

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Gabriel Norcia e Targa

**COMPÓSITO REFORÇADO POR LAMINADO DE BAMBU  
COM MATRIZ DE POLIURETANO E EPÓXI:  
DESENVOLVIMENTO, PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
MECÂNICA**

Florianópolis

2011



Gabriel Norcia e Targa

**COMPÓSITO REFORÇADO POR LAMINADO DE BAMBU  
COM MATRIZ DE POLIURETANO E EPÓXI:  
DESENVOLVIMENTO, PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
MECÂNICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de mestre em Engenharia de Materiais  
Orientador: Prof. Dr. Guilherme M. de O. Barra  
Co-orientador: Prof. Ph.D. Hazim Ali Al-Qureshi

Florianópolis

2011



Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>

Gabriel Norcia e Targa

**COMPÓSITO REFORÇADO POR LAMINADO DE BAMBU  
COM MATRIZ DE POLIURETANO E EPÓXI:  
DESENVOLVIMENTO, PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
MECÂNICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Materiais” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 16 de Setembro de 2011.

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira,  
Coordenador PGMAT

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Guilherme M. de O. Barra,  
Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dachamir Hotza, Dr. Ing.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr. Ing.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Cláudia Sayer, Dr. Eng.  
Membro Externo  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho a minha família,  
Celina, Heitor e Marina.

A meu orientador Prof. Dr. Guilherme  
M. de O. Barra.





## AGRADECIMENTOS

A meu orientador Prof. Dr. Guilherme M. de O. Barra, pelo apoio, confiança, dedicação, autonomia e amizade despendidos ao longo de todo o trabalho.

Aos colegas de laboratório, Bruna Rosa, Daliana Müller, Jaqueline Mandelli, Karine Käfer, Luiz Gustavo Ecco, Nilda Martins, Sílvia Ramôa, Tiago Cardoso, pela amizade, boa convivência e companheirismo.

Ao Sr. Nicolau Palm pelo fornecimento dos colmos de bambu, pelo apoio e pela troca de idéias.

A meu co-orientador Prof. Hazim Ali Al-Qureshi pela ajuda na parte teórica das fibras.

Aos companheiros da equipe Baja/SAE UFSC pelo convívio e ajuda na oficina.

Aos técnicos e funcionários dos laboratórios Labsolda/UFSC e Usicon/UFSC pela ajuda.

Ao Sr. Thomas da empresa Aço e Widea, que gentilmente doou a faca de desempenho utilizada na extração dos laminados.

Aos professores: Prof. Dr. Waldir Soldi e Prof. Dr. Alfredo Tibúrcio do Departamento de Química da UFSC por disponibilizarem os equipamentos de seu laboratório.

A Marly Soldi pela ajuda e confiança despendidos em seu laboratório.

Ao Sr. Donizete da empresa Imperveg pela doação da resina poliuretano.

Aos colegas da Associação Catarinense do Bambu – BambuSC, pelo espaço de divulgação, pelas discussões e pelas sugestões: Eng. Marcos Marques, Sr. Hans J. Kleine, Eng. Thiago Grecco, Marcelo Venturi.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Eng. de Materiais PGMAT/UFSC e ao CNPQ/MCT pela bolsa recebida e pela oportunidade de pesquisa concedidos.



*Depois de plantada esta incrível gramínea, durante quatro anos, não se vê nada, absolutamente nada, exceto o lento desabrochar de um diminuto bulbo. Durante esses quatro anos, todo o crescimento é subterrâneo, numa maciça e fibrosa estrutura de raiz, que se estende vertical e horizontalmente pela terra. No entanto, no quinto ano, o bambu chinês cresce, até atingir 24 metros. Um sábio escreveu: “Muitas coisas na vida (pessoal e profissional) são iguais ao bambu chinês. Você trabalha, investe tempo e esforço, faz tudo o que pode para nutrir seu crescimento, e às vezes não se vê nada por semanas, meses ou mesmo anos. Mas, se tiver paciência para continuar trabalhando e nutrindo, o quinto ano chegará e o crescimento e a mudança que se processam o deixarão espantado”. O bambu chinês mostra que não podemos desistir facilmente das coisas... Nos nossos trabalhos, especialmente projetos que envolvem mudança de comportamento, cultura e sensibilização para ações novas, devemos nos lembrar do bambu chinês para não desistirmos facilmente frente às dificuldades que surgem e que são muitas...*

Provérbio chinês, autor desconhecido



## RESUMO

Os compósitos poliméricos, em especial polímeros reforçados com fibras vegetais, se comparados com outros materiais poliméricos ou mesmo metais, possuem baixa densidade e alta resistência específica, o que os torna adequados para serem utilizados principalmente nas indústrias automotiva, moveleira e de construção civil. Estes materiais também apresentam como vantagens baixo custo e sustentabilidade devido à utilização das fibras vegetais que são provenientes de fontes renováveis. Dentre as diversas plantas fibrosas que fornecem fibras vegetais aplicáveis em compósitos, a grande maioria pode ser cultivada no Brasil, podendo-se destacar os bambus. Além das inúmeras utilizações do bambu como material de construção e matéria prima industrial, é possível extrair suas fibras e utilizá-las como reforço em compósitos. Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos de matriz epóxi ou poliuretano derivado do óleo de mamona com fibras de bambu através do processo de laminação manual seguido de moldagem por compressão. Laminados contínuos de bambu foram extraídos pelo processo de torneamento utilizando-se um dispositivo desenvolvido e construído em laboratório. As propriedades mecânicas dos compósitos foram avaliadas através dos ensaios de tração, flexão, impacto e análise dinâmico-mecânica. A microestrutura dos bambus, dos laminados e dos compósitos foi analisada por Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura. Os compósitos obtidos neste trabalho apresentaram baixa densidade e excelentes propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto. Suas propriedades específicas são quase cinco vezes à de um aço baixo carbono e comparáveis às propriedades de compósitos de fibras de vidro. Os compósitos obtidos possuem propriedades adequadas para serem utilizados em diversas aplicações tecnológicas, principalmente nos setores automotivo, moveleiro e de construção civil.

**Palavras-chave:** Compósito polimérico. Laminado torneado de bambu. Resina de poliuretano vegetal. Resina epóxi. Torneamento de bambu.



## ABSTRACT

Polymer composites, especially vegetable fiber reinforced polymers, have low density and adequate specific strength to be used in the automotive, furniture and civil construction industries. These are low cost and sustainable materials produced with vegetable fibers which are renewable sources. Among the innumerable plants from which biofibers are produced, most of them can be grown and cultivated in Brazil especially the bamboos. Besides the utilization of bamboo as a construction material and industrial raw material, it is also possible to extract its fibers and use them as reinforcement in composites. Polymer matrix composites made from polyurethane or epoxy resin reinforced with bamboo veneers were developed in this work using the hand layup technique followed by compression molding. It was used a castor oil derived polyurethane resin which comes from renewable sources. Rotary cut continuous bamboo veneers were extracted through an especially designed apparatus which was developed and constructed in laboratory. The composites mechanical properties were evaluated by tensile, flexural and impact testing, as well as the dynamic-mechanical analysis. The bamboo microstructure was evaluated by optical and scanning electron microscopy. Composites obtained in this work presented low density and excellent tensile, flexural and impact strengths. Its specific properties were almost five times greater than low carbon steel and even comparable to fiber glass reinforced composites. The composites have adequate properties to be used in innumerable technological applications, especially in the automotive, furniture and construction sectors.

**Keywords:** Polymer Composites. Bamboo veneer. Castor Oil derived Polyurethane resin. Epoxy resin.





## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Painéis, tampos e revestimentos internos utilizados no automóvel Classe E da Mercedes-Benz produzidos com material polimérico reforçado com fibras vegetais, como linho e sisal .....  | 30 |
| Figura 2 – Esquema de classificação de materiais compósitos, segundo a geometria da fase dispersa .....   | 34 |
| Figura 3 - Esquema ilustrativo de compósitos reforçados: (a) por fibras contínuas unidirecionais, (b) fibras descontínuas unidirecionais, (c) fibras descontínuas aleatórias, d) fibras contínuas aleatórias.....   | 35 |
| Figura 4 - Efeito da deformação ao redor da fibra na matriz sob tensão: (a) fibra descontínua sem deformação e (b) deformada.....   | 36 |
| Figura 5 – Esquema ilustrativo da classificação das fibras de acordo com sua composição (sintética ou natural), origem (vegetal, animal ou mineral), lenhosa ou não-lenhosa e posição relativa na planta (caule, folha, fruto, etc.). .....   | 39 |
| Figura 6 – Ilustração dos principais elementos constituintes do bambu: i) rizoma subterrâneo com raízes, ii) um tronco ou <i>colmo</i> delgado, iii) nós externos e diafragmas internos que dividem o colmo em diversas seções, iv) entrenós e v) ramos laterais com folhas .....       | 40 |
| Figura 7 – Principal distinção da constituição subterrânea dos rizomas dos bambus: a) Bambus entouceirantes (Leptomorfos) os quais formam touceiras e b) alastrantes (Paquimorfos), os quais tendem a formar florestas abertas. ....  | 41 |
| Figura 8 - Ampliação do corte transversal da parede de um colmo da espécie <i>Guadua angustifolia</i> , com espessura de 18,5mm, com as principais regiões nomeadas: córtex ou parte externa, região fibro-vascular, e lacuna ou parte interna do colmo. ....                           | 42 |
| Figura 9 – Micrografia obtida por MEV da microestrutura de um bambu da espécie <i>Guadua angustifolia Kunth</i> , onde destacam-se os principais elementos constituintes: feixe vascular (FxV), feixe de fibras (FxF), vasos (V) e células parênquima (P) que constituem a matriz ..... | 43 |
| Figura 10 – a) Micrografia obtida por MEV mostrando o corte tridimensional da estrutura de um bambu, onde b) pode-se observar detalhes do Parênquima (MEV) e c) de um feixe vascular (MO).....  | 44 |
| Figura 11 - Painéis estruturais de bambu: a) painel de esteiras ou <i>esterillas</i> de bambu, b) piso de SWB (Strand Woven Bamboo), c) painel e d) caibro de SWB. ....   | 49 |
| Figura 12 – Principais métodos de produção de laminados (ou folheados) de madeira: a) torneamento (ou desenrolamento) e b) faqueamento. ....  | 50 |
| Figura 13 – a) Extração dos laminados de bambu pela técnica de torneamento com centros e b) aplicação na produção de pranchas de surf .....   | 51 |
| Figura 14 - Resina epóxi a base de bisfenol A.....  | 52 |
| Figura 15 - Reação entre um isocianato e um poliól para formação do Poliuretano, sendo R, R1 e R2 cadeias carbônicas distintas. ....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 – Laminados torneados de bambu extraídos por um dispositivo desenvolvido e construído no laboratório. ....   | 58 |
| Figura 17 - Esquema ilustrativo do misturador mecânico a vácuo utilizado para a mistura dos componentes do compósito.....  | 59 |
| Figura 18 - a) Ilustração do dispositivo para a produção dos folhados de bambu acoplado ao torno mecânico, b) detalhes do suporte: faca de desempenho de Widea e c) ponteira rotativa e disco de náilon para fixação do colmo de bambu. ....                             | 60 |
| Figura 19 - Esquema do procedimento utilizado para a extração dos laminados: a) “sangramento” dos canais laterais; b) retificação da camada externa do colmo; c) e d) avanço do suporte e extração dos laminados de bambu.....   | 62 |
| Figura 20 – Prensa utilizada para a compressão e moldagem dos laminados de bambu e resina formando as chapas de material compósito. ....   | 64 |
| Figura 21 - Ilustração do método usado para cortar os corpos de prova de um compósito. ....  | 65 |
| Figura 22 - Máquinas universais de ensaios, a) Emic DL2000 e b) DL3000, utilizadas para realização dos ensaios de tração. ....   | 66 |
| Figura 23 – a) Ensaio de tração do bambu, com retirada de amostras, b) e c), para análise e quantificação da microestrutura para futura comparação com os resultados mecânicos. ....   | 67 |
| Figura 24 – Ensaio de flexão no modo “flexão em três pontos”, que consiste em aplicar a força de flexão no centro do corpo de prova através de um cutelo até o mesmo romper-se ou deformar-se a um determinado valor.....  | 68 |
| Figura 25 – a) Pêndulo para ensaio de impacto do tipo Izod e b) corpo de prova após o ensaio.....  | 69 |
| Figura 26 – Fresa de topo utilizada para se fazer os entalhes de maneira normatizada nos corpos de prova.....  | 69 |
| Figura 27 - a) Equipamento utilizado para a realização do ensaio de DMA das resinas puras e dos compósitos de bambu e b) garra de flexão em dois pontos ( <i>Single Cantilever Bending</i> ).....  | 70 |
| Figura 28 - Medição da gravidade específica de um material.....  | 71 |
| Figura 29 – a) Microscópio óptico e b) eletrônico de varredura para realização da investigação das microestruturas do bambu e dos compósitos.....  | 73 |
| Figura 30 - Medição da fração volumétrica das fases constituintes da microestrutura do bambu, através do cálculo das áreas relativas por saturação de cores.....   | 74 |
| Figura 31 – a) Corte transversal de um colmo de bambu e b) detalhe da parede do colmo onde observa-se a maior concentração de fibras na parte externa.....   | 75 |
| Figura 32 – a) Corte transversal da parede do colmo e b,c,d) micrografias da microestrutura da parede do colmo onde: a) observa-se a maior concentração de fibras na parte externa (parte superior da foto) e b,c,d) a variação da morfologia dos feixes vasculares..... | 76 |
| Figura 33 - Micrografia da seção transversal de um laminado de bambu embutido em resina, com cerca de 250 µm de espessura, constituído basicamente por feixes de fibras e células parênquima.....  | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34 - Resistência à tração em função da posição na espessura do colmo.  | 78 |
| Figura 35 – Preparação dos corpos de prova para ensaio de tração e determinação do valor médio de resistência de um colmo de <i>Dendrocalamus asper</i> .   | 79 |
| Figura 36 - Resistência a tração do bambu em função da altura do colmo (basal, média, superior) e da posição na parede do colmo (Ext., Int.)  | 80 |
| Figura 37 - Módulo de elasticidade do bambu em função da altura do colmo (basal, média, superior) e da posição na parede do colmo (Ext., Int.)  | 81 |
| Figura 38 – Gráfico da Resistência a tração em função da fração volumétrica de fibras para determinação de correlação matemática entre estas propriedades   | 82 |
| Figura 39 – Gráfico do Módulo elástico em função da fração volumétrica de fibras para determinação de correlação matemática entre estas propriedades  | 83 |
| Figura 40 – a) Empilhamento bidirecional e b) unidirecional em um compósito de laminados torneados de bambu.  | 84 |
| Figura 41 - Micrografia obtida por MEV da seção transversal de um compósito bidirecional de bambu: (A1,2,3) camadas perpendiculares ao plano da página, (B1,2,3) camadas paralelas ao plano, (P) parênquima cortado transversalmente, (P') parênquima cortado longitudinalmente, (F) feixe de fibras cortado transversalmente, (F') feixe de fibras cortado longitudinalmente, (R) resina ou matriz polimérica e (Vz) poros ou vazios | 85 |
| Figura 42 – Resultados do ensaio de tração dos compósitos uni e bidirecionais mostrando em a) a resistência à tração, em b) o módulo elástico e em c) a deformação na ruptura   | 87 |
| Figura 43 - Propriedades mecânicas dos compósitos sob flexão.   | 89 |
| Figura 44 - Resistência ao impacto das resinas puras, do bambu <i>in natura</i> e dos compósitos uni e bidirecionais.   | 91 |
| Figura 45 - Resistência ao impacto específica, (divide-se o valor da resistência pela densidade do compósito).  | 92 |
| Figura 46 - Curvas de E' e Tan $\delta$ em função da temperatura para a resina epóxi e seus compósitos.   | 95 |
| Figura 47 – Curvas de E' e tan $\delta$ em função da temperatura para o poliuretano e seus respectivos compósitos   | 96 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química básica das principais fibras vegetais utilizadas em compósitos e do bambu, espécie <i>Phyllostachys pubescens</i> com idade adulta. ....   | 37 |
| Tabela 2 – Comparação da resistência a tração e módulo de elasticidade dos bambus em diferentes formas de utilização (ripa, BLC, e fibras técnicas) com algumas fibras sintéticas utilizadas em compósitos estruturais, alguns termoplásticos <i>commodities</i> e alguns metais utilizados em estruturas..... | 48 |
| Tabela 3 - Velocidade relativa de reações típicas dos isocianatos.....   | 56 |
| Tabela 4 - Tabela comparativa da resistência à tração de compósitos com diferentes fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; LM: laminação manual. ....  | 88 |
| Tabela 5 - Tabela comparativa das propriedades de flexão, resistência à flexão e módulo flexural, de alguns compósitos termofixos com fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; LM: laminação manual; FV: fibra de vidro; PU: poliuretano; % (m/m): % em massa; % (v/v): % em volume; .....                | 90 |
| Tabela 6 - Tabela comparativa da resistência ao impacto de alguns compósitos poliméricos termofixos de fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; FV: fibra de vidro; PU: poliuretano;.....   | 91 |
| Tabela 7 - Tabela comparativa da resistência ao impacto dos compósitos de bambu com alguns compósitos de alta performance .....  | 93 |



## LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS

$\%$  (m/m) – Porcentagem em massa  
 $\%$  v/v - Porcentagem em volume  
 $(\sigma_t)$  – Resistência à tração  
 $^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius  
 $\mu\text{m}$  - Micrometro  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
Bidir. – Bidirecional  
BLC – Bambu laminado colado  
BMC – *Bulk Molding Compound*  
cm - Centímetro  
DMA – Análise Dinâmico Mecânica  
E – Módulo elástico  
E' – Módulo de armazenamento  
E'' – Módulo de perda  
FV – Fibra de vidro  
FxF – Feixes de fibras  
FxV – Feixes vasculares  
 $\text{g}/\text{cm}^3$  - Densidade: gramas por centímetro cúbico  
h – Hora  
Hz – Hertz  
INBAR – *International Network for Bamboo and Rattan*  
ISSO – *International Standards Organization*  
 $\text{J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$  – Joules metro quadrado por quilograma  
 $\text{J}/\text{m}$  – Joules por metro  
kg – Quilograma  
 $\text{kg}/\text{m}^3$  - Quilogramas por centímetro cúbico  
LM: laminação manual  
m – Metro  
m:m – Relação em massa  
 $\text{m}^2$  - Metro quadrado  
MC - Moldagem por compressão  
MDP – *Medium Density Particleboard*  
MDF – *Medium Density Fiberboard*  
MDI – Difenilmetano diisocianato  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura ou Microscópio Eletrônico de Varredura  
mm – Milímetro  
MO – Microscopia Óptica ou Microscópio Óptico  
MPa – Megapascal



OSB – *Oriented Strandboard*

P – Parênquima

PPG – Polí(óxido de propileno/etileno) glicol

PU – Poliuretano

RIM – Moldagem por Injeção e Reação

RPM – Rotações Por Minuto

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício: sílica

SMC – *Sheet Moulding Compound*

SWB – *Strand Woven Bamboo* (Bambu trançado prensado)

Tan  $\delta$  – Tangente delta

TDI – Tolueno diisocianato

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

T<sub>máx</sub> – Temperatura máxima

U\$ - Dólar americano

Unidir. - Unidirecional

V – Canais vasculares

V<sub>f</sub> – Fração volumétrica

VOC – Compostos Orgânicos Voláteis

Vz – Poros, vazios, bolhas

$\epsilon_{rup}$  – Deformação na ruptura

$\rho$  – Densidade

$\sigma_{máx}$  – Tensão máxima

$\sigma_{rup}$  – Tensão na ruptura

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>             | <b>24</b> |
| <b>SUMÁRIO.....</b>  | <b>26</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....</b>                        | <b>29</b> |
| 1.1 PROBLEMA E CONTEXTUALIZAÇÃO.....                             | 29        |
| 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES.....                               | 32        |
| 1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....                                | 32        |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....                         | 32        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>                              | <b>33</b> |
| 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....                                    | 33        |
| 2.1.1 <i>Definição</i> .....                                     | 33        |
| 2.1.2 <i>Características</i> .....                               | 33        |
| 2.1.3 <i>Classificação</i> .....                                 | 34        |
| 2.1.4 <i>Compósitos poliméricos reforçados por fibras</i> .....  | 35        |
| 2.1.5 <i>Fibras vegetais</i> .....                               | 37        |
| 2.1.6 <i>O BAMBU</i> .....                                       | 39        |
| 2.1.7 <i>Anatomia do colmo</i> .....                             | 42        |
| 2.1.8 <i>Cultivo e manejo</i> .....                              | 44        |
| 2.1.9 <i>Propriedades Mecânicas dos bambus</i> .....             | 46        |
| 2.2 CHAPAS E LAMINADOS DE BAMBU .....                            | 48        |
| 2.3 FABRICAÇÃO DE LAMINADOS TORNEADOS .....                      | 49        |
| 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS .....                                   | 52        |
| 2.4.1 <i>Resinas epóxi</i> .....                                 | 52        |
| 2.4.2 <i>Resina poliuretano derivada de óleo de mamona</i> ..... | 54        |
| 2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS.....                   | 57        |
| 2.5.1 <i>Moldagem por contato ou laminação manual</i> .....      | 57        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                               | <b>58</b> |
| 3.1 MATERIAIS .....  | 58        |
| 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....                               | 59        |
| 3.2.1 <i>Preparação dos corpos-de-prova de resina</i> .....      | 59        |
| 3.2.2 <i>Extração dos laminados de bambu</i> .....               | 60        |
| 3.2.3 <i>Preparação dos compósitos</i> .....                     | 63        |
| 3.2.4 <i>Produção dos corpos de prova dos compósitos</i> .....   | 64        |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO .....   | 65        |
| 3.3.1 <i>Ensaio de tração</i> .....                              | 65        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3.2    | <i>Ensaio de flexão</i> .....   | 67         |
| 3.3.3    | <i>Ensaio de impacto Izod</i> .....   | 68         |
| 3.3.4    | <i>Análise dinâmico mecânica – DMA</i> .....  | 69         |
| 3.3.5    | <i>Determinação da densidade relativa</i> .....   | 70         |
| 3.3.6    | <i>Microscopia</i> .....  | 72         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | <b>75</b>  |
| 4.1      | FIBRAS DO BAMBU.....  | 75         |
| 4.1.1    | <i>Caracterização microestrutural</i> .....   | 75         |
| 4.1.2    | <i>Morfologia dos laminados de bambu</i> .....  | 77         |
| 4.1.3    | <i>Avaliação da resistência à tração dos laminados</i> .....  | 77         |
| 4.1.4    | <i>Determinação do valor médio da resistência à tração e módulo de elasticidade para o colmo</i> .....          | 79         |
| 4.2      | COMPÓSITOS .....  | 83         |
| 4.2.1    | <i>Microestrutura</i> .....   | 83         |
| 4.2.2    | <i>Tração</i> .....   | 85         |
| 4.2.3    | <i>Ensaio de Flexão</i> .....   | 88         |
| 4.2.4    | <i>Ensaio de impacto Izod</i> .....   | 90         |
| 4.2.5    | <i>Análise Dinâmico Mecânica – DMA</i> .....  | 93         |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | <b>97</b>  |
| <b>6</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....   | <b>99</b>  |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....   | <b>101</b> |
|          | <b>ANEXO A – LISTA DAS ESPÉCIES PRIORITÁRIAS DE BAMBU DA REDE INTERNACIONAL DO BAMBU E RATTAN – INBAR</b> ..... | <b>106</b> |



# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

## 1.1 PROBLEMA E CONTEXTUALIZAÇÃO

O esgotamento gradativo do petróleo e as novas leis ambientais que aos poucos entram em vigor no mundo todo, têm sido os principais fatores motivadores para o desenvolvimento de materiais de origem renovável e que não agridam o meio ambiente. Neste contexto, intensificaram-se as pesquisas para a utilização de fibras vegetais como reforço de matrizes poliméricas em substituição às fibras sintéticas, especialmente a fibra de vidro. Tais pesquisas apontam que as fibras vegetais possuem características vantajosas frente às fibras sintéticas, tais como: baixo custo de beneficiamento, fácil manuseio, biodegradabilidade, ser proveniente de fonte renovável, capturar carbono da atmosfera, possuir baixa densidade e provocar menor desgaste nos equipamentos convencionais de processamento de polímeros [1].

Constata-se que o interesse do uso de fibras vegetais está, entre outros fatores, diretamente relacionado à obtenção de materiais compósitos para aplicações tecnológicas voltadas principalmente para a indústria automotiva, moveleira e de construção civil. Uma das maiores aplicações está na fabricação de painéis, tampos e revestimentos internos de automóveis, como realizado no automóvel classe E da Mercedes Benz, Figura 1. Com isso, atinge-se uma redução de peso de 20% e maior resistência mecânica se comparados com os materiais utilizados anteriormente [2].



**Figura 1 – Painéis, tampos e revestimentos internos utilizados no automóvel Classe E da Mercedes-Benz produzidos com material polimérico reforçado com fibras vegetais, como linho e sisal**

Fonte: [3].

Dentre as fibras vegetais pesquisadas, destaca-se que as fibras de bambu possuem um imenso potencial a ser aproveitado como reforço em matrizes poliméricas, pois possuem excelentes propriedades mecânicas específicas e podem ser facilmente cultivadas em território nacional.

País líder da indústria do bambu, a China fatura hoje com esta planta e seus produtos derivados U\$10,33 bilhões por ano, possui 5,38 milhões de hectares de plantações e ainda planta mais 100.000 hectares de bambu por ano [4]. No Brasil, apesar da grande oferta de algumas espécies de bambu, esta gramínea ainda é totalmente sub-utilizada em relação ao seu potencial existente. Isto está relacionado basicamente à falta de uma cultura de aproveitamento do bambu e à inexistência de uma cadeia produtiva, que é formada por produção (plantio e colheita), comercialização, transformadores e consumidores [5].

Nos últimos 10 anos, um grande interesse pelo bambu tem surgido no Brasil, porém, devido à baixa oferta de matéria prima adequada, diversas aplicações estão deixando de ser desenvolvidas. Com isso, têm surgido diversas iniciativas para iniciar o cultivo desta planta e em poucos anos estabelecer a base da cadeia produtiva do bambu. A recente aprovação do projeto de lei 1180/07 pela presidência da

república, que institui a “política nacional de incentivo à cultura do bambu” e os recentes acordos de cooperação com a China, apresentam-se como possíveis marcos para o início do desenvolvimento do bambu no Brasil [6].

Apesar do Brasil possuir a maior quantidade de espécies de bambu das Américas, cerca de 130 [7], ainda as utiliza de forma muito primária e em muitos casos não as utiliza de maneira alguma. As espécies disponíveis em maior quantidade no Brasil são a *Bambusa tuldoides*, chamada popularmente de taquara, e a *Bambusa vulgaris* que são normalmente utilizadas em aplicações simples e de baixo custo. As espécies de maior porte, chamadas comumente de gigantes, como por exemplo, o Guádua (*Guadua angustifolia*), o Mossô (*Phyllostachys pubescens*), e o Gigante (*Dendrocalamus asper* ou *giganteus*), apresentam o maior potencial em aplicações industriais tais como construções e laminados. Além disso, outras espécies gigantes nativas do Brasil, como o *Guadua chacoensis*, *Guadua Tagoara* e *Guadua Weberbaueri*, são praticamente desconhecidas do grande público apesar de possuírem um grande potencial de exploração comercial. Pesquisas sobre a propagação destas espécies devem ser realizadas para que elas possam ser utilizadas em futuros reflorestamentos e formar a base da cadeia produtiva do bambu no Brasil.

Dentre os polímeros comerciais utilizados como matriz para a obtenção de compósitos poliméricos reforçados com fibras, as resinas epóxi e poliuretano destacam-se devido à grande variedade de escolha dos reagentes [8], o que permite obter materiais com diferentes propriedades físicas e químicas. Além disso, o poliuretano é um dos polímeros mais versáteis que existe, podendo ser proveniente de recurso renovável, tal como o poliuretano derivado do óleo de mamona, podendo apresentar-se em diversas formas, tais como uma espuma, um elastômero ou um polímero rígido. Quanto à reatividade química, as resinas epóxi e poliuretanos apresentam grupos epóxi e isocianatos, respectivamente, que podem interagir com grupos funcionais presentes nos materiais lignocelulósicos, como por exemplo seus grupamentos hidroxila (OH), facilitando assim a adesão interfacial entre estas matrizes e as fibras.

Baseado nos fatores acima citados, este trabalho visa aproveitar recursos renováveis disponíveis no Brasil tais como as fibras de bambu, para a utilização como reforço de matrizes poliméricas e produção de materiais compósitos de alta qualidade.

## 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo produzir laminados torneados de bambu, utilizá-los na produção de compósitos com matriz epóxi ou poliuretano e caracterizá-los mecanicamente para serem utilizados em futuras aplicações tecnológicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver e construir um dispositivo para extração de laminados delgados de bambu;
- Caracterizar e quantificar a microestrutura do colmo do bambu através das técnicas de Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura e correlacioná-la com a sua resistência à tração;
- Avaliar as propriedades mecânicas de tração, flexão, impacto e dinâmico-mecânicas das resinas epóxi, poliuretano e dos compósitos uni e bidirecionais reforçados com laminados de bambu.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS**

#### **2.1.1 Definição**

Segundo a *ASTM*, entende-se como compósito um “material formado pela mistura física de dois ou mais materiais, imiscíveis entre si, combinados para formar um novo material útil de engenharia que possui algumas propriedades diferentes em relação aos componentes puros” [9]. Podem ser obtidos por combinações entre metais, cerâmicas ou polímeros. Suas características e desempenho mecânico são fortemente influenciados pelas propriedades dos seus materiais constituintes, sua distribuição, fração volumétrica e interação entre eles. Tais propriedades podem ser aditivas ou os componentes podem interagir em sinergismo, levando à obtenção de propriedades do compósito usualmente superiores à soma das propriedades individuais [10].

#### **2.1.2 Características**

Geralmente os materiais compósitos são formados por uma fase contínua chamada de matriz e uma ou mais fases dispersas, responsáveis pela rigidez e resistência do material. Compósitos poliméricos são constituídos por uma matriz de um polímero termoplástico ou termofixo, e sua função é acomodar de maneira adequada a fase dispersa e transferir a esta a tensão aplicada. A fase dispersa pode atuar como reforço, quando ocorre aumento nas propriedades mecânicas em relação à matriz polimérica, ou como carga de enchimento, quando há redução de custo sem alterar significativamente as propriedades finais do material [10] [11].

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem basicamente de três fatores: da estrutura dos seus materiais constituintes, da fração volumétrica dos componentes, e da interação físico-química entre estas fases. Outros fatores também são importantes, como por exemplo: a geometria, dimensão, concentração e dispersão do reforço.

Dentre os diversos tipos de compósitos, os compósitos poliméricos reforçados por fibras são extremamente atraentes em algumas aplicações por possuírem algumas das seguintes características: são projetáveis de acordo com a necessidade de aplicação, possuem

formato complexo não obtido facilmente por outros materiais, possuem alta resistência química devido à sua matriz polimérica e possuem alto módulo elástico e resistência à tração específica [12]. Desta maneira, são muito utilizados em aplicações onde a alta resistência e baixo peso de seus componentes são necessários como, por exemplo, na indústria aeronáutica [8].

A combinação única de propriedades físicas e químicas existentes em matrizes poliméricas propiciou a expansão de sua utilização em vários segmentos industriais e comerciais [11]. Com isto novas condições para uso foram criadas, possibilitando a abertura de diversas frentes de pesquisa, com o objetivo principal de avaliar o comportamento a longo prazo dos materiais nos diversos ambientes, bem como modificar estes materiais visando a obtenção de propriedades mais adequadas.

### 2.1.3 Classificação

Dentre as diversas maneiras de se classificar os materiais compósitos, destaca-se a classificação de acordo com a forma da fase dispersa, como esquematizada na Figura 2. Nesta classificação, os compósitos são separados em fibrosos, particulados e estruturais. Os compósitos fibrosos por sua vez, são divididos em reforçados por fibras contínuas e reforçados por fibras descontínuas.



**Figura 2 – Esquema de classificação de materiais compósitos, segundo a geometria da fase dispersa.**

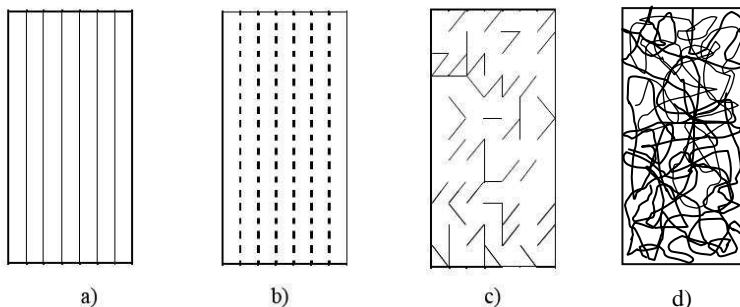
Fonte: [13](adaptado).

As fibras são materiais de formato filantar que podem ser produzidos a partir de polímeros, metais e cerâmicas. Sua característica principal é o formato filantar com razão de aspecto maior ou igual a 100 e alta resistência, que está relacionada com o pequeno diâmetro e volume das fibras e conseqüente baixa quantidade de defeitos na microestrutura [14]. No caso das fibras poliméricas, sua alta resistência está relacionada ao alinhamento das cadeias poliméricas ocorrido durante a fabricação das mesmas [12].

Os compósitos de laminados torneados de bambus podem ser considerados compósitos fibrosos reforçados por fibras contínuas e podem ser produzidos tanto de maneira unidirecional, quando todos os laminados são alinhados na mesma direção, quanto bidirecional, quando estes são empilhados alternadamente em direções perpendiculares.

#### 2.1.4 Compósitos poliméricos reforçados por fibras

Os compósitos poliméricos estruturais geralmente utilizam fibras sintéticas ou naturais como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, conforme esquema ilustrativo da Figura 3.



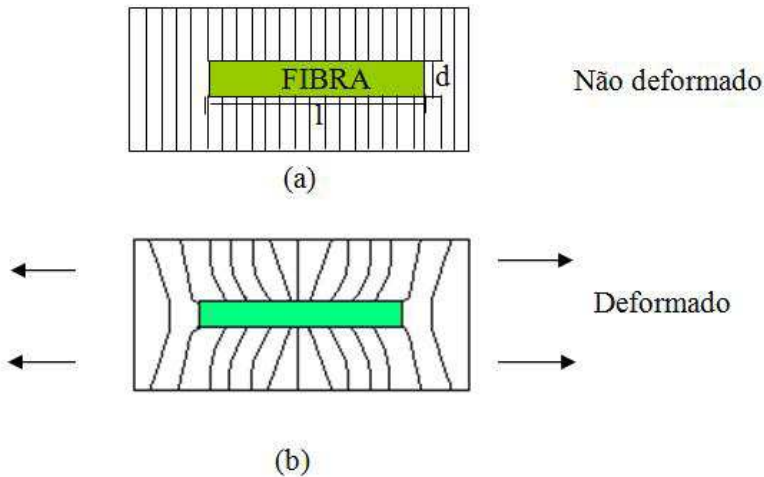
**Figura 3 - Esquema ilustrativo de compósitos reforçados: (a) por fibras contínuas unidirecionais, (b) fibras descontínuas unidirecionais, (c) fibras descontínuas aleatórias, d) fibras contínuas aleatórias.**

Fonte: [14] (adaptado)

Os polímeros reforçados por fibras contínuas constituem os de melhor desempenho mecânico [8]. As propriedades destes compósitos são anisotrópicas, isto é, apresentam alta rigidez e resistência à tração na

direção das fibras, porém com baixo desempenho mecânico sob tração na direção transversal às mesmas, e neste caso a sua resistência é controlada pelas propriedades da matriz.

Os compósitos com fibras descontínuas apresentam menor eficiência de reforço do que as fibras contínuas, entretanto, estes materiais oferecem maior facilidade de processamento e menor custo. Nos compósitos com fibras descontínuas o carregamento na fibra é função de seu comprimento, sendo que seus extremos são pontos concentradores de tensão, que induzem tensões cisalhantes na interface, conforme pode ser observada na Figura 4.



**Figura 4 - Efeito da deformação ao redor da fibra na matriz sob tensão: (a) fibra descontínua sem deformação e (b) deformada.**

Fonte: [14](adaptado).

A escolha da matriz polimérica dependerá das propriedades físicas e químicas exigidas para uma determinada aplicação, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado. A matriz tem o papel de manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com as fibras em virtude de suas características coesivas e adesivas, além de transferir o carregamento para as fibras e protegê-las contra o ataque ambiental.

## 2.1.5 Fibras vegetais

As fibras vegetais, se comparados com as fibras sintéticas utilizadas em compósitos estruturais, tais como fibras de vidro, fibra de carbono e fibras de aramida, possuem propriedades mecânicas inferiores como, por exemplo, resistência à tração e módulo elástico. No entanto, as fibras vegetais possuem algumas características que tornam sua utilização vantajosa em determinadas aplicações. Estas características são principalmente: abundância, baixo custo, baixa densidade, facilidade de obtenção e manuseio, baixa abrasão de equipamentos e moldes, biodegradabilidade e ser de fonte renovável. Portanto, especialmente em aplicações que solicitam baixo esforço mecânico do material, necessidade de baixa densidade e redução de custo [15], os compósitos reforçados com fibras vegetais podem ser utilizados.

Por outro lado, as fibras vegetais também possuem desvantagens que prejudicam a sua aplicação em muitas situações e ambientes, como por exemplo: alta absorção de umidade, baixa resistência ao intemperismo, alta variabilidade de propriedades devido a sua origem natural, baixa estabilidade térmica e baixa resistência aos microorganismos.

As fibras vegetais são constituídas basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, e outros compostos orgânicos. Possuem fórmula e estrutura química complexa e, no caso da lignina, não totalmente decifradas. A Tabela 1 apresenta a composição básica das principais fibras vegetais utilizadas como agente de reforço em compósitos.

**Tabela 1 – Composição química básica das principais fibras vegetais utilizadas em compósitos e do bambu, espécie *Phyllostachys pubescens* com idade adulta.**

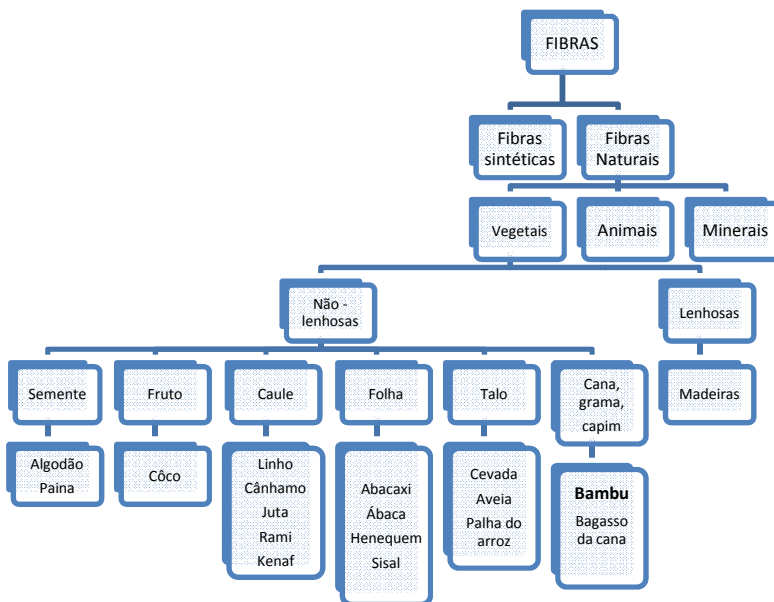
Fontes: bambu [7], demais fibras vegetais [16].

|                     | Sisal<br>%(m/m) | Coco<br>%(m/m) | Algodão<br>%(m/m) | Juta<br>%(m/m) | Linho<br>%(m/m) | Bambu<br>%(m/m) |
|---------------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Celulose</b>     | 66-78           | 32-43          | 85-90             | 61-71,5        | 71              | 49              |
| <b>Hemicelulose</b> | 10-14           | 0,15-0,25      | 5,7               | 13-20          | 18-20           | 27              |
| <b>Lignina</b>      | 10-14           | 40-45          | 4-6               | 12-13          | 2,2             | 26              |
| <b>Pectina</b>      | 10              | 3-4            | -                 | 0,2            | 2,3             |                 |
| <b>Ceras</b>        | 2               |                | 0,6               | 0,5            | 1,7             |                 |
| <b>Cinzas</b>       |                 |                |                   |                |                 | 1,31            |

A celulose é um polímero hidrofílico, de característica polar que contém seis grupos hidroxila em sua estrutura básica, que fazem ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, sendo que nas ligações intramoleculares, as hidroxilas da própria molécula ligam-se entre si, e nas intermoleculares ligam-se com outras moléculas de celulose ou moléculas polares presentes no ambiente. Por este motivo, as fibras vegetais não modificadas apresentam grande afinidade com a umidade ambiente, são hidrofílicas, e pouca afinidade com matrizes poliméricas, que são hidrofóbicas, que é o caso da maioria das resinas empregadas em compósitos. A exposição excessiva dos compósitos à umidade pode provocar inchamento, falta de estabilidade dimensional e perda de propriedades mecânicas devido à diminuição da adesão fibra-matriz. A quantidade de água absorvida pelas fibras depende da umidade relativa do ambiente em que elas estão em equilíbrio e das suas características físico-químicas [16].

Apesar das propriedades mecânicas das fibras vegetais, tais como módulo de elasticidade ( $E$ ) e resistência à tração ( $\sigma_t$ ) serem muito inferiores às das fibras de vidro (FV), a densidade das fibras vegetais, que varia de cerca de 0,7 a 1,4 g/cm<sup>3</sup> [1], é aproximadamente metade da densidade da FV (~2,5 g/cm<sup>3</sup>). Desta maneira, as propriedades específicas das fibras vegetais chegam a ser comparáveis às da FV [16], e podem substituí-las integral ou parcialmente em algumas situações.

Dentre as várias maneiras de se classificar as fibras, utilizou-se neste trabalho a classificação mostrada na Figura 5. A primeira distinção que se faz é entre as fibras sintéticas e naturais. Em seguida, sua origem na natureza: vegetal, mineral e animal. As fibras vegetais por sua vez, são primeiramente separadas em lenhosas (madeiras) e não-lenhosas, as quais são divididas de acordo com a sua origem na planta: fibras da semente, do fruto, do caule ou “fibras moles”, da folha ou “fibras duras”, do talo, e de cana [16]. O bambu está na categoria das gramíneas.



**Figura 5 – Esquema ilustrativo da classificação das fibras de acordo com sua composição (sintética ou natural), origem (vegetal, animal ou mineral), lenhosa ou não-lenhosa e posição relativa na planta (caule, folha, fruto, etc.).**

Fonte: [1](adaptado).

## 2.1.6 O BAMBU

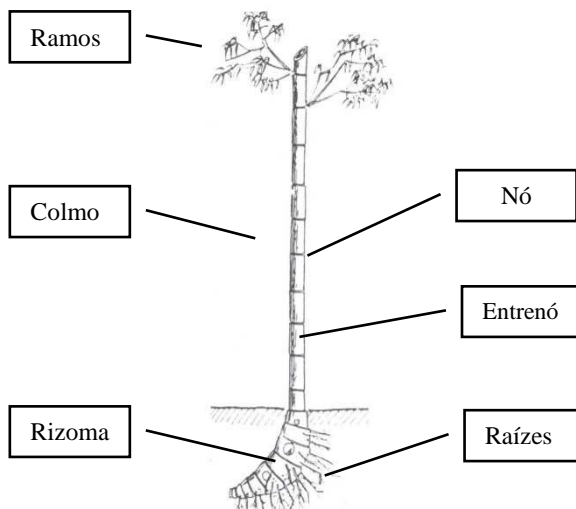
Ao contrário do que muitas pessoas pensam o bambu não é uma árvore, é uma gramínea arborescente gigante, pertencente à família *Gramineae (Poaceae)* e à subfamília *Bambusoideae*. Podem ser divididos basicamente em dois grupos, os bambus herbáceos, parecidos com arbustos, e os bambus lenhosos parecidos com árvores.

Existem no mundo cerca de 1600 espécies de bambus, com aparência que varia de poucos centímetros de altura e talo fino, até 40 m de altura e diâmetro de mais de 30 cm. São distribuídas em 121 gêneros, 25 herbáceos e 96 lenhosos e estão presentes nos climas tropical, subtropical e temperado. Estão presentes em todos os continentes, exceto o continente Europeu, na seguinte proporção: 67% Ásia e Oceania, 3%

África e 30% Américas. A Ásia é o continente com maior número de espécies, em torno de 1000 e onde o bambu encontra o maior número de aplicações: como alimento, material de construção, artesanato, matéria prima industrial, entre outras. No entanto, apenas 250 das espécies que são exploradas têm valor econômico, das quais 200 estão concentradas na China e 50 em outros países [7].

Apesar do grande número de espécies e gêneros, a Rede Internacional do Bambu e Ratan – INBAR, escolheu através de um estudo 20 espécies consideradas de alta prioridade [17]. Nesta lista, mostrada no anexo A, encontra-se a espécie utilizada neste trabalho, *Dendrocalamus asper*, bem como outras espécies citadas anteriormente.

Os bambus possuem aparência singular e são compostos basicamente dos seguintes elementos, mostrados na Figura 6: i) um rizoma subterrâneo com raízes, ii) um tronco delgado, chamado de *colmo*, oco na maioria das espécies, iii) nós externos e diafragmas internos que dividem o colmo horizontalmente em diversas seções, iv) entrenós retos ou curvos de aparência normalmente viva e lustrosa e v) ramos laterais com folhas que realizam a fotossíntese da planta.

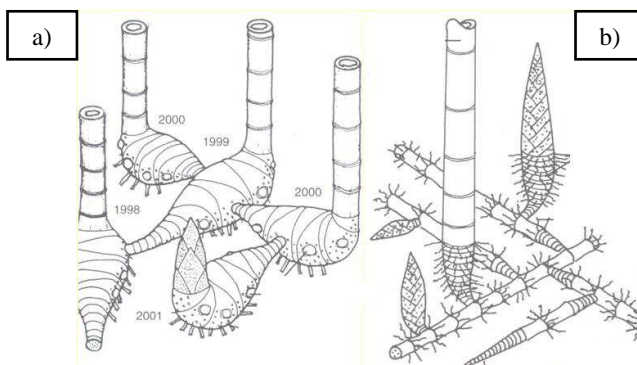


**Figura 6 – Ilustração dos principais elementos constituintes do bambu: i) rizoma subterrâneo com raízes, ii) um tronco ou *colmo* delgado, iii) nós externos e diafragmas internos que dividem o colmo em diversas seções, iv) entrenós e v) ramos laterais com folhas**

Fonte: [7](adaptado).



Em geral, os bambus de clima tropical ou sub-tropical tendem a ser entouceirantes, enquanto que os de clima temperado tendem a ser alastrantes. Os bambus entouceirantes, chamados de leptomorfos, formam touceiras fechadas, e se propagam através do crescimento de rizomas volumosos subterrâneos, Figura 7a). Já os bambus alastrantes, ou paquimorfos, se propagam através de rizomas delgados e compridos e formam florestas abertas alcançando assim longas distâncias de propagação, Figura 7b).



**Figura 7 – Principal distinção da constituição subterrânea dos rizomas dos bambus: a) Bambus entouceirantes (Leptomorfos) os quais formam touceiras e b) alastrantes (Paquimorfos), os quais tendem a formar florestas abertas.**

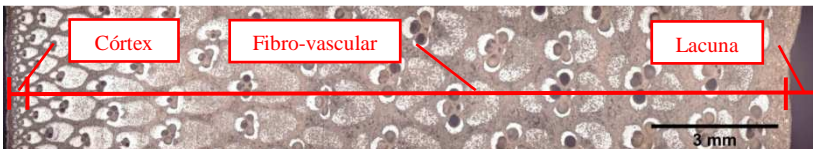
Fonte: [7](adaptado).

Além das diferenças anatômicas entre árvores e bambus, há também variações em seus crescimentos internos. O crescimento das árvores ocorre através da formação de novas células por tecidos especializados chamados de meristema. Nas árvores o crescimento ocorre radialmente pelo crescimento do meristema, chamado de *câmbio*, situado entre a casca e a madeira, formando os chamados anéis de crescimento. Desta forma, as árvores aumentam de diâmetro com a idade. Já no caso do bambu, não existe o câmbio, e ele não cresce em diâmetro, apenas em comprimento. O crescimento do bambu se dá através do broto, originado de uma gema no rizoma subterrâneo [7].

O crescimento do bambu é conhecido como o mais rápido de todas as plantas, sendo registrado um crescimento de 120,9 cm em um período de 24h em Kyoto no Japão, em um bambu da espécie conhecida como Madake (*Phyllostachys reticulata*) de 12 cm de diâmetro [7].

### 2.1.7 Anatomia do colmo

O colmo do bambu é um tubo natural, oco na grande maioria das espécies, e quase sempre cilíndrico. É dividido ao longo de seu comprimento por nós que possuem diafragmas internos quase sempre fechados. Os nós, apesar de serem pontos de fraqueza do colmo, são importantes para evitarem a flambagem do tubo. O bambu afina em direção à ponta e possui paredes que possuem uma estrutura gradiente, a qual muda radialmente, sendo mais resistente e densa de fibras na parte externa, e menos resistente e mais mole na parte interna, fornecendo grande dureza e resistência a essa região. Conforme mostrado na Figura 8, a seção transversal do colmo pode ser dividida em três partes: i) o córtex externo, ii) a parte fibro-vascular – intermediária, e iii) a parte interna vazia chamada de lacuna.



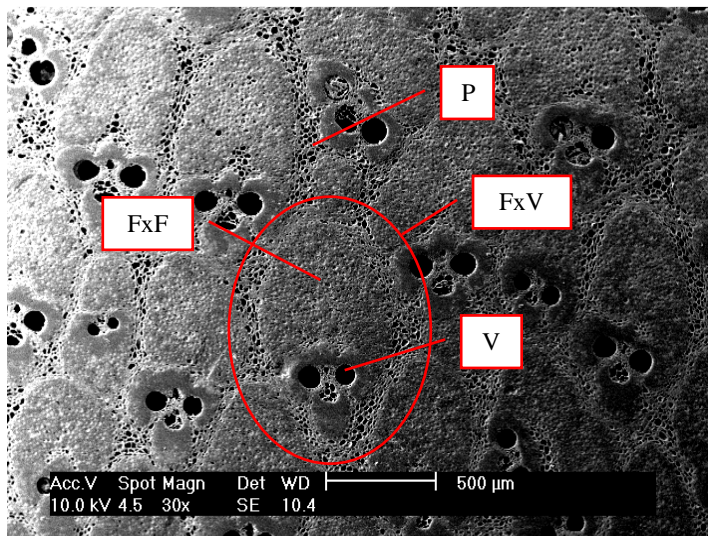
**Figura 8 - Ampliação do corte transversal da parede de um colmo da espécie *Guadua angustifolia*, com espessura de 18,5mm, com as principais regiões nomeadas: córtex ou parte externa, região fibro-vascular, e lacuna ou parte interna do colmo.**

Fonte: do autor.

A estrutura do córtex é formada pela cutícula, epiderme e hipoderme. A cutícula é a camada mais externa e formada por celulose e pectina e coberta por uma camada de cera. Em seguida, a epiderme é formada por duas células epidermais com alto conteúdo de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o que a torna dura e resistente. Abaixo da epiderme, há a hipoderme, com células esclerênquimatosas [18]. Estas camadas formam uma barreira intransponível para os insetos *xilófagos*, principalmente brocas e carunchos, que se alimentam da estrutura interna do bambu, rica em amido. Portanto, somente rachaduras e furos são pontos vulneráveis para o ataque destes insetos.

A área fibro-vascular possui uma estrutura típica de um composto e consiste basicamente de uma matriz de células parênquima

(P) que envolvem os feixes vasculares (FxV), formados por feixes de fibras (FxF) e canais vasculares (V) condutores de seiva e outros minerais, Figura 9. Em um colmo, 52% das células são de parênquima, 40% de fibras e 8% de canais condutores [18].

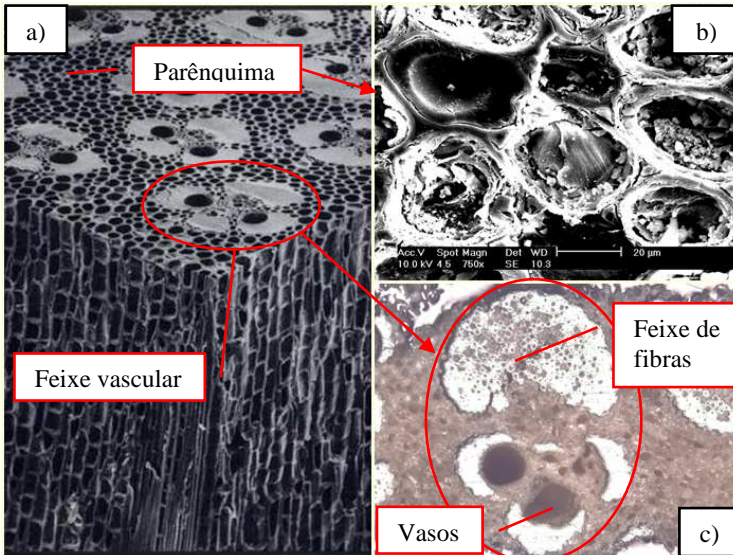


**Figura 9 – Micrografia obtida por MEV da microestrutura de um bambu da espécie *Guadua angustifolia* Kunth, onde destacam-se os principais elementos constituintes: feixe vascular (FxV), feixe de fibras (FxF), vasos (V) e células parênquima (P) que constituem a matriz**  
Fonte: do autor.

A matriz envolve os feixes vasculares e é formada por células de parênquima de cerca de 20-100 µm, ligeiramente alongadas formando uma estrutura do tipo colméia tridimensional, conforme mostrado na Figura 10–[18]. Esta estrutura, que possui densidade média de 0,67 g/cm<sup>3</sup>, portanto bem menos densa do que as fibras, com 1,14 g/cm<sup>3</sup> [18], atua como um amortecedor dos feixes vasculares, contribuindo para a elasticidade dos colmos [19]. Por outro lado, o parênquima é uma região onde os grãos de amido são depositados no interior da célula e, portanto, sujeito ao ataque de insetos *xilófagos*.

Os feixes vasculares, mostrados na Figura 10, são a parte restante da estrutura do bambu, e responsáveis pela resistência deste material,

uma vez que as fibras estão localizadas nesta região, bem como pela condução de água e seiva durante todo o desenvolvimento do bambu.



**Figura 10 – a) Micrografia obtida por MEV mostrando o corte tridimensional da estrutura de um bambu, onde b) pode-se observar detalhes do Parênquima (MEV) e c) de um feixe vascular (MO)**

Fonte: a) [18], b) e c) do autor.

Os feixes de fibras são formados por fibrilas de comprimento de 1,0-2,9 mm e diâmetro de cerca de 10-24 µm. Elas constituem cerca de 60-70% do peso do colmo, são longas e possuem razão de aspecto de cerca de 150:1 a 250:1 [7]. As fibras de bambu são em media maiores do que as madeiras duras, e menores do que as madeiras moles sendo adequada para a produção de pasta de papel [20].

### 2.1.8 Cultivo e manejo

A silvicultura do bambu é a ciência que cuida da tecnologia e metodologia para o plantio e desenvolvimento do bambu. O bambu possui algumas características peculiares que tornam o seu cultivo diferente do cultivo de outras plantas. Algumas características como

rápido crescimento, grande rendimento e renovação da touceira tornam o cultivo do bambu extremamente atrativo tanto para aplicações industriais de grande porte como rurais de pequeno porte.

A escolha de uma espécie a ser plantada em um local determinado, deve ser baseada essencialmente nas condições climáticas, topográficas e do solo, e também no uso a ser feito com a planta. A topografia em que os bambus se desenvolvem melhor são terrenos levemente inclinados e encostas de vales [7].

A temperatura e umidade estão diretamente ligadas ao crescimento e desenvolvimento dos bambus, portanto em condições de abundância destes recursos, seu desenvolvimento tende a ser rápido. Entretanto, o excesso de água pode ser prejudicial para o crescimento dos bambus, que preferem solos bem drenados, podendo até morrer devido ao excesso de água no solo.

Existem basicamente dois métodos de propagação dos bambus sexual e assexuada. A primeira utiliza sementes, porém, como a floração do bambu ocorre em intervalos muito longos, de cerca de 20 a 130 anos, contar apenas com este método para a propagação do bambu é inviável. As vantagens da floração são a grande quantidade de sementes obtidas, em contrapartida, todo um bambuzal pode secar e morrer em pouquíssimo tempo, portanto, se uma comunidade ou empresa depender desta plantação, as consequências podem ser catastróficas do ponto de vista econômico [21].

A segunda opção, propagação assexuada, pode ser feita com diversas partes do bambu, e pode vir a ser bastante rentável em alguns casos, pois de cada colmo podem ser feitas centenas de mudas. Os principais métodos de propagação assexuada são: i) colmo com rizoma, ii) exclusivamente rizoma, iii) pedaços do colmo com ramos (“método do copinho”), iii) pedaços dos ramos e até mesmo pelo enterramento do colmo inteiro (“mergulhia”) [22].

Um outro método muito eficiente e especialmente interessante para espécies de difícil propagação é o método de propagação *in vitro*, a partir do qual de uma pequena amostra da gema do bambu podem ser feitas milhares de mudas. Dependendo da espécie e das condições do empreendimento este método pode ser rentável ou não [21].

Outra propagação bastante eficiente, que ocorre apenas na espécie *Guadua angustifolia Kunth* é através da propagação dos *chuskinas*, que são pequenos talos que crescem aleatoriamente em meio a um *guadual* (bambuzal de *Guadua*), e que se retirados do solo e cultivados adequadamente em viveiros, podem se transformar em uma fonte inesgotável de mudas. Por exemplo, partindo-se de 2000 *chuskinas*,

pode-se no período de um ano produzir mais de 1 milhão de mudas, número suficiente para se reflorestar cerca de 3000 hectares [21].

Uma vez plantado, o bambu forma touceiras ou florestas em questão de poucos anos e é uma ótima alternativa para o reflorestamento de grandes áreas e recuperação de áreas degradadas.

O seu ciclo de vida dura cerca de 11 anos passando pelos seguintes estágios: i) nascimento e crescimento do broto até atingir a altura máxima do colmo (~1 ano), ii) amadurecimento do colmo, aparecimento de todos os ramos e endurecimento da estrutura (~3 anos), iii) maturação do colmo (~3 anos) e declínio e apodrecimento (4 anos). Como todos os anos são gerados novos brotos, então há em uma touceira colmos de todas as idades. Como o bambu não cresce em diâmetro, os brotos já nascem no diâmetro final e crescem apenas na altura.

O manejo da touceira deve ser feito para que esta continue saudável e varia de acordo com o propósito da plantação (cultivo de colmos, cultivo de brotos, extração industrial, etc.). Para a máxima produção de colmos uma touceira deve ser manejada todos os anos, sendo cortados os colmos com quatro anos de idade, quando já atingem próximo do máximo de sua resistência.

A grande vantagem de uma plantação de bambu frente a outras plantas lenhosas é poder extrair colmos de cada touceira todos os anos. Desta maneira, não há o corte e destruição total da plantação quando esta estiver pronta para a colheita, como é o caso de plantações de eucalipto ou pinus, por exemplo. Com isso, os ecossistemas da plantação de bambu e dos arredores permanecem praticamente inalterados no cultivo e manejo do bambu.

### **2.1.9 Propriedades Mecânicas dos bambus**

Existem poucas normas que regulam os ensaios mecânicos dos bambus, por exemplo, o Relatório Técnico ISO/TC N315. Entretanto, existem algumas bibliografias, como Oscar Hidlago 2005, em que são apresentados procedimentos para se ensaiar corretamente este material.

Como a estrutura do bambu varia basicamente conforme i) a posição na altura do colmo, ii) a posição no entrenó e iii) a posição na parede do colmo, é necessário na divulgação de resultados mecânicos de bambu que se especifique claramente as condições de ensaio e as posições de onde os corpos de prova foram obtidos. Além disso, devido à grande variação morfológica entre espécies, é desejável que as

comparações sejam feitas entre mesmas espécies ou entre espécies de mesmo gênero.

Se comparados com os principais tipos de madeiras, os bambus são superiores a todos eles, pois possuem melhores valores de resistência a tração e módulo elástico [7]. Mesmo levando-se em conta que a densidade do bambu é maior que quase todos os tipos de madeira, suas propriedades específicas também são superiores.

Os bambus possuem excelentes propriedades mecânicas tanto quando aproveitados como tubos quanto quando extraídos em ripas ou fibras e transformados em chapas. As propriedades gerais de resistência à tração, e seus respectivos módulos de diferentes formas de utilização dos bambus, ripas, bambu laminado colado ou BLC e fibras técnicas [23] são apresentadas na Tabela 2 e comparadas com as propriedades de outras fibras vegetais utilizadas como reforço de compósitos, fibras sintéticas utilizadas em compósitos estruturais, alguns termoplásticos commodities de uso genérico e alguns metais utilizados em aplicações estruturais simples.

**Tabela 2 – Comparação da resistência a tração e módulo de elasticidade dos bambus em diferentes formas de utilização (ripa, BLC, e fibras técnicas) com algumas fibras sintéticas utilizadas em compósitos estruturais, alguns termoplásticos *commodities* e alguns metais utilizados em estruturas**

| Material  | Densidade (g.cm <sup>-3</sup> ) | Resistência a Tração (MPa) | Resistência a tração específica (MPa/(g/cm <sup>3</sup> )) | Módulo Elástico (GPa) | Módulo Elástico Específico (GPa/(g/cm <sup>3</sup> )) | Referências |
|---|---------------------------------|----------------------------|--|-----------------------|---|-------------|
| Bambu - Ripas ( <i>D. asper</i> )                     | 0,81                            | 245                        | 302  | 20                    | 25  | [23]        |
| Bambu - BLC ( <i>D. asper</i> )                       | 0,79                            | 143                        | 181  | 20                    | 25  | [23]        |
| Bambu - Fibras individuais ( <i>G. angustifolia</i> ) | 1,14                            | 860                        | 754  | 46                    | 40  | [24]        |
| Juta  | 1,30-1,49                       | 393-800                    | 264-615  | 13-26                 | 9-20  | [1]         |
| Rami  | 1,55                            | 400-938                    | 258-605  | 61-128                | 39-83   | [1]         |
| Sisal   | 1,45                            | 468-700                    | 323-483  | 9 - 22                | 6-15  | [1]         |
| Coco  | 1,15-1,46                       | 131-220                    | 89-191   | 4-6                   | 2,7-5,2   | [1]         |
| Aço 1020  | 7,86                            | 380                        | 48   | 210                   | 27  | [13]        |
| Alumínio  | 2,75                            | 35                         | 7  | 69                    | 27  | [13]        |
| Fibra de carbono                                      | 1,74                            | 3600                       | 2069   | 228                   | 131   | [8]         |
| Aramida   | 1,39                            | 3000                       | 2158   | 70                    | 50  | [8]         |
| FV-E  | 2,54                            | 3100-3800                  | 1220-1496  | 76-79                 | 30-31   | [8]         |
| Polipropileno   | 0,90                            | 31-41                      | 34,4-45,5  | 1,08                  | 1,2   | [13]        |
| PEAD  | 0,95                            | 22-31                      | 23,1-32,6  | 1,14-1,55             | 1,2-1,63  | [13]        |

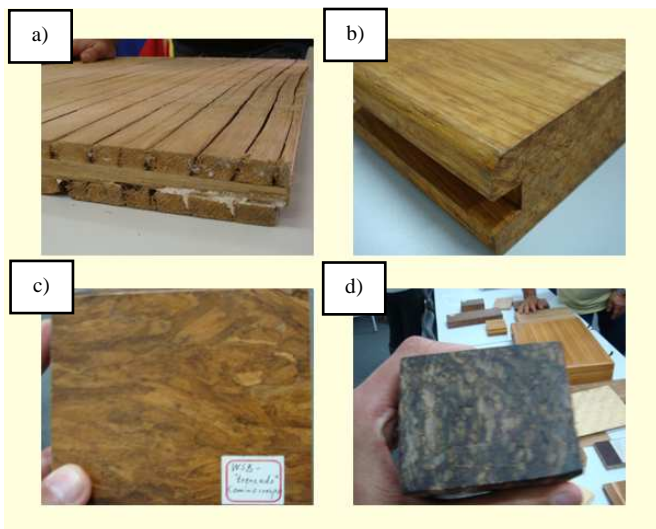
## 2.2 CHAPAS E LAMINADOS DE BAMBU

Dos diversos painéis de madeira disponíveis no mercado, como compensados, painéis MDF e MDP, painéis OSB, dentre outros, todos podem ser fabricados inteiramente de bambu, atingindo melhores propriedades do que os feitos com madeira [7].

Os painéis de bambu podem ser fabricados com elementos de bambu em diversas formas como: fibras longas, fibras curtas, partículas, ripas, laminados, “esteiras” entre outros. Dependendo dos elementos constituintes e de sua configuração, estes painéis podem ser considerados como “estruturais”, quando sua utilização requer alta resistência mecânica, como vigas, paredes e pisos, ou “não-estruturais”



quando utilizados para fins decorativos, como revestimentos de alguns painéis e elementos estruturais, como “painéis de esteira” (ou *esterilla* em espanhol), pisos, chapas e vigas de “bambu trançado prensado” (*Strand Woven Bamboo* ou SWB), são mostrados na Figura 11.



**Figura 11 - Painéis estruturais de bambu: a) painel de esteiras ou *esterillas* de bambu, b) piso de SWB (*Strand Woven Bamboo*), c) painel e d) caibro de SWB.**

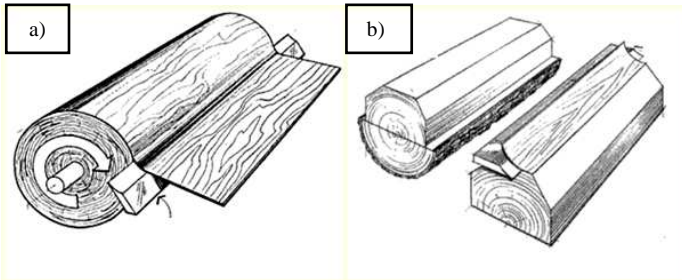
Fonte: do autor.

Tratando-se dos laminados não estruturais, os quais são produzidos neste trabalho, estes são formados pelo empilhamento seqüencial de pelo menos três laminados em direções perpendiculares ou paralelas. Este folhados possuem espessura de cerca de 0,5 mm e são produzidos principalmente no Japão da espécie *Phyllostachis pubescens* [7].

### 2.3 FABRICAÇÃO DE LAMINADOS TORNEADOS

O termo laminado de madeira, em inglês *wood veneer*, corresponde a uma fina camada de material extraída de uma tora de madeira através do corte com faca ou serra [7]. Esta extração pode ocorrer basicamente por: i) torneamento (ou desenrolamento), onde uma tora maciça é rotacionada e pressionada contra uma lamina, Figura 12a),

e ii) pelo faqueamento onde uma tora é fatiada por uma lâmina que desliza no sentido longitudinal da mesma, Figura 12b).



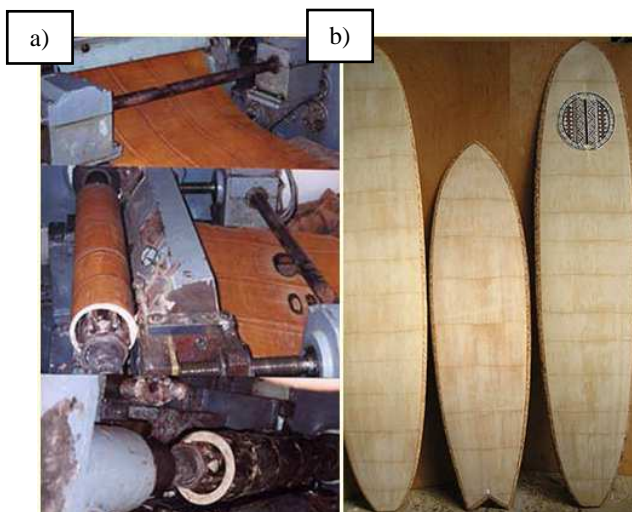
**Figura 12 – Principais métodos de produção de laminados (ou folheados) de madeira: a) torneamento (ou desenrolamento) e b) faqueamento.**

Fonte:[19](adaptado).

Para que a extração do laminado seja facilitada, um tratamento de amolecimento com água fervente (para laminados faqueados) ou vapor de alta pressão (para laminados torneados) é requerido antes da extração. Muitos metros de laminados podem ser extraídos de um tronco de madeira obtendo-se um grande rendimento para cada milímetro de espessura. A principal utilização dos laminados de madeira é no revestimento de chapas de madeira de baixa qualidade e também na fabricação de compensados.

Tratando-se dos laminados de bambu, Existem basicamente dois tipos: contínuos obtidos por torneamento e emendados obtidos por faqueamento de chapas de bambu, que são constituídas de ripas coladas.

Laminados de bambu, ou *bamboo veneers* do termo em inglês, são comuns principalmente na China e Japão e são utilizados principalmente para o revestimento de compensados de madeira e também para a produção de painéis multi-camada [25]. Fora desses países, no entanto, apesar do imenso potencial existente, raras são as aplicações, como por exemplo, móveis, instrumentos musicais e pranchas de surf [26], Figura 13.



**Figura 13 – a) Extração dos laminados de bambu pela técnica de torneamento com centros e b) aplicação na produção de pranchas de surf**

Fonte: [26].

Levando-se em conta o potencial existente para esses painéis em diversas indústrias, pode-se afirmar que o seu desenvolvimento ainda é totalmente incipiente, até mesmo em países que possuem tecnologia de bambu, como a Colômbia, por exemplo. Mesmo no Brasil, que entretanto possui pouca oferta de bambus adequados para essa utilização, devido ao grande rendimento fornecido por esta técnica, a produção destes laminados pode vir a ser uma grande oportunidade comercial.

Os processos utilizados na fabricação de folhados de bambu dividem-se basicamente em: i) métodos que utilizam máquinas (torneamento, faqueamento e corte por serra) e ii) métodos manuais (painel de bambu aplainado) [7].

O torneamento (ou desenrolamento) consiste no corte circunferencial de um colmo de bambu de um ou mais entrenós fixado em um torno. Normalmente a largura não passa de 60 cm, [7], no entanto é possível extrair-se laminados com até 150 cm de largura [27]. A principal dificuldade de se extrair os laminados é a geometria desigual do colmo e o principal fator limitante é a pequena espessura de parede.

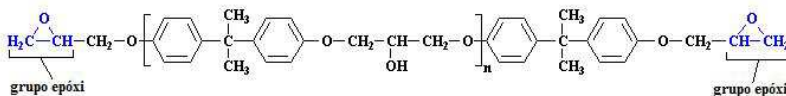
## 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

### 2.4.1 Resinas epóxi

Pertencem a uma classe de resinas termofixas, que oferecem um grande número de combinações e propriedades não obtidas por outras classes de resinas e que são utilizadas nas mais diversas aplicações, como por exemplo: revestimento de latas, placas de circuito impresso, encapsulantes de semicondutores, adesivos, tintas, e compósitos avançados de alta resistência.

O termo epóxi diz respeito a uma vasta gama de polímeros termofixos nos quais a reticulação das cadeias ocorre através da ligação de grupos epóxi. Estes, são constituídos por um anel triplo formado por dois átomos de carbono e um de oxigênio e pode ser ligado a diversos tipos de cadeia polimérica definindo assim as diversas classes desse material.

Sua estrutura não catalisada pode ser observada na Figura 14, e a parte designada como “n” ou “mero” define a sua viscosidade: desde líquida para ( $n \leq 250$ ), até rígida para cadeias longas ( $250 \leq n$ ). É oferecida comercialmente em viscosidades que variam de 5.000 a 14.000 cP a 25 °C.



**Figura 14 - Resina epóxi a base de bisfenol A**

Os três principais componentes que formam uma resina epóxi são: i) uma resina base, ii) agente de cura e iii) agentes modificadores. Podem ser formuladas desde maneira simples, com uma resina base e um agente de cura, até formulações complexas com diversos componentes.

As três principais classes de resinas epóxi são: éter de glicidil bisfenol, amina de glicidil aromática e ciclo alifáticas. As resinas éter de glicidil bisfenol são formada pela reação de condensação entre a epícloridrina e um grupo fenol e entre elas está a resina epóxi mais produzida e utilizada e é conhecida como DGEBA ou éter de diglicidil do bisfenol-A.

A maior parte dos sistemas epóxi curados apresentam resistência à tração de aproximadamente 65 MPa, notável resistência química, à

umidade e à corrosão; propriedades térmicas adequadas, adesivas e elétricas; nenhuma emissão de voláteis, e baixa variação dimensional quando da etapa de cura [8] [28] [29].

As resinas epóxi podem ser formuladas de infinitas maneiras através da combinação de diversos reagentes. Dentre eles estão os agentes de cura que podem ajustar propriedades da resina tais como: cinética de cura, forma física, T<sub>g</sub> e resistências mecânica e química. A cura pode ocorrer em questão de segundos ou até mesmo dias, dependendo do tipo de agente de cura. Pode ocorrer em uma faixa de temperatura de 5 – 260 °C podendo, portanto, ser ativada pela temperatura. Dentre os principais agentes de cura utilizados nas resinas epóxi estão as aminas, derivados de aminas e anidridos e podem ser separados de acordo com a temperatura em que reagem com a resina:

- i) Os que atuam a temperatura ambiente: aminas alifáticas, poliamidas e amidoaminas;
- ii) Os que atuam tanto a temperatura ambiente quanto a alta temperatura: amina de trifluoreto de Boro e imidazólicos;
- iii) Os que atuam em altas temperaturas: aminas aromáticas e anidridos.

Os agentes modificadores são utilizados para dar características especiais à resina não curada e ao produto final. Os principais tipos de agentes modificadores são: borrachas (para melhorar a flexibilidade, resistência à fadiga e absorção de impacto), termoplásticos (mesmo que borrachas), diluentes (para diminuir a viscosidade, freqüentemente perde-se propriedades mecânicas e térmicas), retardantes de chama, cargas (diminuir custo, carga de reforço, diminuir retração, diminuir fluxo e escorrimento e aumentar a condutividade térmica e elétrica) e pigmentos.

Os principais fatores que distinguem o uso das resinas epóxi de acordo com a sua aplicação e processamento são: i) a resistência mecânica (resinas estruturais e não-estruturais), temperatura de serviço (temperatura ambiente e alta temperatura) e viscosidade. Além disso, outros fatores são utilizados como critério de seleção, tais como: resistência a tração, módulo elástico e deformação, resistência ao impacto e tenacidade à fratura, temperatura de deflexão térmica ou HDT e temperatura de transição vítrea ou T<sub>g</sub>, inflamabilidade, durabilidade em serviço, disponibilidade comercial do material, facilidade de processamento e preço.

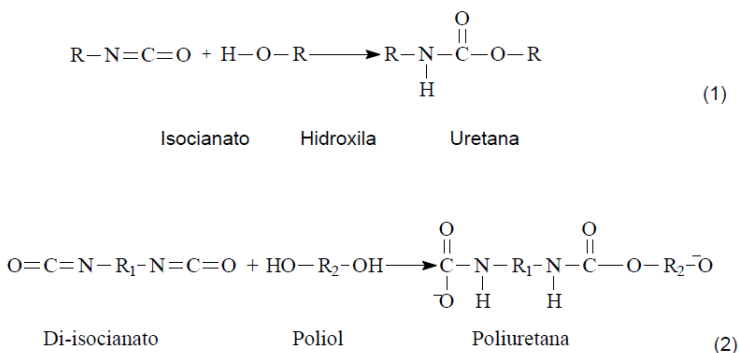
### 2.4.2 Resina poliuretano derivada de óleo de mamona

Os poliuretanos tiveram o seu desenvolvimento a partir da década de 1930 em países como Alemanha e Inglaterra, sendo um dos precursores o químico alemão Otto Bayer. Desde então sofreram um grande crescimento tanto produção e consumo quanto no campo de aplicação. Desde o seu início até os dias atuais, os PUs foram sendo incorporados aos processos de fabricação de espumas rígidas, tintas elastômeros, espumas flexíveis, espumas semi-flexíveis e semi-rígidas, moldagem por injeção e reação ou RIM, entre outros. Nas últimas duas décadas, o desenvolvimento dos PUs tem focado nas questões ambientais, com produtos com baixo nível de emissão de compostos orgânicos voláteis ou VOCs, utilização de polióis derivadas de óleos vegetais como o óleo de mamona e também o reaproveitamento através da reciclagem [30].

Devido ao grande número de reagentes que podem ser utilizados para a sua fabricação, os poliuretanos podem ser produzidos em diversas formas: rígido, flexível, borrachoso e na forma de espumas.

Os poliuretanos são produzidos a partir da reação de poliadição de um di ou poliisocianato com um polímero hidroxilado de baixa massa molecular ou poliól, além de outros reagentes e aditivos tais como: agentes de cura, extensores de cadeia, catalisadores, agentes de expansão, surfactantes, cargas, agente anti-envelhecimento, pigmentos, retardantes de chama, entre outros.

Conforme mostrado na Figura 15 1), a reação entre o grupo isocianato e hidroxila forma o grupo uretana, e a reação entre o di ou poli-isocianato com as hidroxilas do poliól produz o poliuretano, Figura 15 2) [31].



**Figura 15 - Reação entre um isocianato e um poliól para formação do Poliuretano, sendo R, R1 e R2 cadeias carbônicas distintas.**

Fonte: [31](adaptado)

As propriedades dos poliuretanos são influenciadas diretamente pelo isocianato e poliól utilizados na reação, sendo que o primeiro fornece rigidez à cadeia através dos grupos uretana e o segundo confere flexibilidade através da cadeia carbônica. Portanto, desta maneira propriedades como o módulo de elasticidade, tenacidade e Tg podem ser ajustadas através da quantidade relativa dos reagentes utilizados.

Existem dois grupos principais de isocianatos, i) os alifáticos e os ii) aromáticos sendo que os dois tipos mais utilizados, tolueno diisocianato ou TDI e o difenilmetano diisocianato ou MDI, pertencem ao primeiro grupo.

Os isocianatos possuem o grupo NCO que reage com compostos que possuam átomos de hidrogênio ativo, Tabela 3, tais como os polióis, a água, os extensores de cadeia e os grupos hidroxila das fibras vegetais [30]. Dos diversos tipos de isocianatos comerciais, a grande maioria (95%) é aromático à base de TDI ou dos diferentes tipos de MDI [30].

**Tabela 3 - Velocidade relativa de reações típicas dos isocianatos**

| COMPOSTO COM HIDROGÊNIO ATIVO | ESTRUTURA TÍPICA     | VELOCIDADE RELATIVA* |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Amina alifática primária      | R-NH <sub>2</sub>    | 100.000              |
| Amina alifática secundária    | RR'NH                | 20.000 – 50.000      |
| Amina aromática primária      | Ar-NH <sub>2</sub>   | 200 – 300            |
| Hidroxila primária            | RCH <sub>2</sub> -OH | 100                  |
| Água                          | HOH                  | 100                  |
| Ácido carboxílico             | RCOOH                | 40                   |
| Hidroxila secundária          | RR'CH-OH             | 30                   |
| Uréia                         | R-NH-CO-NH-R         | 15                   |
| Hidroxila terciária           | RR'R''C-OH           | 0,5                  |
| Uretano                       | R-NH-CO-O-R          | 0,3                  |
| Amida                         | RCO-NH <sub>2</sub>  | 0,1                  |

Nos PUs a maioria das reações dos isocianatos ocorre através da adição à dupla ligação C=N. Um centro nucleofílico contendo um átomo de hidrogênio ativo ataca o carbono eletrofílico e o átomo de hidrogênio ativo é então adicionado ao nitrogênio. Grupos aceptores de elétrons, ligados ao grupamento NCO, aumentam sua reatividade e os doadores a reduzem e, por isso, os isocianatos aromáticos são mais reativos do que os alifáticos. A ocorrência de impedimento estérico tanto no grupo isocianato, quanto no composto com hidrogênio ativo provocam diminuição na reatividade.

Isocianatos irão reagir com qualquer molécula que contenha um hidrogênio ativo, portanto formando uréia e gás carbônico quando em contato com a água ou umidade. Desta maneira, para compósitos com fibras vegetais é necessário realizar a secagem das fibras antes do processamento.

Existem três principais tipos de polióis, os i) poliéteres, ii) poliésteres e iii) os de cadeia hidrocarbônica. Os polióis poliéteres são os mais utilizados e normalmente são derivados do poli(óxido de propileno) glicol e copolímeros de poli(óxidos de propileno/etileno) glicóis ou PPGs. Os PPGs são utilizados principalmente em espumas flexíveis, os polióis poliésteres utilizados principalmente na produção de elastômeros microcelulares, os polióis poliéster alifáticos nos PUs flexíveis, os polióis poliéster aromáticos nos Pus rígidos, os polióis PTHF em elastômeros de alto desempenho e finalmente polióis acrílicos em vernizes de acabamentos automotivos.



## 2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS

Existem diversos processos de fabricação de compósitos, dos mais simples aos mais complexos e especializados. Através deles transforma-se as matérias-primas, resinas, fibras, cargas, aditivos, etc., em peças e produtos finais. Os processos mais conhecidos e utilizados são: moldagem por contato ou laminação manual, laminação por projeção simultânea, laminação contínua, bolsa de vácuo, infusão a vácuo, moldagem por transferência de resina ou RTM (*light* e alta pressão), enrolamento filamental, pultrusão, processos de moldagem a quente como o SMC e o BMC, preenchimento e autoclave, dentre muitos outros especializados e com variações [11].

De todos os processos disponíveis, os que são mais atrativos para a fabricação de compósitos de laminados torneados de bambus são a laminação manual, laminação contínua, bolsa de vácuo e infusão a vácuo.

### 2.5.1 Moldagem por contato ou laminação manual

É o mais simples de todos os processos de fabricação de compósitos e consiste em impregnar com uma resina termofixa diversas camadas de reforço usualmente dispostas em um molde côncavo. Para tal impregnação, utiliza-se rolos ou pincéis e, após a laminação do laminado este pode ser submetido a uma compressão para que haja melhor adesão entre as camadas e que as bolhas em excesso sejam expulsas. A fração de fibras obtida na laminação é de cerca de 30 %m/m, porém maiores valores podem ser alcançados com a maior permeabilidade do reforço, menor viscosidade da resina e maior pressão de compressão.

É um método simples, que requer poucos investimento e equipamento, porém custoso do ponto de vista da mão de obra e ineficiente do ponto de vista da produtividade. É aplicado principalmente na fabricação de cascos de barcos, piscinas, carenagens de veículos, entre outros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

A resina poliuretano (Imperveg® RP1315A) constituída por dois componentes, um pré-polímero (componente A) e um polioli (componente B), foi doada gentilmente pela empresa Imperveg localizada em Aguai – SP. É uma resina semi-rígida, isenta de solventes e derivada do óleo de mamona. Os componentes A, B e a mistura final possuem, respectivamente, densidades de 0,98 g/cm<sup>3</sup>, 1,22 g/cm<sup>3</sup>, e 1,05 g/cm<sup>3</sup>. Sua resistência à tração é de ~15MPa e deformação na ruptura de cerca de 8%.

A resina epóxi foi obtida no comércio de São José – SC, da fabricante Triepox em dois componentes, resina epóxi do bisfenol A com massa molar  $\leq 700$  g.mol<sup>-1</sup> (Triepox® TCR-550) e agente de cura à base de amina (XR-435). Resina e agente de cura possuem, respectivamente, densidade de 1,10 - 1,6 g/cm<sup>3</sup> e 1,00 – 1,01 g/cm<sup>3</sup>. Sua resistência à tração é de 61 MPa e deformação na ruptura de cerca de 16%.

Os laminados torneados de bambu foram obtidos em laboratório a partir de um dispositivo protótipo adaptado de um torno desenrolador. Os folhados possuem espessura de 0,2-0,5 mm, 20 cm de largura e comprimento definido pela extração, Figura 16.



**Figura 16 – Laminados torneados de bambu extraídos por um dispositivo desenvolvido e construído no laboratório.**

Fonte: do autor.

## 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Preparação dos corpos-de-prova de resina

Os componentes do poliuretano ou da resina epóxi foram misturados sob vácuo por doze minutos em um misturador mecânico a 275 RPM, conforme ilustrado na Figura 17. As proporções utilizadas na mistura do poliuretano e da resina epóxi foram de 1,0:1,2 (m:m) (componente A: componente B) e 2:1 (m:m) (resina epóxi:agente de cura), respectivamente.



**Figura 17 - Esquema ilustrativo do misturador mecânico a vácuo utilizado para a mistura dos componentes do compósito.**

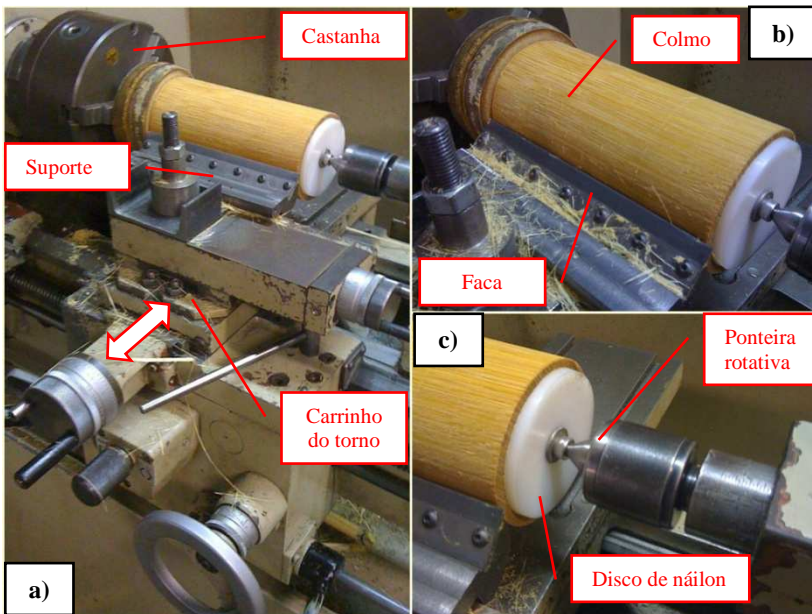
Fonte: do autor.

Para a fabricação dos corpos-de-prova de tração, As misturas de pré-polímero/poliol e resina epóxi/agente de cura foram vertidas em um molde de silicone nas dimensões dos corpos de prova da norma ASTM D638-08. Para a confecção das amostras de flexão e impacto, as misturas foram vertidas em uma placa retangular até atingirem a espessura desejada e, depois de curadas, foram cortadas com uma microretífica Dremel nas dimensões das normas ASTM D7264-07 e ASTM D256-06, respectivamente.

Os compósitos com matriz de resina de poliuretano foram curados à temperatura ambiente por uma semana, enquanto que os com resina epóxi foram curados em estufa à 60 °C por 60 minutos.

### 3.2.2 Extração dos laminados de bambu

Devido à total indisponibilidade dos laminados contínuos de bambu no Brasil, foi necessário produzi-los em laboratório, tornando-se a sua obtenção uma etapa bastante laboriosa, uma vez que foi necessário desenvolver e construir um equipamento de extração. Desta forma, foi desenvolvido um dispositivo para se extrair os laminados de bambu, conforme ilustrado na Figura 18.



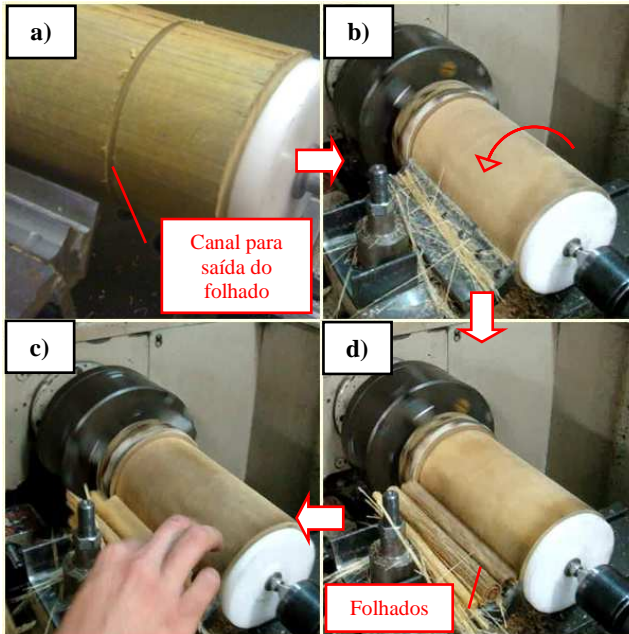
**Figura 18 - a) Ilustração do dispositivo para a produção dos folhados de bambu acoplado ao torno mecânico, b) detalhes do suporte: faca de desempenho de Widea e c) ponteira rotativa e disco de náilon para fixação do colmo de bambu.**

Fonte: do autor.

Este dispositivo é simples e robusto e facilmente acoplável a um torno mecânico. Sua construção foi baseada em um projeto de um torno desenrolador utilizado para a produção de laminados de madeira. O dispositivo é constituído basicamente por um suporte de aço e uma ferramenta de corte (faca de desempenho de 30 cm de largura, gentilmente doada pela empresa Aço e Widea de Joinville – SC), conforme ilustrado na Figura 18a). Este suporte é fixado no carrinho do torno, o qual possui movimento transversal ao eixo principal, detalhe da Figura 18a), e pode ser precisamente controlado pelo operador do torno.

Para a correta fixação do colmo de bambu no torno, uma de suas extremidades é fixada pela castanha e a outra por um suporte adaptável de náilon que é preso à ponteira rotativa do torno, Figura 18c). Outra alternativa é inserir um eixo por dentro do colmo, fazendo o suporte pela parte interna para o corte externo.

Após a fixação do colmo é realizada a extração das fibras, que consiste nas seguintes etapas: i) fixar um colmo de bambu com seção de aproximadamente 30 cm de comprimento no torno, ii) “sangrar” dois canais laterais para a saída do laminado; iii) realizar a retificação da camada externa do colmo para facilitar a extração dos laminados e por último iv) avançar o suporte com a faca de forma a pressionar a superfície do colmo, extraíndo finos laminados de bambu. A espessura do laminado obtido é ajustada pela rotação do torno, e pelo avanço do carrinho. Os laminados são extraídos no sentido circunferencial, como o desenrolar de uma bobina de papel e, como as fibras do bambu são todas alinhadas paralelamente ao eixo longitudinal do colmo, são obtidos laminados unidirecionais. As principais etapas da extração dos laminados são mostradas na Figura 19.



**Figura 19 - Esquema do procedimento utilizado para a extração dos laminados: a) “sangramento” dos canais laterais; b) retificação da camada externa do colmo; c) e d) avanço do suporte e extração dos laminados de bambu.**

Fonte: do autor.

Comparando-se com uma tora de madeira, os colmos de bambu possuem uma pequena espessura disponível para extração dos laminados. Por outro lado, o rendimento por milímetro de espessura é grande e depende de alguns fatores como, i) espessura dos laminados, ii) espessura da parede do colmo, iii) diâmetro do colmo e iv) largura da faca, neste caso 20 cm. Para um típico colmo de bambu gigante com 12 cm de diâmetro e 25 mm de parede, consegue-se um aproveitamento de cerca de 70%, ou ~18 mm; 2 mm são perdidos na retificação da superfície e 5 mm são deixados no final. Destes 18 mm, são produzidos cerca de 20,52 metros lineares de folhado por entrenó ou 4,10 m<sup>2</sup> de folhado, com os quais consegue-se produzir 1,02 m<sup>2</sup> de um composto com quatro camadas e cerca de 1,8 mm de espessura.

Entretanto, como a parte interna da parede do colmo possui uma estrutura com baixa fração volumétrica de fibras, apenas os primeiros

metros lineares extraídos do colmo são realmente resistentes. Portanto, se os folhados externos e internos forem misturados, serão obtidos compósitos de média resistência, porém, se apenas os primeiros metros de folhados forem misturados, serão obtidos compósitos de alta resistência.

### **3.2.3 Preparação dos compósitos**

Neste trabalho, foram produzidos compósitos de matriz epóxi ou poliuretano com camadas bidirecionais (dispostas perpendicularmente entre si) e unidirecionais (com todas as fibras na mesma direção). Os compósitos foram produzidos com quatro ou mais camadas, com espessuras de ~1,8 – 3,2 mm, de acordo com a necessidade do ensaio a ser realizado.

Foi utilizado o processo de laminação manual seguido de compressão em uma prensa com carga máxima de compressão de 15 toneladas, Figura 20, a uma tensão de ~0,27 MPa por um período de 24h à temperatura ambiente. Estas condições de moldagem foram escolhidas por serem adequadas para aglomerar adequadamente as fibras sem danificá-las e conseguir eliminar a maior parte das bolhas retidas na resina. O tempo de pós-cura para as amostras dos compósitos de PU foi de 10 dias à temperatura ambiente, enquanto que os corpos de prova dos compósitos de epóxi passaram por um tratamento de pós-cura por quatro horas à  $70 \pm 5$  °C. Desta maneira, foram obtidos compósitos com uma fração de fibras de  $52 \pm 2$  % (m/m).



**Figura 20 – Prensa utilizada para a compressão e moldagem dos laminados de bambu e resina formando as chapas de material compósito.**

Fonte: do autor.

Os métodos de bolsa de vácuo e infusão a vácuo também foram utilizados na fabricação dos compósitos, obtendo chapas com altas frações de fibras chegando a quase 80 % (m/m). No entanto, devido à alta viscosidade das resinas epóxi e poliuretano, que dificultavam a impregnação do laminado, e o longo tempo de vácuo requerido para a cura das mesmas, estes métodos foram substituídos pela laminação manual seguida de compressão.

### **3.2.4 Produção dos corpos de prova dos compósitos**

Para a produção dos corpos de prova de tração, flexão e impacto, foram utilizadas chapas laminadas de espessuras adequadas para cada norma, das quais foram cortados os corpos de prova utilizando-se uma microretífica Dremel com serra para madeira, conforme mostrado na Figura 21. Foram seguidas as orientações e dimensões das normas mencionadas no item 3.2.1.





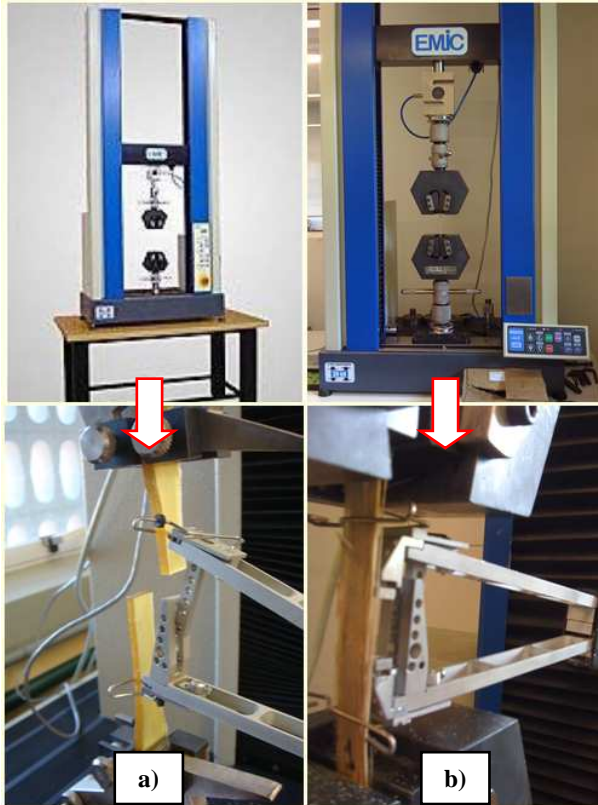
**Figura 21 - Ilustração do método usado para cortar os corpos de prova de um compósito.**

Fonte: do autor.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração das resinas, do bambu e dos compósitos uni e bidirecionais foram realizados conforme as normas ASTM D638-08, “Propriedades de Tração para Plásticos” e ASTM D3039, “Propriedade de Tração de Materiais Compósitos com Matriz Polimérica”. Para as resinas e compósitos bidirecionais utilizou-se uma máquina universal de ensaios Emic DL2000 com célula de carga de duas toneladas, Figura 22a), e para o ensaio dos laminados de bambu e compósitos unidirecionais foi utilizada uma máquina de ensaios Emic 3000 com célula de carga de 20 toneladas com garras autotravantes por efeito de cunha, Figura 22b).



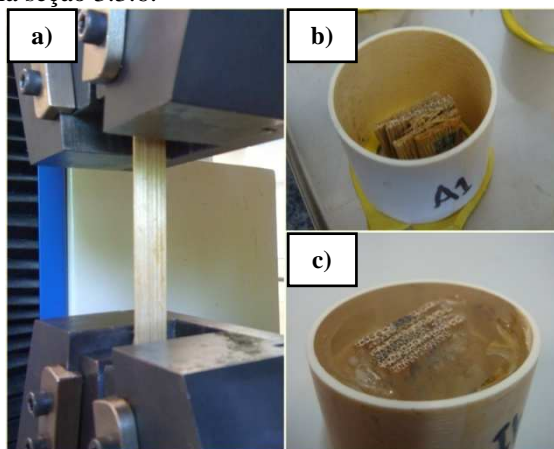
**Figura 22 - Máquinas universais de ensaios, a) Emic DL2000 e b) DL3000, utilizadas para realização dos ensaios de tração.**

Fonte: do autor.

Com os resultados destes ensaios, foram plotados gráficos Tensão x Deformação de onde foram obtidos: i) o módulo elástico ( $E$ ), ii) a tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), iii) a tensão de ruptura ( $\sigma_{\text{rup}}$ ) e iv) a deformação na ruptura ( $\epsilon_{\text{rup}}$ ).

Para o ensaio de tração do bambu, um procedimento especial foi adotado: a medição da fração de fibras de cada corpo de prova ensaiado para posterior comparação com os valores de resistência à tração e módulo elástico. Desta maneira, de cada corpo de prova ensaiado, Figura 23a), foi cortada uma pequena seção, Figura 23b), que foi embutida em resina e preparada para a observação microscópica Figura

23c). O procedimento para medição das frações volumétricas será detalhado na seção 3.3.6.



**Figura 23 – a) Ensaio de tração do bambu, com retirada de amostras, b) e c), para análise e quantificação da microestrutura para futura comparação com os resultados mecânicos.**

Fonte: do autor.

### 3.3.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão do bambu, da resina epóxi e dos compósitos foram realizados de acordo com a norma ASTM D7264-07, “Propriedades de Flexão de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica”. Foi utilizado o modo “flexão por três pontos” em uma máquina universal de ensaios Emic DL2000, com célula de carga de 2 toneladas e um dispositivo para ensaio de flexão/dobramento Emic DP5.01, Figura 24.

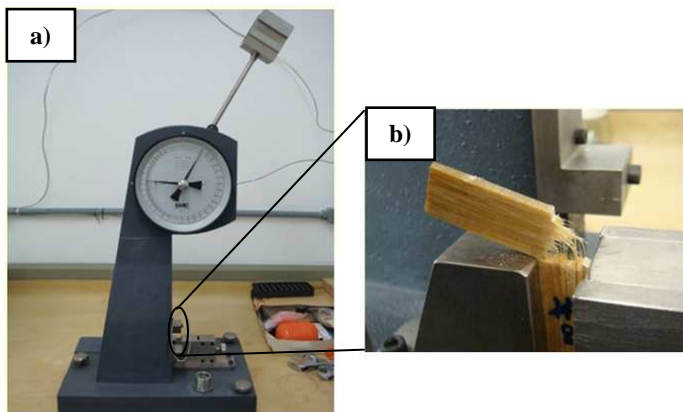


**Figura 24 – Ensaio de flexão no modo “flexão em três pontos”, que consiste em aplicar a força de flexão no centro do corpo de prova através de um cutelo até o mesmo romper-se ou deformar-se a um determinado valor**

Fonte: do autor.

### **3.3.3 Ensaio de impacto Izod**

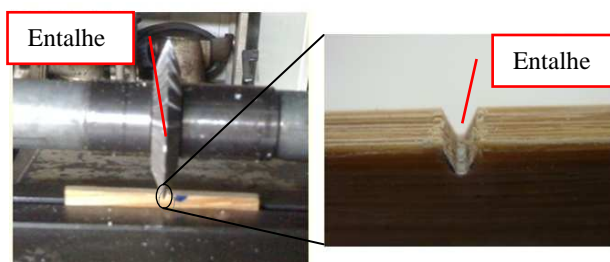
O ensaio de impacto Izod foi realizado de acordo com a norma ASTM D256-06, “Determinando a Resistência ao Impacto do Tipo Pêndulo Izod de Plásticos”, que também é aplicada a polímeros e compósitos poliméricos. Foram ensaiadas as resinas epóxi e poliuretano e seus respectivos compósitos uni e bidirecionais. Foi utilizado um pêndulo do tipo Izod Emic AIC-1, com energia nominal de 2,70 J para o ensaio dos polímeros, e 10,80 J para o ensaio dos compósitos, conforme ilustrado na Figura 25.



**Figura 25 – a) Pêndulo para ensaio de impacto do tipo Izod e b) corpo de prova após o ensaio.**

Fonte: do autor.

Os corpos de prova para ensaio de impacto foram cortados com uma microretífica a partir de chapas de compósitos ou resina pura de cerca de 4,0 mm de espessura, conforme descrito na seção 3.2.4. Em seguida, foram entalhados por uma fresa de perfil constante para ensaio de impacto com ângulo de  $45^\circ$  e raio de 0,25 mm, conforme detalhado na Figura 26.



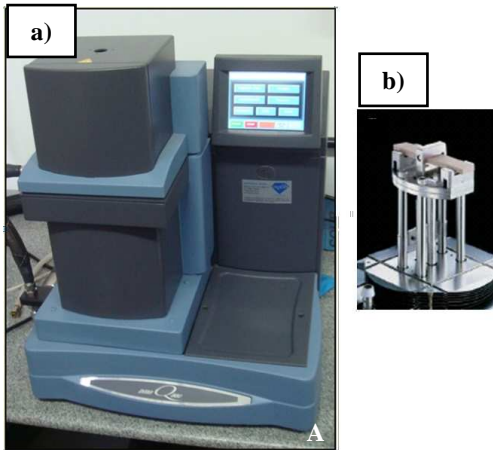
**Figura 26 – Fresa de topo utilizada para se fazer os entalhes de maneira normatizada nos corpos de prova.**

Fonte: do autor.

### 3.3.4 Análise dinâmico mecânica – DMA

A análise dinâmico-mecânica foi realizada em um equipamento da TA Instruments modelo Q800, com frequência de 1Hz, deformação

de 0,5% e faixa de temperatura de 30 a 140 °C, Figura 27a). Os corpos de prova foram cortados com uma microretífica nas dimensões de 35 x 5 x 10 mm (comprimento x largura x espessura). Foram ensaiados os polímeros puros e seus respectivos compósitos no modo “flexão em dois pontos” ou *single cantilever bending*, conforme mostra a Figura 27b). Neste modo, uma das extremidades do corpo de prova é fixada por pressão e a outra presa a uma haste que realiza um esforço de flexão cíclico.



**Figura 27 - a) Equipamento utilizado para a realização do ensaio de DMA das resinas puras e dos compósitos de bambu e b) garra de flexão em dois pontos (*Single Cantilever Bending*).**

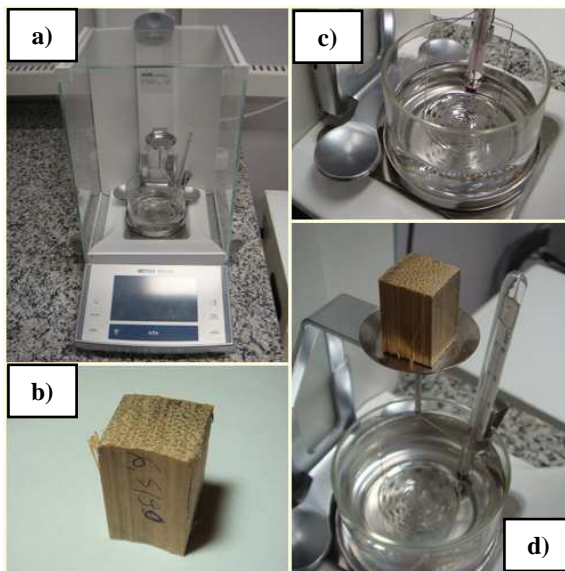
Fonte: do autor.

### 3.3.5 Determinação da densidade relativa

Foram utilizados dois métodos para a medição da densidade das resinas, do bambu e dos compósitos: densidade relativa de acordo com a norma ASTM D792-08 e a simples medição da massa e volume dos corpos de prova.

Para a realização das medidas de densidade relativa, foi utilizada uma balança analítica de precisão da marca Mettler-Toledo modelo XS205, adaptada para a medição de densidade conforme mostrado na Figura 27a). O procedimento experimental nesta balança é extremamente rápido e simples, e consiste apenas em medir o peso da amostra fora do líquido, Figura 27d) e em seguida medir novamente o

peso da amostra imersa em água com auxílio do suporte imerso, Figura 27c). Após estas duas medidas, a balança calcula automaticamente a densidade relativa da amostra.



**Figura 28 - Medição da gravidade específica de um material**

Fonte: do autor.

Nos casos em que a amostra reaja com a água, se dissolva ou sofra absorção, por exemplo, deve-se utilizar um outro líquido inerte, como etanol ou óleo vegetal ou então utilizar um outro método.

O segundo método utilizado para a medição da densidade foi a simples medição da massa e volume das amostras e o cálculo da densidade utilizando a Equação 1 que é a equação básica da densidade:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

**Equação 1**

Onde,

$\rho$ : densidade,

$m$ : massa,

$v$ : volume.

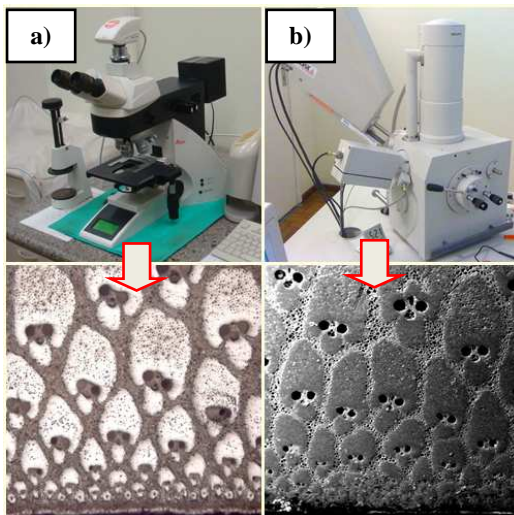
O procedimento deste método consiste em i) medir com um paquímetro as dimensões do corpo de prova e calcular o seu volume, ii) medir a sua massa em uma balança de precisão, e iii) calcular a sua densidade conforme acima mencionado.

Como o bambu absorve água quando em contato com a mesma, a medição de sua densidade foi realizada por este método. Para a confecção dos corpos de prova, foram cortados 10 cubos de bambu da parede do colmo e tirada uma média, conforme mostra a Figura 28b). Como a concentração de fibras e parênquima varia conforme a posição na espessura, o valor obtido representa um valor médio da densidade do bambu. Como as fibras possuem maior densidade, e na parte externa há uma maior concentração de fibras, pode-se concluir que a parede do bambu é mais densa na parte externa e menos densa na parte interna.

### **3.3.6 Microscopia**

A microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) foram utilizadas para observar a microestrutura dos laminados e dos compósitos e também medir a fração volumétrica de fibras e matriz. Foi utilizado um microscópio óptico da marca Leica modelo DM4000M, com aumento de até 1500x, Figura 29a), e um microscópio eletrônico de varredura da marca Phillips modelo XL 30 Figura 29 b).

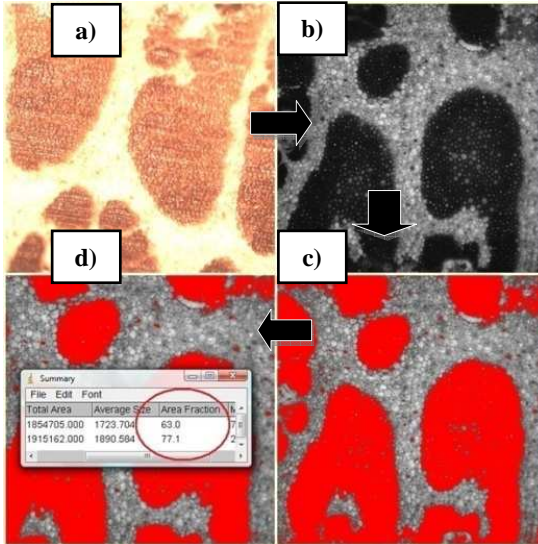




**Figura 29 – a) Microscópio óptico e b) eletrônico de varredura para realização da investigação das microestruturas do bambu e dos compósitos.**

Fonte: do autor.

A medida da fração volumétrica das fases constituintes dos laminados e do bambu (parênquima e fibras) foi realizada através da análise das micrografias (MO ou MEV) pelo programa ImageJ. Através deste programa é possível saturar as fases constituintes com diferentes cores e em seguida quantificá-las. Conforme esquematizado na Figura 30, i) uma micrografia normal, Figura 30a), é ii) convertida para uma imagem de 8-bits, Figura 30b), e em seguida iii) saturada por uma ou mais cores, Figura 30c). Após este procedimento, o programa calcula as frações de área que foram saturadas e apresenta os valores em uma tabela, conforme ilustrado na Figura 30d).



**Figura 30 - Medição da fração volumétrica das fases constituintes da microestrutura do bambu, através do cálculo das áreas relativas por saturação de cores.**

Fonte: do autor.

Desta maneira, foi obtida a fração volumétrica das fases constituintes do bambu (matriz, fibras e vasos). Tal método, que obtém a fração volumétrica a partir do cálculo das áreas, só é válido para as situações em que a estrutura seja constante ao longo de seu eixo longitudinal, que é o caso do bambu e também de compósitos fibrosos com fibras unidirecionais.

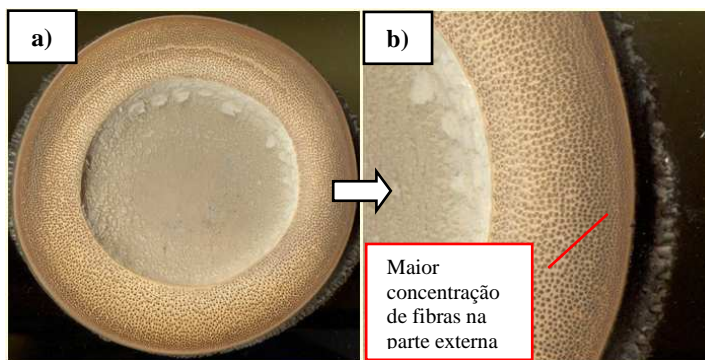
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 FIBRAS DO BAMBU

#### 4.1.1 Caracterização microestrutural

Devido às características morfológicas especiais do bambu, sua caracterização microestrutural é fundamental quando se deseja utilizar este material como matéria prima para a fabricação de chapas, laminados e compósitos. As principais características morfológicas e de resistência são i) a variação de propriedades ao longo do comprimento do colmo, ii) a variação de propriedades na espessura da parede do colmo, iii) a anisotropia do bambu, iv) a existência de nós e diafragmas internos ao longo do colmo, v) a variação de comprimento das fibrilas entre o nó e o entrenó e vi) o afinamento ao longo de seu comprimento.

No que tange a extração de laminados, o aspecto morfológico da microestrutura que mais afeta a sua resistência é a variação na concentração de fibras ao longo da espessura, Figura 31 a) e b), que é maior na parte externa e diminui gradualmente para o interior.

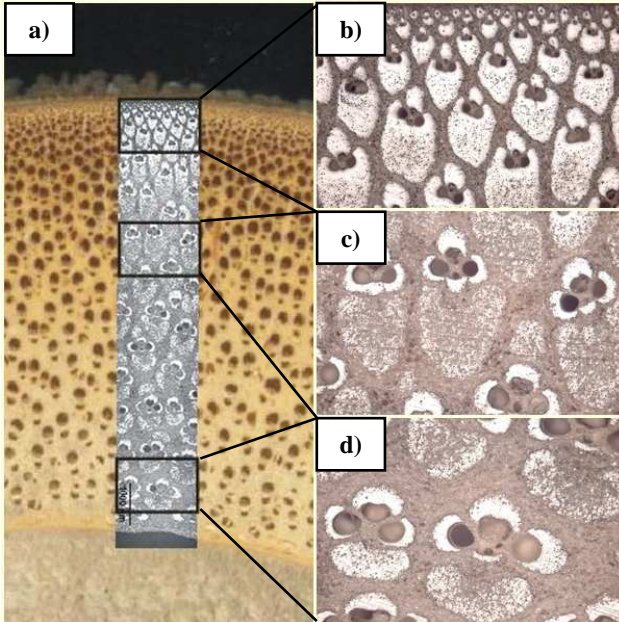


**Figura 31 – a) Corte transversal de um colmo de bambu e b) detalhe da parede do colmo onde observa-se a maior concentração de fibras na parte externa.**

Fonte: do autor.

Conforme descrito em detalhe na seção 2.1.7 - “Anatomia do colmo”, a microestrutura do bambu é formada basicamente por uma fase contínua e de baixa resistência chamada de parênquima e por uma fase descontínua de alta resistência formada pelos feixes vasculares. Estas

duas fases e seus elementos constituintes podem ser observados na Figura 32.



**Figura 32 – a) Corte transversal da parede do colmo e b,c,d) micrografias da microestrutura da parede do colmo onde: a) observa-se a maior concentração de fibras na parte externa (parte superior da foto) e b,c,d) a variação da morfologia dos feixes vasculares**

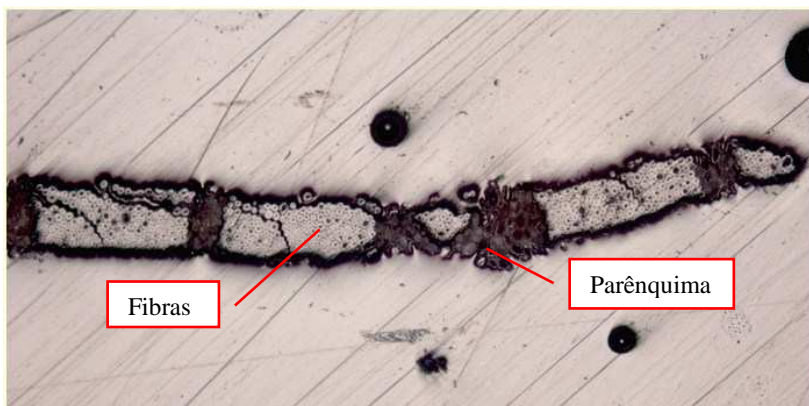
Fonte: do autor.

Nota-se que a fração de fibras diminui da parte externa para a parte interna e a forma dos feixes vasculares também muda. Eles são menores e mais densos na parte externa, Figura 32b) e maiores e mais dispersos e com formato de “pata de onça” na parte interna, Figura 32d). Como as fibras estão relacionadas diretamente com a resistência do bambu, há uma grande variação de resistência conforme a posição que se extrai o material da espessura da parede do bambu. Desta maneira, os primeiros metros de laminados extraídos do colmo, para o *Dendrocalamus asper*, tendem a ser 75% mais resistentes do que os laminados extraídos do interior da parede do colmo [32].

### 4.1.2 Morfologia dos laminados de bambu

Os laminados torneados de bambu são constituídos basicamente por feixes de fibras paralelos, alinhados no sentido longitudinal, e células parênquima, que são frágeis e formam uma estrutura contínua que envolve os feixes vasculares. Desta maneira, são frágeis no sentido perpendicular às fibras e extremamente resistentes paralelamente a elas. Como sua microestrutura varia ao longo da espessura, Figura 33, folhados extraídos da parte externa com maior quantidade de fibras, possuem melhor resistência ao manuseio e também maior resistência à tração no sentido longitudinal. Portanto, durante sua extração por torneamento, conforme a posição na parede do colmo, os laminados variam bastante em relação a i) sua estrutura, ii) sua resistência e ao seu acabamento superficial.

Desta forma, o melhor folhado pertence à região externa do colmo, pois possui grande concentração de fibras, ótima resistência mecânica, não se desfaz facilmente com o manuseio e possui bom acabamento superficial.

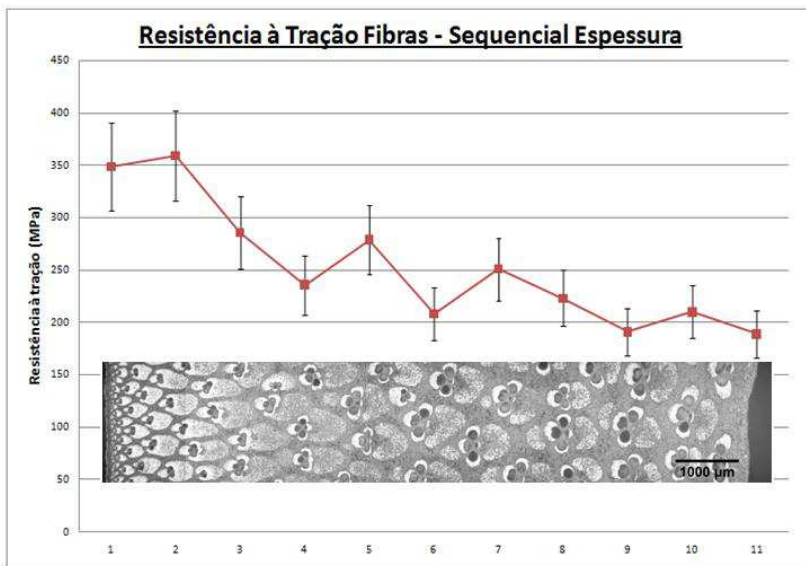


**Figura 33 - Micrografia da seção transversal de um laminado de bambu embutido em resina, com cerca de 250  $\mu\text{m}$  de espessura, constituído basicamente por feixes de fibras e células parênquima.**

Fonte: do autor.

### 4.1.3 Avaliação da resistência à tração dos laminados

Para se avaliar a variação da resistência mecânica ao longo da parede do colmo, foi realizado um estudo onde finas ripas de bambu foram extraídas sequencialmente ao longo da espessura, e ensaiadas por tração. Estas ripas foram cortadas na mesma espessura a partir da parte externa e numeradas de um a onze. Destas, foi construída uma curva da resistência à tração em função da posição da ripa, conforme ilustrado na Figura 34. Desta curva, observa-se que a parte externa do colmo possui valores médios de 350 MPa e a parte interna possui valores médios de 190 MPa. Portanto, a parte externa é 85% mais resistente que a parte interna da parede do colmo.



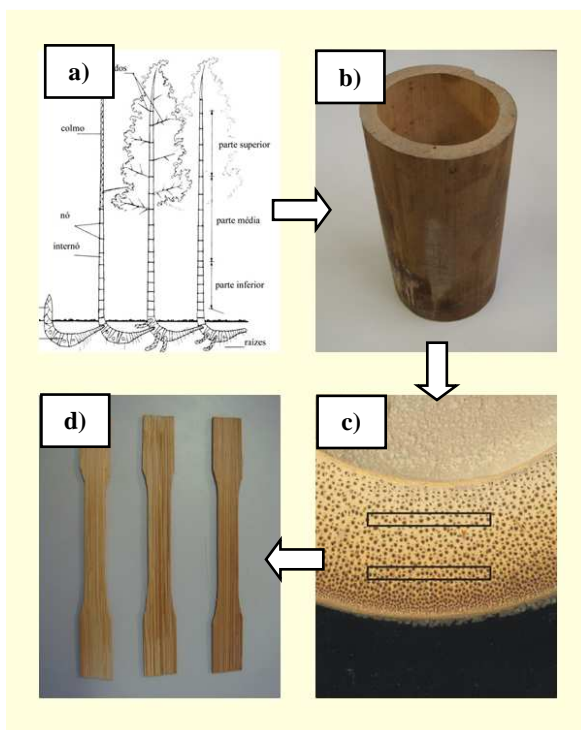
**Figura 34 - Resistência à tração em função da posição na espessura do colmo.**

Como o ensaio foi realizado de amostras do mesmo entrenó, cerca de 10 ripas de cada espessura, pode-se afirmar que amostras retiradas da mesma espessura possuem frações volumétricas de fibras muito semelhantes. Medições feitas neste trabalho, seção 4.1.4,

Figura 36, indicaram que a parte externa do colmo possui fração volumétrica de cerca de 60% de fibras e a parte interna de cerca de 35%.

#### 4.1.4 Determinação do valor médio da resistência à tração e módulo de elasticidade para o colmo

A determinação do valor médio de resistência a tração e módulo elástico do colmo foi realizada segundo metodologia adotada por Hidalgo-López, 2003[7], e é ilustrada na Figura 35. Este procedimento consistiu em i) selecionar um colmo maduro da espécie *Dendrocalamus asper* de 15 metros de altura, ii) dividi-lo em três partes (basal, média e apical), Figura 35a), iii) retirar um entrenó de cada seção, Figura 35b), iv) extrair corpos de prova delgados no sentido longitudinal da parte externa (Ext) e interna (Int) do colmo, Figura 35 c) e d) e v) ensaiá-los por tração em uma máquina universal de ensaios.



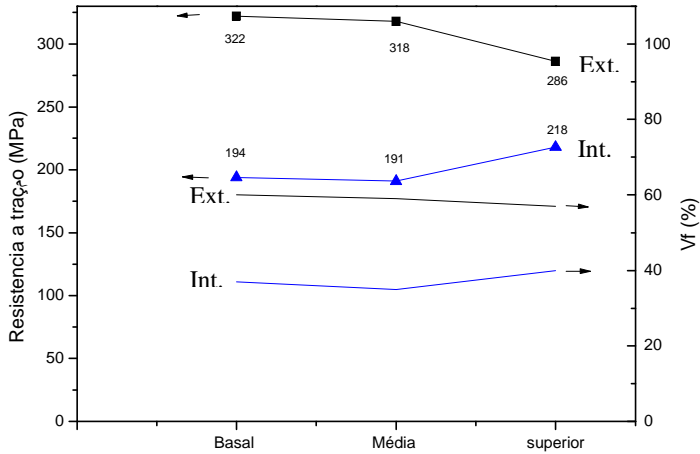
**Figura 35 – Preparação dos corpos de prova para ensaio de tração e determinação do valor médio de resistência de um colmo de *Dendrocalamus asper*.**

Fonte: do autor.

A partir do ensaio de tração foram construídas curvas da resistência à tração,

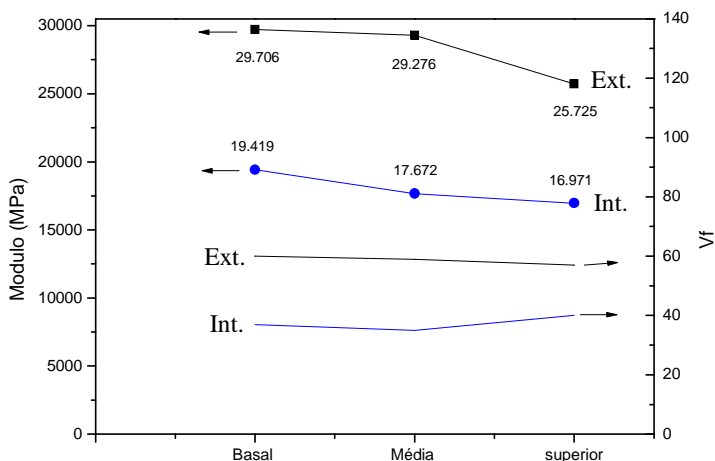
Figura 36, e do módulo de elasticidade,

Figura 37, correlacionando-se os valores com a fração volumétrica e a seção do colmo (basal, média, apical).



**Figura 36 - Resistência a tração do bambu em função da altura do colmo (basal, média, superior) e da posição na parede do colmo (Ext., Int.)**





**Figura 37 - Módulo de elasticidade do bambu em função da altura do colmo (basal, média, superior) e da posição na parede do colmo (Ext., Int.)**

Observa-se que os valores da resistência à tração e módulo de elasticidade para as amostras extraídas da parte externa do colmo (Ext) são maiores do que os obtidos para os corpos de prova retirados da parte interna (Int), uma vez que a fração volumétrica de fibras na região externa é maior do que a interna. Por outro lado, a quantidade de fibras e os valores das propriedades de tração das amostras extraídas da parte basal, média e apical são semelhantes.

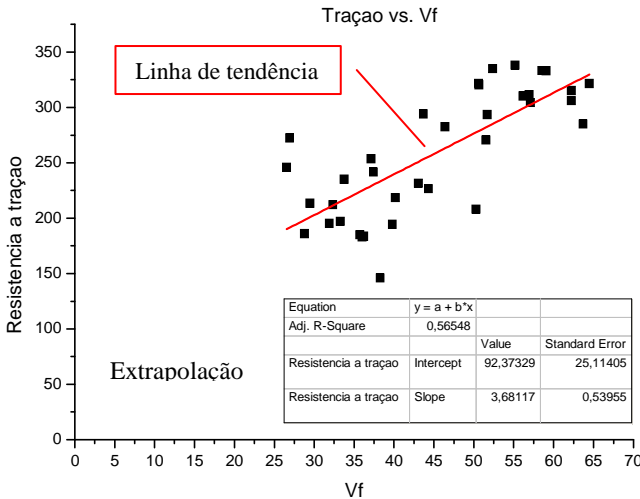
Como a resistência do bambu está diretamente ligada à fração de fibras da estrutura sendo testada, foi então construída a curva da resistência à tração em função da fração volumétrica de fibras, Figura 38. Conforme esperado, à medida que a fração volumétrica de fibras aumenta há um aumento na resistência à tração dos folhados de bambu. Assumindo-se Em seguida, foi adicionada uma linha de tendência obtendo-se a Equação 2:

$$y = a + bx = 92,3 + 3,6x$$

**Equação 2**

Pode-se prever com esta equação a resistência à tração do bambu conforme a fração volumétrica de fibras.

Para a obtenção da linha de tendência, assume-se que a relação Resistência vs. Fração volumétrica seja linear, e tudo indica que sim, pois a linha de tendência linear foi a que se ajustou com menor erro. Entretanto, um estudo matemático mais aprofundado se faz necessário para maior segurança na obtenção desta relação. Além disso, através da extrapolação desta curva consegue-se obter um valor teórico de uma estrutura com  $V_f = 0\%$ , ou seja, composta apenas de parênquima, e  $V_f = 100\%$ , composta apenas de fibras. Os valores obtidos foram, respectivamente de 92,3 MPa e 460 MPa. Não foram encontrados dados na literatura que comprovem ou neguem os valores encontrados. Portanto, faz necessário um novo estudo com esta espécie para comprovação da equação e dos valores encontrados.

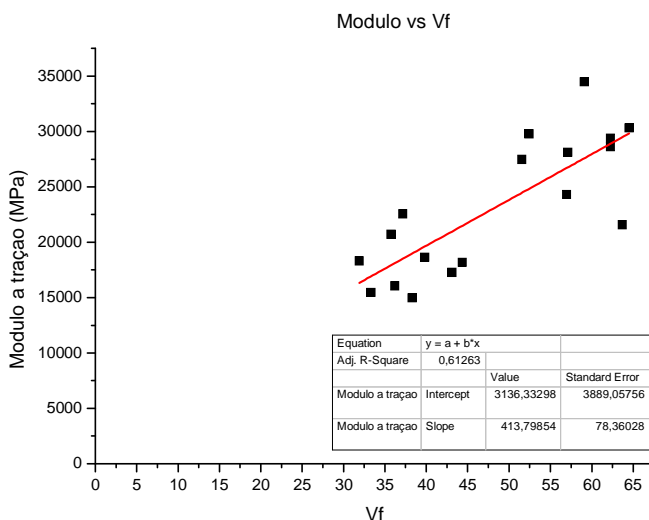


**Figura 38 – Gráfico da Resistência a tração em função da fração volumétrica de fibras para determinação de correlação matemática entre estas propriedades**

A mesma metodologia, adotada para estimar a resistência à tração do parênquima e fibra, foi utilizada para o módulo elástico, Figura 39,

obtendo a Equação 3, e os seguintes valores teóricos do módulo do parênquima e do módulo das fibras, respectivamente: 3,136 GPa e 44,516 GPa.

$$y = a + bx = 3136 + 413,8x \quad \text{Equação 3}$$



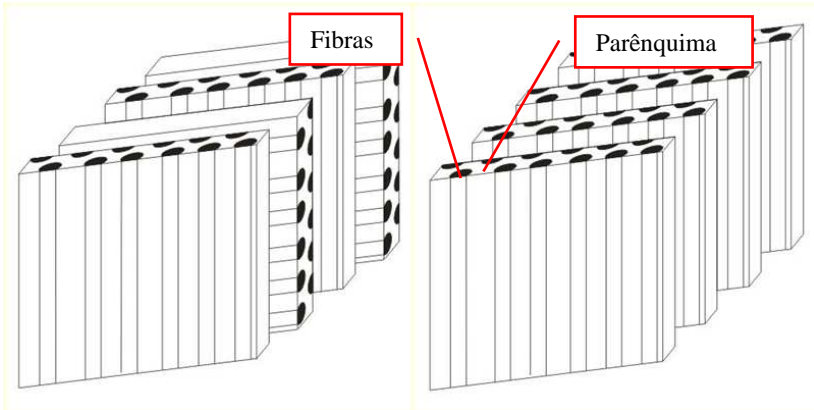
**Figura 39 – Gráfico do Módulo elástico em função da fração volumétrica de fibras para determinação de correlação matemática entre estas propriedades**

## 4.2 COMPÓSITOS

### 4.2.1 Microestrutura

Muito estudada na área de Engenharia de Materiais, a inter-relação propriedades-processamento-microestrutura, mostra que a microestrutura depende basicamente do processamento e das propriedades dos materiais constituintes. Neste trabalho, foram utilizados laminados torneados de bambu empilhados seqüencialmente e moldados em seguida por compressão. Desta maneira, foram produzidas duas microestruturas distintas: a primeira do empilhamento

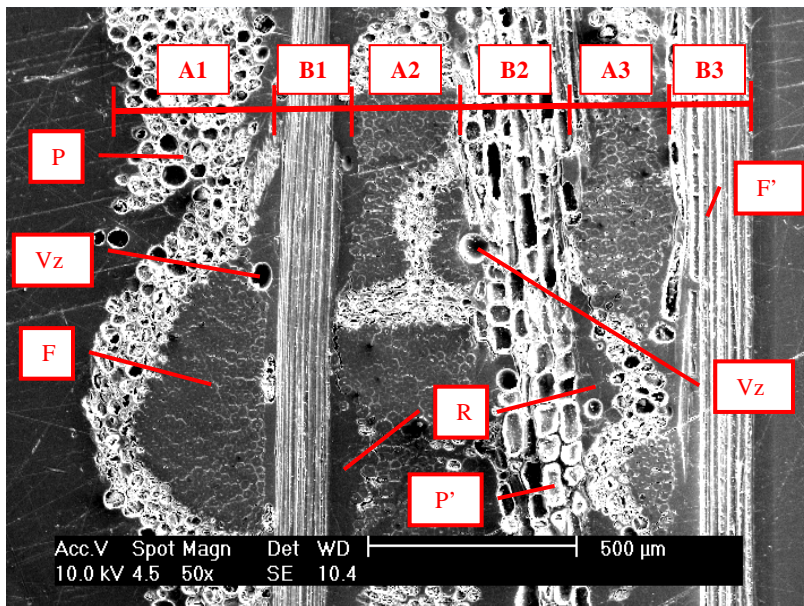
unidirecional e a segunda do empilhamento bidirecional. A Figura 40 a) e b) mostra as duas situações de maneira simplificada. A quantidade de camadas foi escolhida de acordo com a espessura desejada, sendo que com quatro camadas obteve-se um laminado com cerca de 1,8 mm de espessura.



**Figura 40 – a) Empilhamento bidirecional e b) unidirecional em um compósito de laminados torneados de bambu.**

Fonte: do autor.

Na Figura 41, é mostrada Uma microestrutura real de um laminado bidirecional de seis camadas onde cada elemento constituinte pode ser visualizado. As camadas A1, A2 e A3 possuem alinhamento perpendicular ao plano da página e as camadas B1, B2 e B3 alinhamento paralelo. Nas camadas A1, A2 e A3, observa-se o parênquima (P) do laminado de bambu e sua estrutura celular do tipo colméia e os feixes de fibras (FxF) densos e escuros constituídos por microfibrilas. Nas camadas B1 e B3, observa-se um feixe de fibras cortado (F') e na camada B2 o corte está na matriz de parênquima (P') onde observa-se as células alongadas. Entre as camadas, observa-se resina (R) que é responsável por unir as fibras e transferir a elas a carga aplicada ao compósito. Por fim, observa-se os poros ou vazios (Vz) da resina incorporados durante o processamento do compósito.



**Figura 41 -** Micrografia obtida por MEV da seção transversal de um compósito bidirecional de bambu: (A1,2,3) camadas perpendiculares ao plano da página, (B1,2,3) camadas paralelas ao plano, (P) parênquima cortado transversalmente, (P') parênquima cortado longitudinalmente, (F) feixe de fibras cortado transversalmente, (F') feixe de fibras cortado longitudinalmente, (R) resina ou matriz polimérica e (Vz) poros ou vazios

Fonte: do autor.

#### 4.2.2 Tração

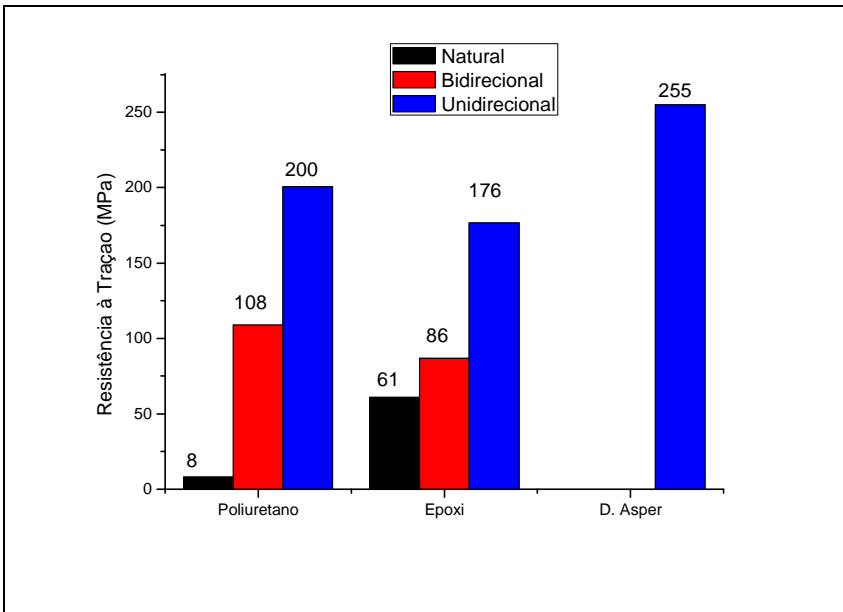
Os compósitos com matriz de resina epóxi e poliuretano apresentaram aumento significativo nos valores de tensão na ruptura e módulo de elasticidade quando comparados às matrizes poliméricas. A resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais com matriz de poliuretano é respectivamente 25 e 201 vezes maior do que o poliuretano puro, enquanto que os compósitos unidirecionais com matriz epóxi é 2,8 e 40 vezes maior do que a resina epóxi pura, respectivamente. Este fato sugere que a matriz de poliuretano possui maior adesão com os laminados de bambu do que os compósitos com matriz de resina epóxi. Merlini, et al., 2011, [33], avança a hipótese de que os grupos isocianatos livres do poliuretano

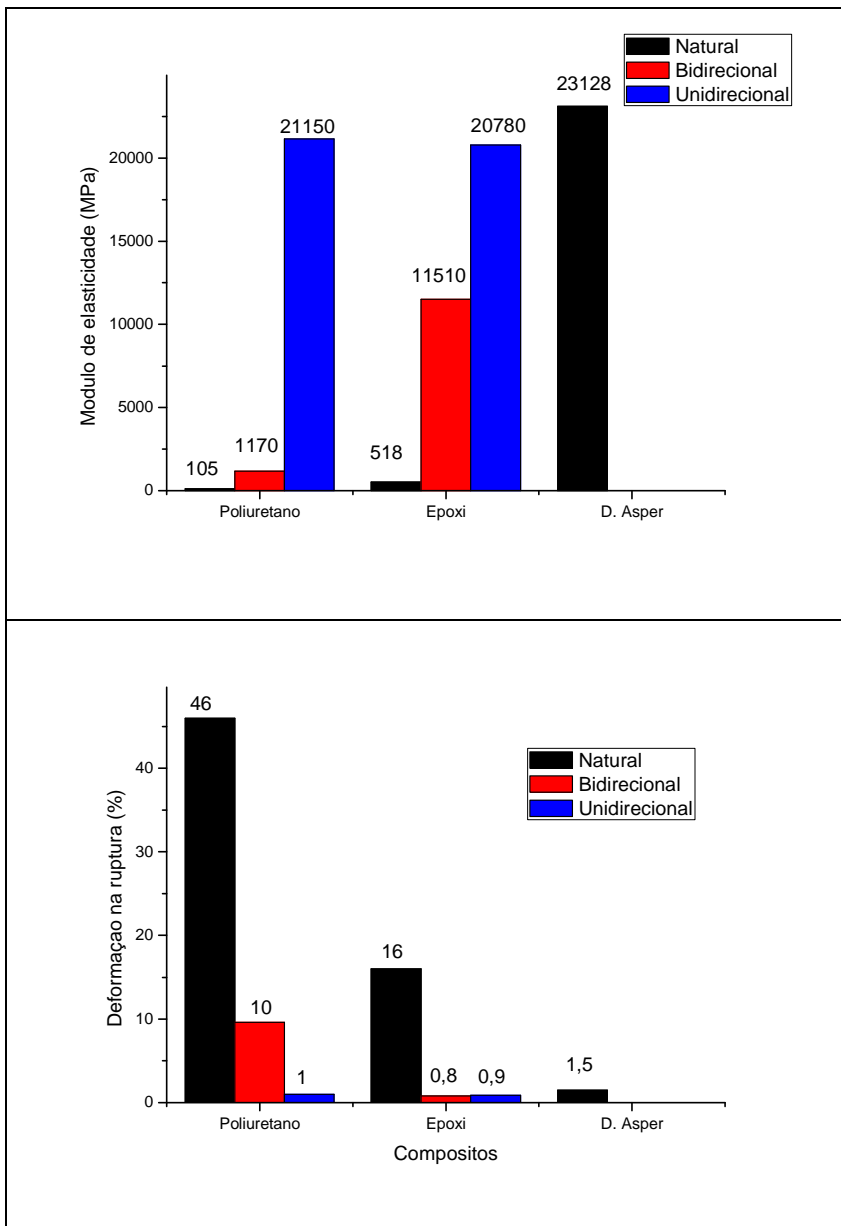
interagem com os grupos hidroxilas das fibras, formando uma ligação primária na interface que proporciona maior transferência de tensão da matriz para as fibras. Vilar, 2004 também menciona as ligações entre o grupo isocianato e átomos de hidrogênio, conforme mencionado na seção 2.4.2.

Conforme esperado, os compósitos bidirecionais apresentaram menor eficiência de reforço quando comparados com os compósitos unidirecionais, uma vez que as fibras posicionadas a 90° em relação à tensão aplicada não atuam como elemento de reforço (neste caso, podem atuar como defeitos). Os compósitos bidirecionais deformam-se em média 14 vezes mais do que os compósitos unidirecionais, uma vez que a tensão transferida da matriz para as fibras é menor nos compósitos bidirecionais do que nos unidirecionais, induzindo maior deformação plástica na matriz.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de tração comprovam que os laminados podem ser usados eficientemente como agente de reforço das matrizes poliméricas estudadas neste trabalho.

Na Figura 42 são mostrados os resultados do ensaio de tração (resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação na ruptura) das resinas, do bambu e dos compósitos.





**Figura 42 – Resultados do ensaio de tração dos compósitos uni e bidirecionais mostrando em a) a resistência à tração, em b) o módulo elástico e em c) a deformação na ruptura**

Se comparados com outros compósitos poliméricos termofixos com fibras vegetais, os compósitos produzidos neste trabalho possuem excelentes propriedades mecânicas de tração e módulo. Apenas outros compósitos de bambu, referência [7], são tão resistentes quanto ou mais resistentes do que os compósitos produzidos neste trabalho. Tal fato pode ser visto na Tabela 4, onde estão agrupados resultados de outros trabalhos com compósitos termofixos com fibras vegetais.

**Tabela 4 - Tabela comparativa da resistência à tração de compósitos com diferentes fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; LM: laminação manual.**

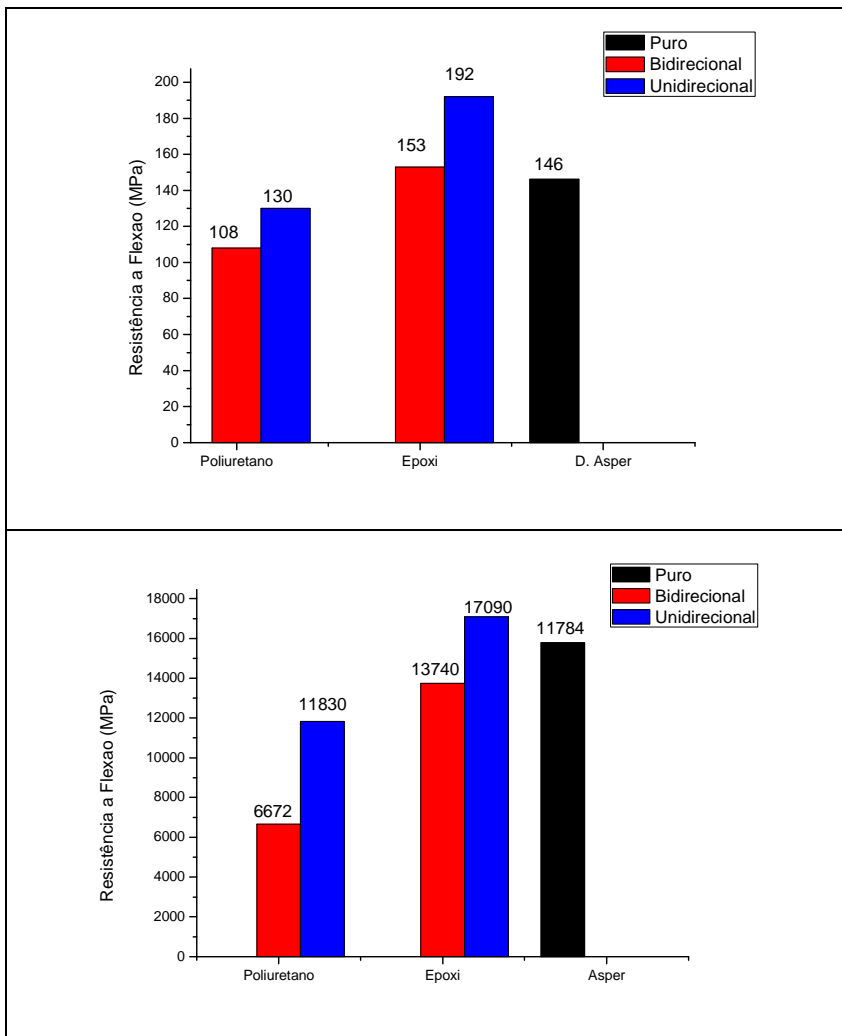
| Compósito                              | Fibras           | Processo | Tração MPa | E GPa | Fração fibra % M/M;V/V | Referências   |
|--|------------------|----------|------------|-------|------------------------|---------------|
| bambu epóxi                            | Unidir.          | MC       | 176        | 20,78 | 50% mm                 | este trabalho |
| bambu epóxi                            | Bidir.           | MC       | 86         | 11,51 | 50% mm                 | este trabalho |
| bambu PU                               | Bidir.           | MC       | 200        | 21,15 | 50% mm                 | este trabalho |
| bambu PU                               | Bidir.           | MC       | 108        | 1,17  | 50% mm                 | este trabalho |
| banana phenol formaldeido              | curtas, picadas  | MC       | 25         | 0,556 | 45%                    | [34]          |
| bambu( <i>D. strictus</i> )/ araldite  | longas           | LM       | 425        |       | 80%                    | [7]           |
| bambu( <i>B. pervariabilis</i> )/epóxi | longas           | LM       | 203        | 61,00 | -                      | [7]           |
| RB/GF/Al                               |                  | LM       | 200        |       | -                      | [7]           |
| curauá/GF                              | longas uni/manta | LM       | 150        |       | -                      | [35]          |
| curauá                                 | longas uni       | LM       | 140        |       | -                      | [35]          |
| GF                                     | manta            | LM       | 80         |       | -                      | [35]          |
| sisal PU                               | curtas           | MC       | 60         | 5,50  | 30% vv                 | [31]          |
| sisal PU                               | longas           | MC       | 120        | 16,00 | 30% vv                 | [31]          |
| banana PU                              | curtas           | MC       | 10         | 0,05  | 15% vv                 | [33]          |
| juta poliéster insaturado              | longas           | LM       | tração     | 23,5  | 20%vv                  | [36]          |
| juta poliéster insaturado              | longas           | MC       | tração     | 47    | 31%vv                  | [36]          |

### 4.2.3 Ensaio de Flexão

Segundo análise dos resultados, observou-se que os compósitos unidirecionais apresentaram resistência à flexão 23% superiores do que os bidirecionais, Figura 43. Comparando-se as matrizes, observa-se que os compósitos com matriz epóxi são mais resistentes do que os com matriz poliuretano. No caso dos compósitos unidirecionais, os compósitos com matriz epóxi são 47% mais resistentes e, no caso dos bidirecionais, esta diferença é de 41%. No caso dos módulos elásticos de



flexão observa-se que os compósitos unidirecionais possuem em média módulos 41% maiores que os compósitos bidirecionais. Comparando-se os módulos dos compósitos unidirecionais entre si, os de matriz epóxi são 44% maiores do que os de poliuretano. Já no caso dos módulos dos compósitos bidirecionais, a diferença é ainda maior e igual a 105%.



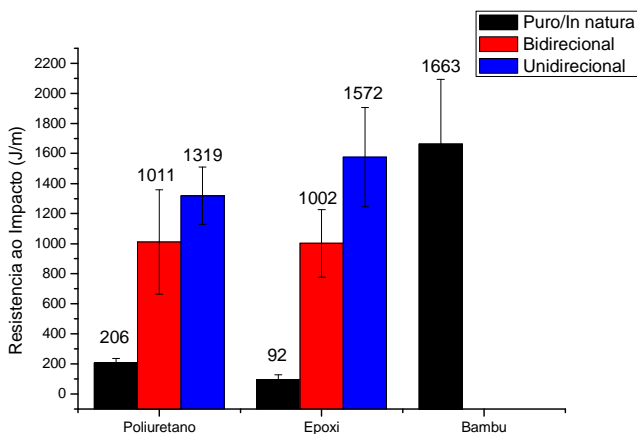
**Figura 43 - Propriedades mecânicas dos compósitos sob flexão.**

**Tabela 5 - Tabela comparativa das propriedades de flexão, resistência à flexão e módulo flexural, de alguns compósitos termofixos com fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; LM: laminação manual; FV: fibra de vidro; PU: poliuretano; %(m/m): % em massa; %(v/v): % em volume;**

| Compósito                           | Fibras           | Processo | Resistência à Flexão (MPa) | Módulo flexural (GPa) | Fração fibra | Ref.          |
|-------------------------------------|------------------|----------|----------------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| Bambu/epóxi                         | Unidir.          | MC       | 192                        | 17,09                 | 50% [m/m]    | este trabalho |
| Bambu/epóxi                         | Bidir.           | MC       | 153                        | 13,74                 | 50% [m/m]    | este trabalho |
| Bambu/PU                            | Unidir.          | MC       | 130                        | 11,83                 | 50% [m/m]    | este trabalho |
| Bambu/PU                            | Bidir.           | MC       | 108                        | 6,67                  | 50% [m/m]    | este trabalho |
| banana phenol formaldeido           | Curtas, picadas  | MC       | 73                         | 6,45                  | 40%          | [34]          |
| Bambu/epóxi <i>B. pervariabilis</i> | Longas,          | Unidir.  | 93                         | 27,9                  | -            | [7]           |
| Curauá/GF                           | Longas uni/manta | LM       | 150                        | 70                    | -            | [35]          |
| Curauá                              | Longas unidir.   | LM       | 140                        | 7,5                   | -            | [35]          |
| GF                                  | Manta            | LM       | 90                         | 4,5                   | -            | [35]          |
| Sisal/epóxi                         |                  | -        | 244                        | 17                    | 40% [v/v]    | [37]          |
| Sisal/PU                            | Curtas           | MC       | 70                         | 3                     | 10% [v/v]    | [31]          |
| Sisal/PU                            | Longas           | MC       | 150                        | 6,5                   | 30% [v/v]    | [31]          |

#### 4.2.4 Ensaio de impacto Izod

A resistência ao impacto por pêndulo Izod dos materiais de partida bem como dos compósitos é mostrada na Figura 44. Observa-se que a resina epóxi possui a menor resistência ao impacto (92 J/m), seguida do poliuretano (206 J/m) e do bambu (1663 J/m), que por sua vez possui uma excelente resistência ao impacto. Observa-se também que os compósitos unidirecionais são em média 43% mais resistentes ao impacto do que os bidirecionais. Nos compósitos unidirecionais, a matriz epóxi possui resistência ao impacto 19% maior em relação à matriz poliuretano, nos compósitos bidirecionais a resistências das duas matrizes é praticamente igual.



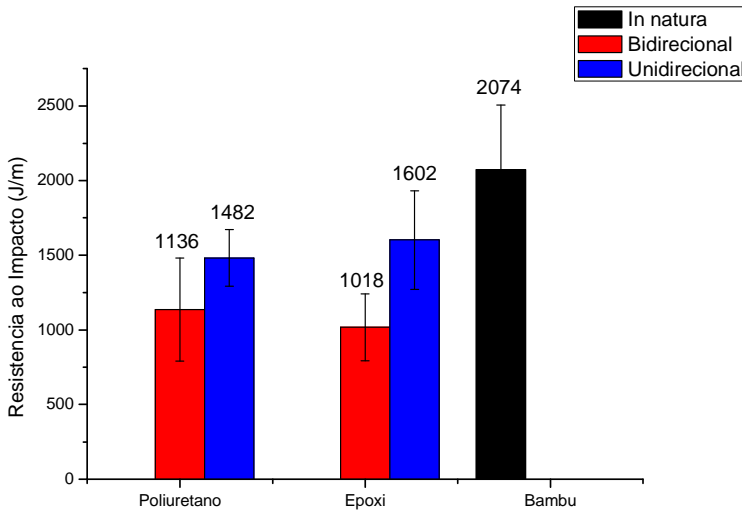
**Figura 44 - Resistência ao impacto das resinas puras, do bambu *in natura* e dos compósitos uni e bidirecionais**

Comparando-se os resultados deste trabalho com os resultados de outros trabalhos com compósitos poliméricos termofixos com fibras vegetais, Tabela 6, observa-se que os primeiros possuem excelente resistência ao impacto sendo até cerca de 50 vezes superior.

**Tabela 6 - Tabela comparativa da resistência ao impacto de alguns compósitos poliméricos termofixos de fibras vegetais; MC: moldagem por compressão; FV: fibra de vidro; PU: poliuretano;**

| Compósito                      | Fibras          | Processo | Impacto Izod | Unidade              | Fração fibra | Ref.          |
|--------------------------------|-----------------|----------|--------------|----------------------|--------------|---------------|
| bambu epóxi                    | Unidir.         | MC       | 1576         | J/m                  | 50% mm       | este trabalho |
|                                |                 |          | 1,58         | J/mm                 |              |               |
|                                |                 |          | 128          | (kJ/m <sup>2</sup> ) |              |               |
| bambu epóxi                    | Bidir.          | MC       | 1002         | J/m                  | 50% mm       | este trabalho |
|                                |                 |          | 1,00         | J/mm                 |              |               |
|                                |                 |          | 78           | (kJ/m <sup>2</sup> ) |              |               |
| bambu PU                       | Unidir.         | MC       | 1319         | J/m                  | 50% mm       | este trabalho |
|                                |                 |          | 1,32         | J/mm                 |              |               |
|                                |                 |          | 86           | (kJ/m <sup>2</sup> ) |              |               |
| bambu PU                       | Bidir.          | MC       | 1011         | J/m                  | 50% mm       | este trabalho |
|                                |                 |          | 1,01         | J/mm                 |              |               |
|                                |                 |          | 67           | (kJ/m <sup>2</sup> ) |              |               |
| glass fiber phenol formaldeido | Curtas, picadas | MC       | 80           | kJ/m <sup>2</sup>    | 40%          | [34]          |
| banana phenol formaldeido      | Curtas, picadas | MC       | 35           | kJ/m <sup>2</sup>    | 50%          | [34]          |
| comp lignofenolico bagaço      | -               | MC       | 28           | J/m                  | -            | [38]          |

Calculando-se as resistências específicas dos compósitos uni e bidirecionais de poliuretano e epóxi, Figura 45, observa-se que os valores aumentam ligeiramente, mas o comportamento permanece o mesmo.



**Figura 45 - Resistência ao impacto específica, (divide-se o valor da resistência pela densidade do compósito)**

No entanto, comparando-se os valores de resistência ao impacto específica com os valores de compósitos de alta performance, fibra de aramida e compósitos de fibra de vidro, Tabela 7, observa-se que os valores dos compósitos de bambu são muitos próximos e, no caso do bambu in natura, até superior. Portanto, há uma grande oportunidade de desenvolvimento de materiais balísticos baseados nestas fibras vegetais.

**Tabela 7 - Tabela comparativa da resistência ao impacto dos compósitos de bambu com alguns compósitos de alta performance**

| Material                                | Densidade         | Impacto Izod J/m | Impacto Izod específica J.cm <sup>3</sup> /m.g | Ref.          |
|---|-------------------|------------------|--|---------------|
| <b>Bambu <i>in natura</i></b>           | 0,802             | 1663             | 2073   |               |
| <b>bambu epóxi unidir.</b>              | 0,98              | 1576             | 1608   | este trabalho |
| <b>bambu epóxi bidir.</b>               | 0,98              | 1002             | 1022   | este trabalho |
| <b>bambu PU unidir.</b>                 | 0,890             | 1319             | 1482   | este trabalho |
| <b>bambu PU bidir.</b>                  | 0,890             | 1011             | 1135   | este trabalho |
| <b>Aramida epóxi<sup>1</sup></b>        | 1,38 <sup>2</sup> | 2562             | 1856   | [8]           |
| <b>Fibra de vidro epóxi<sup>1</sup></b> | 1,99 <sup>2</sup> | 3843             | 1931   | [8]           |

#### 4.2.5 Análise Dinâmico Mecânica – DMA

A análise dinâmico-mecânica é utilizada para a determinação das propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos e também de compósitos. Neste ensaio, uma força oscilatória é aplicada de maneira senoidal a uma amostra, a uma determinada frequência e sob tensão ou deformação constante, e a resposta em termos de rigidez e amortecimento é registrada.

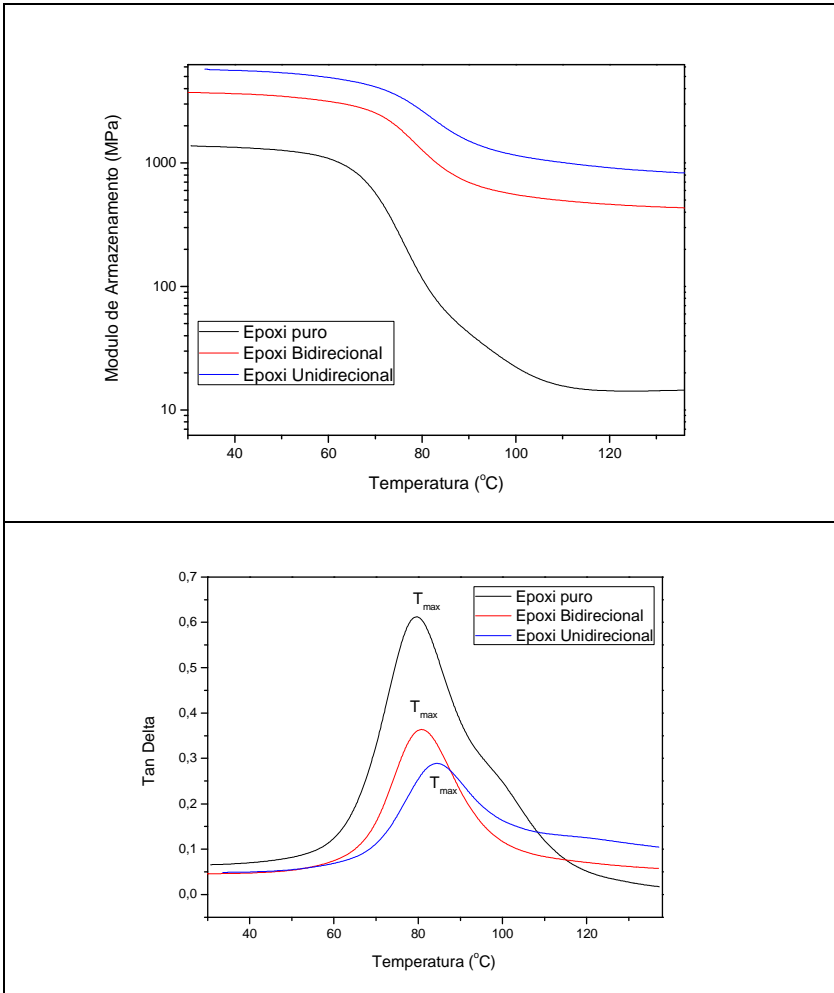
Através deste ensaio, obtém-se basicamente três curvas em função da faixa de temperatura:  $\tan \delta$ , módulo de perda ( $E''$ ) e módulo de armazenamento ( $E'$ ).  $\tan \delta$  é a relação entre  $E''$  e  $E'$  e chamado de fator de dissipação.

Na Figura 46 são apresentadas as curvas de  $E'$  e  $\tan \delta$  para a matriz de epóxi e seus compósitos. Nota-se que o módulo de armazenamento da resina epóxi mantém um valor constante e elevado para temperaturas inferiores à 70 °C. Esta região corresponde à transição vítrea, abaixo da qual a mobilidade do polímero é restrita. Acima desta temperatura há uma redução do módulo, uma vez que a mobilidade do sistema aumenta com o aumento da temperatura. Conforme esperado, o compósito unidirecional apresentou maior módulo de armazenamento do que o compósito bidirecional e resina epóxi, confirmando os resultados apresentados pelo ensaio de tração. Observa-se que a intensidade do pico máximo ( $T_{máx}$ ) na curva de  $\tan \delta$  é maior para a

<sup>1</sup> Valores típicos para um compósito com resina epóxi e fibra na forma de tecido. Não informado qual tipo da trama.

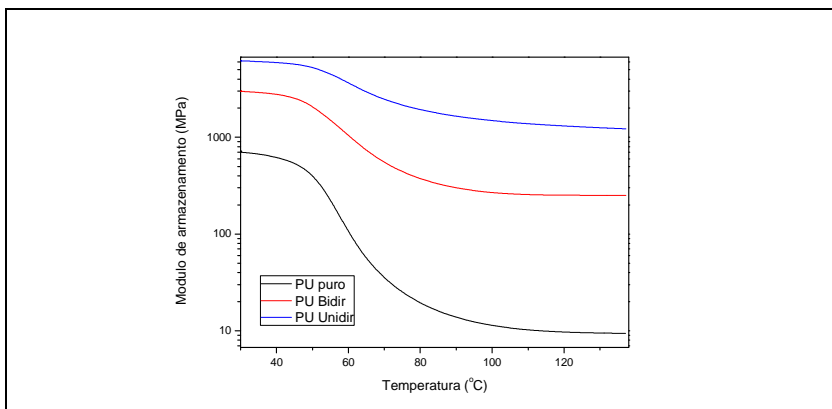
<sup>2</sup> Valores típicos para um compósito de Aramida. Não especificados detalhes de processamento.

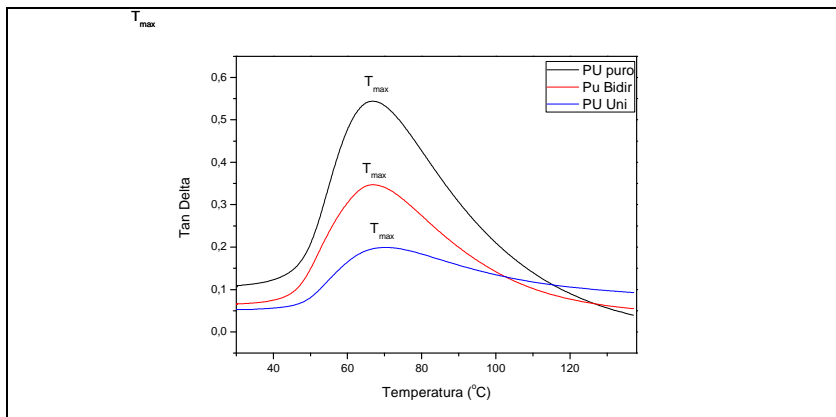
resina epóxi do que para os compósitos bidirecional e unidirecional, indicando que o compósito unidirecional é mais rígido do que o compósito bidirecional e resina epóxi. As temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) da resina epóxi e compósitos correspondem às temperaturas em que a curva de  $\tan \delta$  em função da temperatura atinge um pico máximo ( $T_{m\acute{a}x}$ ). Verifica-se que os valores das  $T_g$  para a resina epóxi, compósito bidirecional e unidirecional são similares.



**Figura 46 - Curvas de  $E'$  e  $\tan \delta$  em função da temperatura para a resina epóxi e seus compósitos.**

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de  $E'$  e  $\tan \delta$  em função da temperatura para a o poliuretano e compósitos uni e bidirecionais. O valor do  $E'$  do poliuretano e seus respectivos compósitos mantém-se constante para temperaturas inferiores à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , correspondendo à região vítrea, em que a mobilidade do polímero é restrita. Acima desta temperatura há uma redução do módulo, conforme explicado anteriormente. A intensidade do pico máximo ( $T_{\text{máx}}$ ) na curva de  $\tan \delta$  é maior para o poliuretano do que para os compósitos bidirecional e unidirecional, indicando que o compósito unidirecional é mais rígido do que o compósito bidirecional e poliuretano puro. Nota-se que os valores das  $T_g$  para o poliuretano, compósito bidirecional e unidirecional são similares.





**Figura 47 – Curvas de  $E'$  e  $\tan \delta$  em função da temperatura para o poliuretano e seus respectivos compósitos**



## 5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios e estudos realizados neste trabalho conclui-se que:

- Comparando-se os resultados apresentados neste trabalho com outros estudos reportados na literatura pode-se inferir que os laminados de bambu apresentam maior eficiência de reforço do que outras fibras vegetais, tais como fibras de coco, juta, sisal, curauá, entre outras.
- O método de extração dos laminados, uma vez ajustados os parâmetros do processo, mostrou-se um método de rápida e fácil obtenção de fibras de alta qualidade, além de fornecer grande rendimento.
- A resistência à tração ou módulo de elasticidade dos laminados varia de acordo com a posição na espessura da parede do colmo em que estes são extraídos. Isto ocorre, pois na região externa do colmo existe maior concentração volumétrica de fibras do que na interna.
- A utilização do método de laminação manual seguida de compressão para a fabricação dos compósitos produziu compósitos bastante resistentes apesar da moderada fração mássica de fibras obtida, aproximadamente 50 %9(m/m). Esta, pode ser facilmente aumentada consideravelmente através do aumento na compressão ou utilização de outros métodos como, por exemplo, de infusão a vácuo.
- Os compósitos unidirecionais apresentaram melhores propriedades mecânicas em todos os ensaios realizados em relação aos compósitos bidirecionais.
- A utilização dos laminados de bambu em compósitos elimina a etapa de tratamento químico contra insetos, como é o caso na utilização direta dos colmos de bambu como elementos estruturais e, portanto, sua utilização na fabricação de componentes estruturais mostra-se vantajosa.
- A utilização de uma resina de origem vegetal na fabricação de compósitos, como a de poliuretano derivada do óleo de mamona, vai de encontro com as necessidades atuais do mercado que busca materiais para aplicações tecnológicas

originados de fontes renováveis e que não agredam o meio ambiente.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o estudo de outras propriedades específicas dos compósitos e das fibras ou laminados como a resistência ao arrancamento (*pullout*), a resistência a tração de fibras individuais, a absorção de umidade e o envelhecimento;
- Realizar o tratamento químico dos folhados de bambu pelos processos de i) mercerização e ii) silanização, verificando sua influência nas propriedades mecânicas;
- Fabricar compósitos com fibras soltas de bambu, obtidas através do desmembramento dos laminados;
- Otimizar o processo de extração de fibras por torneamento, obtendo laminados mais largos;
- Utilizar os laminados de bambu como agente de reforço de outras matrizes poliméricas como, por exemplo, a resina de poliéster insaturado;
- Verificar a viabilidade de utilização dos folhados de bambu no reforço de chapas de termoplásticos, como PE e PP, pelo processo de prensagem a quente ou SMC;
- Otimizar o processo de fabricação de compósitos com folhados de bambu, utilizando os processo de bolsa de vácuo e infusão a vácuo;
- Desenvolver compósitos híbridos, com utilização de fibras naturais e fibras sintéticas para possibilitar a utilização em aplicações estruturais;
- Investigar as propriedades de absorção de impacto dos compósitos de bambu, visando sua utilização em aplicações de proteção balística, como coletes à prova de bala e blindagem de veículos;
- Utilizar os compósitos de bambu para a fabricação de compósitos-sanduiche;
- Realizar um estudo com o poliuretano de origem vegetal, visando investigar a influência das fibras vegetais na sua cura e reforço mecânico;

- Realizar o estudo de estabilidade térmica dos laminados e dos compósitos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural Polymers, Biopolymers, and Biocomposites**. Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, 2005.
2. SCHUH, T. G. **Renewable Materials for Automotive Applications**. Natural fibres performance forum. Copenhagen: [s.n.]. 1999.
3. NATIONAL COMPOSITE NETWORK. National composite network. **National composite network**. Disponível em: <<http://www.ncn-uk.co.uk/DesktopDefault.aspx?tabindex=139&tabid=431>>. Acesso em: 26 Agosto 2011.
4. XINHUA NEWS AGENCY. China's bamboo industry booms for greener economy. **Xinhua News**, 29 ago. 2011. Disponível em: <[http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-07/18/c\\_13402777.htm](http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-07/18/c_13402777.htm)>. Acesso em: 29 ago. 2011.
5. CASTRO, A. M. G. D.; COBRE, R. V.; GOEDERT, W. J. **Prospecção de demandas tecnológicas: manual metodológico para o SNPA**. Embrapa - DPD. Brasília. 1995.
6. SÍTIO VAGALUME. Lei do Bambu - Brasília. **Sítio Vagalume**, 29 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.sitiovagalume.com/bambu/lei-do-bambu-brasilia/>>. Acesso em: 29 ago. 2001.
7. HIDALGO-LÓPEZ, O. **Bamboo The Gift of the Gods**. Bogotá: Oscar Hidalgo-López, 2003.
8. AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM Handbook - Composites**. Materials Park, Ohio: American Society of Metals, v. 21, 2001.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology for Composite Materials1**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2007. (D3878-07).
10. HULL, D. **An Introduction to composite materials**. Cambridge: Cambridge university press, 1981.
11. ABMACO. **Compósitos 1 Materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências**. São Paulo: ABMACO, 2009.
12. AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
13. CALLISTER JUNIOR, W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley and Sons, 2001.
14. CALLISTER, W. J. D. **Ciência e engenharia de materiais, uma introdução**. Quinta edição. ed. [S.l.]: [s.n.], 2002.
15. AL-QURESHI, H. A. **The design and development of Automotive Body from natural fiber reinforced composites**. Int. Conf.on composites

- engineering, ICCE/4. Big Island of Hawaii: [s.n.]. 1997. p. 95-96.
- 16 NATURAL Polymers, Biopolymers, and Biocomposites. [S.l.]: [s.n.].  
.
- 17 INBAR. Priority species of bamboo and rattan. **International Network for Bamboo and Rattan**, 1998. Disponível em:  
<[http://www.inbar.int/publication/txt/INBAR\\_Technical\\_Report\\_No01.htm](http://www.inbar.int/publication/txt/INBAR_Technical_Report_No01.htm)  
>. Acesso em: 29 ago. 2011.
- 18 LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 1998.
- 19 TAIHUI, W.; WENWEI, C. **A study on the anatomy of the vascular bundles of bamboo from China**. Proceeding os the bamboo workshop. Hangzhou: Zhejiang Bamboo Research Center. 1985.
- 20 LIESE, W. **The structure of bamboo in relation to its properties and utilization**. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL USE OF BAMBOO. Beijing: CHINESE ACADEMY OF FORESTRY. 1992.
- 21 RÍOS, H. C. **Bambu Guadua - Bosques Naturales en Colombia - Plantaciones comerciales en México**. [S.l.]: Hormilson C. Ríos. COLMEX, 2009.
- 22 PEREIRA, M. A. D. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo de alma**. 1. ed. Bauru: Editora canal6.
- 23 PEREIRA, M. A. D. R.; SALGADO, M. H. **Projeto Bambu**:  
. Determinación de las características mecánicas de listones laminados del bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) cultivado en la Unesp de Bauru/SP/Brasil. SIMPOSIO LATINOAMERICANO DEL BAMBÚ. Guayaquil: Unesp. 2006.
- 24 TRUJILLO, E. et al. **Characterization of polymer composite materials based on bamboo fibres**. 14th European conference on composite materials. Budapest: [s.n.]. 2010.
- 25 MOSO BAMBOO. Panels & Panels covering. **Moso Bamboo**, 29 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.moso-bamboo.com/products/panels-panel-covering-materials/veneer>>. Acesso em: 29 ago. 2011.
- 26 YOUNG, G. History. **Bamboo Surfboards**, 29 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.bamboosurfboardshawaii.com/theory.html>>. Acesso em: 29 ago. 2011.
- 27 SALAMON, C. **Ensaio para viabilizar a laminação do bambu Dendrocalamus Giganteus em operações de torneamento sem centros**. Guaratinguetá. 2009.
- 28 PHAM, H. Q.; MARKS, M. J. **Encyclopedia of polymer science and technology - Epoxy resins**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- 29 BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; GRULK, E. A. **Polymer Handbook**. Fourth Edition. ed. new York: Wiley, 1999.

- 30 VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3 ed. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.
- 31 DA SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. UfsCar. São Carlos. 2003.
- 32 TARGA, G. N. E.; BARRA, G. M. D. O.; AL-QURESHI, H. A. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Resina Epóxi Reforçados por Fibras de Bambu**. Segundo Seminário da Rede Brasileira do Bambu - RBB. Rio Branco: [s.n.]. 2010.
- 33 MERLINI, C.; BARRA, G. M. D. O.; AL-QURESHI, H. A. **Análise experimental de compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira**. Florianópolis. 2011.
- 34 JOSEPH, S. et al. A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibres and glass fibres. **Composites Science and technology**, n. 62, p. 1058-1868, maio 2002.
- 35 DA SILVA, R. V. et al. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 154-161, 2008.
- 36 TARGA, G. N. E.; BARRA, G. M. D. O.; AL-QURESHI, H. A. **Produção e caracterização mecânica de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado**. 10o. Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 2009.
- 37 LI, Y.; MAI, Y.-W.; YE, L. **Sisal fibre and its composites: a review of recent developments**. Centre for Advanced Materials CAMT. Sydney, p. 2037-2055. 2000.
- 38 TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. F. D.; FROLLINI, E. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 12, n. 4, p. 228-239, 2002.
- 39 OSTAPIV, F.; SALAMON, C.; GOLÇALVES, M. T. T. Cursos tecnológicos de bambu guadua no Acre - Perspectivas sustentáveis e inovadoras. **Athena - Revista Científica de Educação**, v. 10, n. 10, Jan. Jun. 2008.
- 40 AL-QURESHI, H. A. **Wetting analysis of natural sisal fibers with polymeric matrix**. Second International Conf. on Composite Science and Technology. Durban: [s.n.]. 1998. p. 69-74.
- 41 TSAI, S. N.; HOA, S. S.; GAY, D. **Composite Materials: Design and applications**. New York: CRC Press, 2003.
- 42 OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties. **Composites: Part A applied science and manufacturing**, Kyo-tanabe, Japão, n. 35, p. 377-383, 2004.

- 43 FARRELY, D. **The book of Bamboo**. San Francisco: Sierra Club Books, . 1984.
- 44 ARANGO, J. A. M.; HINCAPIÉ, C. A. O. **Fundamentos Práticos del secado de Guadua - Bambu**. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- 45 CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Art Liber . Editora, 2006.
- 46 SILVERSTEIN, R. M.; CLAYTON BASSLER, G.; MORRILL, T. C. . **Identificação Espectrométrica de compostos Orgânicos**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., v. 5a edição, 1963.
- 47 WEGST, U. G. K. Bending efficiency through property gradients in . bamboo, palm, and wood-based composites, Philadelphia, v. Journal of the mchanical behaviorof biomedicasl materials 4, n. 744-755, 2011.
- 48 RAO, K. M. M.; RAO, K. M. Extraction and tensile properties of natural . fibers:Vakka, date and bamboo, Vijayawada, India, v. Composite Structures, 2005.
- 49 AMADA, S.; UNTAO, S. Fracture properties fo bamboo, Tenjin, Kiryu, v. . Composites part B: Engineering, n. 32, 2001.
- 50 SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies . on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications, Curitiba, v. Composites Part A, n. 38, 2007.
- 51 LO, T. Y.; CUI, H. Z.; LEUNG, H. C. The effect of fiber density on . strength capacity of bamboo, Hong Kong, v. Materials Letters, n. 58, 2004.
- 52 SILVA, R. et al. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de . polímeros e em compósitos, Maringá, v. Química Nova , n. 32, 2009.
- 53 REMADE. Remade - Revista da Madeira. Disponível em: . <<http://www.remade.com.br/br/index.php>>. Acesso em: 29 ago. 2011.
- 54 CLASSIC WOOD WORKING INC. Classic Wood Working Inc. **How are veneers cut?**, 29 ago. 2011. Disponível em: . <[http://www.classicwoodworkinginc.com/InfoData\\_Pop/VeneersCut.html](http://www.classicwoodworkinginc.com/InfoData_Pop/VeneersCut.html)>. Acesso em: 29 ago. 2011.
- 55 AZZINI, A. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica . de colmos de bambusa vulgaris Schrad, Campinas, v. 36, n. 43-50, 1987.
- 56 FREITAS JUNIOR, J. L. **Padrões espaciais e temporais das florestas com bambu (Guadua spp. ) no sudoeste da Amazônia, detectados através de imagem de satélite**. Anais do IX Congresso de Ecologia do Brasil. São Lourenço: IX Congresso de Ecologia do Brasil. 2009.
- 57 BARRA, G. M. D. O. **Compósito poliuretano/fibra natural: preparação e estudo da viabilidade de utilização de fibra natural inorgânica**. UFSC. Florianópolis. 2004.
- 58 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Determining**



- . **the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. ASTM. West Conshohocken. 2006. (D256).
- 59 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2008. (D3039).
- 60 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2010. (D790).
- 61 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Tensile Properties of Plastics**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2008. (D638-08).
- 62 MOIZÉS, F. A. **Painéis de Bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo**. Bauru. 2007.

## ANEXO A – Lista das espécies prioritárias de bambu da Rede Internacional do Bambu e Rattan – INBAR

Estudo realizado pela Rede Internacional de Bambu e Rattan – INBAR[17], com o intuito de se estabelecer as 20 espécies mais prioritárias de bambu do mundo, conforme os critérios definidos no estudo:

1. *Bambusa balcooa* Roxb.
2. *B. bambos* (L.) Voss
3. *B. blumeana* J A and J H Schultes
4. *B. polymorpha* Munro
5. *B. textilis* McClure
6. *B. tulda* Roxb.
7. *B. vulgaris* Schrad. ex Wendl
8. *Cephalostachyum pergracile* Munro
9. *Dendrocalamus asper* (Schultes f.) Backer ex Heyne
10. *D.giganteus* Wallich ex Munro
11. *D.latiflorus* Munro
12. *D. strictus* (Roxb.) Nees
13. *Gigantochloa apus* J A and J.H. Schultes
14. *G. levis* (Blanco) Merrill
15. *G.pseudoarundinacea* (Steud.) Widjaja
16. *Guadua angustifolia* Kunth
17. *Melocanna baccifera* (Roxb.) Kurz
18. *Ochlandra* Thw. (Spp.)
19. *Phyllostachys pubescens* Maze1 ex H. de Leh 11 including *P. bambusoides* Sieb. and Zucc and *P. edulis* Makino
20. *Thyrsostachys siamensis* (Kurz) Gamble