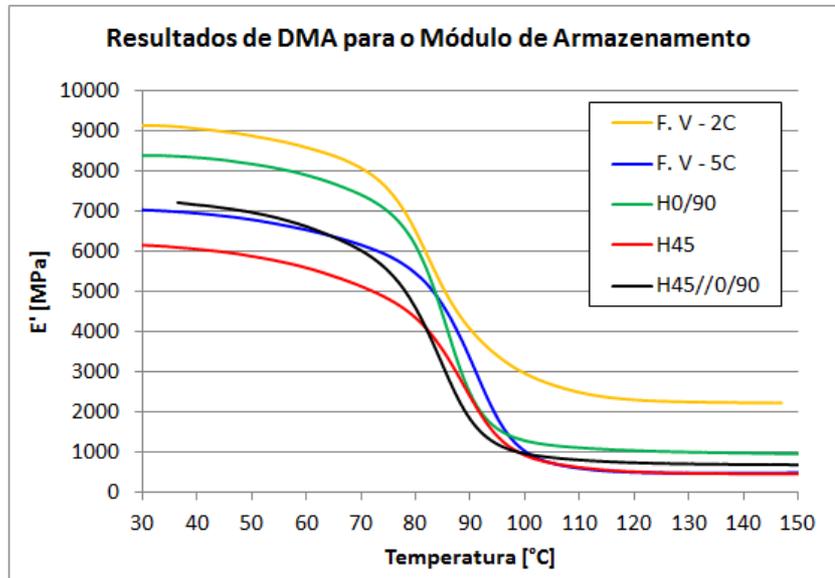
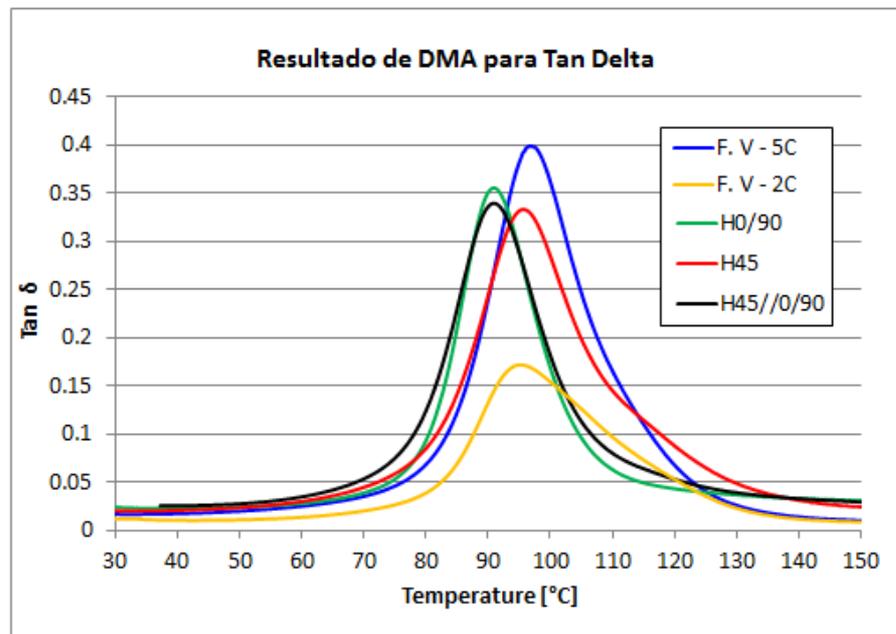
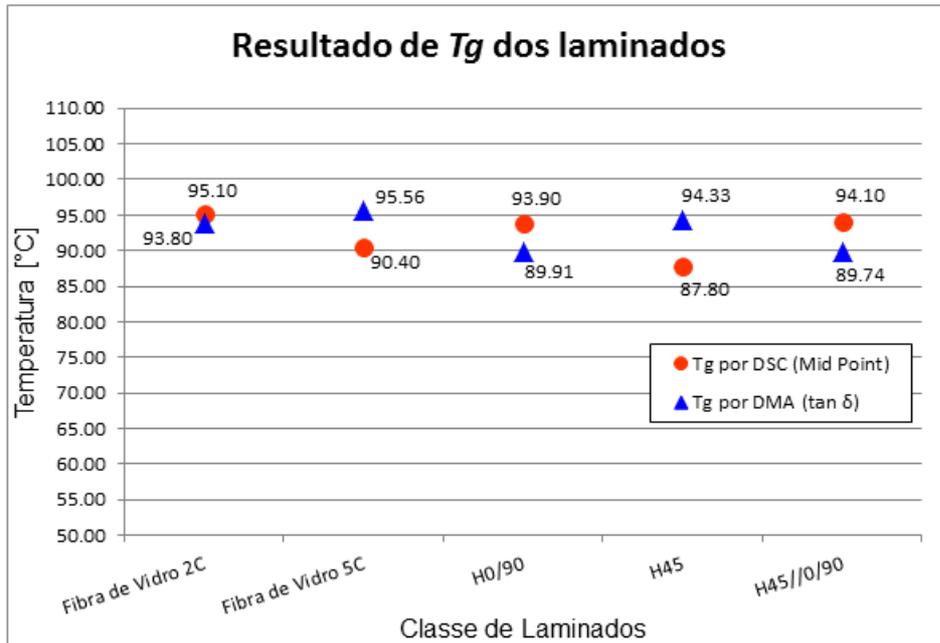


Figura 4.7 – Curvas de  $Tan$  delta ( $T_g$ ) para todas 5 classes de laminados.



A Figura 4.8 apresenta os resultados de temperatura de  $T_g$  dos laminados. Nesse trabalho, considerou 75°C como a temperatura de  $T_g$  mínima que os laminados devem apresentar. Esta é a temperatura mínima requisitada em determinadas aplicações para compósitos estruturais de matriz epóxi, como no segmento eólico (BRONDSTED; NIJSSEN, 2013). As curvas das análises de DSC estão disponíveis na seção Anexos.

Figura 4.8 - Gráfico com os valores de  $T_g$  da matriz obtidos pelas técnicas de DSC e DMA.



Nota-se que há uma pequena variação entre as temperaturas de transição vítrea dos laminados, tanto considerando a mesma técnica (7°C para DSC e 5,8°C para DMA) como entre as técnicas (7,7°C entre a maior e a menor temperatura). Variações como estas, nos valores de  $T_g$ , para uma mesma amostra, ao ser analisada por ambas as técnicas são passíveis de ocorrer, devido a particularidade de cada uma das técnicas, pois a DMTA possui uma maior sensibilidade na determinação da  $T_g$  de matrizes com ligações cruzadas em compósitos e laminados em relação à DSC (TIWARI; RAJ, 2015; MENARD, 2008).

Alguns estudos encontrados na literatura indicam uma diferença de aproximadamente 10°C entre os valores de  $T_g$  obtidos por DSC e DMA de matrizes epóxi (TURCSAN, 2017; VELTHUIS, PEITZ, 2013; SOUZA, REIS, 2013).

Quanto às variações dentro da mesma técnica tanto para a DMTA quanto para DSC, alguns fatores podem influenciar nessa diferença, como a variação na proporção da mistura resina/endurecedor para um sistema epóxi e agente de cura a base de amina (PETERSEN *et al.*, 2015; BURTON *et al.*, 2013), pois o sistema de resina utilizado possui uma tolerância de  $\pm 2$  partes em massa ou em volume de endurecedor (agente de cura). O equipamento misturador utilizado possui uma tolerância de  $\pm 1$  parte em massa de endurecedor, como tal tolerância ainda se

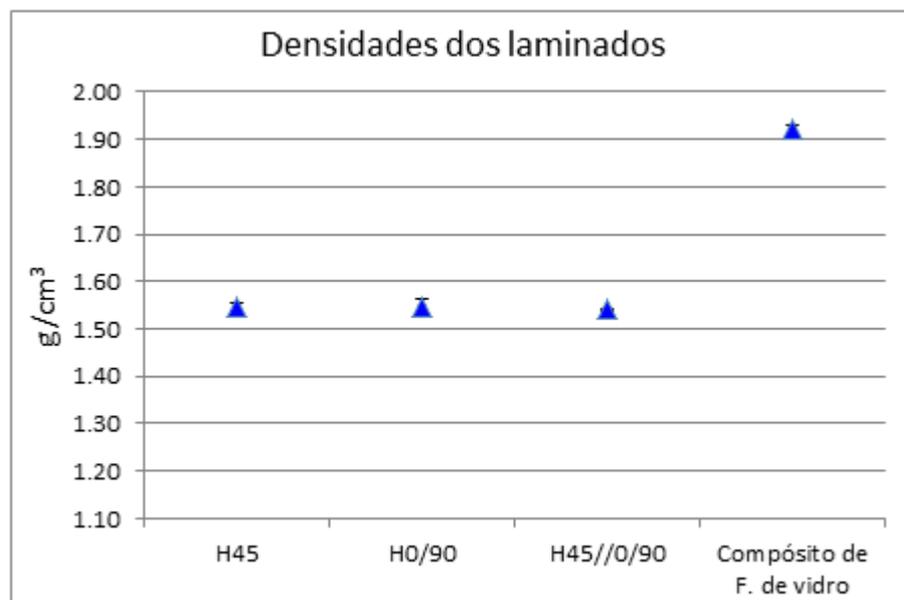
mantém dentro da especificação (Anexo C), as propriedades do sistema são preservadas. Outro fato para essa disparidade pode estar associado a uma não completa homogeneidade da temperatura da mesa/molde durante o ciclo de cura e pós-cura.

Mesmo considerando as pequenas diferenças nos valores de  $T_g$ , pode-se concluir que as propriedades da matriz utilizada estão asseguradas, uma vez que os laminados apresentam os valores de  $T_g$  dentro dos requisitos mínimos estabelecidos para determinadas aplicações estruturais (BRONDSTED; NIJSSEN, 2013).

#### 4.1.2 Densidade dos laminados

A Figura 4.9 apresenta os valores de densidade dos três laminados híbridos em comparação com um laminado de fibras de vidro. A densidade foi determinada conforme ASTM D792:2008. Foram analisadas 3 amostras de cada um dos laminados de regiões distintas. Comparando as densidades dos compósitos híbridos Biaxiais com o compósito de fibras de vidro nota-se uma redução de aproximadamente 20%, fato que é muito interessante para diminuir o peso de peças ou componentes que, futuramente, possam ser fabricados.

Figura 4.9 – Valores de densidade dos laminados de híbridos moldados comparados com um laminado de fibras de vidro.



### 4.1.3 Fração mássica de fibra dos laminados (*FWF*)

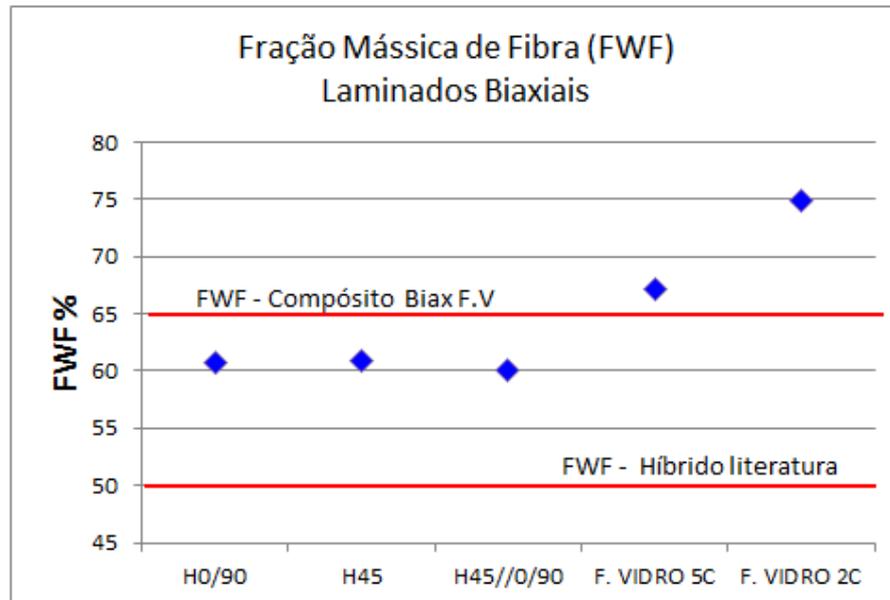
Os tecidos de fibras de vidro e de fibras de juta que compunham os laminados foram pesados antes de sua fabricação, de modo que ao pesar o laminado após a moldagem se determinasse o percentual de fibra e resina do laminado, esse processo foi feito também para os laminados híbridos.

O percentual de fibra do compósito ou fração mássica de fibra (*Fibre Weight Fraction - FWF*) de um laminado é um parâmetro importante, pois tem influência nas propriedades mecânicas do laminado (MARINUCCI, 2011). Para os laminados de fibras de vidro, além dos processos de pesagem dos materiais e do laminado, foi feita a determinação da *FWF* por calcinação, de modo a certificar-se de que a determinação por pesagem era confiável.

Assim, para o laminado Biaxial com 5 camadas, foi encontrado *FWF* de 67,1 % pelo processo de pesagem e 67,8 % por calcinação. Isso demonstra que a determinação da *FWF* pesando os materiais antes e após a moldagem é representativa, mesmo não possuindo a mesma precisão quanto o processo por calcinação.

A Figura 4.10 mostra os resultados de *FWF* dos laminados. Nota-se uma boa repetitividade dos valores dos laminados híbridos (H0/90, H45 e H45//0/90), considerando o processo de fabricação por infusão. A média de *FWF* dos laminados híbridos foi de 60,5%. Na Figura 4.10 há dois limites de referência, representados por suas linhas vermelhas, correspondentes aos valores de *FWF* de laminados híbridos de fibras de vidro e juta encontrados na literatura que estão em torno de 50 % (DEHURY, 2013; AHMED *et al.*, 2008; GUJJALA *et al.*, 2014) e o valor de *FWF* mais comum para um compósito com tecidos de construção biaxial  $\pm 45^\circ$ , fabricado por infusão, que está em torno de 65 a 70 %. (AKIL *et al.* 2010; DALBEHERA *et al.*, 2015; DEHURY, 2013; AHMED *et al.*, 2008; GUJJALA *et al.*, 2014).

Figura 4.10 - Gráfico com os valores de *FWF* encontrados nos laminados híbridos e nos laminados de fibras de vidro.



Para o laminado de fibras de vidro contendo 02 camadas (2C), observa-se que há uma maior fração mássica de fibras, cerca de 75 %, em comparação ao laminado com 05 camadas (5C), isso se deve ao fato de, em poucas camadas, se conseguir um empilhamento mais compacto e, conseqüentemente, menor consumo de resina, e maior fração de fibra (NASSEH, 2015; MANAS, 2007).

## 4.2. Resultados dos Ensaio de Tração

A seguir os resultados dos ensaios de tração são apresentados separadamente em relação às orientações das fibras de vidro ( $0^\circ/90^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ ) para melhor entendimento dos resultados.

### 4.2.1 Ensaio de Tração de laminados com fibra de vidro e fibra de juta orientadas a $0^\circ/90^\circ$ (G0/90 e H0/90)

Foram ensaiados 10 corpos de prova de laminados contendo apenas fibras de vidro orientadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , essa classe de laminado foi usada apenas como referência. A classe de laminado híbrido era composta por fibras de vidro e fibras de juta orientadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Neste caso, foram ensaiados 12 corpos de prova.

De acordo com os resultados da Tabela 4.1 e curvas da Figura 4.11 é possível observar que a resistência à tração do laminado contendo somente fibras de vidro (G0/90) apresentou valores médios de 425,0 MPa e módulo de elasticidade de 14,7 GPa, enquanto que o laminado híbrido (H0/90) apresentou resistência a tração de 199,67 MPa e módulo elástico de 8,2 GPa.

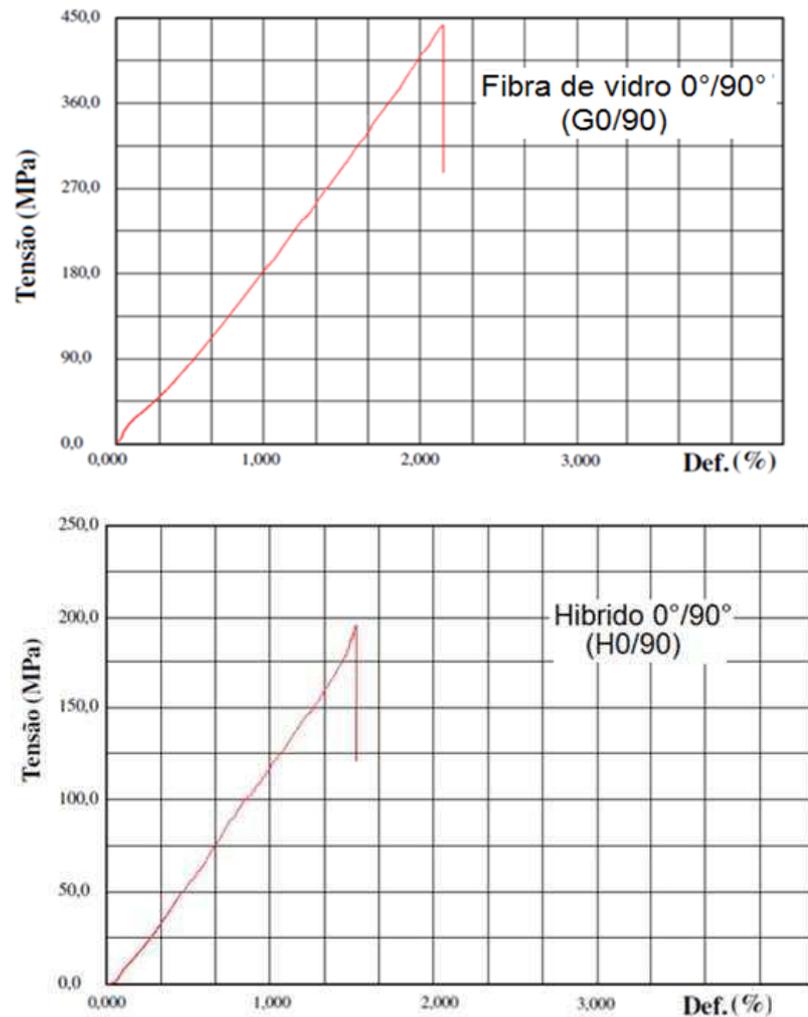
Assim, a resistência à tração do laminado híbrido foi, aproximadamente, 53% menor do que o laminado de fibras de vidro. Isto se deve ao fato de que a introdução das duas camadas de tecido de fibras de juta ocasionou acréscimo na espessura do laminado (1,55mm para fibras de vidro e 3,35mm para o híbrido) sem contribuição na resistência. Isto, também, pode ser observado pelos valores médios de força muito próximos, 17kN para o G0/90 e 15,8kN para o H0/90, uma vez que no tipo de teste realizado (tração à 0°) a propriedade dominante é a da fibra, especificamente da fibra de vidro na direção 0° (BERTHELOT, 1999, ÇEÇEN *et. al.*, 2008).

Outra característica que pode ser notada é a diminuição no valor da deformação (Tabela 4.1) no caso dos laminados híbridos. Isso se deve, possivelmente, ao menor valor de deformação das fibras de juta, aproximadamente 1,8% em relação às fibras de vidro, com 4,5% (DEHURY, 2013; SANJAY *et. al.*, 2015).

Tabela 4.1 - Valores de tensão máxima ( $\sigma_T$ ), módulo (E) e deformação ( $\epsilon$ ) do laminado de fibras de vidro (G0/90) e do laminado híbrido (H0/90) com a mesma orientação.

CDP	$\sigma_T$ [MPa]	Desvio Padrão	$E_T$ [GPa]	Desvio Padrão	$\epsilon$ [%]	Desvio Padrão
G0/90	425,0	28,4	14,7	1,8	2,2	0,3
H0/90	199,7	11,4	8,2	0,6	1,5	0,1

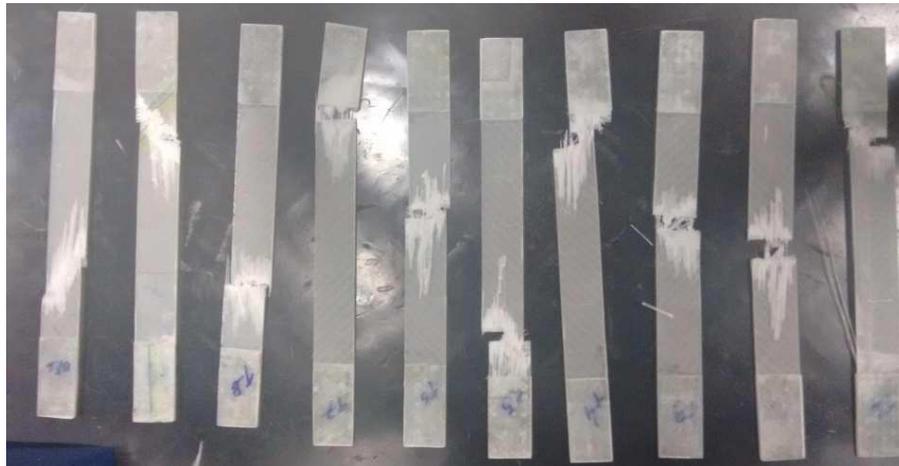
Figura 4.11 - Curvas dos valores médios de tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração dos laminados: (a) contendo somente fibras de vidro; e (b) do laminado híbrido com camadas orientadas em  $0^\circ/90^\circ$ .



Nas Figuras 4.12 e 4.13 estão apresentados os corpos de prova após os ensaios de tração.

As características das fraturas dos laminados de fibras de vidro orientados em  $0^\circ/90^\circ$  apresentados na Figura 4.12 são semelhantes às fraturas encontradas em laminados ensaiados no trabalho realizado por Martinez (2011) para a mesma direção de fibra.

Figura 4.12 - Corpos de prova de laminado de fibra de vidro (G0/90) fraturados após ensaio de tração.

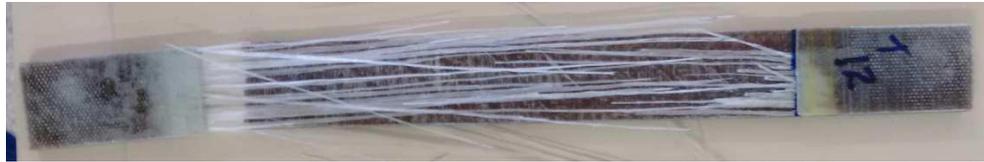


A característica da fratura dos laminados híbridos apresentaram algumas particularidades. Primeiramente, em 8 dos 12 corpos de prova foram observadas delaminações ao longo de toda área útil, como mostra as Figuras 4.13 e 4.14. Também foi observada que a área da falha, em todos os corpos de prova, foi concentrada próximo ao *tab*. A norma ISO 572-5 não estabelece registro do modo de falha, porém, considerando a ASTM D3039M-08 apenas para caracterizar os modos de falhas, mesmo ocorrendo próximo ao *tab*, os modos são válidos. Tais modos de falha foram caracterizados como: falha lateral (tipo de falha), no *tab* (área da falha) com 10 corpos de prova fraturados na parte superior (localização da falha) e 2 na parte inferior.

Figura 4.13 - Corpos de prova de laminado híbrido (H0/90) fraturados após ensaio de tração.



Figura 4.14 - Corpo de prova com várias fibras de vidro delaminadas longitudinalmente ao longo de sua área útil.



#### 4.2.2 Ensaio de Tração de laminados contendo fibras de vidro e fibras de juta orientadas em $\pm 45^\circ$ (G45 e H45) e $\pm 45^\circ$ com $0^\circ/90^\circ$ (H45//0/90).

Foram ensaiados 9 corpos de prova de laminados contendo apenas fibras de vidro orientadas a  $\pm 45^\circ$ , sendo que essa classe de laminado foi usada apenas como referência. A primeira classe de laminado híbrido foi composta por fibras de vidro e fibras de juta orientadas em  $\pm 45^\circ$ . Neste caso, foram ensaiados 12 corpos de prova. A segunda classe laminado híbrido foi composta de fibras de vidro orientadas em  $\pm 45^\circ$  com fibras de juta orientadas em  $0^\circ/90^\circ$ , e foram ensaiados 11 corpos de prova.

A Tabela 4.2 mostra os valores obtidos e a Figura 4.15 as curvas obtidas nos ensaios. Na Tabela 4.2 observa-se que tanto o laminado de fibras de vidro (G45), quanto o laminado híbrido (H45), ambos orientados em  $\pm 45^\circ$ , apresentaram valores de resistência à tração muito semelhantes, ou seja, 84,4 MPa para o laminado de fibra de vidro e 84,0 MPa para o híbrido, considerando que há uma considerável diferença nas espessuras dos laminados, 1,55mm para o de fibras de vidro e 3,35mm para o híbrido.

Tabela 4.2 - Valores de tensão máxima em tração ( $\sigma_T$ ), módulo (E) e deformação ( $\epsilon$ ) dos laminados de fibras de vidro (G45) e dos laminados híbridos (H45 e H45//0/90).

CDP	$\sigma_T$ [MPa]	Desvio Padrão	$E_T$ [GPa]	Desvio Padrão	$\epsilon$ [%]	Desvio Padrão
G45	84,4	4,4	14,5	2,6	5,5	0,9
H45	84,0	3,4	7,6	1,1	3,4	1,1
H45//0/90	68,2	5,5	7,9	0,9	1,7	0,1

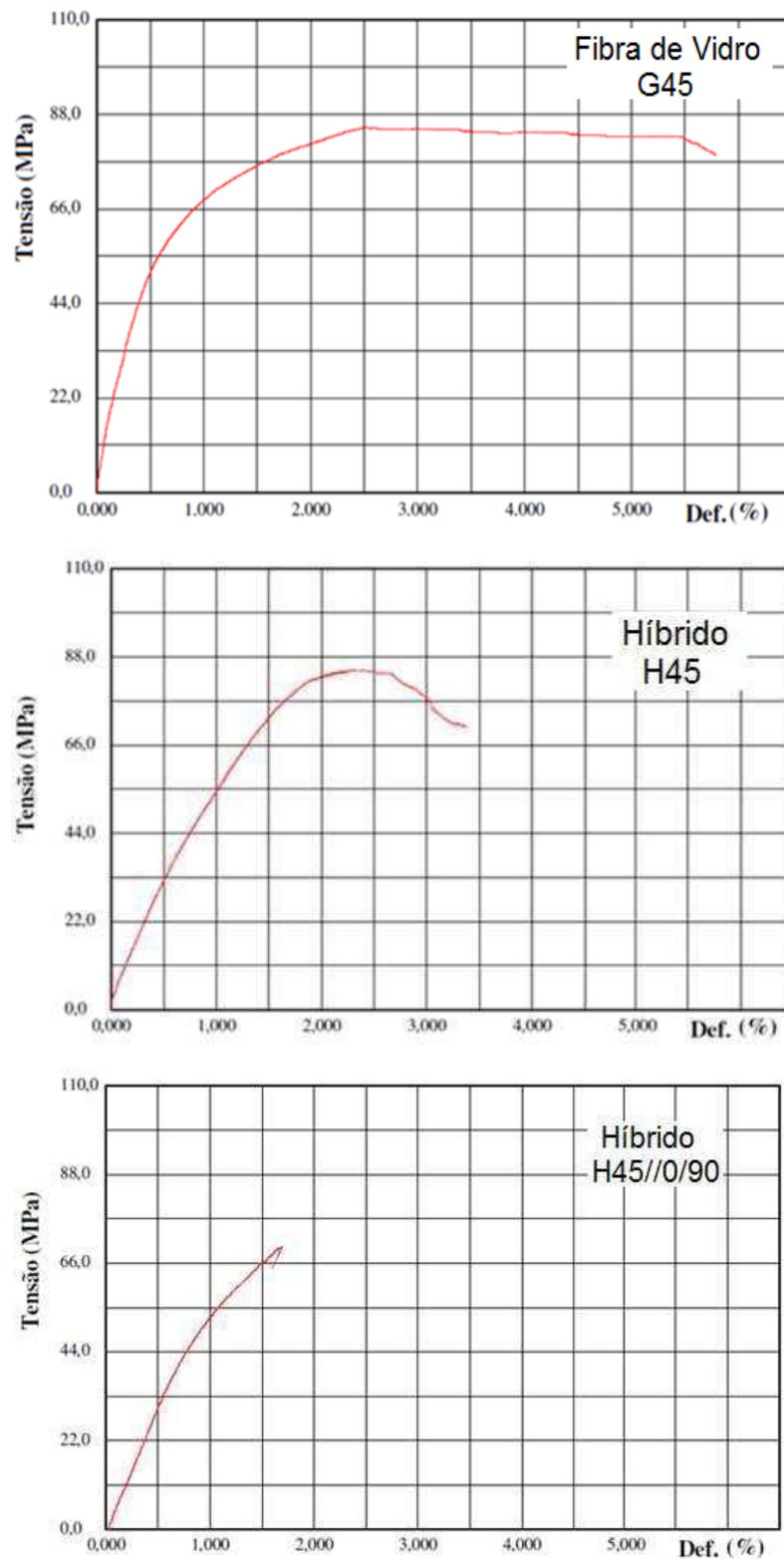
No caso do laminado H45 (Tabela 4.2), cujas fibras estão orientadas a  $\pm 45^\circ$  em relação ao eixo  $0^\circ$ , a introdução da fibra de juta promoveu uma significativa

estabilidade da propriedade de tensão ou resistência à tração a  $45^\circ$ . Isto também pôde ser observado nos valores médios da força dos ensaios, que foram 3137N para G45 e 7073N para H45. Nesse tipo de ensaio, a fibra orientada a  $\pm 45^\circ$  deixa de apresentar propriedade dominante e passa a prevalecer a propriedade da matriz e/ou a interação de ambas (interface), produzindo uma distribuição uniforme de tensão de cisalhamento no plano do laminado. (TOTRY *et. al.*, 2010; DANDAYUDHAPANI, 2006; CUI *et. al.*, 2016). Este resultado demonstra que, para determinadas aplicações, é possível obter laminados mais espessos com a hibridização para uma resistência equivalente a de um laminado menos espesso contendo somente de fibras de vidro, ou seja, nesse caso o aumento de espessura pode ser promovido pela introdução de fibras de juta ao invés de fibras de vidro para uma mesma resistência a tração e com menor densidade. Por outro lado, essa hibridização leva à uma redução significativa no módulo de elasticidade do laminado híbrido (7,6 GPa) em relação ao laminado de fibras de vidro (14,5 GPa), possivelmente, devido ao aumento da deformação da fase elástica e principalmente pelo próprio baixo módulo de elasticidade da fibra de juta, somado à diminuição da fração de fibra (SANTA *et al.* 2016; KU *et al.* 2011, ASHIK, RAMESH, 2015).

Em relação ao laminado híbrido (H45//0/90) com fibras de vidro orientadas a  $\pm 45^\circ$  e fibras de juta orientadas a  $0^\circ/90^\circ$ , este apresentou resistência à tração de 68,2 MPa, cerca de 19% abaixo em relação aos laminados G45 e H45. Essa redução na resistência pode ter relação com uma menor contribuição das fibras de juta por possuir cerca de 50% de suas fibras orientadas a  $90^\circ$  na configuração  $0^\circ/90^\circ$ , porém seu módulo de elasticidade apresentou-se praticamente igual ao laminado H45, possivelmente pelas mesmas influências.

Quanto à deformação, assim como para os laminados H0/90 e G0/90, a introdução da camada de fibras de juta ocasiona diminuição da porcentagem de deformação na fratura (Tabela 4.2 e Figura 4.15), com deformação ainda menor para o laminado onde a fibra de juta está na direção  $0/90^\circ$  (H45//0/90).

Figura 4.15 - Representação das curvas de valores médios de tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração das três classes de laminados.



Nas Figuras 4.16 a 4.18 estão apresentados os corpos de prova após os ensaios de tração. As características da fratura dos laminados contendo somente

fibras de vidro orientadas em  $\pm 45^\circ$  (Figura 4.16) são bem semelhantes às encontradas em alguns trabalhos na literatura (MARTINEZ, 2011; CUI *et al.*, 2016) com fraturas direcionadas em  $\pm 45^\circ$ , e algumas delaminações distribuídas ao longo da área útil do corpo de prova.

As fraturas dos laminados híbridos, particularmente os apresentados na Figura 4.17 (H45), diferentemente do que foi discutido para os híbridos  $0^\circ/90^\circ$ , não apresentou disparidade em relação aos corpos de prova contendo somente fibras de vidro. Já os corpos de prova híbridos H45//0/90, apresentaram fratura com característica mais frágil, particularidade que pode ser relacionada à menor deformação em relação as classe G45 e H45 na Figura 4.15, além de não apresentar inícios de delaminações visíveis ao longo da área útil do corpo de prova.

Figura 4.16 - Corpos de prova de laminados G45 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionada em  $\pm 45^\circ$  (b).

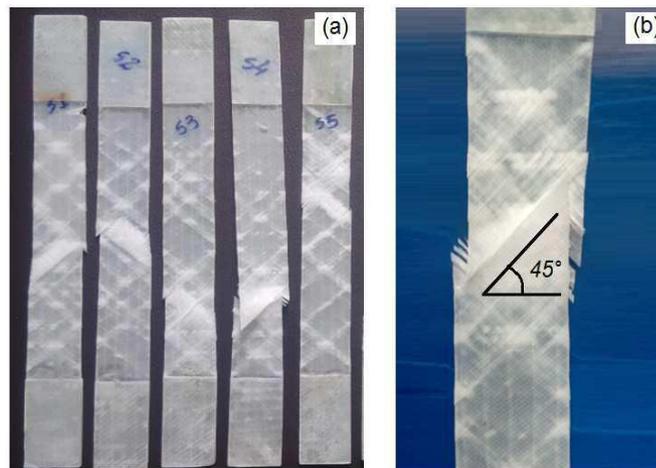


Figura 4.17 - Corpos de prova de laminado H45 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionada em  $\pm 45^\circ$  (b).

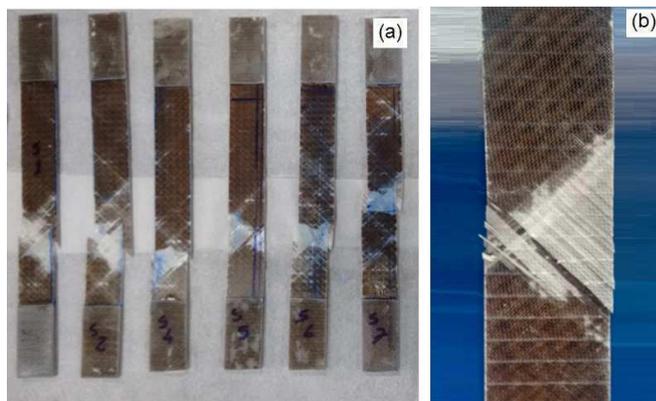
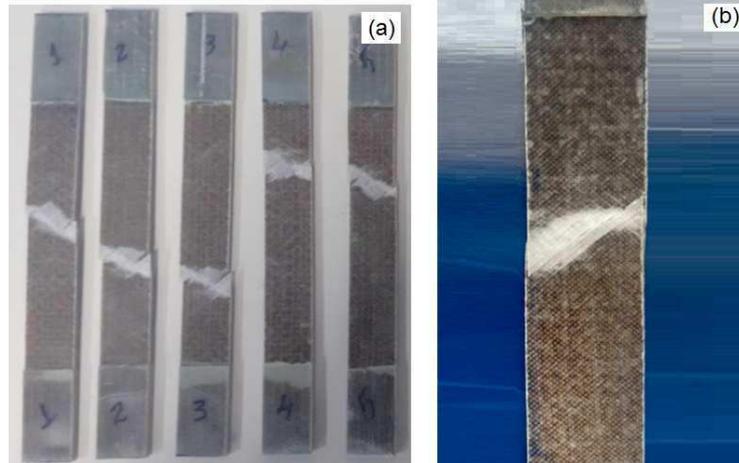


Figura 4.18 - Corpos de prova de laminado H45//0/90 fraturados após ensaio de tração (a). Detalhe para fibras fraturadas direcionadas próximo de 45° com menor deformação local (b).



A partir dos resultados apresentados anteriormente para os ensaios de tração, as Figuras 4.19 e 4.20 apresentam resumidamente os valores obtidos considerando as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação dos laminados. As barras na cor “azul” são os resultados dos laminados somente de fibras de vidro que foram usados apenas como referência na análise das propriedades dos laminados híbridos. As barras na cor “laranja” são os resultados dos laminados híbridos.

Figura 4.19 - Resultados das propriedades de tração (resistência e deformação) para cinco configurações dos laminados.

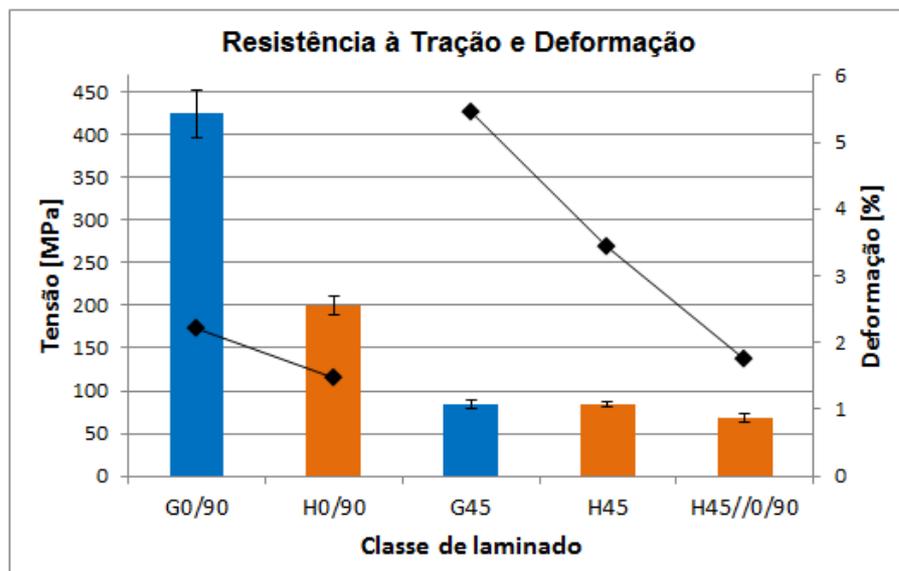
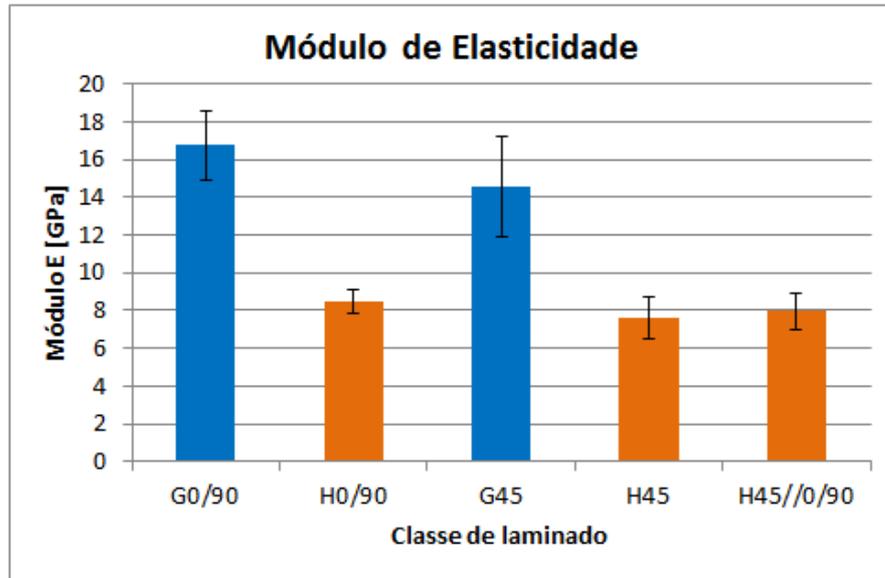


Figura 4.20 - Resultados da propriedade de módulo de elasticidade para as cinco configurações dos laminados.



Dentre os resultados mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20 o melhor foi do laminado híbrido H45 por apresentar valor de resistência máxima à tração muito próxima à do laminado de fibras de vidro (G45). Considerando que houve um aumento na espessura do laminado híbrido de aproximadamente 45%, tem-se um laminado de maior espessura, com significativa resistência à tração e 20% mais leve.

### 4.3 Resultados dos ensaios de *Short Beam*

Nos ensaios de *Short Beam* foram ensaiados 11 corpos de prova de cada uma das 5 configurações laminadas. A seguir, os resultados são apresentados separadamente em relação às orientações das fibras de vidro ( $0^\circ/90^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ ) para melhor entendimento dos resultados.

#### 4.3.1 Ensaio de *Short Beam* para determinação da Tensão de Cisalhamento Interlaminar nos laminados G0/90 e H0/90

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos no ensaio de *Short Beam* para os laminados G0/90 e H0/90. Nota-se que a redução no laminado híbrido H0/90 da

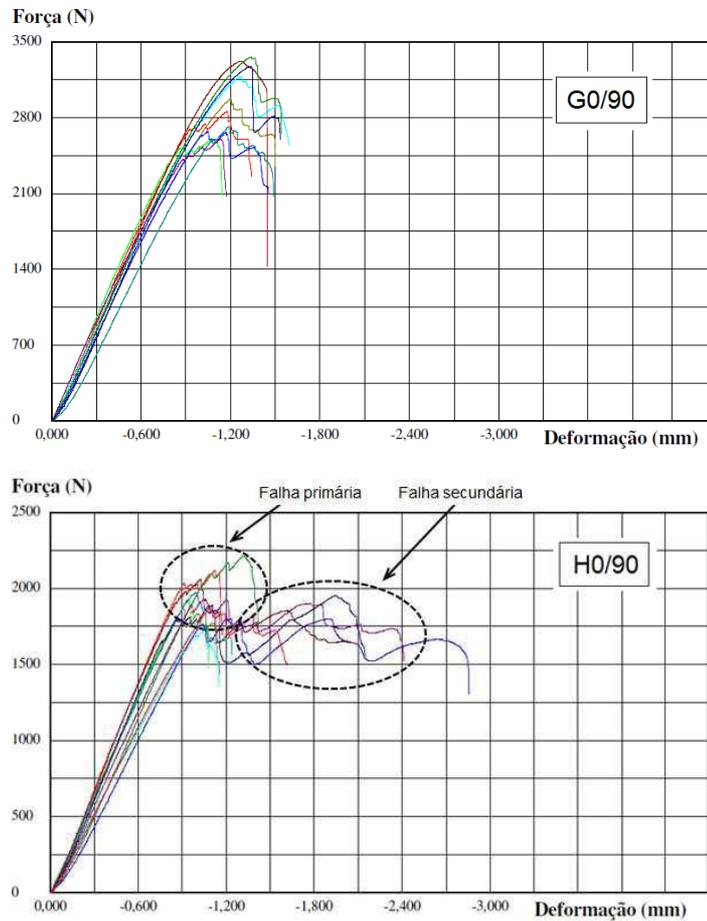
tensão de cisalhamento interlaminar (ILSS) foi de cerca de 34% em relação ao laminado de fibras de vidro. Essa redução, possivelmente, se deve a dois fatores principais. Primeiramente, como o laminado híbrido apresenta uma fração de resina maior e o cisalhamento interlaminar é dependente da propriedade da matriz e da interface fibra/matriz e não da fibra, e como a matriz possui uma propriedade de cisalhamento menor, logo isso se reflete no laminado. Adicionalmente, outra propriedade medida pelo ILSS é a intensidade de adesão na interface fibra/matriz e, no caso, laminados de fibras de vidro tem maior adesão entre as fibras de vidro e a resina epóxi do que entre as fibras de juta e a resina. Isto se deve ao fato das fibras de vidro utilizadas em laminados serem tratadas superficialmente com agentes de adesão de natureza química similar às resinas termorrígidas, principalmente, resinas epóxi (MALLICK, 2008; JUNIOR *et. al.*, 2013, 2015; BOUGUESSIR *et. al.*, 2016).

Tabela 4.3 – Resultado de ILSS para as duas classes de laminado.

<b>CDP</b>	<b>S<sub>13</sub> [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>G0/90</b>	38,9	3,9
<b>H0/90</b>	25,7	1,3

A Figura 4.21 mostra as curvas do ensaio de *Short Beam*. Alguns corpos de prova no laminado híbrido (H0/90), em comparação com o laminado contendo somente fibras de vidro (G0/90), apresentaram uma maior deformação na fratura, após a carga máxima (falha primária), seguido de uma leve retomada da força (abaixo da carga máxima) até a falha total (falha secundária). Esse leve aumento na deformação para laminados híbridos também foi observado no trabalho de Angrizani (2014).

Figura 4.21 – Curvas do ensaio de *Short Beam* para o laminado biaxial de fibra de vidro G0/90 e híbrido H0/90.



Nas figuras 4.22 e 4.23 é possível observar as visíveis delaminações internas que ocorrem entre as camadas, características de materiais ensaiados em Short Beam. Na Figura 4.24, as imagens de microscopia ótica evidenciam as falhas interlaminares.

Figura 4.22 – Corpos de prova, após ensaio, do laminado G0/90, lado da aplicação da carga (a), e lado dos apoios (b). As setas indicam as regiões com delaminações.

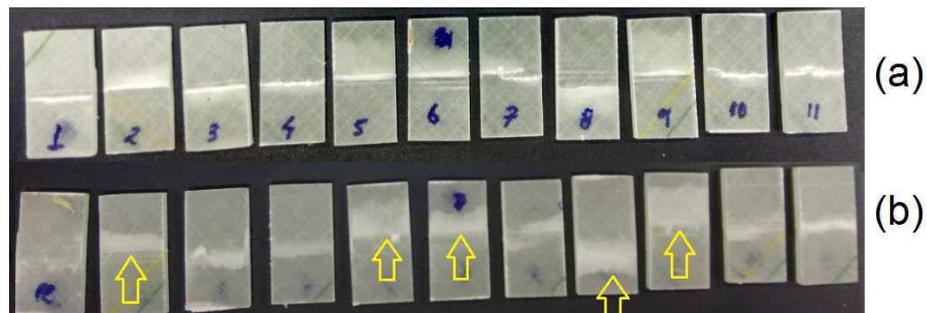


Figura 4.23 – Corpos de prova, após ensaios *Short Beam*, do laminado híbrido H0/90, lado da aplicação da carga (a), e lado dos apoios (b). As setas indicam as regiões com delaminações.

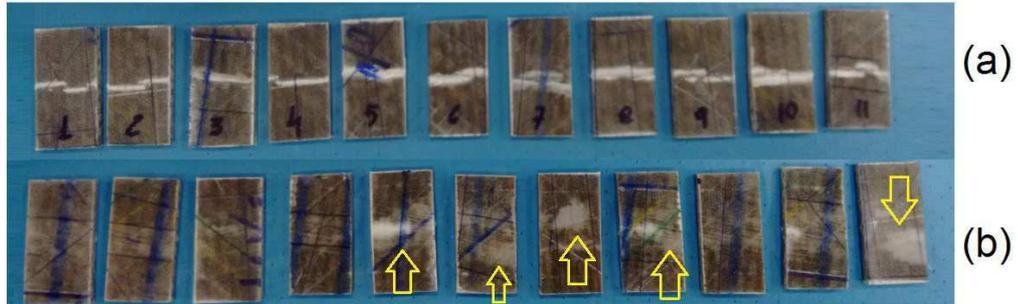
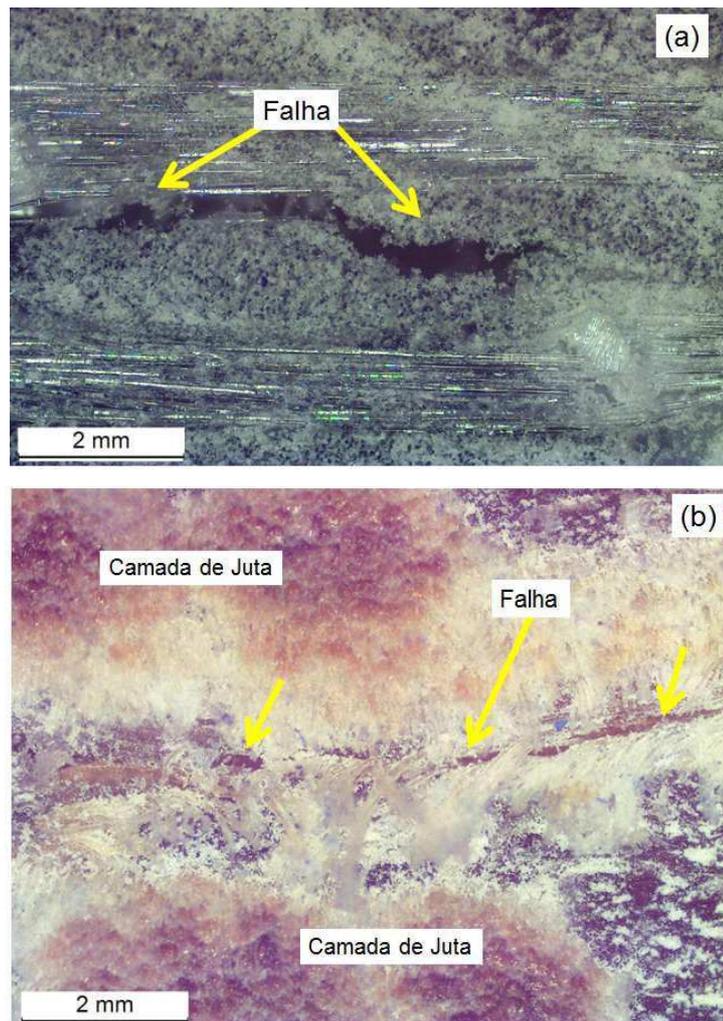


Figura 4.24 – Imagens de microscopia ótica de um corpo de prova do laminado G0/90 (a); e de um corpo de prova do laminado híbrido (b); mostrando as falhas entre as camadas. Vistas da lateral dos corpos de prova.



### 4.3.2 Ensaio de *Short Beam* para determinação da Tensão de Cisalhamento Interlaminar nos laminados G45, H45 e H45//0/90

A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos no ensaio de *Short Beam* para os laminados G45, H45 e H45//0/90. Assim como tem sido relatado na literatura (MALLICK, 2008; CREEMERS, 2010), para os laminados contendo somente fibras de vidro, já se previa um maior ILSS dos laminados  $0^\circ/90^\circ$  da seção anterior, em relação aos laminados a  $\pm 45^\circ$ , e por isso a discussão decorre em duas seções.

Comparando os resultados dos laminados híbridos H45 (23,13 MPa) e H45//0/90 (21,38 MPa) com o de fibra de vidro G45 (26,3 MPa), houve uma redução do ILSS de 12% e de 18,8% para os laminados H45 e H45//0/90, respectivamente. A redução do ILSS entre as duas classes, somente laminado de fibras de vidro e híbrido, também pode ser justificada, assim como na seção anterior (4.3.1), pela predominância da propriedade da matriz devido a sua maior fração e pela menor resistência da interface das fibras de juta com a resina em comparação da interface com as fibras de vidro (JUNIOR *et. al.*, 2013, 2015; BOUGUESSIR *et. al.*, 2016).

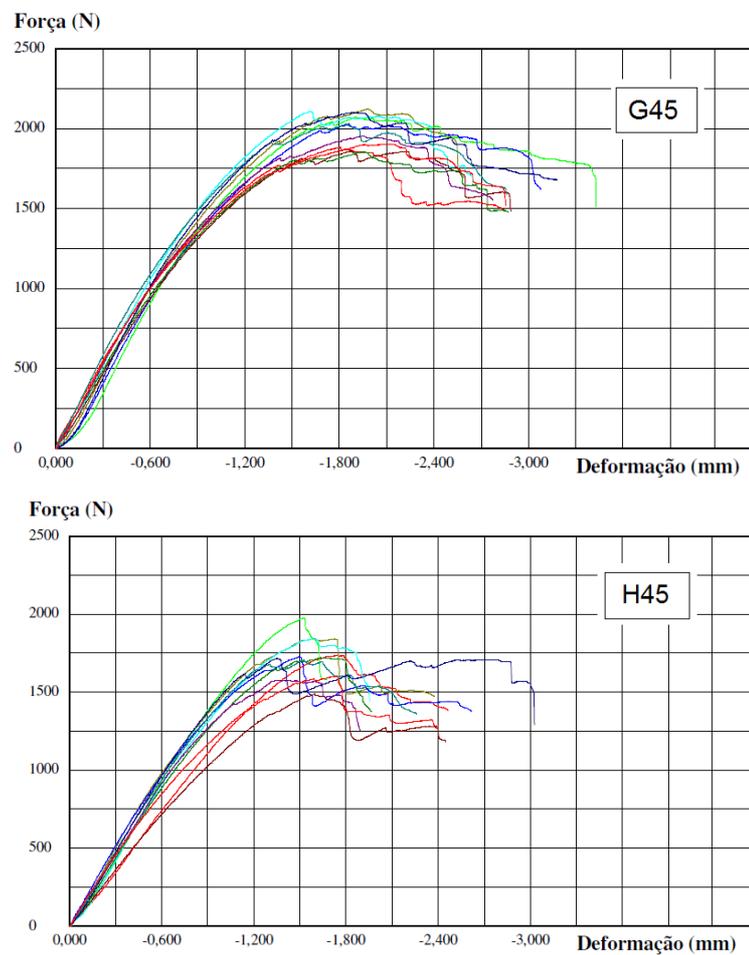
Entre os laminados híbridos H45//0/90 (21,38 MPa) e H45 (23,13 MPa), considerando os desvios padrão, pode-se assumir comportamentos equivalente entre os laminados. E, considerando apenas o nominal e, assim, uma redução de 7,5% entre os laminados híbridos H45//0/90 (21,38 MPa) em relação ao H45 (23,13 MPa), não foram encontrados na literatura estudos sobre o efeito dos planos de empilhamento das camadas na resistência ao cisalhamento para laminados híbridos. Foram encontrados trabalhos de laminados somente com fibras de vidro e de carbono que atribuem menor resistência ao cisalhamento devido à falha na interface entre o empilhamento  $90^\circ/45^\circ$  em comparação a outras interfaces, entre eles o empilhamento  $45^\circ/45^\circ$  e  $45^\circ/-45^\circ$  (MALLICK, 2008; CREEMERS, 2010). Este empilhamento coincide com o utilizado neste trabalho, mas como a propriedade de cisalhamento interlaminar é muito sensível à fração de fibra/resina e a porosidades, é possível que uma dessas variáveis tenha interferido na redução do valor de resistência do tipo ILSS do laminado H45//0/90.

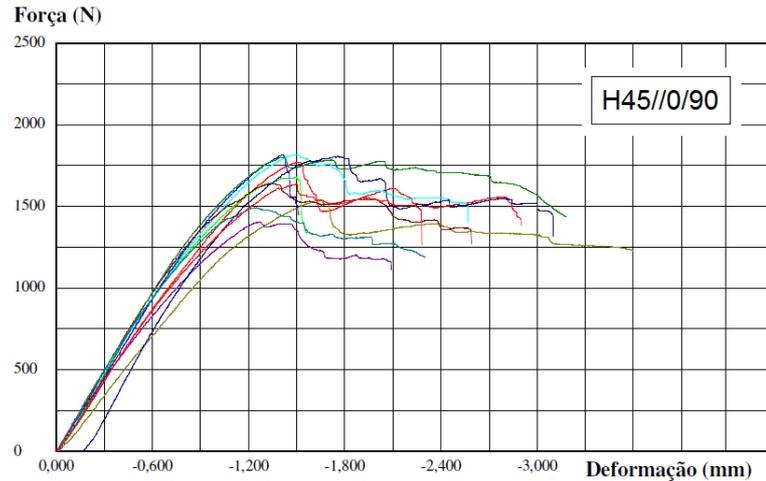
Tabela 4.4 - Resultado de ILSS para as três classes de laminado.

CDP	$S_{13}$ [MPa]	Desvio Padrão
<b>G45</b>	26,3	1,8
<b>H45</b>	23,1	1,5
<b>H45//0/90</b>	21,4	1,9

A Figura 4.25 mostra as curvas para os laminados de fibras de vidro (G45) e híbridos (H45 e H45//0/90). Para os laminados híbridos nota-se uma queda mais abrupta, após a carga máxima, prosseguindo com a deformação.

Figura 4.25 – Curvas do ensaio de Short Beam para o laminado biaxial de fibras de vidro G45 e híbridos H45 e H45//0/90.





Nas figuras 4.26 a 4.28 é possível observar as delaminações internas que ocorrem entre as camadas, características de fraturas que geralmente ocorrem nos materiais laminados ensaiados por *Short Beam*.

Figura 4.26 – Corpos de prova, após ensaio, do laminado G45, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b), as setas indicam as regiões com delaminações.

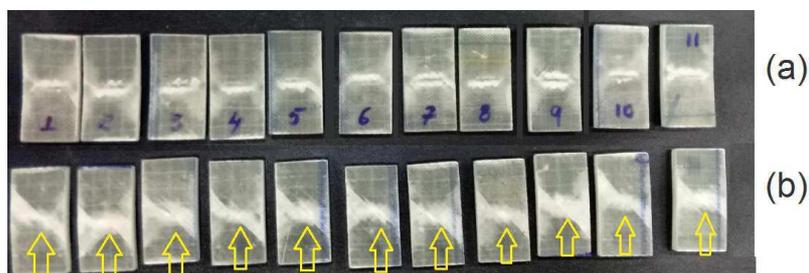


Figura 4.27 – Corpos de prova, após ensaio, do laminado H45, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b); as setas indicam as regiões com delaminações.

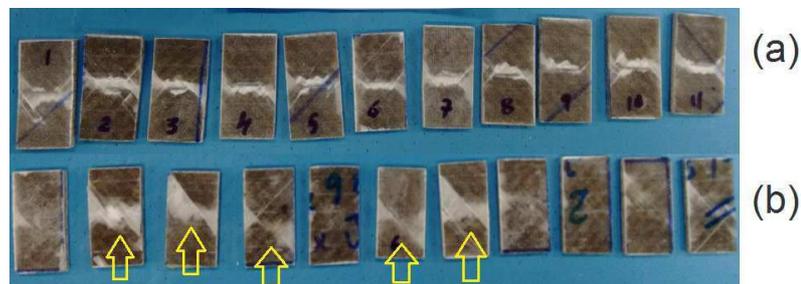
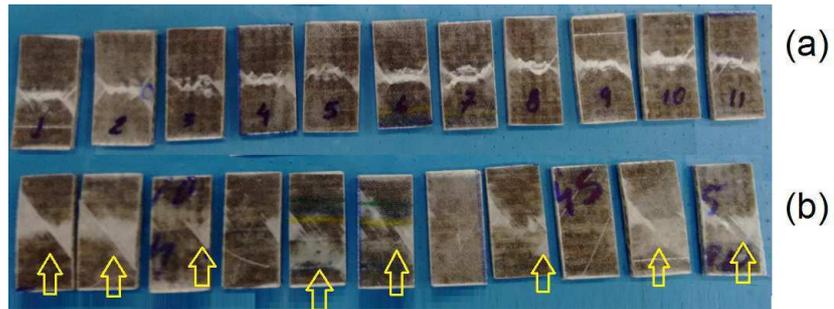
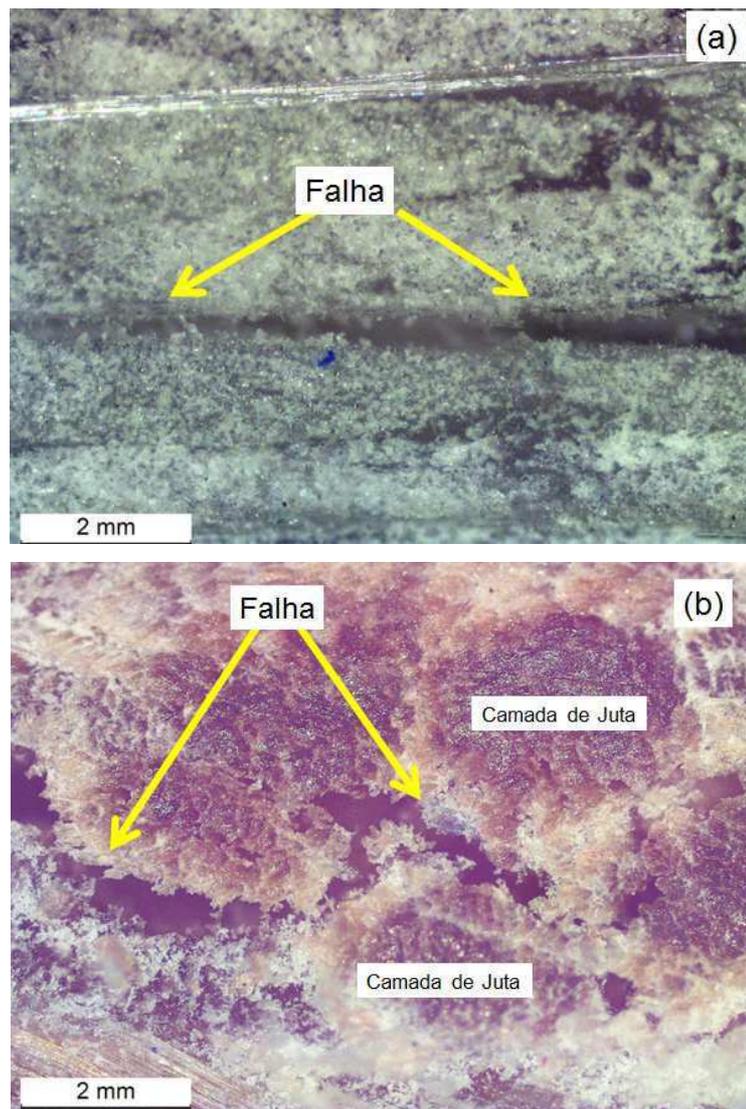


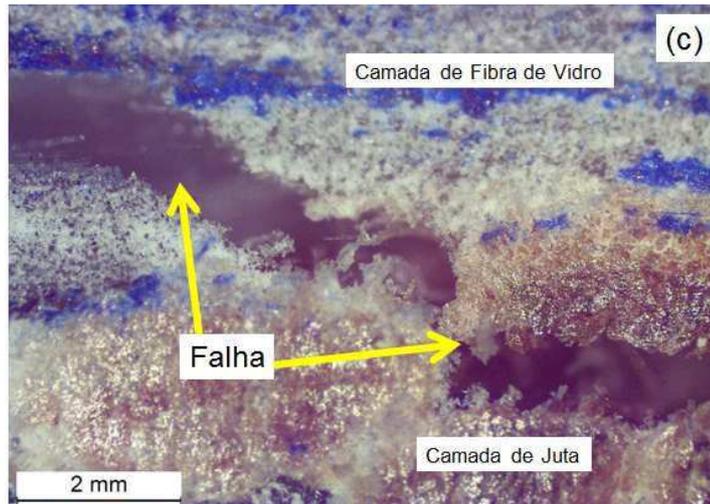
Figura 4.28 – Corpos de prova, após ensaio, do laminado H45//0/90, lado da aplicação da carga (a) e lado dos apoios (b); as setas indicam as regiões com delaminações.



Na Figura 4.29, as imagens de microscopia ótica evidenciam as falhas entre as camadas de fibras de vidro e entre as camadas de juta. As falhas estão paralelas ao eixo longitudinal do corpo de prova, como é desejado nesse tipo de ensaio.

Figura 4.29 – Imagens de microscopia ótica de um corpo de prova do laminado G45 (a), dos corpos de prova de laminados híbridos H45, 7 (b) e H45//0/90, 3 (c), mostrando as falhas entre as camadas. Vistas da lateral dos corpos de prova.

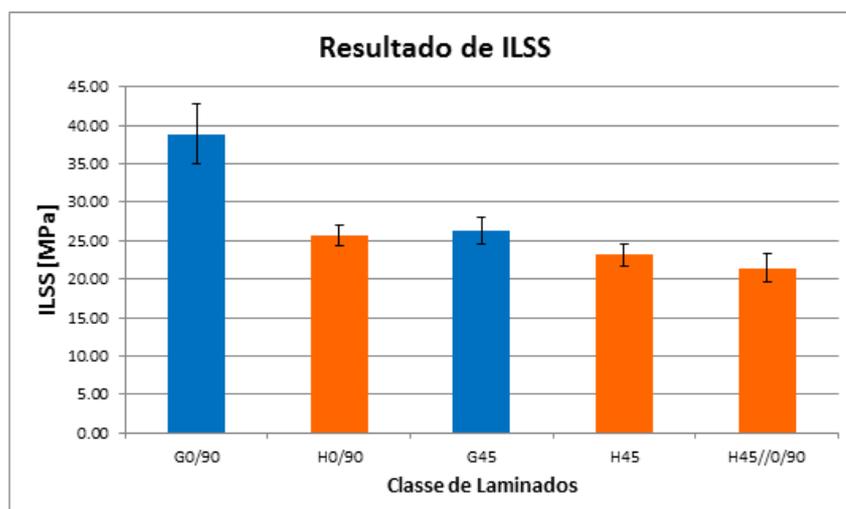




A partir dos resultados apresentados nos parágrafos anteriores para o ensaio de Cisalhamento Interlaminar *Short Beam*, a Figura 4.30 apresenta resumidamente os valores obtidos para a tensão de cisalhamento interlaminar (ILSS) para todas as 5 classes de laminados. As barras na cor “azul” são os resultados dos laminados somente de fibras de vidro que foram usados apenas como referência na análise das propriedades dos laminados híbridos. As barras na cor “laranja” são os resultados dos laminados híbridos.

Dentre os resultados mostrados na Figura 4.30, considerando apenas os laminados híbridos, o melhor resultado, em termos de resistência ao cisalhamento interlaminar é do laminado híbrido H0/90, para o H45 e H45//0/90, considerando os desvios padrão, os resultados se assemelham.

Figura 4.30 – Resultados dos ensaios de Cisalhamento Interlaminar *Short Beam* para as 5 classes de laminados.



#### 4.4 Resultados dos ensaios de Compressão

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de compressão das 5 classes de laminados, os mesmos são apresentados separadamente em relação a orientações das fibras de vidro ( $0^\circ/90^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ ) para melhor entendimento dos resultados.

##### 4.4.1 Ensaio de Compressão dos laminados G0/90 e H0/90

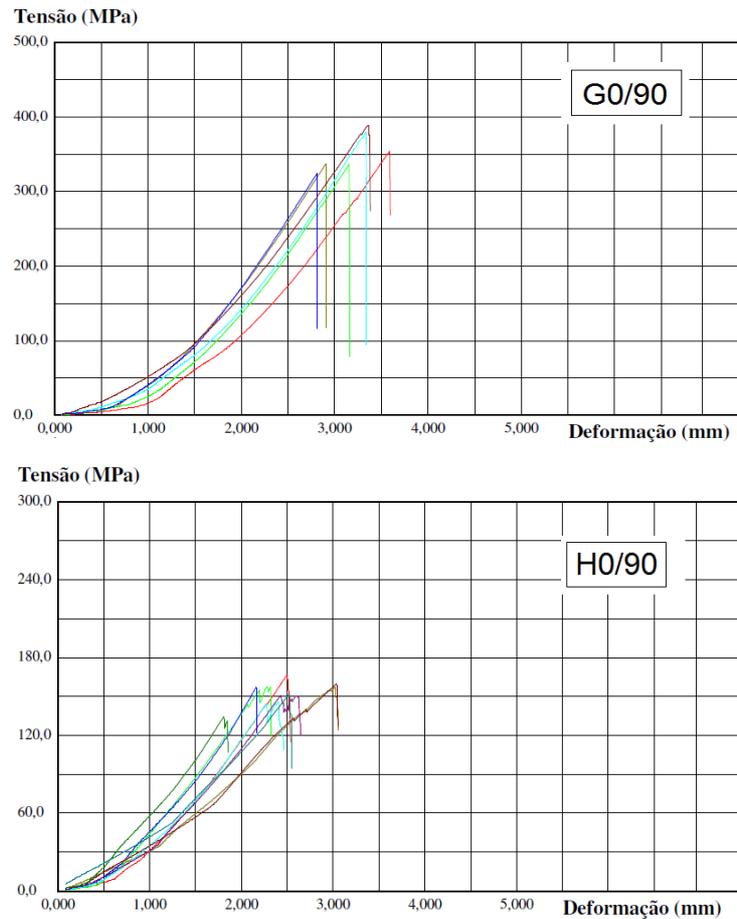
Do laminado G0/90 foram ensaiados 6 corpos de prova (cdps) e 10 cdps do laminado híbrido H0/90. A Tabela 4.5 e a Figura 4.31 mostram os resultados para estas duas classes de laminados. A resistência à compressão do laminado híbrido foi cerca de 56% menor em relação ao laminado de fibras de vidro.

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura que discutem o comportamento à compressão tanto de compósitos híbridos (fibra natural/fibra de vidro) quanto de compósitos contendo fibras de juta. Além disto, propriedades como a compressão são muito sensíveis a fração dos constituintes, orientação das fibras, empilhamento, etc., e devem ser essencialmente levadas em consideração para ponderar tais discussões comparativas. Em alguns dos trabalhos encontrados, os autores correlacionam a diminuição de resistência à compressão à redução da fração de fibras do compósito (GHAFAR *et. al.*, 2006; KUMAR *et. al.*, 2016), além da própria baixa resistência a compressão das fibras de juta (98 MPa) em relação às fibras de vidro (325 MPa) (KISHORE *et. al.*, 1983; CUI *et. al.*, 2016). Tais fatores, possivelmente, também contribuíram para a redução da propriedade encontrada neste trabalho. Outro trabalho (SHARBA *et. al.* 2016) que analisou a resistência à compressão de laminados híbridos de fibras naturais com fibras de vidro, resultou em redução de 40% com a introdução de fibras de *Kenaf* entre camadas de fibras de vidro com empilhamento semelhante.

Tabela 4.5 – Resultado da tensão em compressão para laminados G0/90 e H0/90.

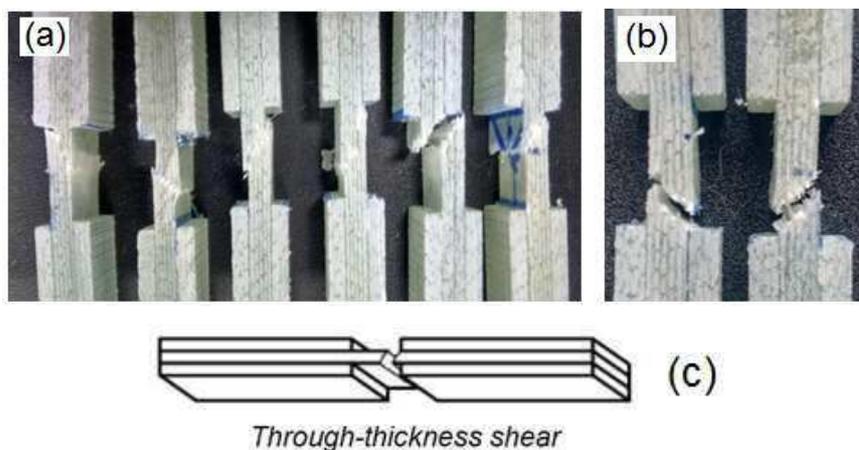
CDP	$\sigma_c$ [MPa]	Desvio Padrão
<b>G0/90</b>	353,6	23,4
<b>H0/90</b>	153,6	9,2

Figura 4.31 - Curvas do ensaio de Compressão dos laminados G0/90 e H0/90



No ensaio de compressão também foram analisados os modos de falha dos corpos de prova. Como mostra a Figura 4.32, nos corpos de prova G0/90, devido a presença de fibra a 0 e 90°, o modo de falha predominante é o cisalhamento ao longo da espessura (*Through-thickness shear*).

Figura 4.32 – Falha dos laminados G0/90 (a). Detalhe da fratura (b). Modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (c).



Já para os corpos de prova laminados híbridos o modo predominante foi o modo *Delamination* (delaminação), como mostra a Figura 4.33. Modo de falha semelhante foi reportado por Manteghi *et. al.*, (2016) ao ensaiar laminados híbridos de fibras de linho/fibras de vidro com empilhamento semelhante, mostrando uma separação na interface entre as camadas de fibras de vidro e as de linho. As falhas nos laminados híbridos foram falhas mais discretas, sem notável ruptura das fibras em nenhum dos corpos de prova. Para melhor corroborar o modo de falha, imagens de microscopia ótica foram feitas em alguns corpos de prova, como mostra a Figura 4.34. As falhas estão paralelas ao eixo longitudinal do corpo de prova, como é adequado e conforme nesse tipo de ensaio.

Figura 4.33 – Laminados H0/90 com falha após ensaio. Vista frontal (a), vista lateral (b) e modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (c).

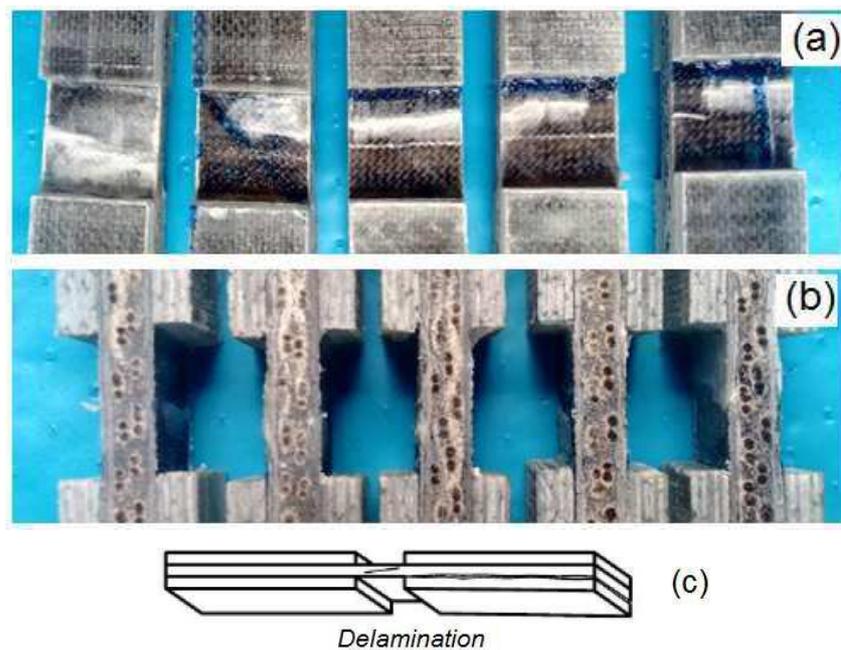
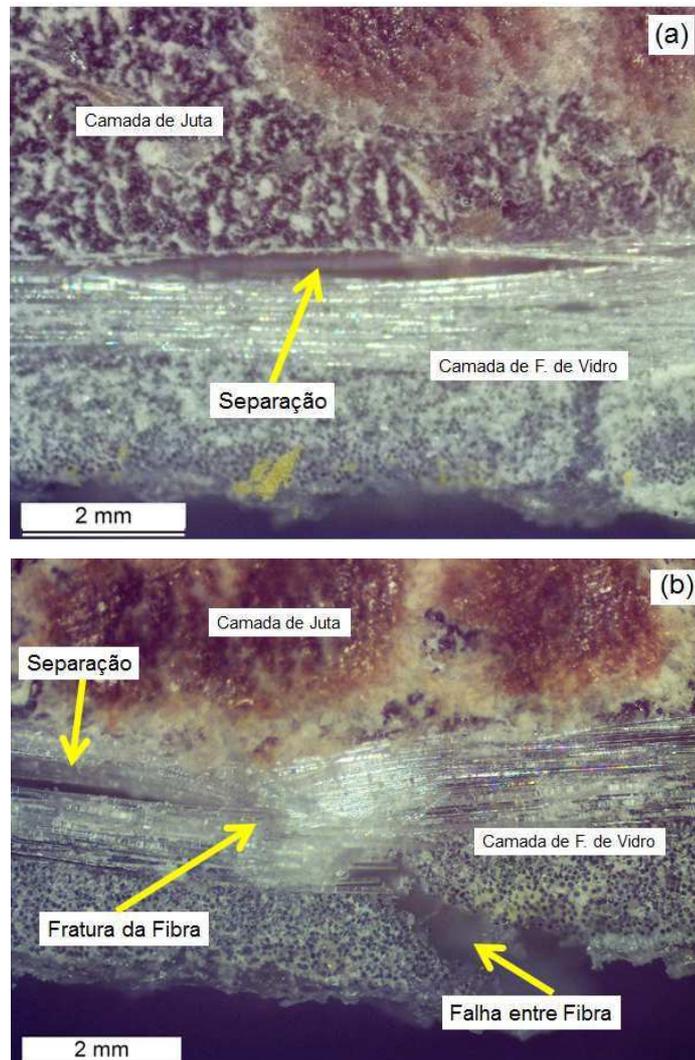


Figura 4.34 – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova de laminados híbridos: número 6 (a) e 2 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova.



#### 4.4.2 Ensaio de Compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90

Foram ensaiados 8 corpos de prova (*cdps*) do laminado G45, 11 *cdps* para H45 e 12 *cdps* para H45//0/90. A Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos nos ensaios e na Figura 4.35 são mostradas as curvas geradas no ensaio.

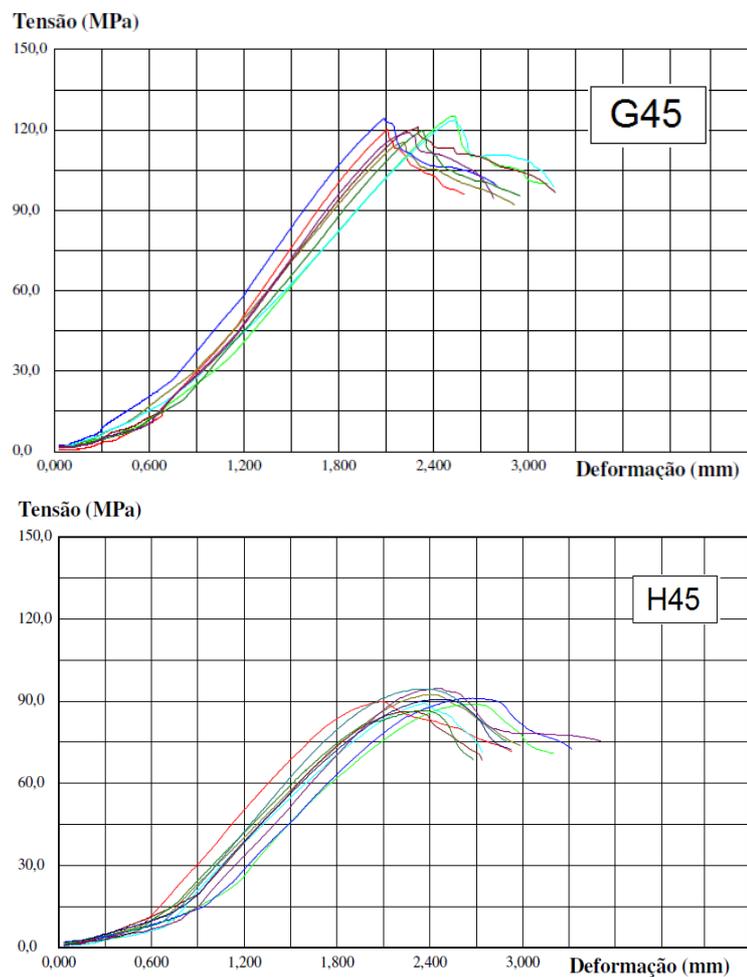
A redução entre os laminados somente de fibras de vidro, desta seção em relação aos laminados citados na seção anterior, ocorreu devido a utilização do empilhamento em  $\pm 45$  da camada de fibra de vidro (BORTOLOTTI, 2012, CUI *et. al.*, 2016). Assim, tal mudança de orientação das fibras de vidro reflete diretamente nos laminados híbridos. Quanto à redução de aproximadamente 25% da resistência à

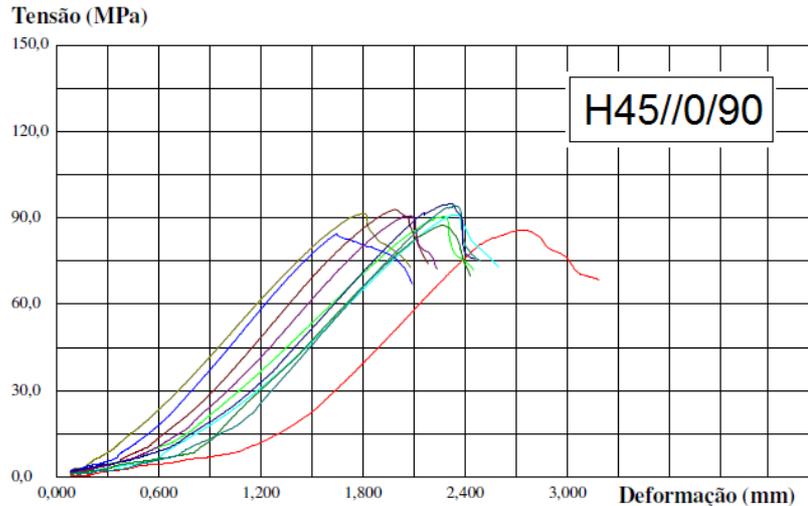
compressão de ambos os laminados híbridos em relação ao laminado contendo somente fibras de vidro, pondera-se as mesmas atribuições discutidas para os laminados G0/90 e H0/90 na seção anterior (4.4.1), outorgando a queda de propriedade à redução da fração de fibras do compósito (GHAFAR *et. al.*, 2006; KUMAR *et. al.*, 2016), e à baixa resistência a compressão das fibras de juta (98 MPa) em relação às fibras de vidro (325 MPa) (KISHORE *et. al.*, 1983; CUI *et. al.*, 2016).

Tabela 4.6 – Resultado da resistência à compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90.

CDP	$\sigma_c$ [MPa]	Desvio Padrão
<b>G45</b>	121,2	3,4
<b>H45</b>	91,5	2,9
<b>H45//0/90</b>	90,5	3,4

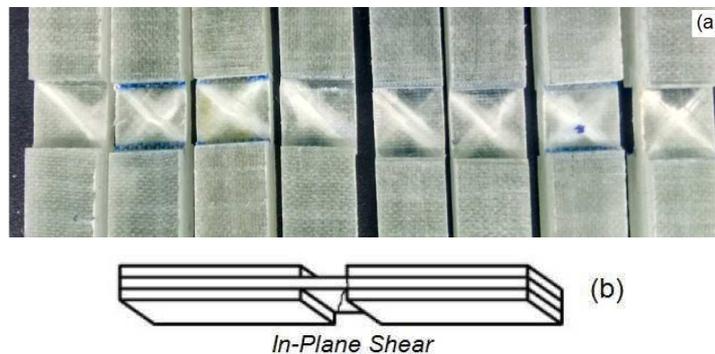
Figura 4.35 - Curvas dos ensaios de compressão dos laminados G45, H45 e H45//0/90.





O modo de falha para todos os corpos de prova G45 foi o cisalhamento no plano (*In-Plane Shear*) com a delaminação ocorrendo nas duas direções de suas fibras ( $+45^\circ$  e  $-45^\circ$ ) como mostra a Figura 4.36.

Figura 4.36 – Corpos de prova G45 fraturado (a) e modo de falha ocorrido segundo a norma ISO14126 (b).



As fraturas dos corpos de prova híbridos H45, caracterizou-se por delaminações em toda a área útil, sem direção preferencial como ocorreu no G45. Algumas dessas delaminações apresentaram características de dobras nas camadas de fibras de vidro, como mostra a Figura 4.37. O modo de falha do tipo delaminação (*Delamination*), ocorreu nas camadas de fibras de vidro e, entre estas e as camadas de fibras de juta. Não foram observadas falhas nas camadas de fibras de juta em nenhum dos corpos de prova, nem mesmo através da análise de microscopia ótica. As imagens de microscopia ótica (Figura 4.38) mostram delaminações entre a camada de fibras de vidro e as camadas de fibras de juta. As

falhas estão paralelas ao eixo longitudinal do corpo de prova, como é esperado nesse tipo de ensaio.

Figura 4.37 – Corpos de prova H45 fraturado (a) e modo de falha ocorrido de acordo com a norma ISO14126 (b).

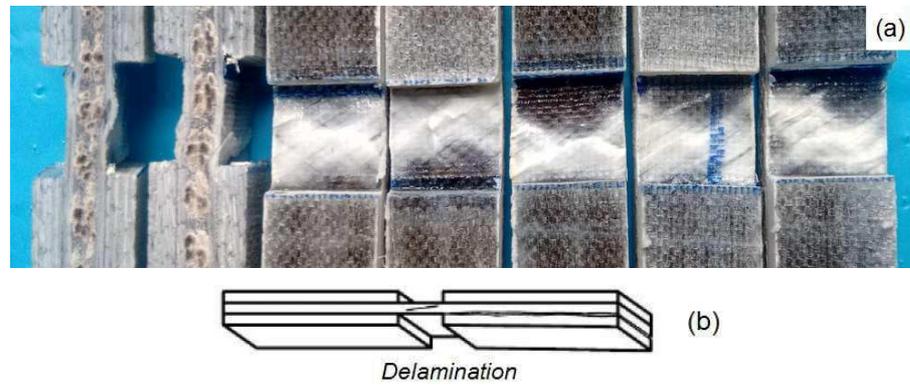
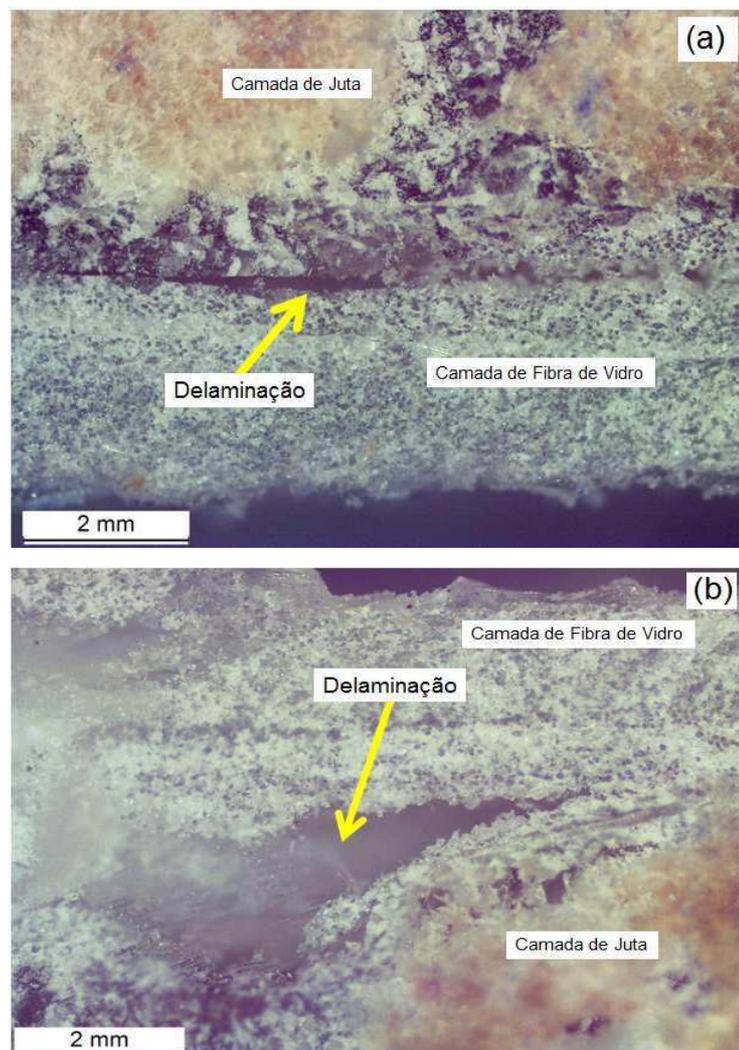


Figura 4.38 – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova híbrido número 10 (a) e 9 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova.

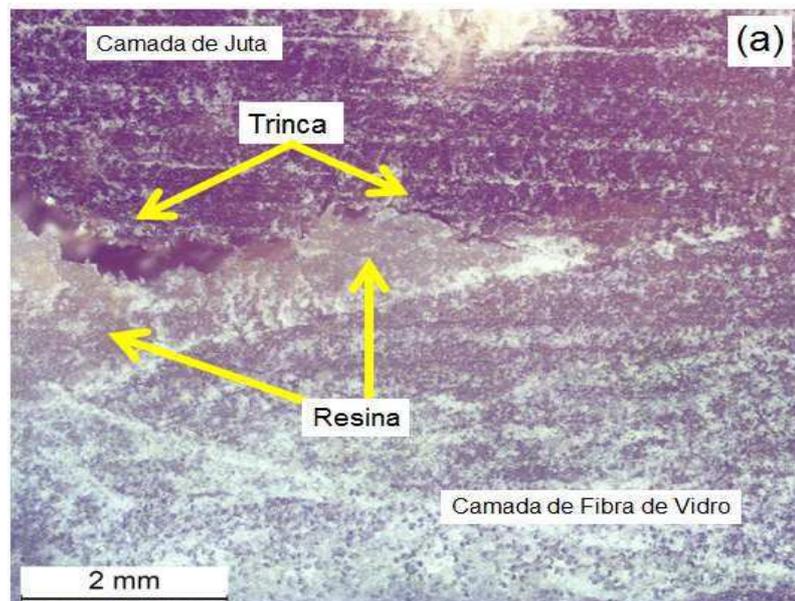


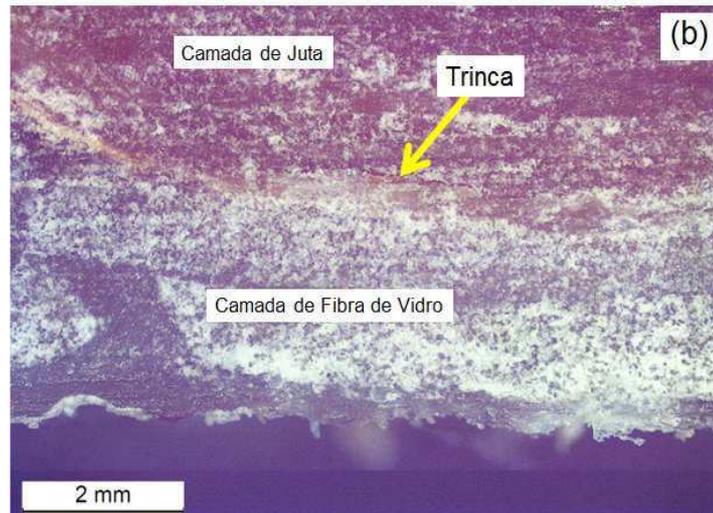
As fraturas dos corpos de prova híbridos H45//0/90 (Figura 4.39) são bastante similares às ocorridas nos corpos de prova H45, com delaminações menores. O modo de falha ocorrido também foi do tipo delaminação (*Delamination*), e novamente nas camadas de fibras de vidro e, entre estas e as camadas de fibras de juta. Também não há nítida falha nas camadas de fibras de juta dos corpos de prova, porém, através das imagens de microscopia foi possível identificar algumas trincas nas camadas de fibras de juta e entre estas e a resina, como mostra a Figura 4.40.

Figura 4.39 – Corpos de prova H45//0/90 fraturado.



Figura 4.40 – Imagens de microscopia ótica da fratura de dois corpos de prova híbrido número 4 (a) e 7 (b). Imagens obtidas da lateral do corpo de prova

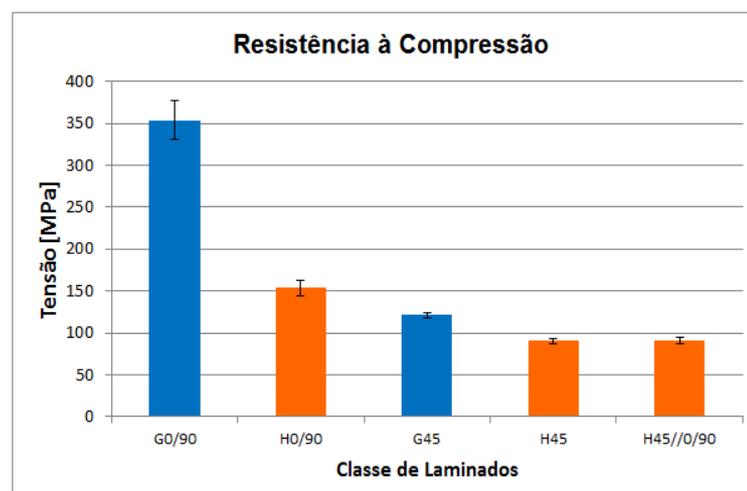




A partir dos resultados apresentados para o ensaio de compressão, a Figura 4.41 apresenta resumidamente os valores obtidos para a tensão ou resistência à compressão para todas as 5 classes de laminados. As barras na cor “azul” são os resultados dos laminados somente de fibras de vidro, que foram usados apenas como referência na análise das propriedades dos laminados híbridos. As barras na cor “laranja” são os resultados dos laminados híbridos.

Dentre os resultados mostrados na Figura 4.41, considerando apenas os laminados híbridos, o melhor resultado de resistência à compressão foi do laminado híbrido H0/90, devido a propriedade dominante das fibras de vidro orientadas a  $0^\circ$ . Os laminados H45 e H45//0/90 apresentaram resultados similares de resistência à compressão.

Figura 4.41 – Resultados dos ensaios de compressão para as 5 classes de laminados.



#### 4.5 Resumo dos resultados das propriedades mecânicas dos laminados

As Figuras 4.42 e 4.43 apresentam um resumo das principais propriedades analisadas neste trabalho. A Figura 4.43 é uma ampliação da escala da Figura 4.42 para os resultados de ILSS uma vez que seus valores, normalmente, são inferiores às resistências à tração e à compressão.

Nota-se que em quase todos os laminados híbridos houve uma redução das propriedades quando comparadas aos laminados de fibras de vidro. Um caso particular foi o resultado da tensão em tração do laminado híbrido H45 que apresentou comportamento semelhante ao laminado contendo somente fibras de vidro (G45). Neste caso é importante destacar que o laminado híbrido apresentou o dobro de espessura do laminado de fibras de vidro, ou seja, aumentou-se a espessura e manteve-se a resistência do material, no entanto, houve uma redução no módulo de elasticidade.

Para a propriedade de resistência à compressão, apesar da redução dos laminados híbridos em relação aos laminados de fibras de vidro; entre os híbridos a 45° a orientação da fibra de juta não influenciou na resistência à compressão.

Em relação à propriedade de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS), de maneira geral, a redução desta propriedade (Figuras 4.42 e 4.43) nos laminados híbridos em relação aos de fibras de vidro é menos intensa.

Figura 4.42 – Resumo das propriedades mecânicas analisadas.

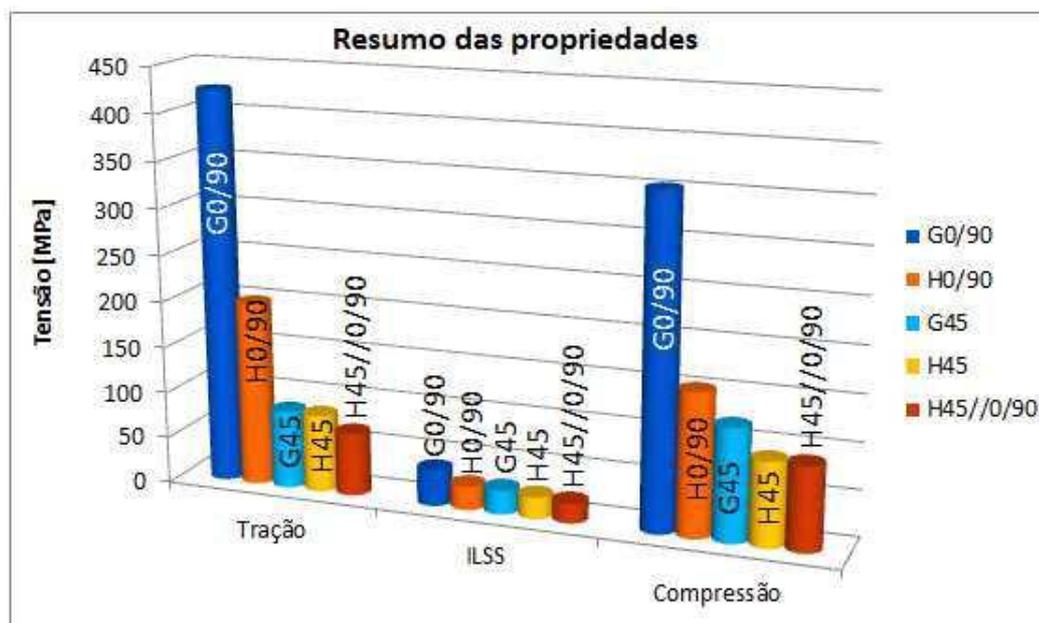


Figura 4.43 – Ampliação dos resultados de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar (ILSS)



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que é possível obter laminados híbridos com considerável conteúdo de fibra (*fibre weight fraction – FWF*) utilizando-se do processo de infusão à vácuo, processo que é pouco relatado pela literatura para compósitos contendo fibras vegetais.

No caso deste trabalho foi conseguida uma redução na densidade do laminado híbrido de aproximadamente, 20% em relação ao laminado contendo somente fibras de vidro.

De maneira geral houve decréscimos nas propriedades mecânicas dos laminados híbridos em relação aos laminados contendo apenas fibras de vidro. No entanto, para os laminados G45 e H45, a resistência à tração se manteve com o aumento da espessura, o que nesse caso é uma vantagem, uma vez que é possível obter laminados mais espessos apenas com a adição das fibras de juta, mantendo resistência mecânica similar.

Os laminados híbridos com fibras de vidro orientadas em 0/90° apresentaram as melhores propriedades em relação aos demais laminados híbridos devido a propriedade dominante da fração das fibras a 0°.

A significativa redução de algumas propriedades possivelmente invalida a utilização das configurações híbridas estudadas para aplicações estruturais como no caso de pás eólicas. No entanto, os laminados híbridos desenvolvidos neste trabalho, e as configurações propostas e analisadas podem ser aplicados para moldar componentes em compósitos para peças não estruturais ou com menores requisitos de resistência, e ainda com possibilidades de melhorias de resistências mecânicas, utilizando-se outras configurações ou até mesmo outros tipos de tecidos.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas dificuldades foram observadas durante e depois do desenvolvimento deste trabalho. Assim, são citadas a seguir, algumas sugestões para que outros trabalhos complementares à este possam ser desenvolvidos minimizando possíveis problemas:

- Utilizar tecidos de fibras de juta ou de outras fibras vegetais com maior gramatura ou de tecelagem com maior união entre as fibras, de modo a minimizar ou até mesmo eliminar regiões com concentração de resina (“excesso de resina” ou “bolsão de resina”) e assim obter melhores frações de fibra.

- Produzir e caracterizar laminados híbridos com configuração semelhante com outras fibras naturais que apresentem boas propriedades mecânicas e processabilidade como, por exemplo, fibras de curauá, fibras de linho, entre outras, visando aplicações em pás eólicas de pequeno porte.

- Na seleção do tipo de fibra natural, além das propriedades mecânicas da fibra, escolher uma configuração de tecelagem (trama e urdume) que deforme menos os filamentos. Adicionalmente, considerar para a seleção, se os filamentos que compõe o feixe de fibras serão torcidos ou não.

- Avaliar a propriedade de absorção de água dos laminados com as construções apresentadas neste trabalho, uma vez que as fibras naturais estão entre as camadas de fibra de vidro.

- Desenvolver Análises de Elementos Finitos (FEA) para laminados híbridos com fibras vegetais para aplicações em diversos tipos de peças ou componentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELLAOUI, H. et al. Fabrication, characterization and modelling of laminated composites based on woven jute fibres reinforced epoxy resin. *Material and Design*, Casablanca, v. 68, p. 104-113, Dez. 2015.

AHMED, K. S., VIJAYARANGAN, S. Tensile, flexural, and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites. *Journal of Materials Processing Technology*, Coimbatore, v. 207, p. 330-335, 2008.

AKIL, H. Md., ROSA, I. M., SANTULLI, C., SARASIN, F. Flexural behaviour of pultruded jute/glass and kenaf/glass hybrid composites monitored using acoustic emission. *Materials Science and Engineering A*, n. 527, p. 2942–2950, 2010.

ALONSO, T. V. Estudo da reação de formação de adutos gerados por resina epóxi e polialquelenos glicóis. 2013, 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto. de Engenharia Química. São Paulo, 2013.

ANGRIZANI, C. C. et. al. Analysis of curaua/glass hybrid interlayer laminates. *Journal of Reinforced Plastics*, v. 33 (5), p. 472-478, 2014.

ASTM D7028-07: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA), 2007.

ASTM D3418-15: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, 2015.

ASTM D2584-08: Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, 2008.

ASTM D792-08: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, 2008.

ALTMANN, A. GESELL, P. DRECHSLER, K. Strength prediction of ply waviness in composite materials considering matrix dominated effects. *Composites Structure*, n.127, p. 51-59, 2015.

BALAGURU, P., NANNI, A., GIANCASPRO, J. FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A Guide to fundamentals and design for repair and retrofit. Londres: Taylor & Francis, 2009, 328 p.

BANSAL, N. P., ÜNAL, Ö. In-plane and interlaminar shear strength of a unidirectional Hi-Nicalon fiber-reinforced celsian matrix composite. *Ceramics International*, v. 28, p.527-540, 2002.

BERTHELOT, J. M. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. New York: Springer, 1999. 646 p.

- BORTOLOTTI, P. Carbon glass hybrid material for wind turbine rotor blade. 2012, 121 f. Thesis (Master of Science in Sustainable Energy Tecnology) - Delft University of Technology, Delft, 2012.
- BRAGA, L. A. MAGALHÃES JR, P. A. A. Analysis of the mechanical and thermal properties of jute and glass fiber as reinforcement epoxy hybrid composites. *Materials Science and Engineering C*, n. 56, p. 269-273, 2015.
- BRONDSTED, P., NIJSSEN, R. *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing , 2013. 464 p.
- BOUVET, G. *et. al.* Impact of polar groups concentration and free volume on watersorption in model epoxy free films and coatings. *Progress in Organic Coatings*, n. 96, p.32-41, 2016.
- BURTON, B. L. *Acceleration of Amine-Cured Epoxy Resin Systems* (Huntsman Corporation), 2013. Disponível em: <https://goo.gl/g140ah>. Acesso em 10 dez. 2016.
- CAIRNS, D.S. NELSON, J. W. WOO, K. MILLER, D. Progressive damage analysis and testing of composite laminates with fiber waves. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 90, p. 51-61, 2016
- CAMPBELL, F. C. *Introduction to Composite Material and Processs: Unique Materials that Require Unique Processes*. CAMPBELL, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. 1ª Ed. Oxford. Elsevier Science. 2004. cap. 1, p. 2 – 37.
- CANEVAROLO, Jr., S. V. *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. São Paulo: Artiliber, 2003. 448 p
- CARNEIRO, L. A. V., TEIXEIRA, A. M. A. J. *Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção*, 2008. Disponível em: <https://goo.gl/bKCIHx>. Acesso em: 07 jan. 2017.
- CECH. V. PALESCH, E. LUKES, J. The glass fiber–polymer matrix interface/interphase characterized by nanoscale imaging techniques. , v. 83, p.22-26, 2013.
- CHANDA, M., ROY, S. K. Plastics Technology Handbook. 4th. ed. New York: CRC Press, 2002.
- COBAN, O., BORA, M. O., SINMAZCELIK, T., GUANY, V. Effect of fiber orientation on viscoelastic properties of polymer matrix composites subjected to thermal cycles. *Composites Polymer*, v. 3, p. 411-416, 2010.
- COSTA M. L., REZENDE, M. C., PARDINI, L. C. *Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 1999.

CREEMERS, R.J.C. Interlaminar shear strength criteria for composites: An assessment by means of statistical analysis. 2010. Disponível em <https://goo.gl/gxcYrK>. Acesso em: 09 jan. 2017.

CUI, H. *et. al.* Effect of strain rate and fibre rotation on the in-plane shear response of  $\pm 45$  laminates in tension and compression tests. *Composites Science and Technology*, v. 135, p. 106-115, 2016.

DALBEHERA, S., ACHARYA, S.K. Effect of cenosphere addition on erosive wear behaviour of jute-glass reinforced composite using taguchi experimental design. *Materials Today: Proceedings* n. 2, p. 2389 – 2398, 2015.

DANDAYUDHAPANI, S. K. Characterization of in-plane shear properties of laminated composites at high strain rates. 2006. 117 f. Thesis (Master of Science) – Madras University, Madras, 2006.

DANIEL, I. M., ISHAI, O. *Engineering Mechanics Composite Materials*. New York. Oxford University Press, 1994. 410 p.

DARROS, A. B., PAIVA, J. M. F. Propriedades de Flexão de Polipropileno Reforçado com Fibras de Sisal e Coco Antes e Após Condicionamento. *Revista Iberoamericana de Polímeros (Internet)*, v. 16, p. 221-228, 2015.

DEHUR, J. Processing & Characterization of jute/glass fiber reinforced epoxy based hybrid composites. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Engenharia Mecânica) National Institute of Technology Rourkela, Odisha, 2013.

DEPPA, B., POTHAN, L., MAVELIL-SAM, R., THOMAS, S. Structure, properties and recyclability of natural fibre reinforced polymer composites. In: A. FAINLEIB, A., GRIGORYEVA, O. Recent Developments in Polymer Recycling. India: Transworld researcher network, 2011, cap 3, p. 101-120.

DONG, C. Effects of Process-Induced Voids on the Properties of Fibre Reinforced Composites. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 32, p. 597-604, 2016.

DUC, F., BOURBAN, P-E, MANSON, A. J. Dynamic mechanical properties of epoxy/flax fibre composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.v. 33(17), p.1625–1633, 2014.

ELHAJJAR, R. F., SHAMS, S. S. Compression testing of continuous fiber reinforced polymer composites with out-of-plane fiber waviness and circular Notches. *Polymer testing*, n. 35, p. 45-55, 2014.

FARHANA, N. I. E. *et. al.* A novel vibration based non-destructive testing for predicting glass fibre/matrix volume fraction in composites using a neural network model. *Composite Structures*, v. 144, p 69-107, 2016.

FERREIRA, J. M., CAPELA, C., MANAIAB, J., COSTA, J. D. Mechanical Properties of Woven Mat Jute/Epoxy Composites. *Materials Research*, v. 19 (3), p. 702-710, 2016.

GILMORE, C. M. Materials Science and Engineering Properties 1st. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013. Cap. 14, 711p.

GONCALVES, V. O. *et. al.* Resistencia ao cisalhamento losipescu em compósitos de fibras de carbono e de vidro com resina epóxi. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 1, n. 1, p. 49-53, 2009.

GRIFFIN, D. A. MALKIN, M. C. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2011-259, 2011, Florida, Lessons Learned from Recent Blade Failures: Primary Causes and Risk-Reducing Technologies, 2011, p. 1-9.

GROHAMAN, G. S. Assessing interlaminar shear stress-strain curves in tape composites based on the flat-plate torsion method. 2015, 51 f. Thesis (Master of Science in Aerospace Engineering) – University of Texas, Arlington, 2015.

GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Material, Process and System, 4th ed. John Wiley & Sons, 2010, 1012 p.

GUJJALA, R. OJHA, S. ACHARYA, SK. PAL, SK. Mechanical properties of woven jute–glass hybrid-reinforced epoxy composite. *Jornal of Composites Materials*, n. 48(28), p. 3445-3455, 2014.

GWEC Fonte: Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2015. Disponível em [www.gwec.net](http://www.gwec.net). Acesso em: 15 set. 2016.

GUTIÉRREZ, E., BONO, F. Review of industrial manufacturing capacity for fibre-reinforced polymers as prospective structural components in Shipping Containers: Approximate cost, production methods and market drivers. JRC Scientific and Policy Report. 2013. Disponível em [goo.gl/hNdtLP](http://goo.gl/hNdtLP). Acesso em: 28 abr. 2017.

HAAMEEM, M. J. A. *et. al.* Effects of water absorption on Napier grass fibre/polyester composites. *Composite Structures*, v. 144, p. 138–146, 2016.

HARRIS, B. *Engineering Composite Material*. 2ª Ed. London. IOM Communications, 1999. 317 p.

HASSAN, M. R. *et al.* Characterization of jute and glass fiber reinforced polyester based hybrid composite. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* n. 51, p. 81-88, 2016.

HOSSAIN, Md. R *et. al.* Tensile behavior of environment friendly jute epoxy laminated composites. *Procedia Engineering*, n. 56, p. 782-788, 2013.

HOSSAIN, Md. R., ISLAM, Md. A., VUUREA, A. V., VERPOEST, I. Tensile behavior of environment friendly jute epoxy laminated composite. *Procedia Engineering*, n. 56, p.782–788, 2015.

HOSOKAWA, M. N., DARROS, A. B., MORIS, V. A. S., PAIVA, J. M. F. Polyhydroxybutyrate Composites with Random Mats of Sisal and Coconut Fibers. *Materials Research*, v. 20, p. 279-290, 2017.

ISO527-4-97: Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, 1997.

ISO14126:99: Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of compressive properties in the in-plane direction, 1999.

ISO14130-97: Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method, 1997.

JOSHI, S. V., DRZAL, L. T., MOHANTY, A. K., ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites: Part A* 35, p. 371–376, 2004.

JUNIOR, J. H. S. A. *et. al.* Hybridization effect on the mechanical properties of curaua/glass fiber composites. *Composites: Part B*, n. 55, p.492–497, 2013.

JUNIOR, J. H. S. A. *et. al.* Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. *Materials and Design*, n. 65, p.789–795, 2015

KALANTARI, M. DONG, C. DAVIES, I. J. Numerical investigation of the hybridisation mechanism in fibre reinforced hybrid composites subjected to flexural load. *Composites Part B*, n.102, p. 100-111, 2016.

KHAM, J. A., KHAM, M. A. *Biofiber Reinforcements in Composite Materials. The use of jute as reinforcements in composites.* 1st. Ed. Cambridge, Woodhead Publishing, 2014. Part 1, Cap 1, p. 3-29.

KHASHABA, U. A. In-plane shear properties of cross-ply composite laminates with different off-axis angles. *Composite Structures*, n. 65(2), p. 167-177, 2004.

KIM, Jang-Kyo. MAI, Yiu-Wing. *Engineered interfaces in fiber reinforced composites.* 1st. Oxford ed. ELSEVIER SCIENCE Ltd, 1988, 401 p.

KNOPS, M. *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates:* The Theory of Alfred Puck. New York: Springer, 2008.

KOMURIAH, N., KUMAR, S., PRASAD, D. Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties. *Mechanics of Composite Materials*, v. 50, n. 3, p. 509-528, 2014.

KORONIS, G., SILVA, A., FONTUL, M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites: Part B*. n. 44, p. 120–127, 2013.

KU, H. WANG, H. PATTARACHAIYAKOOP, N. TRADA, M A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part B* 42, p. 856–873, 2011.

KUMAR, S., PRASAD, L. PATEL, V. K. Effect of Hybridization of Glass/kevlar Fiber on Mechanical Properties of Bast Reinforced Polymer Composites: A Review. American Journal of Polymer Science & Engineering, n. 5, p.13-23, 2017.

KYRIAKIDES, S. et. al. On compressive failure of fiber reinforced composites. Int.J. Solids Structures, v. 32, n. 6/7, p. 689-738, 1995.

LEE, S. H., WAAS, A. M. Compressive response and failure of fiber reinforced. International Journal of Fracture, n. 100, p. 275-306, 1999.

LEZZI, P. J. SEAMAN, J. H., TOMOZAWA, M. Strengthening of E-glass fibers by surface stress relaxation. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 402, p. 116-127, 2014

LI, Y. LI, Q. MA, H. The voids formation mechanisms and their effects on the mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 72, p.40-48, 2015

LIEBIG *et. al.* Influence of voids on the compressive failure behaviour of fibre-reinforced composites. Composites Science and Technology, v. 117, p. 225-233, 2015.

LIPKE, U. HAVERKAMP, J. B. ZAPF, T. LIPPERHEIDE, C. Matrix effect on leaching of Bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) from epoxy resin based inner lacquer of aluminium tubes into semi-solid dosage forms. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, v 101, p. 1-8, 2016.

LOPES, I. A. F. Estudo do Processo de Infusão a Vácuo de Materiais: Produção de tampa de bagageira para autocarro. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2009.

MA, S., LIU, X., ZHU, J. Research Progress on Bio-based Thermosetting Resins. Polymer International, n. 65, p.164–17, 2016.

MAGNUSSEN, C. J. A fabric deformation methodology for the automation of fiber reinforced polymer composite manufacturing. 2011. 44 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Iowa State University Ames, Iowa, 2011.

MALLICK, P. K. Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, 616 p.

MANSOR, M.R. *et. al.* Hybrid natural and glass fibers reinforced polymer composites material selection using Analytical Hierarchy Process for automotive brake lever design. Materials and Design. v. 51, p. 484–492, 2013.

MANTEGHI, S. *et. al.* Investigation of the mechanical properties and failure modes of hybrid natural fiber composites for potential bone fracture fixation plates. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, n. 65, p. 306-316, 2017.

MARGEM, F. M. et. al. The dynamic-mechanical behavior of epoxy matrix composites reinforced with ramie fibers. *Revista Matéria*, v. 15, n. 2, p. 167-171, 2010.

MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos*. 1ª Ed. São Paulo. Artiber, 2011. 333 p.

MASUELLI, M. A. *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*. Disponível em <http://www.intechopen.com/book/fiber-reinforced-polymer-the-technology-applied-for-concrete-repair>. Acesso em 15 ago. 2015.

MARSH, G. Next Step for Automotive Materials. *Materialstoday*. 2003. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103004292>. Acesso em 07 de Janeiro de 2016.

MARTINEZ, C. B., Estudo da Influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de produção de resina. 2011. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2011.

MAZUMDAR, S., KARTHIKEVAN, D., PICHLER, D., BENEVENTO, M., FRASSINE, R. State of the Composites Industry Report for 2017. Disponível em: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/composites-industry-report-2017/>. Acesso em: 06 de Janeiro de 2017

MITTAL, V. SAINI, R. SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites e A review. *Composites Part B* n. 99, p.425-435, 2016.

MOHANTY, A. K., MISRA, M. DZAL, L. T. Sustainable Bio-Composites From Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World”, *Journal of Polymers and the Environment*, v.10, Issue 1, 2002.

MOBASHER, B. Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites. Boca Raton: CRC Press, 2011, 473 p.

MORTAZAVIAN, S. FATEMI, A. Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part B*, n 72, p. 116-129, 2015.

MUSTATA, F. TUDORACHI, N. BICU, I. The kinetic study and thermal characterization of epoxy resins crosslinked with amino carboxylic acids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, n. 112, p.180–191, 2015.

MUTHUVEL, M., RANGANATH, G. JANAETHANAN, K., SRINIVASAN, K., Characterization Study of Jute and Glass Fiber Reinforced Hybrid Composite Material. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Disponível em [goo.gl/F6vU3J](http://goo.gl/F6vU3J). Acesso em 02 de agosto de 2015.

NAJAFI, M., ESLAMI-FRASANI, R. KHALILI S. M. R. Comparison of Compressive Properties Between Vacuum Infusion and Hand Lay-Up Method Toward Balsa Core

Sandwich Composites. *Journal of Mechanical Research and Application*, v. 4, n. 2, p. 33-40, 2012.

NASSEH, J. A Lei de Hooke e a teoria da elasticidade de Thomas Young aplicada aos materiais compósitos. In: 1ª Semana de Compósitos Avançados SAMPE. São Jose dos Campos, 2015.

NOSSA, T. S. Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de carbono, aramida e vidro. 2011. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba, 2011.

OMRANI, E. MENEZES, P. L. ROHATGI, P.K. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, n. 19 717–736, 2016.

ONUAGULUCHI, O., BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, n. 68, p.96-108, 2016.

OPELT, C.V., PAIVA, J.M.F., CÂNDIDO, G. M., REZENDE, M. C. A fractographic study on the effects of hygrothermal conditioning on carbon fiber/epoxy laminates submitted to axial compression. *Engineering Failure Analysis*, v. 79, p. 342-350, 2017.

ORNAGHI, H. L. Jr. *et al.* Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Hybrid Composites Molded by Resin Transfer Molding. Wiley InterScience, 2010. Disponível em [goo.gl/wC0PnS](http://goo.gl/wC0PnS). Acesso em mar. 2017.

PAIVA, J. M. F., CANDIDO, G. M., MAYER, S., REZENDE, M. C. Avaliação da Temperatura de Transição Vítrea de Compósitos Poliméricos Reparados de Uso Aeronáutico. *Polímeros*, v. 16, p. 79-87, 2006.

PAIVA, J. M. F., FROLLINI, E., TRINDADE, W. G. Compósitos de Matriz Termofixa Fenólica Reforçada com Fibras Vegetais. *Polímeros*, São Carlos, v. 4, p. 170-176, 1999.

PAIVA, J. M. F., SANTOS, A. D. N., REZENDE, M. C. Mechanical and Morphological Characterizations of Carbon Fiber Fabric Reinforced Epoxy Composites Used in Aeronautical Field. *Materials Research*, v. 12, p. 367-374, 2009.

PANOSSO, G. B. Análise de critério de falha baseado em fenômenos físicos para materiais compósitos laminados. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

PARDINI, L.C., NETO, F. L. *Compósitos Estruturais*. 1ª Ed. São Paulo. Edgard Blücher Ltda, 2006. 313 p.

PAPADAKIS, N. RAMIREZ, C. REYNOLDS, N. Designing Wind turbine blades for disposal, recycle or reuse. In: GOODSHIP, V. Management, Recycling and Reuse of Waste Composites. 1st. Ed. Cambridge, Boca Raton: Woodhead Publishing Ltd, 2010. Cap. 16, p. 443-457.

PIRES, E. N. Efeito do Tratamento de Superfície de Fibra de Juta no Comportamento Mecânico de compósito de Matriz Epóxi. 2009, 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PONÍŽIL, T. Experimental comparison of shear properties of FRP measured by astm methods. 2015, 48 f. Thesis (Bachelor in Mechanical Engineering) – Brno University of Technology, Brno, 2015.

POUSTKOV, I. et. Al. Stability of bisphenol A diglycidyl ether and bisphenol F diglycidyl ether in water-based food simulants. *Eur Food Res Technol*, n. 219, p. 534-539, 2004.

PRABHAKAR, P., WASS, A. M., RAVEENDRA, R. S. The Interaction of Failure Modes in the Compression Response and Failure of Laminated Composites. *Structure Structural Dynamics and Materials Conference*, n. 23, 2012. Disponível em <https://goo.gl/5vGLwS>. Acesso em: 17 dez. 2015.

RAMESH, M. PALANIKUMAR, K., REDDY, H. K. Comparative Evaluation on Properties of Hybrid Glass Fiber- Sisal/Jute Reinforced Epoxy Composites. *Procedia Engineering*, Ahmedabad. v. 2, p. 745-750, 2013.

RATNA, D. Handbook of Thermoset Resins. Shrewsbury: Shawbury iSmithers, 2009. 424 p.

REZENDE, M. C., COSTA, M. L., BOTELHO, E.C. *Compósitos Estruturais*. 1ª Ed. São Paulo. Artiliber, 2011. 396 p.

RIDDLE, T. W. NELSON, J. W. CAIRNS, D.S. Effect of Defects in Composites Wind Turbine Blade: Round 2. Sandia Report, Sand 2012-8111, 2012.

RIOS, A. S. Estudo do envelhecimento acelerado de materiais compósitos revestidos com poliuretano aplicados em aerogeradores . 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, 2012.

ROMANZINI, D. *et. al.* Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites. *Materials and Design*, n. 47, p.9-15, 2013.

SABA, N., PARIDAH, M. T., JAWAID, M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. *Construction and Building Materials*, n.76, p. 87–96, 2015.

SANJAY, M. R. ARPHITA, G. R. YOGESHA. B. Study on Mechanical Properties of Natural - Glass Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. *Material Today, Karnataka*, v. 2, p. 2959-2967, 2015.

SANTA, J. F. VANEGAS-JARAMILLO, J. D. PATIÑO, I. D. Mechanical Characterization of Composites Manufactured by RTM Process: Effect of Fiber Content, Strain Rate and Orientation. *Latin American Journal of Solids and Structures*. n. 13. p. 344-364, 2016

SHAH, D. U. Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. *Springer*. v. 48, p. 6083-6107. 2013

SHAH, D. U, SCHUBEL, P. J., CLIFFORD, M. J. Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *Elsevier Composites: Part B*. n. 52, p. 172–181, 2013.

SHARBA, M. J. *et. al.* Partial Replacement of Glass Fiber by Woven Kenaf in Hybrid Composites and its Effect on Monotonic and Fatigue Properties. *Bio Resources*, n 11(1), p. 2665-2683, 2016.

SHARMA, R. S., ASHIK, K. P. A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, n.3, p. 420-426, 2015.

SILVA, H. S. P. Desenvolvimento de compósitos Polimérico com Fibra de Curauá e Híbrido com Fibra de Vidro. 2010, 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

SOUZA, J. P. B, REIS, J. M. L. Thermal behavior of DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) adhesives and its influence on the strength of joints. *Springer*, 2013. Disponível em <http://www.appliedadhesionscience.com/content/1/1/6>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SPERANZINI, E. AGNETTI, S. CORRADI, M. Experimental analysis of adhesion phenomena in fibre-reinforced glass structures. *Composites Part B: Engineering*. V. 101, p. 155-166, 2016.

SWOLFS, Y. GORBATIKH, L. VERPOES, I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 67, p. 181-200, 2014.

TACK, J. L., FORD, D. M. Thermodynamic and mechanical properties of epoxy resin DGEBF crosslinked with DETDA by molecular dynamics. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, n. 26, p.1269–1275, 2008.

TAMBYRAJAH, D. Indulge and Explore Natural Fiber Composites: a invitation to product designers. *NFC Design Platform, The Netherland*, 2015. 242 p.

TIWARI, A. RAJ, B. Reactions and Mechanisms in Thermal Analysis of Advanced Materials Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction. 2nd. ed. New York: CRC Press, 2015, 616 p.

TOTRY, E. *et al.* Effect of fiber, matrix and interface properties on the in-plane shear deformation of carbon-fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology*, n. 70, p. 970–980, 2010.

TRINDADE, W. G., PAIVA, J. M. F., LEÃO, A. L., FROLLINI, E. Ionized Air Treated Curaua fibers as Reinforcement for Phenolic Matrices. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 293, p. 521-528, 2008.

TURCSAN, T. MESZAROS, L. Mechanical performance of hybrid thermoset composites: Effects of matrix and reinforcement hybridization. *Composites Science and Technology*, v., 22, p. 32–39, 2017.

VALLITTU, P. K. High-aspect ratio fillers: Fiber-reinforced composites and their anisotropic properties. *Dental Materials*, n. 31, p. 1-7, 2015.

VERMA, K. K. *et. al.* Development of Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERITy) Process for Manufacturing of Primary Aircraft Structures. *Journal of the Indian Institute of Science*, v. 93:4, 2013.

VILCHEZ, J. L. *et. Al.* Determination of trace amounts of bisphenol F, bisphenol A and their diglycidyl ethers in wastewater by gas chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, n. 431, p. 31-40, 2001

WALLENBERGER, F. T., BINGHAM, P. A. Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications. New York: Springer, 2010. p. 473.

WALLENBERGER, F. T., WATSON, J. C., LI. H. Glass Fibers. ASM International. ASM Handbook, v. 21: Composites, 2001. Disponível em [goo.gl/J8qb21](http://goo.gl/J8qb21). Acesso em 22 jan. 2017.

WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, n. 63, p. 1259-1264, 2003.

WENBIN, L. *et. al.* A novel preparation approach for improving the mechanical and wet tribological properties of carbon fabric/phenolic composites. *Materials and Design*, n. 103, p.356-364, 2016.

XIA, L., ZUO, L. ZHA, S., JIANG, S., GUAN, R., LU, D. Kinetic research on low-temperature cure of epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v 50, p. 255-264, 2014.

YANG, B. *et. al.* Bending, compression, and shear behavior of woven glass fiber-epoxy composites. *Composites part B*, n. 312, p. 715-721, 2000.

YURDAKUL, A. GUNKAYA, G., DOLEKCEKIC, E., KAVAS, T. KARASU, B. Novel glass compositions for fiber drawing. *Ceramics International*, n.41, p.13105–13114, 2015.

ZHANG, Y. LI, Y. MA, H. TAO, Y. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Composites Science and Technology*. Shanghai, n. 88, p 172-177, 2013.

ZHU, J. WANG, J. ZU, L. Influence of out-of-plane ply waviness on elastic properties of composite laminates under uniaxial loading. *Composite Structures*, v. 132, p. 440-450, 2015.

## ANEXO - A

## CURVAS DE DSC

Figura 1 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel híbrido 19 (H0/90).

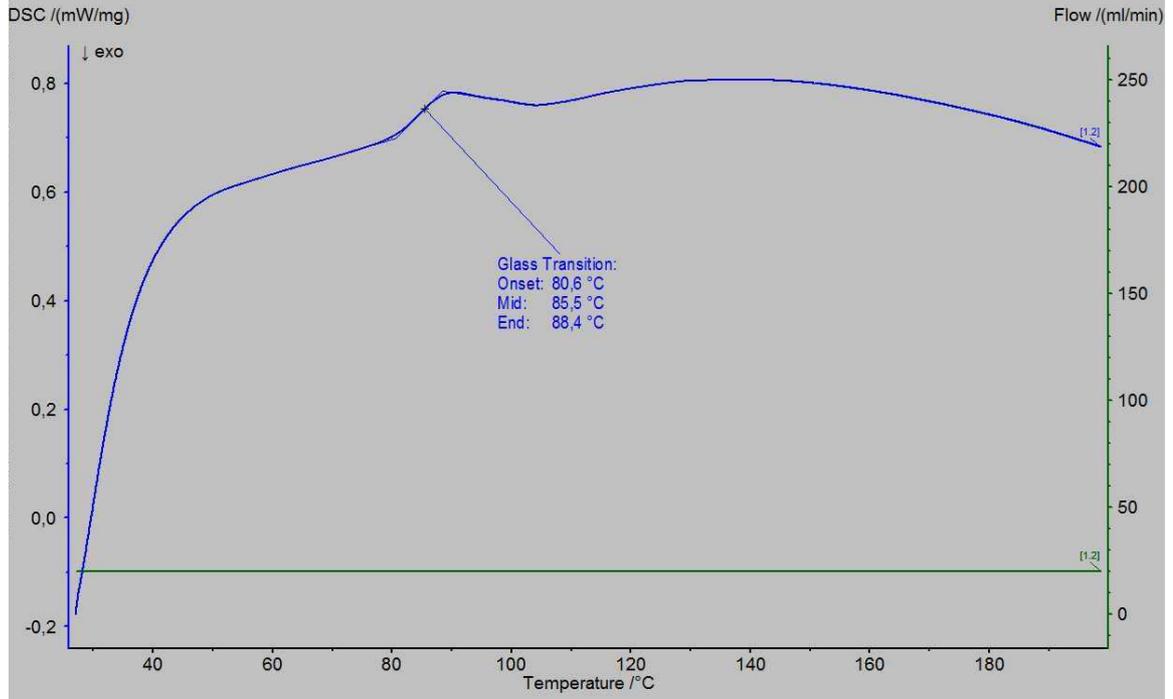


Figura 2 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel híbrido 20 (H45).

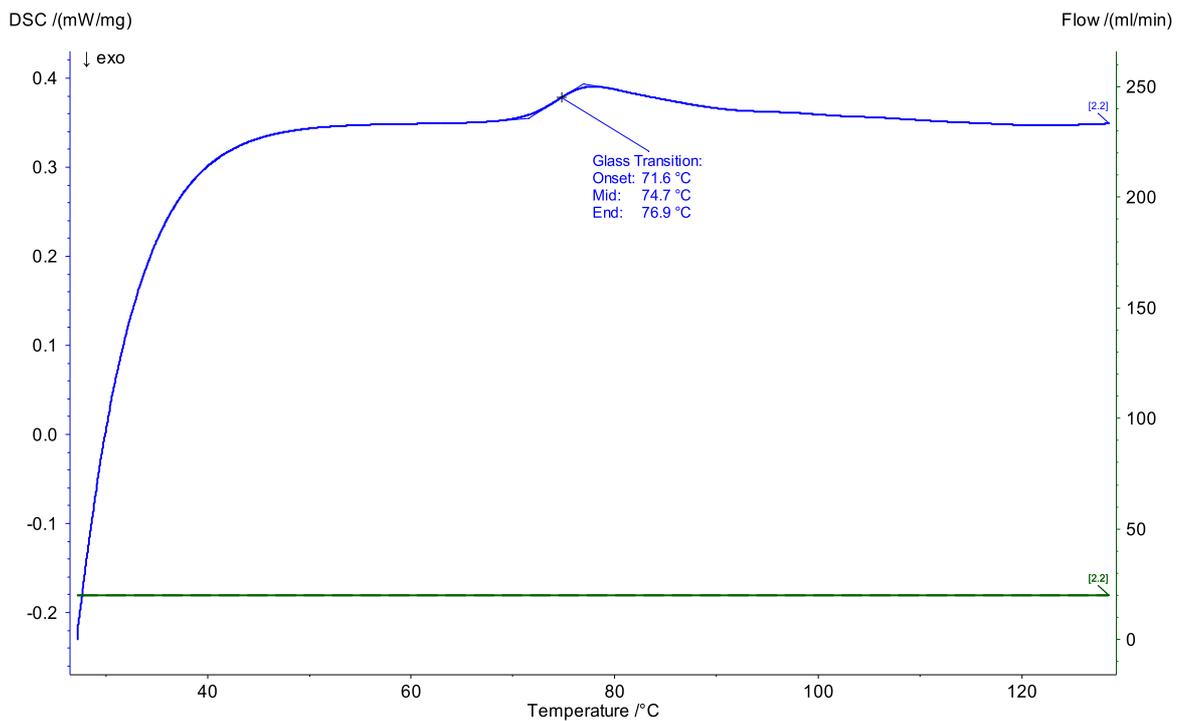


Figura 3 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel híbrido 21(H45//0/90).

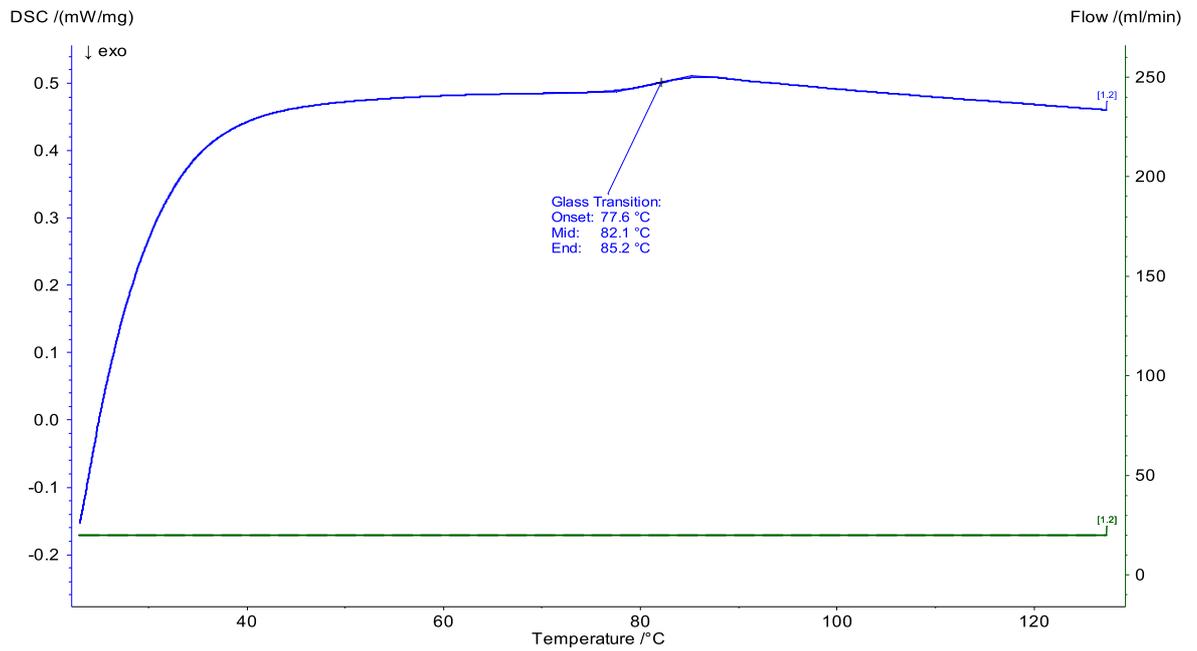


Figura 4 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel com 2 camadas de Biax (F. Vidro 2c).

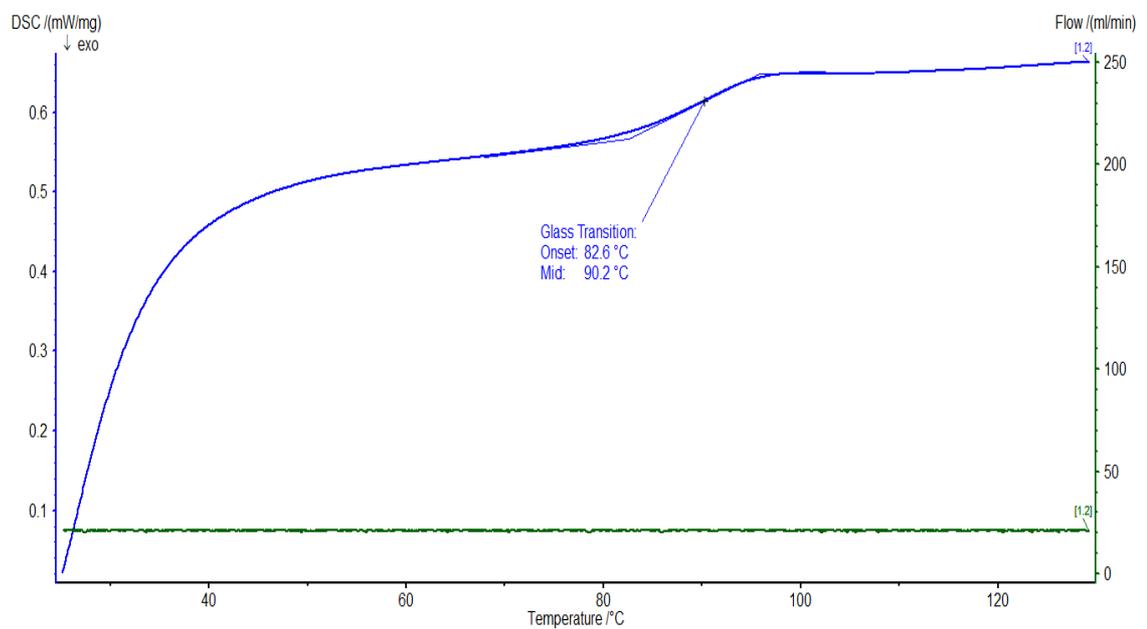
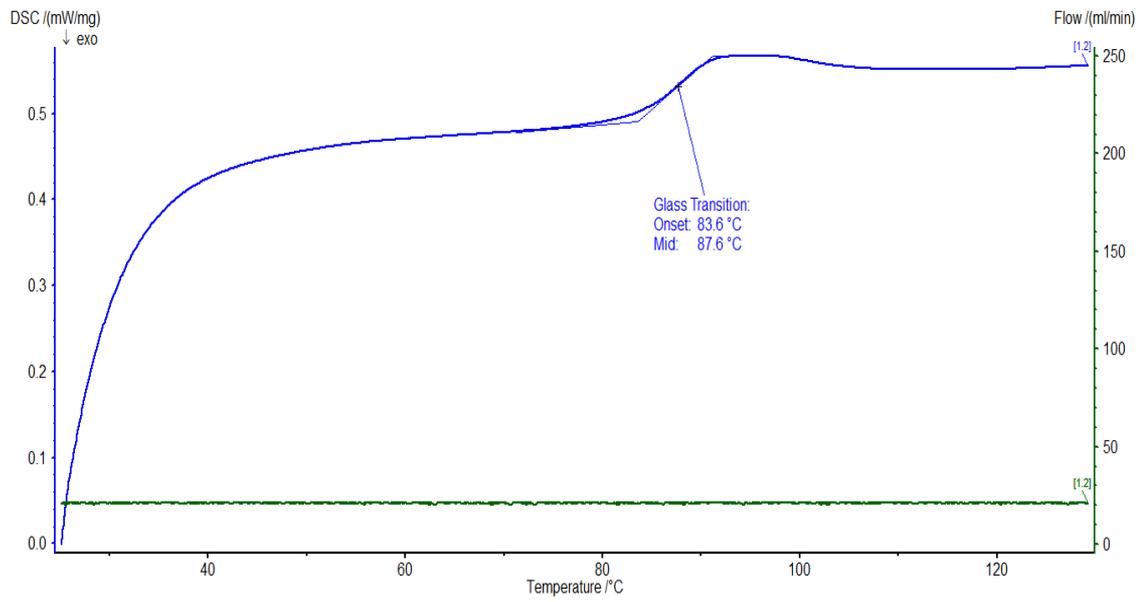


Figura 5 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel com 5 camadas de Biax (F. Vidro 5C).



## ANEXO - B

### CURVAS DE DMA

Figura 1 – Curva de DMA da amostra de laminado teste.

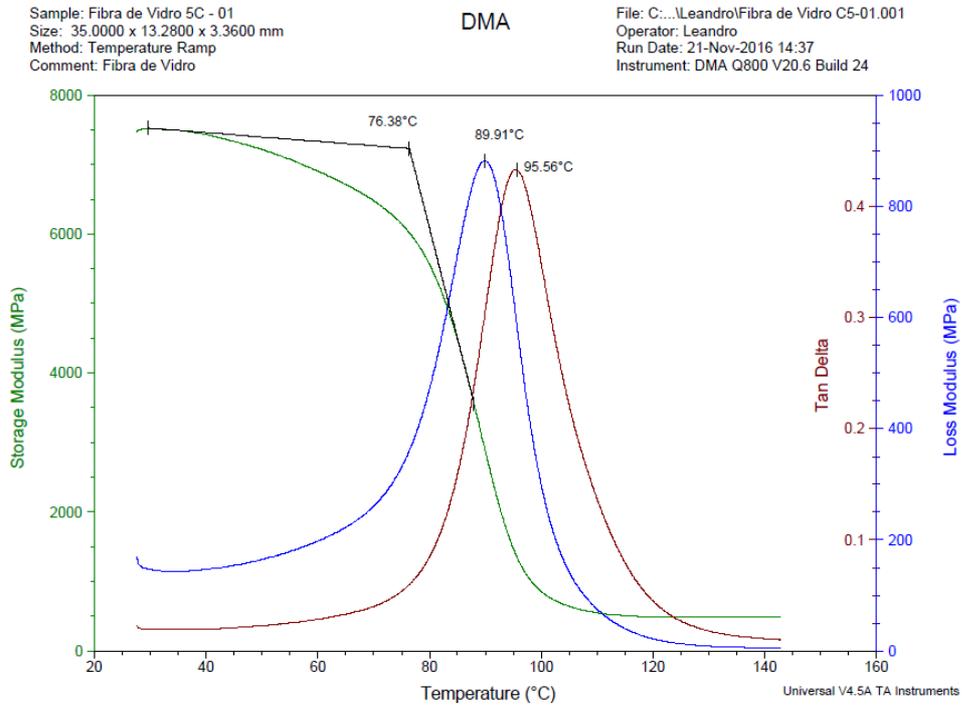


Figura 2 – Curva de DMA da amostra de laminado do painel híbrido 19 (H0/90).

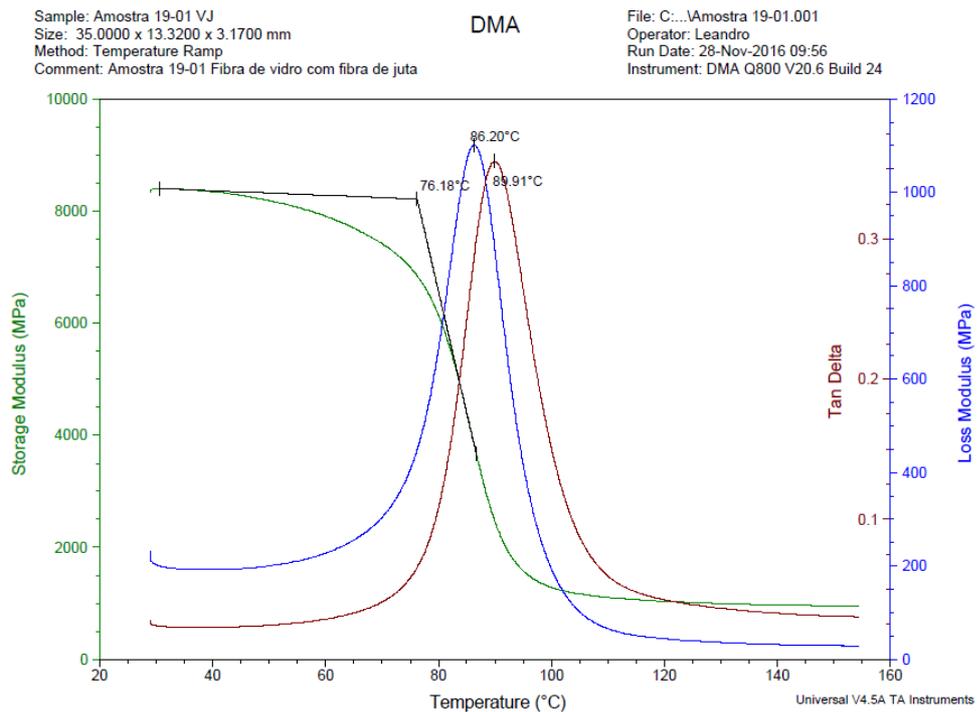


Figura 3 – Curva de DMA da amostra de laminado do painel híbrido 20 (H45).

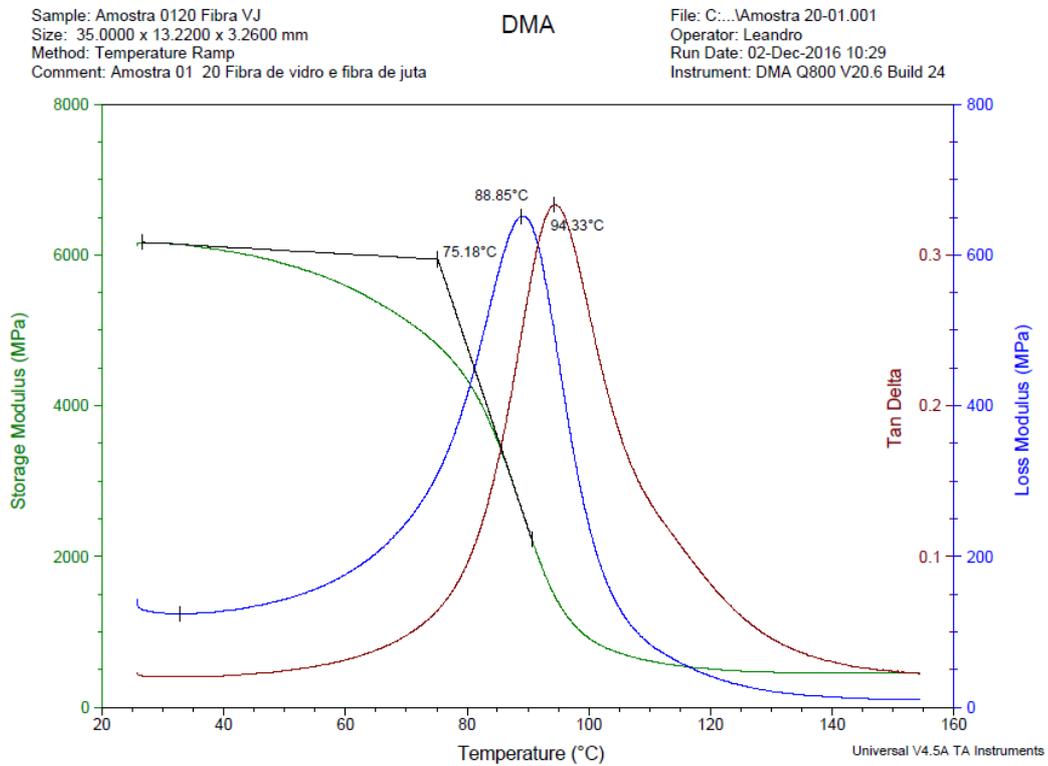


Figura 4 – Curva de DMA da amostra de laminado do painel híbrido 21(H45//0/90).

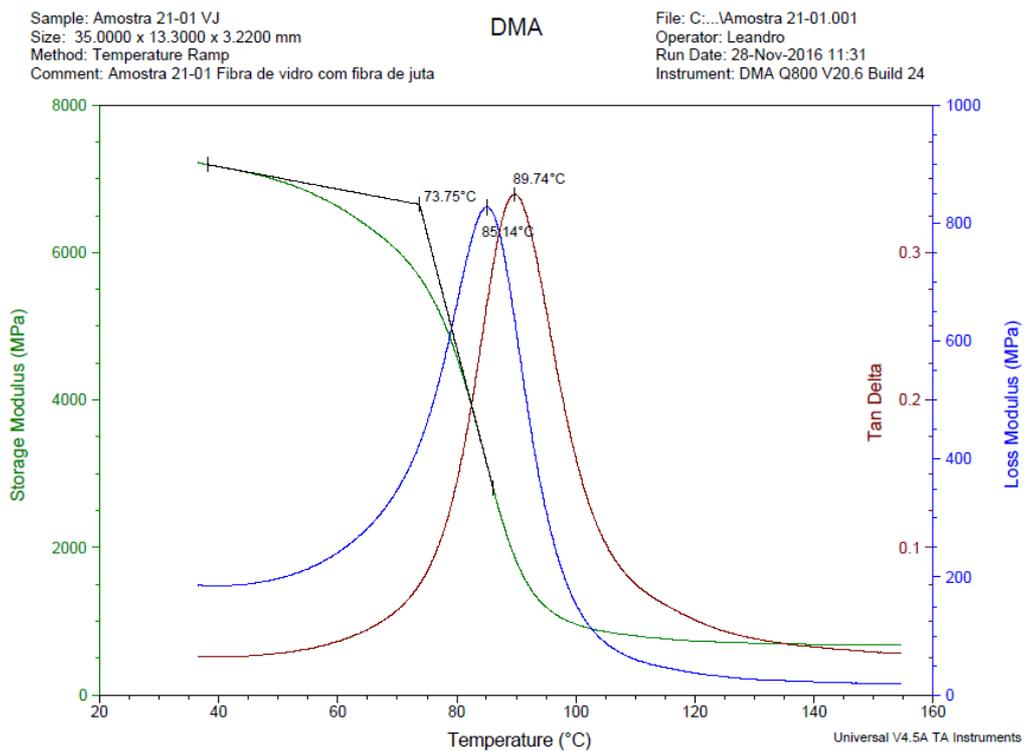


Figura 5 – Curva de DMA da amostra de laminado do painel com 2 camadas de Biax (F. Vidro 2c).

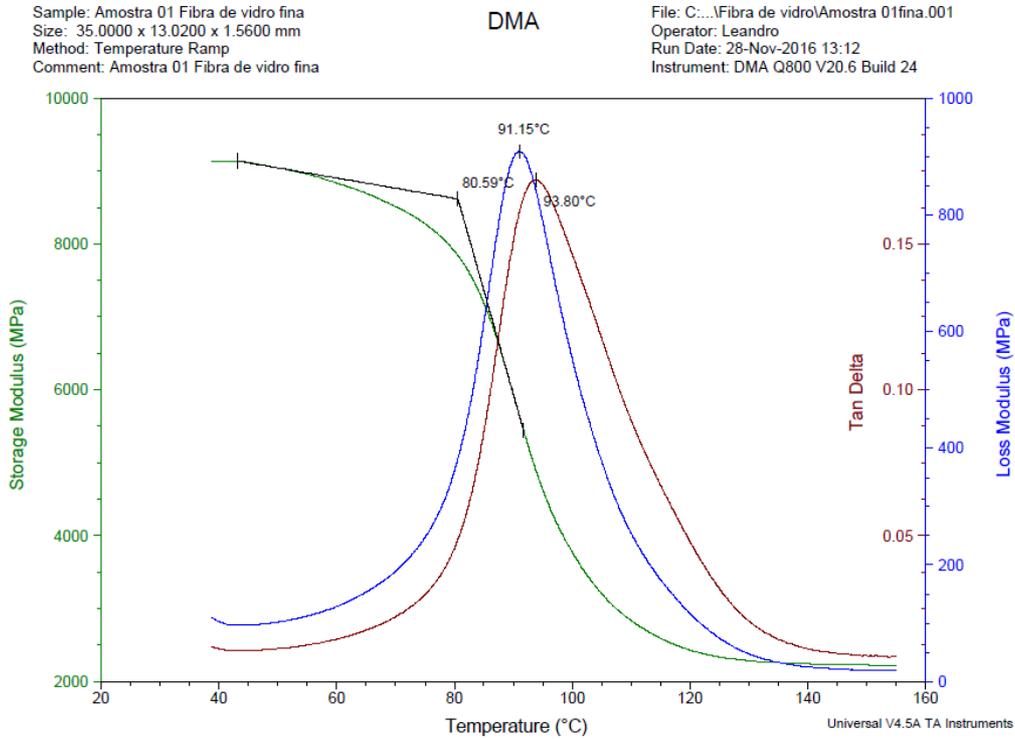
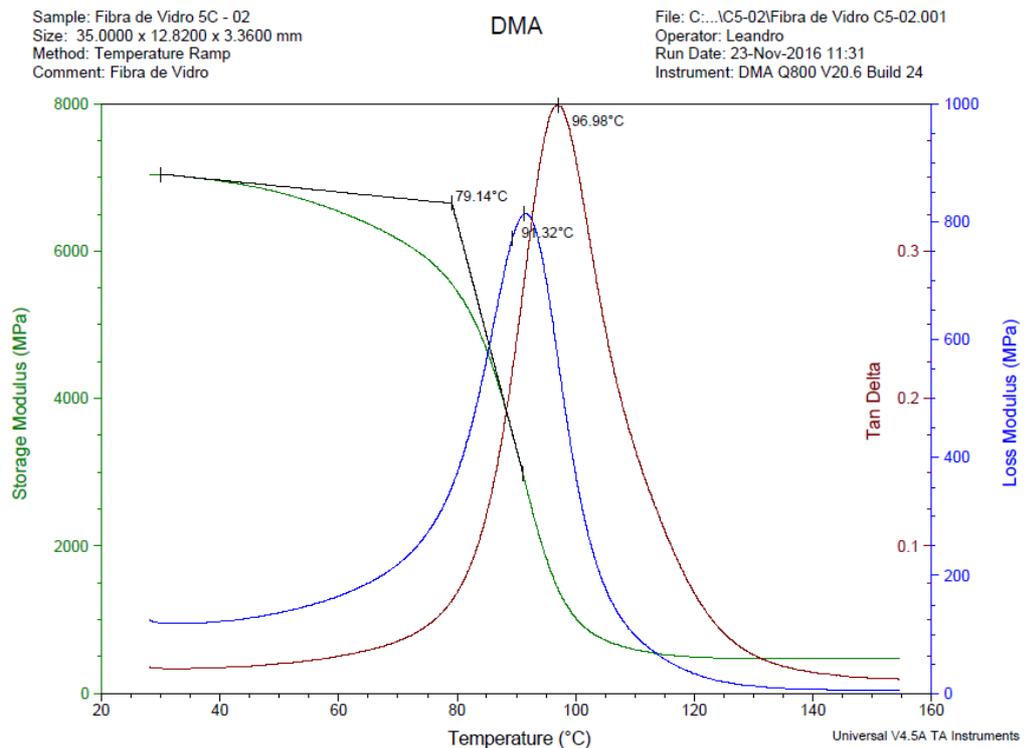


Figura 5 – Curva de DSC da amostra de laminado do painel com 5 camadas de Biax (F. Vidro 5c).



## ANEXO - C

## FICHA TÉCNICA DOS MATERIAIS

Figura 1 – Ficha Técnica do tecido Biax 989g/m<sup>2</sup> da fabricante Owens Corning (Brasil).



## PRODUCT INFORMATION

## PRODUCT NAME

DB-1000 SE-1500 / 127 CM

## WEIGHT UNIFORMITY (G/M2)

0°	66TEX/EC9 - 3 G/M2
90°	300TEX/SE-1500 - 30 G/M2
+45°	600TEX/SE-1500 - 475 G/M2
-45°	600TEX/SE-1500 - 475 G/M2

## CS

KNIT YARN PES 7.5 TEX - 6 G/M2 - CHAIN STITCH - GAUGE 5

TOTAL WEIGHT 989 G/M2

## STANDARD ROLL

LENGTH (M)	100
WEIGHT (KG)	126
WIDTH (MM)	1270

## PRODUCT CERTIFICATES

DNV	NO
LLOYD	NO

**OWENS CORNING FIBERGLAS  
ESPAÑA, S.A.**  
P.O. BOX 34  
C-55, Km. 20  
E-08295  
SANT VICENÇ DE CASTELLET –  
BARCELONA SPAIN  
+34.93.833.38.05

**OWENS CORNING LATIN AMERICA**  
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS,  
17.891-30. AND.  
CEP – 04795-100  
SÃO PAULO, BRAZIL  
55.11.5514.7900

**EUROPEAN OWENS CORNING  
FIBERGLAS S.A.**  
CHAUSSÉE DE LA HULPE, 166  
B-1170 BRUSSELS  
BELGIUM  
32.2.674.92.11

**OWENS CORNING  
WORLD HEADQUARTERS**  
ONE OWENS CORNING PARKWAY  
TOLEDO, OHIO 43659  
1.800.GET.PINK  
[www.owenscorning.com/composites](http://www.owenscorning.com/composites)

**OWENS CORNING ASIA/PACIFIC**  
HANOI BUILDING 3F  
1-2-9 SHIKAKOEN, MINATO-KU  
TOKYO, 105-0011 – JAPAN  
81.3.5733.1671



## COMPOSITE SOLUTIONS

INNOVATIONS FOR LIVING™

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

March 2004 Copyright© 2004 Owens Corning

Figura 2 – Ficha Técnica do tecido Biax 800g/m<sup>2</sup> da fabricante Owens Corning (Brasil).

## Technical Fabrics



OCV Fabrics Rio Claro Rod Washington Luiz, Km171, Cond Cidade Azul Rio Claro São Paulo 13501-600  
SAC Phone: 0800 707 3312 Fax: +55 19 3535 9332

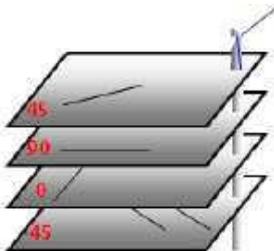
**Especificação do Produto**

**BX0830/05C02**

**DB830**

**Date: 24-Mar-2016**

**Revision: 2L**



Nome da camada	1	2	3	4	5
Direção da fibra	(+45°)	(90°)	(0°)	(-45°)	Fio de costura
Calculada G/M <sup>2</sup>	394 +/-20	24 +/- 2	2 +/- 1	394 +/-20	8 +/-4
Fios / cm	4.72	0.79	0.22	4.72	1.97
Peso do fio (TEX)	600	300	100	600	7
Material	Advantex® Glass Fibers	Advantex® Glass Fibers	Advantex® Glass Fibers	Advantex® Glass Fibers	PES
Fabricante	OC_RC	OC_RC	OC_RC	OC_RC	RC_01
Diâmetro de Filamento	16-17 µ	16-17 µ	13 µ	16-17 µ	
Compatibilidade do Sizing	EP	EP	EP	EP	
Tipo do Sizing	SE1500	SE1500	SE1500	SE1500	-

Gramagem Total Calculada (g/m<sup>2</sup>) 830 +/-42 g/m<sup>2</sup>

Tipo da Costura Chain

Pontos Costura/ cm 3.45

Figura 3 – Ficha Técnica da resina e endurecedor da fabricante Hexion (Alemanha).

<b>HEXION™</b> Specialty Chemicals	<b>Technical Information</b> Epoxy and Phenolic Resins Division Epoxy Resins	2.1-3
	<b>EPIKOTE™ Resin MGS® RIM 135</b>	

		Infusion resin RIM 135
Density	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,13 - 1,17
Viscosity	[mPas]	700 - 1.100
Epoxy equivalent	[g/equivalent]	166 - 185
Epoxy value	[equivalent /100g]	0,54 - 0,60
Refractory index		1,548-1,552

### Specifications

Measuring conditions:  
 measured at 25 °C / 77 °F

		Hardener RIMH 134	Hardener RIMH 137
Density	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,93 - 1,00	0,93 - 0,98
Viscosity	[mPas]	10 - 80	10 - 50
Amine value	[mg KOH/g]	550 - 700	400 - 600
Refractoy index		1,4900 - 1,5000	1,460 - 1,463

Measuring conditions:  
 measured at 25 °C / 77 °F

## EPIKOTE™ Resin MGS® RIM 135

	Infusion resin RIM 135	Hardeners RIMH 134-137
Average EP - Value	0,56	-
Average amine equivalent	-	52

## Processing details

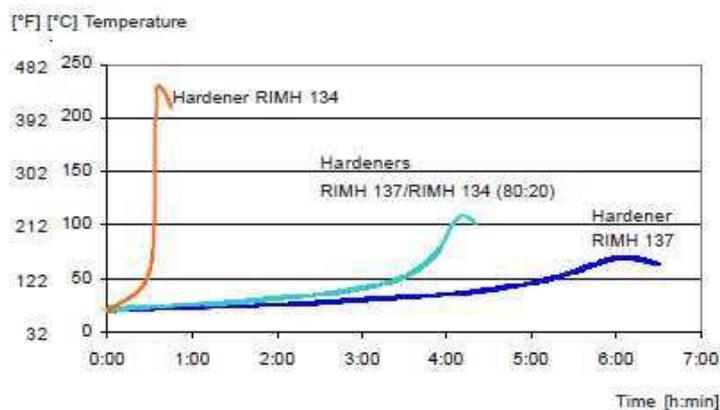
	Infusion resin RIM 135 : Hardener RIMH 134 - RIMH 137
By weight	100 : 30 ± 2
By volume	100 : 36 ± 2

## Mixing ratios

The specified mixing ratios must be observed as exactly as possible. Adding more or less hardener will not effect a faster or slower reaction - but in incomplete curing which cannot be corrected in any way.

Resin and hardener must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container.

## EPIKOTE™ Resin MGS® RIM 135



## Temperature development

Quantity: 100 g / 20 °C (77 °F)

The optimum processing temperature is in the range between 20 °C and 25 °C (68-77 °F). Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10 °C (50 °F) will halve the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fillers) causes an acceleration of the resin/hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the hardened product.

Do not mix large quantities - particularly of highly reactive systems - at elevated processing temperatures. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will heat up fast because of the dissipating reaction heat (exothermic resin-hardener reaction). This can result in temperatures of more than 200 °C (392 °F) in the mixing container, which may cause smoke-intensive burning of the resin mass.

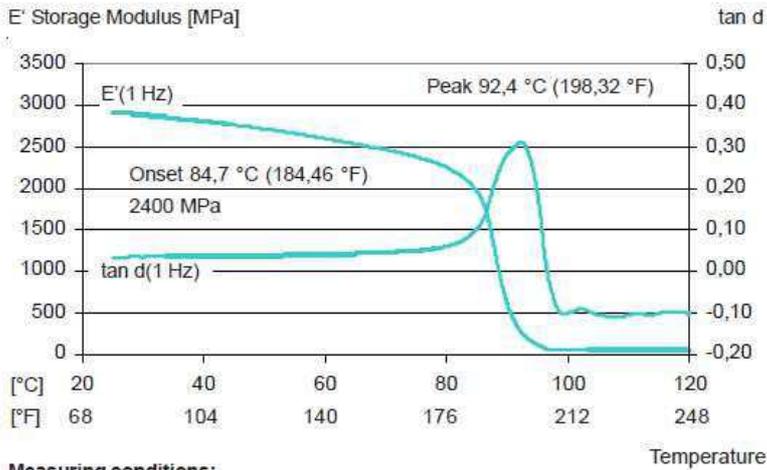
**EPIKOTE™ Resin MGS® RIM 135**

**DMA Measuring after heat treatment**

**DMA**

DMA-T<sub>g</sub> (peak) tan delta

Infusion resin RIM 135 with mixture of Hardeners RIMH 137 (80 %) /RIMH 134 (20 %)



**Measuring conditions:**  
Sample thickness: 2 mm  
Heat rate: 2 K/min

HEXION SPECIALTY CHEMICALS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING ANY PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION SPECIALTY CHEMICALS, except that the product shall conform to contracted specifications; and that the product does not infringe any valid United States patent. The information provided herein was believed by Hexion Specialty Chemicals to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable; but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use.

Am Ostkai 21/22  
70327 Stuttgart  
Germany  
Phone: +49 (0) 711 - 3 89 80 00  
Fax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011  
www.hexionchem.com

August, 2006

May, 2006