



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

João Paulo Lemos Ferreira

**Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta  
densidade para uso estrutural**

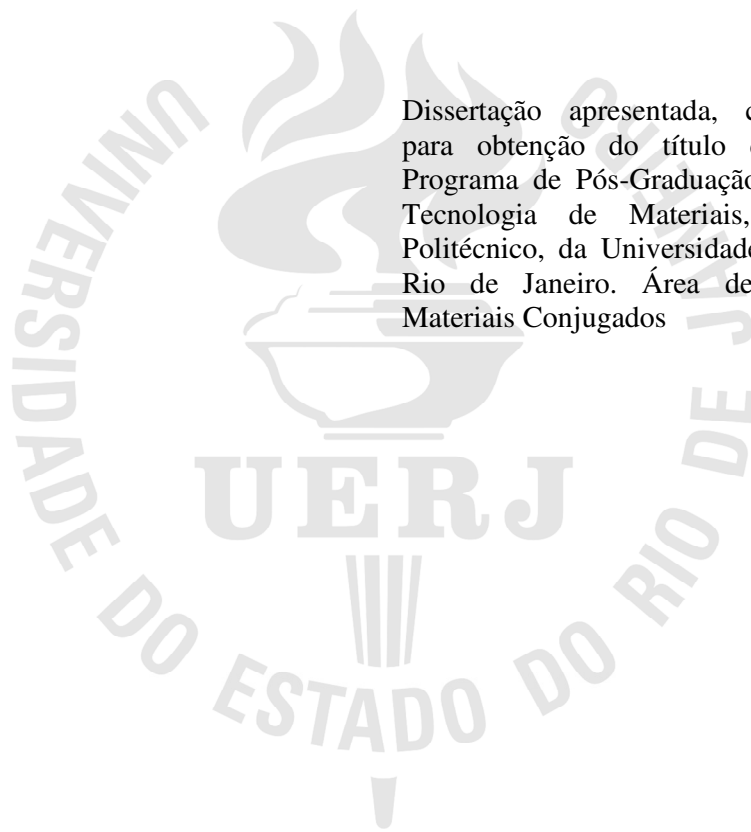
Nova Friburgo

2019

João Paulo Lemos Ferreira

**Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para  
uso estrutural**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Conjugados



Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

F383	Ferreira, João Paulo Lemos.  Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para uso estrutural / João Paulo Lemos Ferreira. - 2019. 143 f. : il.  Orientador: Eduardo Martins Sampaio. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.  1. Compositos poliméricos - Teses. 2. Bambu - Teses. 3. Fibras vegetais - Teses. 4. Plástico reforçado com fibra - Teses. 5. Produtos naturais - Teses. 6. Sustentabilidade - Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.  CDU 620.1:531.4-36
------	---

Bibliotecária: Sandra Mueller CRB7/3633

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

João Paulo Lemos Ferreira

**Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para  
uso estrutural**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Conjugados

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis  
Instituto Politécnico – UERJ

---

Prof. Dr. Aricelso Maia Limaverde Filho  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Nova Friburgo  
2019

Dedico este trabalho a meus pais. Pela prioridade dada a minha educação em todos os momentos, e aos ensinamentos sobre o caráter e a dignidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais por toda força e confiança depositada.

A minha namorada Renata, por toda paciência, amor e suporte dado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio pela ajuda, confiança e oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao meu amigo e companheiro de longas jornadas de trabalho, Kiarash Ertebati, este trabalho não seria possível sem sua participação.

Aos técnicos de laboratório Ricardo Hudson e Jorge Futtigami, pela realização dos ensaios e ajuda na determinação de propriedades.

Aos outros trabalhadores do LAA e TECPOL pela ajuda e tempo disponibilizado.

Ao professor Dr. Joaquim Teixeira de Assis e ao técnico Luiz Felipe Lobato, pela disponibilidade de ferramentas do laboratório de ensaios físicos do IPRJ.

Ao Rancho Santa Mônica pela cessão dos bambus para a realização deste trabalho.

Ao marceneiro Rodrigo pela paciência, dedicação e ajuda no manejo e usinagem dos bambus, assim como na preparação de corpos de prova.

A empresa ECOTRAL e seu proprietário Alex, pela disponibilização do espaço, diversas ferramentas que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, tempo de serviço e ideias para o desenvolvimento do molde utilizado na prensagem.

A outros profissionais do IPRJ que participaram de alguma forma para que este trabalho fosse realizado.

Apesar de você  
Amanhã há de ser  
Outro dia.  
*Chico Buarque*

## RESUMO

FERREIRA, João Paulo Lemos. Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para uso estrutural. 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

Desde a alimentação, vestuário, artesanato, até a sua utilização na construção civil e na engenharia de maneira geral, é notável a utilização do bambu ao longo dos tempos nas civilizações. O bambu é um material funcional devido as suas diversas possibilidades de uso, propriedades, custo e apelo ambiental. O Brasil, com sua vasta riqueza natural e enorme demanda por produtos oriundos da madeira, tem o bambu como grande aliado no desenvolvimento de novos produtos, que atendam as perspectivas da sustentabilidade. Neste estudo é apresentada uma metodologia para a produção de um protótipo de um compósito de fibras de bambu e resina polimérica termorrígida. Apesar da não existência de normas estabelecidas para este tipo de compósito, foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas conforme as normas NBR 7190; ASTM D143 e ISO 22157-1. Os ensaios realizados demonstram a grande viabilidade na produção desse compósito em substituição às madeiras de alta densidade tradicionais usadas em estruturas no Brasil.

Palavras-chave: Bambu. Compósito. Fibras naturais. Sustentabilidade.



## ABSTRACT

FERREIRA, João Paulo Lemos. Study and development of high density bamboo composite prototype for structural use. 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

From food, clothing, crafts, to its use in construction and engineering in general, it is remarkable to use bamboo over time and civilizations. Bamboo is a functional material due to its diverse possibilities of use, properties, cost and strong environmental appeal. Brazil, with its vast natural wealth and huge demand for wood products, has bamboo as a great ally in the development of new products that meet the prospects of sustainability. This paper presents an initial methodology for the production of a prototype of a composite of bamboo fibers and thermoset polymer resin. Despite the absence of established norms for this type of composite, the physical and mechanical properties were evaluated according to the norms ABNT NBR 7190; ASTM D143 and ISO 22157-1. The tests demonstrated the great feasibility in the production of this composite in substitution of the traditional high density wood used in structures in Brazil.

Keywords: Bamboo. Composites. Natural fibers. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção da cadeia dos negócios com madeira no Sul do Brasil.....	20
Figura 2 - Aplicações do bambu no design (fabricação de móveis), utensílios de cozinha, instrumentos musicais, engenharia mecânica.....	22
Figura 3 - Stand do SEBRAE/AC - Feira do Empreendedor - Exposição Agropecuária do Estado do Acre – EXPOACRE – 2005. ....	22
Figura 4 - Construções em bambu. ....	23
Figura 5 - Partes principais do bambu .....	27
Figura 6 - Morfologia dos colmos de bambu. ....	28
Figura 7 - Diferentes tipos de rizoma. ....	29
Figura 8 - Rizoma típico de um bambu entouceirante.....	29
Figura 9 - Crescimento do bambu .....	30
Figura 10 - Concentração das fibras na parte externa da parede colmo. ....	32
Figura 11 - Macroestrutura da parede do colmo de bambu.....	33
Figura 12 - Aspectos morfológicos e anatômicos do colmo. ....	35
Figura 13 - Detalhe da distorção fibro-vasculares nodal. ....	35
Figura 14 - Detalhe dos conjuntos vasculares, parênquima e fibras do bambu, seção transversal do gênero <i>Dendrocalamus giganteus</i> .....	36
Figura 15 - Seção longitudinal indicando os elementos anatômicos do <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Feixes de fibras e células parenquimatosas. ....	36
Figura 16 - Características anatômicas do bambu. ....	37
Figura 17 - Corte ortogonal esquemático do bambu, conforme modelo, mostrando diferentes tensões entre os feixes e a matriz.....	37
Figura 18 - Eixos ortogonais do bambu. ....	43
Figura 19 - Cura na moita. ....	57
Figura 20 - Cura por imersão.....	58
Figura 21 - Cura por calor. Vala no chão (acima) e forno a gás (abaixo).....	58
Figura 22 - Método de Boucherie com pressão hidrostática, e o método de Boucherie modificado utilizando pressão pneumática. ....	61
Figura 23 - Esquema detalhado do método de Boucherie modificado. ....	62
Figura 24 - Amostras de material empregado nos painéis. ....	70
Figura 25 - Processo geral de manufatura do bamboo scrimber na China.....	73

Figura 26 - Esquema geral de processo de manufatura de bamboo scrimber. ....	73
Figura 27 - Touceira de <i>Dendrolacamus giganteus</i> onde foram retirados os colmos para o presente estudo. ....	78
Figura 28 - Ferramentas manuais utilizadas no corte e manejo inicial do bambu. ....	78
Figura 29 - Divisão dos colmos de bambu em comprimento de 1,5m com auxílio de motosserra. ....	79
Figura 30 – Usinagem dos colmos. ....	80
Figura 31 - Esquadrejadeira utilizada ....	81
Figura 32 – Ripas de bambu padronizadas. ....	81
Figura 33 - Tratamento dos bambus pelo método de imersão prolongada. ....	82
Figura 34 - Dois momentos da secagem: (a) logo após o tratamento em água; (b) após 45 dias de secagem. ....	83
Figura 35 - Resina de laminação PIPEFIX. ....	84
Figura 36 - Prensa utilizada na prensagem dos compósitos estruturais de bambu. ....	85
Figura 37 – Fabricação do molde para prensagem a partir de chassi de caminhão. ....	85
Figura 38 - Encaixe do molde na prensa. ....	86
Figura 39 - Padronização das ripas. ....	87
Figura 40 - Métodos para diminuição da espessura das fibras de bambu. ....	88
Figura 41 - Diminuição dos tamanhos das fibras até peça prensada $C > A$ . ....	88
Figura 42 - Ripas com espessuras menores sendo marteladas contra o metal. ....	89
Figura 43 - Secagem das ripas antes da prensagem. ....	90
Figura 44 - Separação da quantidade de fibras a serem prensadas. ....	91
Figura 45 - Agitador magnético e béquer para aquecimento da resina ....	91
Figura 46 - Aquecimento da resina antes da prensagem. ....	92
Figura 47 - Molde de aço galvanizado flexível revestido com fita plástica. ....	92
Figura 48 - Peças utilizadas na prensagem. ....	93
Figura 49 - Embolo e cilindro da prensa. ....	93
Figura 50 - Momento da prensagem. ....	93
Figura 51 - Blocos após prensagem. ....	94
Figura 52 - Fluxograma simplificado do procedimento de fabricação do compósito de bambu de alta densidade até a prensagem. ....	95
Figura 53 - Confecção dos corpos-de-prova. ....	96
Figura 54 - Dimensões e formato do corpo de prova para ensaios físicos. ....	97
Figura 55 - A) paquímetro; B) balança; C) forno. ....	100

Figura 56 - Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras. ....	101
Figura 57 - Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. ....	102
Figura 58 - Gráfico tensão x tempo de acordo com o diagrama de carregamento do ensaio.....	103
Figura 59 - Ensaio de compressão. ....	103
Figura 60 - Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras. ....	104
Figura 61 - Ensaio de tração.....	105
Figura 62 - Gráfico tensão x deformação do compósito de bambu.....	106
Figura 63 - Gráfico tensão x deformação da madeira Angelim-pedra.....	106
Figura 64 - Corpos de prova para ensaio e flexão. ....	107
Figura 65 - Ensaio de flexão.....	108
Figura 66 - Gráfico tensão x deformação para o ensaio de flexão. ....	109
Figura 67 - Comparativo entre teor de umidade do compósito de bambu e outras madeiras. ....	111
Figura 68 - Comparativo entre as densidades aparentes de compósito de bambu e outras madeiras. ....	112
Figura 69 - Comparativo entre o fator anisotrópico do compósito de bambu e outras madeiras. ....	113
Figura 70 - Comparativo entre as resistências à compressão paralela às fibras do compósito de bambu e outras madeiras. ....	114
Figura 71 - Comparativo entre as resistências à tração do compósito de bambu e outras madeiras. ....	115
Figura 72 - Comparativo entre os módulos de elasticidade do compósito de bambu e outras madeiras. ....	116
Figura 73 - Comparativo entre as densidades aparentes de compósito de bambu e bamboo scrimber.....	116
Figura 74 - Comparativo entre as resistências à compressão de compósito de bambu e bamboo scrimber.....	117
Figura 75 - Comparativo entre as resistências à tração de compósito de bambu e bamboo scrimber.....	117
Figura 76 - Comparativo entre os módulos de elasticidade à flexão de compósito de bambu e bamboo scrimber. ....	118
Figura 77 - Gráfico tensão x tempo do ensaio de compressão paralela às fibras.....	140

Figura 78 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração paralela às fibras. ....	141
Figura 79 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração paralela às fibras. ....	142
Figura 80 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de flexão. ....	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação energia de produção por unidade de tensão.....	21
Tabela 2 - Principais diferenças entre bambus herbáceos e bambus lenhosos.....	26
Tabela 3 - Composição química do bambu.....	34
Tabela 4 - Propriedades físicas de algumas espécies de bambu.....	42
Tabela 5 - Tensão à tração nas partes basal, intermediária e topo do bambu Dendrocalamus giganteus.....	45
Tabela 6 - Razão entre tensão de tração e a massa específica de alguns materiais.....	46
Tabela 7 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à tração de bambu (continua).....	47
Tabela 8 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à tração de bambu (conclusão).....	48
Tabela 9 - Resistência à compressão nas partes basal, intermediária e topo do bambu Dendrocalamus giganteus.....	49
Tabela 10 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à compressão do bambu (continua).....	49
Tabela 11 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à compressão do bambu (conclusão).....	50
Tabela 12 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à flexão do bambu (continua).....	52
Tabela 13 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à flexão do bambu (conclusão).....	53
Tabela 14 - Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu Dendrocalamus giganteus.....	55
Tabela 15 - Resistência ao cisalhamento transversal às fibras. Valores obtidos para a parte basal, intermediária e topo da espécie Dendrocalamus giganteus.....	56
Tabela 16 - Tipos de resinas para união de bambu, usos e condições.....	66
Tabela 17 - Propriedades de materiais estruturais de bambu, bambu natural, madeira natural e produto à base de madeira.....	73
Tabela 18 - Pesquisa sobre as propriedades mecânicas estimadas na literatura existente.....	75
Tabela 19 - Propriedades físicas e mecânicas de madeiras Larch, Abeto chinês (chinese fir) e Masson pine e do bamboo scrimber.....	76

Tabela 20 - Propriedades físicas e mecânicas de bambu verde, laminado colado de bambu e bamboo scrimber. ....	76
Tabela 21 - Especificações técnicas do PIPEFIX.....	83
Tabela 22 - Dados do ensaio de Umidade.....	132
Tabela 23 - Dados do ensaio de densidade básica.....	133
Tabela 24 - Dados do ensaio de densidade aparente .....	134
Tabela 25 - Dados do ensaio de estabilidade dimensional.....	137
Tabela 26 - Dados do cálculo de variação volumétrica. ....	138
Tabela 27 - Dados do ensaio de compressão paralela às fibras (continua).....	139
Tabela 28 - Dados do ensaio de compressão paralela às fibras (conclusão).....	140
Tabela 29 - Dados do ensaio de tração paralela às fibras. ....	141
Tabela 30 - Dados do ensaio de tração paralela às fibras. ....	142
Tabela 31 - Dados do ensaio de flexão estática.....	143

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
1.1 <b>Morfologia do Bambu</b> .....	26
1.1.1 Desenvolvimento e crescimento .....	30
<b>1.2 A espécie Dendrocalamus giganteus (Wallich ex. Munro)</b> .....	31
<b>1.3 Características químicas do Bambu</b> .....	32
<b>1.4 Propriedades Físicas</b> .....	38
1.4.1 Densidade .....	38
1.4.2 Teor de Umidade .....	39
1.4.2.1 Teor de umidade de equilíbrio.....	40
1.4.3 Ponto de saturação da fibra de bambu .....	40
1.4.4 Estabilidade dimensional.....	41
<b>1.5 Propriedades mecânicas</b> .....	42
1.5.1 Resistência à tração paralela às fibras.....	44
1.5.2 Resistência à compressão paralela às fibras .....	48
1.5.3 Resistência à flexão.....	50
1.5.4 Resistência ao cisalhamento .....	53
1.5.4.1 Resistência ao cisalhamento interlaminar .....	54
1.5.4.2 Resistência ao cisalhamento transversal .....	55
<b>1.6 Preservação e tratamento</b> .....	56
1.6.1 Métodos tradicionais .....	56
1.6.1.1 Cura na moita de bambu.....	56
1.6.1.2 Cura por imersão.....	57
1.6.1.3 Cura por calor .....	58
1.6.1.4 Cura por fumaça .....	59
1.6.1.5 Cura por lama .....	59
1.6.2 Tratamento químicos.....	59
1.6.3 Tratamentos sob pressão .....	60
1.6.3.1 Método de substituição de seiva .....	60
1.6.3.2 Método de Boucherie modificado.....	60
<b>1.7 Secagem</b> .....	62



<b>1.8</b>	<b>Adesivos/resina de laminação e Adesão .....</b>	<b>63</b>
1.8.1	Propriedades do adesivo na madeira e no bambu.....	64
<b>1.9</b>	<b>Tipos de resinas.....</b>	<b>65</b>
1.9.1	Resinas poliuretanos .....	67
1.9.2	Resinas à base de Poliacetato de Vinila (PVA).....	67
1.9.3	Resinas à base de resina resorcinol-formaldeído e ureia-formaldeído .....	68
1.9.4	Resinas à base epóxi .....	68
<b>1.10</b>	<b>Painéis de bambu e os tipos de fabricação .....</b>	<b>69</b>
<b>1.11</b>	<b>Bamboo Scrimber .....</b>	<b>71</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>77</b>
<b>2.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>77</b>
2.1.1	Coleta do Material .....	77
2.1.2	Usinagem dos colmos .....	79
2.1.2.1	Corte longitudinal dos colmos.....	79
2.1.3	Tratamento.....	82
2.1.4	Secagem .....	82
2.1.5	Resina utilizada.....	83
2.1.5.1	Resina PIPEFIX.....	83
<b>2.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>84</b>
2.2.1	Desenvolvimento do molde.....	84
2.2.2	Produção das fibras .....	87
2.2.3	Secagem das Fibras abertas .....	89
2.2.4	Metodologia de Prensagem .....	90
2.2.5	Preparação dos corpos-de-prova.....	96
<b>2.3</b>	<b>Determinação das propriedades físico-mecânicas .....</b>	<b>97</b>
2.3.1	Ensaio Físicos .....	97
2.3.1.1	Umidade .....	98
2.3.1.2	Densidade .....	98
2.3.1.3	Estabilidade dimensional.....	99
2.3.2	Ensaio Mecânicos.....	101
2.3.2.1	Compressão paralela às fibras .....	101
2.3.2.2	Tração paralela às fibras.....	104
2.3.2.3	Flexão estática .....	107
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>110</b>

<b>3.1</b>	<b>Comparação compósito de bambu x madeiras estruturais .....</b>	<b>110</b>
3.1.1	Ensaio Físicos .....	110
3.1.1.1	Umidade .....	110
3.1.1.2	Densidade .....	111
3.1.1.3	Estabilidade Dimensional.....	112
3.1.2	Ensaio Mecânicos.....	113
3.1.2.1	Ensaio de Compressão .....	113
3.1.2.2	Ensaio de Tração.....	114
3.1.2.3	Ensaio de Flexão.....	115
<b>3.2</b>	<b>Comparação compósito de bambu x bamboo scrimber .....</b>	<b>116</b>
3.2.1	Densidade .....	116
3.2.2	Resistência à compressão .....	117
3.2.3	Resistência à tração.....	117
3.2.4	Módulo de Elasticidade à flexão.....	118
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
	<b>Sugestão para trabalhos futuros.....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE A – Ensaio de Umidade.....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE B - Ensaio de Densidade .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE C - Ensaio de Estabilidade Dimensional.....</b>	<b>135</b>
	<b>APÊNDICE D - Ensaio de Compressão paralela às fibras .....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE E - Ensaio de Tração paralela às fibras.....</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE F - Ensaio de flexão .....</b>	<b>143</b>

## INTRODUÇÃO

### **Materiais compósitos e fibras naturais**

De acordo com Callister et al (2008), o advento dos compósitos como uma classe de materiais distinta deu-se na metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos deliberadamente projetados e engenheirados. O reconhecimento desse novo conceito de combinar materiais diferentes durante a fabricação levou à identificação dos compósitos como uma nova classe distinta dos metais, cerâmicas e polímeros familiares. Materiais com propriedades específicas e não usuais são necessários para uma gama de aplicações de alta tecnologia, tais como as encontradas nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte. As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida a melhor combinação de propriedades.

Nos últimos trinta a trinta e cinco anos, materiais compósitos, plásticos e cerâmicas tem sido os materiais emergentes dominantes. O volume e o número de aplicações de materiais compósitos cresceram de forma constante, penetrando e conquistando novos mercados sem descanso. Os materiais compósitos modernos constituem uma proporção significativa do mercado de materiais de engenharia, desde produtos do dia-a-dia até aplicações de nicho sofisticadas.

Embora os materiais compósitos já tenham comprovado seu valor como materiais para a economia de peso, o desafio atual é torná-los rentáveis. Recentemente, para a fabricação de materiais compósitos, as fibras sintéticas mais comumente utilizadas são as fibras de carbono e fibras de vidro. Os compósitos de fibra natural são excelentes na maioria dos parâmetros, exceto a resistência, que são menores quando comparadas com fibras de vidro por exemplo (BRIEF, 2011).

Uma vez que as propriedades das fibras naturais em comparação com as fibras sintéticas são favoráveis de acordo com os aspectos sociais e econômicos, o uso de fibras naturais em muitas aplicações vem aumentando em muitos tipos de indústria. Compósitos de fibra natural incluem fibra de coco, juta, bagaço, algodão, bambu, cânhamo. As fibras naturais

podem ser usadas para reforçar as matrizes termofixas e termoplásticas. Resinas termofixas, como epóxi, poliéster, poliuretano e fenólicos, são compostos comumente usados que exigem aplicações de alto desempenho. Proporcionam propriedades mecânicas suficientes, em especial rigidez e resistência, a níveis de preços aceitáveis. A ciência dos compósitos oferece oportunidades significativas para materiais aprimorados a partir de recursos renováveis, com suporte aprimorado para a sustentabilidade global. Os compósitos de fibras naturais são atraentes para a indústria por causa de sua baixa densidade e vantagens ecológicas sobre compósitos convencionais. Estes compósitos estão ganhando importância devido à sua natureza não carcinogênica e biodegradável. (BONGARDE, 2014)

Dentro deste contexto o Brasil tem um papel fundamental no desenvolvimento de políticas de manutenção e desenvolvimento sustentável, pois em seu território se concentra uma das mais ricas biodiversidades do planeta: a Floresta Amazônica. Dentre as pesquisas nesta área, que vêm crescendo e que aparecem em destaque, são as que buscam a aplicação para modificadores naturais, principalmente quanto à utilização de fibras naturais. Destaque deve ser dado à utilização de fibras naturais de origem vegetal, em razão da enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade, passíveis de serem pesquisadas, e por ser uma fonte de recurso renovável. No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. (MARINELLI, 2008)

### **Vantagens e justificativas do uso do bambu**

A taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal no período agosto/2003-agosto/2004 - alarmantes 26.130 km<sup>2</sup> – foi a segunda maior da história e equivale a mais de 8.600 campos de futebol por dia. De acordo com estimativas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a destruição em apenas um ano da floresta com a maior biodiversidade do planeta foi maior do que a área total do Estado de Sergipe e pouco menor do que a Bélgica (MARINELLI, 2008).

A demanda por produtos oriundos da madeira, construção de estradas, áreas destinadas a pastagens e a exploração ilegal de madeira são alguns fatores que vem ocorrendo num ritmo cada vez mais acentuado, resultando no desmatamento de espécies arbóreas nativas e na redução de suas áreas, que pode refletir nas mudanças climáticas globais. Diante destes fatos, torna-se necessário pesquisar materiais alternativos, de caráter renovável e que possam suprir

tal demanda. O bambu se destaca como um material excelente por causa de suas características físico-mecânicas, baixo custo, facilidade de obtenção e versatilidade. (BRITO, 2013)

As fibras de coco, sisal, cinza de casca de arroz e o bambu apresentam propriedades similares aos materiais tradicionais (cerâmicas, aços, alumínio e etc.) que são utilizados na indústria, podendo substituí-los, obtendo-se assim vantagens não só econômicas, mas também de ordem técnica. O bambu é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável, principalmente no que diz respeito a habitações populares. O baixo consumo de energia em sua produção, a grande abundância e o baixo preço caracterizam o bambu como material potencialmente promissor, além de contribuir com a redução da poluição, conservando os recursos naturais (GHAVAMI, 1995).

Os componentes fundamentais do bambu são celulose, hemicelulose e lignina, em baixas proporções são encontradas resinas, ceras, taninos e sais (LIESE, 1998; COSTA, 2004). Conforme a idade do colmo ele pode ser utilizado para brotos comestíveis (um ano de idade) até utilizações estruturais (com três a cinco anos de idade) e por volta de 10 a 12 anos o colmo começa a deteriorar na touceira e perder resistência mecânica (PEREIRA; BERALDO 2008).

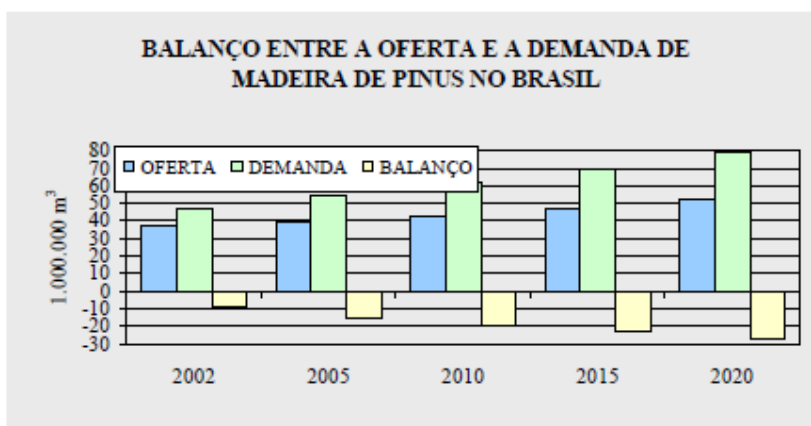
Ainda de acordo com Ghavami (2007), pelo fato de ser um material renovável, que absorve gás carbônico e usa energia solar, ser facilmente reincorporado a natureza após seu ciclo de vida, crescer com facilidade e rapidamente e possuir espécies que apresentam excelentes propriedades de engenharia, o bambu, planta milenar, pode ser chamado, nessa época de preocupações com a sustentabilidade, de um material para o século XXI.

O emprego do bambu apresenta, em comparação com a madeira, uma série de vantagens. Destacam-se entre seus diversos benefícios o baixo custo, leveza, possibilidade de curvatura, superfície lisa, coloração atrativa, resistência à tração comparável à do aço, resistência à compressão superior a do contrato, grande rigor estético e excelentes resultados na fabricação de móveis, estruturas, tubulações, drenos e habitações (PEREIRA & BERALDO, 2007).

O bambu no Brasil, contrariamente à madeira, ainda não sofre exploração a nível industrial, contudo pode substituí-la em grande número de aplicações. Conforme aumentam as utilidades da madeira, e o número de consumidores, o mercado aumenta sua pressão sobre os recursos florestais existentes. Conforme análise da figura 1, observa-se a tendência do mercado para o aumento de consumo (oferta/procura) de espécies tradicionais pelas indústrias de base florestal. Isto implica na procura de alternativas viáveis como o bambu, implicando

no desenvolvimento tecnológico destas espécies. Considerando a atual falta de madeira no mercado mundial a tendência dos países produtores não deve ampliar seus volumes de exploração e, o mercado será cada vez mais dependente de madeiras reconstituídas e seus produtos (MISKALO, 2009).

Figura 1 - Projeção da cadeia dos negócios com madeira no Sul do Brasil



Fonte: MISKALO, 2009.

### Utilização do bambu na engenharia

De acordo com Janssen (2000), as aplicações de engenharia com bambu, como material base nas indústrias de produção e manufatura, dependem basicamente dos limites de suas propriedades mecânicas. Suas propriedades físicas e mecânicas o qualificam como um material alternativo para uso em construção, estruturas, automóveis, aviões, arte e design, comidas e bebidas, têxteis e vestuário e indústrias de papel e celulose. Bambu, há séculos atrás, era reconhecido como um material de homens pobres em localidades onde era disponível, especialmente na África, Ásia e América do Sul e Latina. Entretanto, nos anos recentes, o bambu obteve um grande crescimento em aplicações estruturais e em vários outros produtos que são sustentáveis e renováveis. As propriedades multifuncionais do bambu se provaram excelentes e o tornaram uma fonte de material natural sustentável para trabalhos de engenharia. (NAXIUM, 2001).

As aplicações de bambu na engenharia podem ser divididas em dois grupos, de domésticos até aplicações industriais. Também é aplicado em artesanato e produtos de

arquitetura feitos à mão através de processamento de pequenos volumes de bambu. O processamento industrial de produtos de bambu envolve o processamento mecânico e semi-mecânico de grandes quantidades de colmos de bambu nas dimensões e aplicações requeridas.

Além disso, é utilizado na produção de papel, carvão vegetal, papelão, laminados, fibras em compósitos, e assim por diante. Produtos de bambu possuem uma excelente vantagem em componentes de transporte de carga, onde suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, módulo de elasticidade, e outras que são essenciais para o suporte de estruturas. Aplicações de bambu são muito comuns em áreas onde aplicações de carga são necessárias (AKINLAB, 2007).

De acordo com o estudo promovido por Ghavami (1995), do ponto de vista ecológico, o bambu consome menos energia, conforme observado na tabela 1. Pesquisas da ABMTENC – Associação Brasileira em Materiais e Tecnologias não Convencionais sobre o consumo energético e o impacto ambiental dos diferentes materiais e materiais alternativos, apresentaram resultados positivos dos testes que desenvolve como bambu como substituto ao aço em estruturas de lajes, vigas e colunas e concreto.

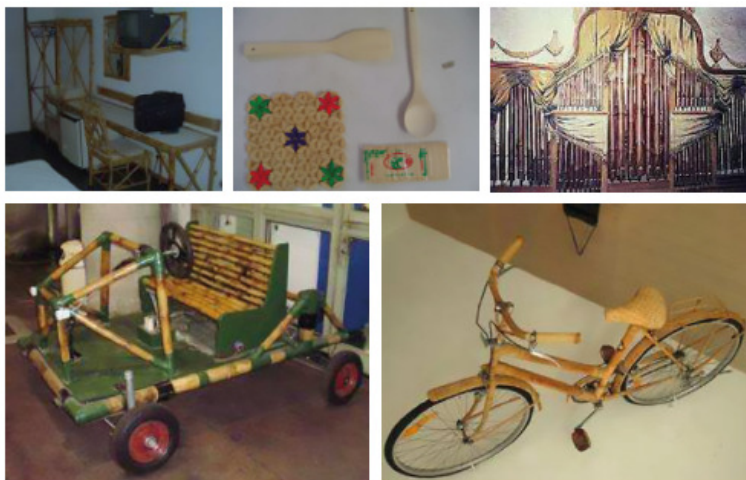
Tabela 1 - Relação energia de produção por unidade de tensão

<b>Material</b>	<b>Bambu</b>	<b>Madeira</b>	<b>Concreto</b>	<b>Aço</b>
<b>MJ/m<sup>3</sup>/MPa</b>	30	80	240	1500

Fonte: GHAVAMI, 1992.

O bambu já é utilizado no meio rural como tutor para plantas, demarcação de curvas de nível, cercas, estrados, comedouros, esteiras, cestos, forros, proteção de terrenos, quebra-vento, controle de erosão, carvão, drenagem, condução de água, alimentação, vara de pescar. O potencial da planta na fabricação de móveis, artefatos domésticos, instrumentos musicais e mesmo na engenharia mecânica é inegável (GHAVAMI, 2017). Alguns exemplos de aplicações estão mostrados na figura 2.

Figura 2 - Aplicações do bambu no design (fabricação de móveis), utensílios de cozinha, instrumentos musicais, engenharia mecânica



Fonte: GHAVAMI, 2017.

Pela sua versatilidade, o bambu é um dos materiais mais antigos a ser utilizado pela humanidade. Há registros de uso do bambu na engenharia no início da civilização, na China, onde pontes suspensas foram construídas com cabos de bambu, dando origem a pontes e coberturas suspensas que hoje são construídas com cabos de aço. Técnicas de construção desenvolvidas na Índia neste período são até hoje utilizadas em países orientais como Indonésia, Taiwan e Tailândia. A eficiência deste material para a construção civil é comprovada considerando a durabilidade das obras construídas pelos povos asiáticos. As figuras 3 e 4 apresentam construções em bambu (MURAD, 2007).



Figura 3 - Stand do SEBRAE/AC - Feira do Empreendedor – Exposição Agropecuária do Estado do Acre – EXPOACRE – 2005.



Fonte: MURAD, 2007.

Figura 4 – Construções em bambu



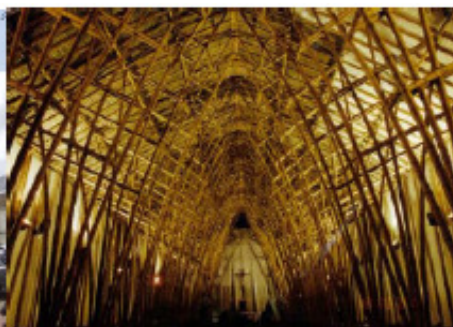
A)



B)



C)



Legenda: A) Memorial indígena em Campo Grande –MS; B) Ponte de bambu em Stuttgart, Alemanha; C) Vistas frontal e interna da Catedral construída em bambu na Colômbia.

Fonte: MURAD, 2007.

## Objetivos

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um método de produção de um protótipo de compósito de bambu de alta densidade, que será composto de fibras de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* e resina epóxi.

Além disso, outro objetivo deste trabalho consiste na produção de corpos-de-prova do referido compósito produzido, e estes corpos-de-prova devem seguir as normas: NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, ASTM D143 e ISO 22157-1: 2004 (E) – Part I, como referência. O compósito será submetido aos seguintes testes, que seguirão os procedimentos a seguir:

- a) Umidade (NBR 7190)
- b) Densidade (NBR 7190)
- c) Estabilidade Dimensional (NBR 7190)
- d) Compressão paralela às fibras (NBR 7190)
- e) Tração paralelas às fibras (ISO 22157)
- f) Flexão (ASTM D143)

Os resultados encontrados serão comparados às propriedades de madeiras brasileiras de uso estrutural, e com outros compósitos de bambu de alta densidade existentes na literatura.

Com a realização deste trabalho inicial, o LAA irá planejar as próximas etapas para a continuidade da pesquisa e conseqüentemente, a melhoria das propriedades do compósito.

## Estrutura do trabalho

No capítulo 1 são apresentadas as aplicações do bambu como material de engenharia e suas vantagens. A utilização de fibras naturais na produção de materiais compósitos também é mencionada.

No capítulo 2 uma revisão sobre o material bambu e suas características químicas, físicas e mecânicas será apresentada. Os tratamentos mais comuns e os adesivos geralmente

utilizados em trabalhos utilizando bambu. Também serão apresentadas algumas características do compósito de bambu produzido em outros países, conhecido como *bamboo scrimber*.

O capítulo 3 apresenta todos os materiais e métodos utilizados na produção do compósito de bambu de alta densidade, desde o corte e manejo do bambu até a produção do produto final. Também será apresentado uma revisão sobre a resina utilizada durante o processamento do compósito e suas características.

O capítulo 4 aborda os métodos de determinação das propriedades do compósito, com base nas normas NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeiras, ASTM D143 - ISO 22157-1: 2004 (E) Part I, desde a produção de corpos-de-prova até a metodologia utilizada na realização dos testes.

No capítulo 5 os resultados obtidos nos testes realizados, serão comparados com os resultados encontrado na bibliografia para alguns tipos de madeira e *bamboo scrimber*.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho, e também a sugestão para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Morfologia do Bambu

O bambu compreende a subfamília *Bambusoideae*, uma das 12 subfamílias reconhecidas dentro da família das gramíneas (*Poaceae*). Ao contrário das outras gramíneas, bambus são a única linhagem principal dentro da família para se adaptar e diversificar dentro do habitat da floresta. Dados da sequência molecular suportam fortemente o bambu como uma linhagem distinta. (CLARK, 2015)

Segundo Filgueiras & Gonçalves (2004), os bambus pertencem à família das gramíneas e a subfamília *Bambusoideae* que por sua vez se divide em duas grandes tribos: bambus herbáceos e os bambus lenhosos, algumas diferenças entre eles de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 - Principais diferenças entre bambus herbáceos e bambus lenhosos

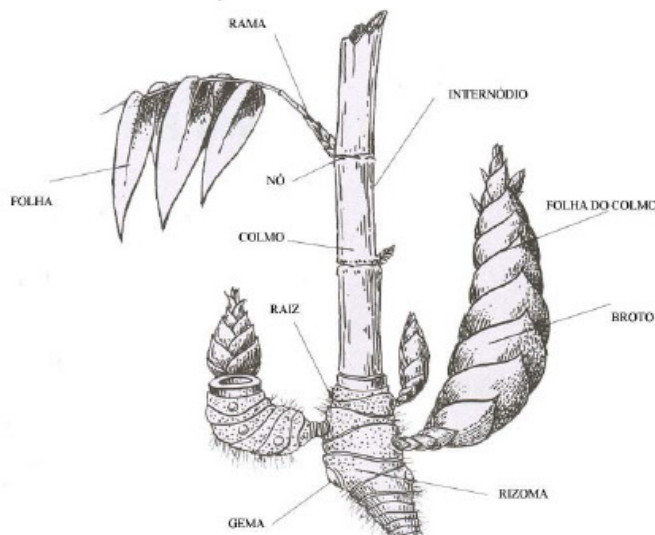
Características	Herbáceos	Lenhosos
1. Comprimento	Geralmente , 2 m	1 - 35 m
2. Ramificações	Simples	Complexas
3. Consistência do colmo	Herbáceo (não lignificado; facilmente quebrável entre dois dedos)	Lenhoso (lignificado; inquebrável entre dois dedos)
4. Folha do colmo	Ausente	Presente
5. Lígula externa	Ausente	Presente
6. Flores	Unissexuais	Bissexuais
7. Florescimento	Contínuo (Policárpico)	Sazonal (monocárpico)
8. Exposição direta ao sol	Intolerante	Tolerante

Fonte: FILGUEIRAS; GONÇALVES, 2004.

Embora seja uma gramínea, os bambus possuem hábito arborescente e da mesma forma que as árvores apresentam uma parte aérea constituída pelo colmo, folhas e ramificações e outra subterrânea composta pelo rizoma e raiz. Todos esses constituintes são formados pela mesma lógica: uma série alternada de nós e entrenós. Com o crescimento do bambu, cada novo entrenó é envolto por uma folha caulinar protetora, fixa ao nó anterior no

anel caulinar. Os nós são pedaços íntegros de tecido, compreendendo o anel nodular, o anel da bainha e uma gema dormente, que são os locais de aparecimento do novo crescimento segmentado (rizoma, colmo ou galho) (CRUZ, 2002; NOGUEIRA, 2008; e SILVA, 2005), conforme figura 5.

Figura 5 - Partes principais do bambu



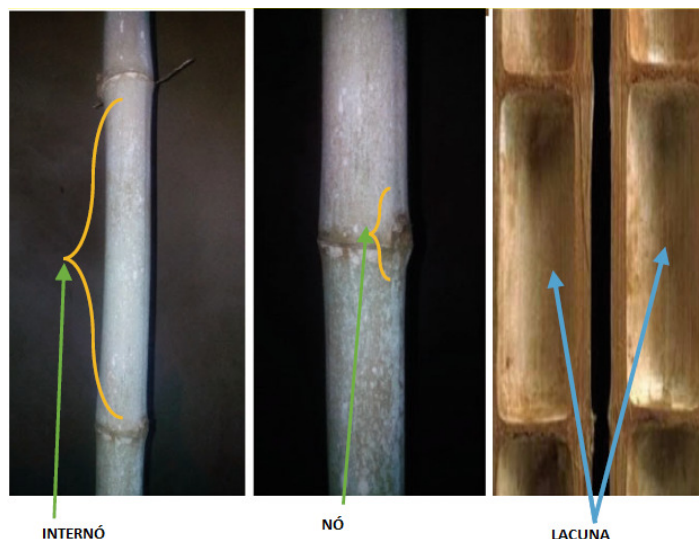
Fonte: NMBA, 2004.

O colmo é a parte mais visível e notável da planta de bambu que se desenvolve a partir de brotos que emergem de gomos. Aparece como um cilíndrico alongado tronco com articulações intermitentes conhecidas como nós. Geralmente, os colmos variam em dimensões, cor e às vezes cheiro dependendo da espécie.

Existem variações importantes nas dimensões do colmo quando diferentes espécies são comparadas. Os colmos podem ser eretos, em zigue-zague, curvados, dispersos ou trepados. As variações no diâmetro do bambu em relação às espécies estão dentro da faixa de 1,0 a 20mm.

O caule ou colmo de planta de bambu podem ser cônicas ou elípticas e compreendem diversos nós e internós, conforme mostrado na figura 6. O internó é oco com nós nas duas extremidades (SCHRODER, 2011). Os nós contribuem para garantir que o bambu seja relativamente reto, permitindo o armazenamento de água e nutrientes. (LIESE e DING, 2003; TAYLOR et al, 2014). O comprimento dos internós e como eles estão distribuídos no colmo podem ser usados como fator na determinação das condições do habitat do bambu. Tanto as bainhas do colmo como os brotos se desenvolvem e emergem da região nodal (BANIK, 2000).

Figura 6 - Morfologia dos colmos de bambu



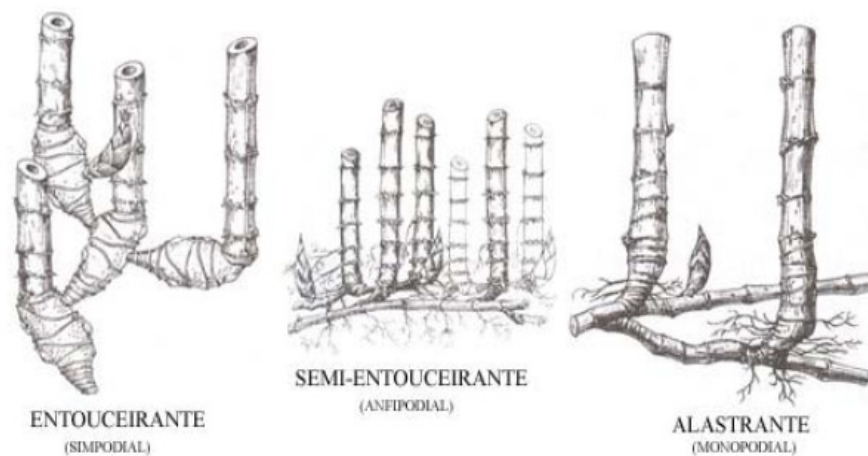
Fonte: AKINLAB, 2017.

Segundo Banik (2010), assim como todas plantas, as raízes do bambu auxiliam no transporte e armazenamento de nutrientes, alimento e água, enquanto assegura ancoragem estrutural. No que diz respeito à forma e tamanho, as raízes de bambu são relativamente simétricas e oscilam entre 0,4 e 4,8 mm. As raízes de bambu estão situadas como um anel em torno das áreas nodais do rizoma.

De acordo com Silva (2005), o rizoma é um caule subterrâneo dotado de nós e entrenós com folhas reduzidas a escamas e que se desenvolve paralelamente a superfície do solo. Não deve ser confundido com a raiz que é uma parte distinta da planta e com algumas funções completares e outras completamente diferentes.

Basicamente existem dois grupos distintos de bambus quanto ao tipo de rizoma: os que formam touceiras (simpodiais) e os alastrantes (monopodiais). Muitos autores propõem o semi-entouceirante (anfipodial) como um terceiro tipo que dispõe de ambas as características anteriores como mostrado na figura 7.

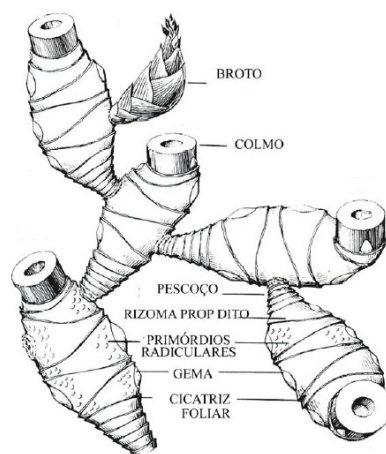
Figura 7 - Diferentes tipos de rizoma.



Fonte: NMBA, 2004.

A espécie *Dendrocalamus giganteus*, objeto do presente estudo, pertence ao grupo paquimorfo ou simpodial. Seus rizomas são mais curtos, grossos e sólidos; possui gemas laterais que crescem horizontalmente em curtas distâncias formando um novo ápice na periferia, acarretando um agrupamento em forma de touceira, que pode conter de 30 a 100 colmos. Os novos brotos emergem durante a estação da chuva. Na figura 8 o rizoma de bambu entouceirante.

Figura 8 - Rizoma típico de um bambu entouceirante.



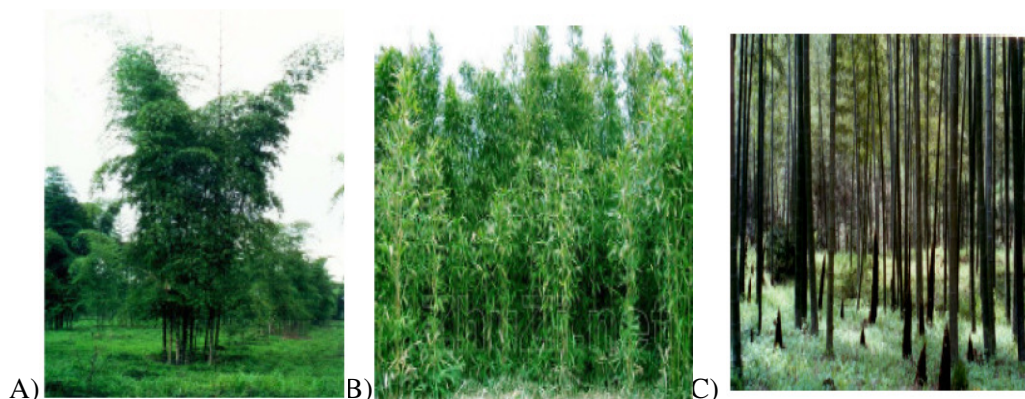
Fonte: SILVA, 2005.

### 1.1.1 Desenvolvimento e crescimento

Segundo Cruz (2002), diferente das árvores, cujo tronco cresce ao mesmo tempo radial e verticalmente até alcançar seu completo desenvolvimento entre os 12 e 15 anos e ainda depois dos 100 anos, o bambu emerge do solo com o diâmetro máximo que terá em sua vida, o qual não aumenta com a idade, pelo contrário diminui proporcionalmente ao longo de seu comprimento. O colmo alcança sua máxima altura entre os 30 e 80 dias no grupo leptomorfo e entre os 80 e 180 dias no grupo paquimorfos. Terminado seu crescimento começa a formação de seus ramos e folhas a qual se completa no primeiro ano.

Entre os 4 e 12 primeiros meses, o bambu é muito brando e flexível, pelo que é empregado na confecção de cestos e outras peças artesanais. À medida que alcança sua maturidade, as fibras tornam-se cada vez mais duras e resistentes até atingir sua máxima resistência entre os três e seis anos, idade apropriada para seu uso na construção civil. Depois deste período, os colmos começam lentamente a mudar a cor até secar completamente. O crescimento do bambu é tão rápido que não existe na natureza planta que possa igualar-se a ele. Em condições normais e na época de maior desenvolvimento, o crescimento em 24 horas pode alcançar de 8 a 10 cm, chegando a 40 cm em espécies como o *Dendrocalamus giganteus*. Na figura 9, uma foto como exemplo do crescimento do bambu entouceirante, aonde está inserida a espécie estudada neste trabalho, além do crescimento dos outros 2 tipos de rizoma.

Figura 9 - Crescimento do bambu



Legenda: (A) - Simpodial (entouceirante); (B) - Anfiomorfo (semi-entouceirante); (C) - Monopodial (alastrante).  
Fonte: JIANGHUA, 2007.



## 1.2 A espécie *Dendrocalamus giganteus* (Wallich ex. Munro)

A espécie *Dendrocalamus giganteus* (Wallich ex Munro) é considerada uma planta nativa do sul de Mianmar e noroeste da Tailândia. Em épocas passadas foi introduzida em lugares como Índia, principalmente a Noroeste e a Oeste de Bengala, Sri Lanka, Bangladesh, Nepal, Tailândia, sul da China, Vietnam, Indonésia, península da Malásia, Filipinas (MONTIEL; SÂNCHEZ, 2006).

No Brasil a maior incidência do bambu gigante é nas regiões do sul e sudeste onde se adaptou ao clima e solo (JUDZIEWICZ et al., 1999).

Lin (1968), classificou o *Dendrocalamus giganteus* como espécie de grande porte por possuir altura entre 20 e 30m, diâmetro do colmo entre 20 e 30 cm, comprimento internodal de 30 a 45 cm e espessura de parede variando entre 1 e 3 cm, ideal para o processo de manufatura de lâminas para painéis, polpa e papel, utensílios domésticos e alimento. Essa espécie pode atingir até 36 m de altura e 25 cm de diâmetro. Os colmos apresentam três fases distintas de crescimento, sendo a primeira caracterizada pelo crescimento em comprimento de até 10 cm por períodos de 24 h, quando atingem cerca de 5 m de comprimento; na segunda, o crescimento atinge a taxa de 15 cm em 24 horas, com faixas de 5 a 15 m e a terceira, com crescimento mais lento influenciado pelo clima, caracterizado pela chuva e baixas temperaturas (NASCIMENTO, 1990).

Analisando a velocidade média de crescimento dessa espécie, Azzini et al. (1989), obtiveram 22,0 cm/dia. O tempo máximo de desenvolvimento dessa espécie em altura está entre 80 a 110 dias (NOMURA et al., 1986).

De acordo com Ventania (2008), a produtividade de uma touceira do *Dendrocalamus giganteus* com 100 m<sup>2</sup> pode chegar até 600 colmos (varas) de até 20 m de altura.

Assim, este excepcional vigor vegetativo gera vários benefícios ambientais como uma aptidão para o reflorestamento, recuperação de áreas degradadas e o fornecimento de matéria prima para a indústria, tendo em vista as pressões ambientais em torno das florestas nativas para extração de madeira.

Segundo Hidalgo López (1981), as excelentes propriedades mecânicas do bambu desta espécie estão diretamente relacionadas com a quantidade de umidade dos colmos, idade, densidade do bambu, mas principalmente pela quantidade de fibras que garantem sua resistência. É um material que tem alto índice de absorção de umidade e baixo módulo de elasticidade, porém, sua resistência à compressão, flexão e tração, em função do seu peso

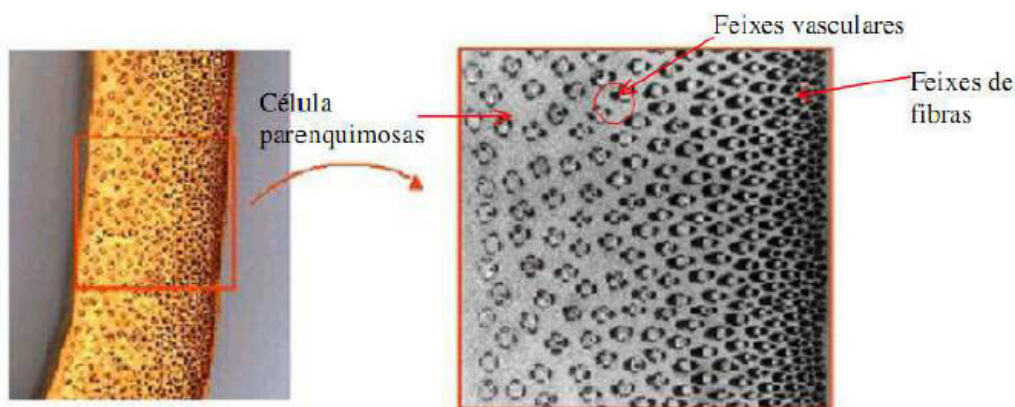
específico, estimula sua utilização como elemento estrutural. Suas propriedades estruturais em algumas espécies formadas pelas relações resistência/massa específica, superam as madeiras e o concreto, podendo ser comparada ao aço (JANSSEN, 2000).

### 1.3 Características químicas do Bambu

De acordo com Lima Jr. (2000), o bambu é por natureza um material composto, seu colmo é formado por fibras, vasos e condutores de seiva que estão distribuídos não uniformemente na seção transversal e embebidos em um tecido de preenchimento, uma espécie de matriz, denominado *Parenchyma*. Segundo Ghavami e Marinho (2003), sobre a microscopia do bambu, observou-se que os feixes de fibra são mais concentrados à medida que se localizam mais próximos da parte externa do colmo. As fibras do bambu constituem a parte desta planta que confere resistência para combater as cargas de vento (solicitação predominante durante o tempo que o bambu está na touceira). Na figura 10, pode-se observar como se comporta a variação da fração volumétrica das fibras ao longo da espessura do colmo do bambu *Phyllostachys heterocycla pubescens* (Mosó).

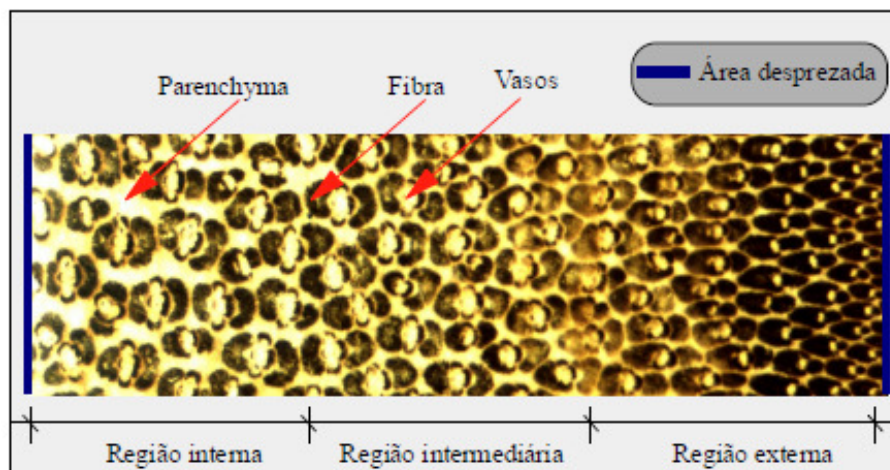
Cerca de 40% do colmo do bambu é formado por *Parenchyma*, 10% por vasos e condutores de seiva e 50% por fibras conforme apresentado na figura 11.

Figura 10 - Concentração das fibras na parte externa da parede colmo



Fonte: GHAVAMI; MARINHO, 2003.

Figura 11 - Macroestrutura da parede do colmo de bambu



Fonte: LIMA JR., 2000.

O *Parenchyma* é formado por células pouco rígidas, de paredes muito finas constituídas basicamente de celulose e preenchidas por Lignina; além de suas células serem conectadas umas às outras através de cavidades. O *Parenchyma* confere certa plasticidade à planta e é o tecido mais fraco do bambu. Sua função é armazenar reservas nutritivas que o vegetal necessita. O sistema vascular do bambu é composto de duas partes: o *Pholem*, formado por longas células de paredes finas, constituídas principalmente por Lignina e responsável pelo transporte de material nutritivo para as partes superiores do bambu; e o *Xylen*, formado por células de paredes espessas, de composição complexa, que está localizado dentro do *Pholen* e responsável pelo transporte de água e minerais. As fibras são formadas por células mortas (*Sclerenchyma*) de grande comprimento e de paredes constituídas principalmente por celulose. Elas são responsáveis pelas propriedades mecânicas da planta.

Segundo Cruz (2002), o bambu, como material orgânico, é produzido por processos fotossintéticos localizado nas folhas. O bambu é um composto polimérico, anisotrópico, com diferentes propriedades mecânicas em diferentes direções e não homogêneo, não tendo a mesma composição, estrutura ou características em todo seu volume. A principal fonte de propriedades mecânicas do bambu é a celulose. Na molécula de celulose são definidos três planos mutuamente ortogonais. Essas moléculas são unidas no primeiro plano por fortes ligações de hidrogênio, no segundo plano por fracas ligações de Van der Waals e no terceiro por fortes ligações covalentes. As propriedades da lignina não são muito conhecidas devido à sua estrutura química extremamente complexa. A lignina fornece rigidez para as árvores, tornando o seu crescimento possível, além de proporcionar maior durabilidade aos tecidos,

protegendo-os da ação de micro-organismos. Por último a hemicelulose é formada por polissacarídeos de baixa resistência, constituídos por 150 a 200 moléculas de sacarose. Estes componentes orgânicos formam as paredes das células que compõem os tecidos do bambu. Nas regiões externas das paredes dos colmos encontram-se em maior concentração a celulose biológica, hemiceluloses e lignina silícica. Em menor concentração são encontradas cinzas, álcool, benzeno e pentoses (GHAVAMI e MARINHO, 2001).

Os principais constituintes químicos dos colmos de bambu são carboidratos determinados, como celulose (60-70%), pentosana (20-25%), hemicelulose e a lignina (20-30%) e, em minoria, constituintes como resinas, tanino e sais inorgânicos. A composição química do bambu é similar às das madeiras de alta densidade, com exceção para as que contêm alto extrato alcalino, cinzas e sílica. Na tabela 3 são apresentadas as porcentagens dos constituintes químicos do bambu (TOMALANG et al, 1980).

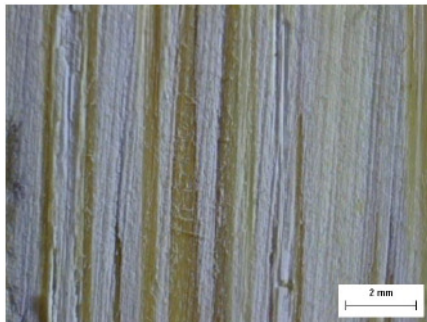
Tabela 3 - Composição química do bambu.

<b>Componentes</b>	<b>% em massa</b>
Carbono	50
Oxigênio	43
Hidrogênio	6,1
Nitrogênio	0,04-0,26
Cinzas	0,2-0,6

Fonte: BERNDSEN, 2008.

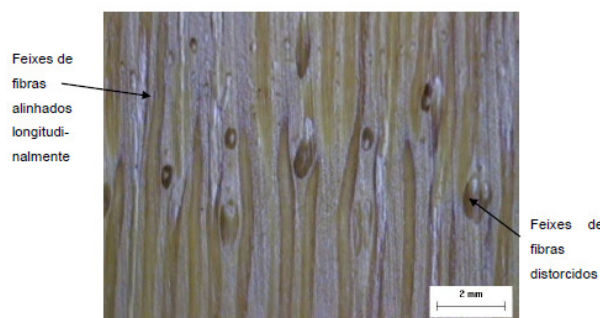
O termo grã se refere ao paralelismo das fibras do bambu em relação ao eixo longitudinal, enquanto que nas coníferas as grãs podem ser dos tipos direitos ou regulares, e ainda, inclinados ou irregulares. No bambu estudado, basicamente a grã é direita, ou seja, apresenta tecidos axiais paralelos ao eixo longitudinal do colmo, figura 12. Este arranjo permite uma elevada resistência mecânica (característica importante do bambu), facilita o processamento de corte no sentido tangencial. O bambu, após o corte tangencial apresenta superfícies regulares, devido à grã reta, que são parcialmente interrompidas na região saliente dos internós denominados nós, figura 13.

Figura 12 - Aspectos morfológicos e anatômicos do colmo



Fonte: MISKALO, 2009.

Figura 13 - Detalhe da distorção fibro-vasculares nodal



Fonte: MISKALO, 2009.

Os nós promovem a conexão transversal com a parede do colmo via diafragma, por se tratarem de peças ocas (LIESE, 1998).

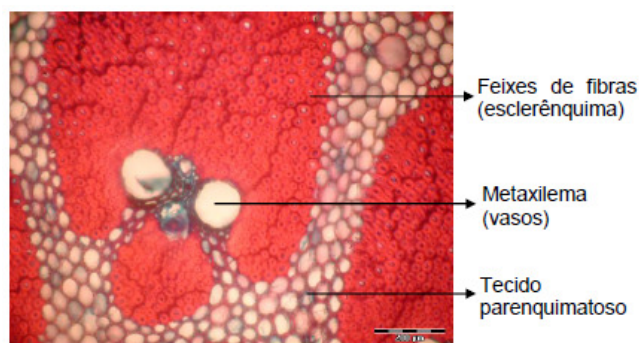
Este material pode ser considerado como composto natural no qual a lignina atua como matriz e as fibras como reforço. A lignina é um armazenador de energia, sendo responsável pela transferência de tensões entre as fibras (JAIN et al., 1992). As fibras de celulose promovem grande resistência à tração, em flexão e rigidez na direção longitudinal do bambu.

A fração volumétrica destas fibras varia ao longo da seção transversal do bambu, sendo que na parte mais externa a fração volumétrica é maior em relação à parte mais interna (GHAVAMI & MARINHO, 2003). Quando a seção do bambu é cortada, vários pontos de cor escura podem ser observados. Esses pontos são feixes de fibras circundados por canais vasculares, como pode ser visto na figura 14. A estrutura anatômica da seção transversal é determinada pelo formato, tamanho, disposição e número de canais vasculares. Estes são compostos ditos mecânicos, os quais são formados por dois tipos de vasos, o metaxilema e o

floema, e pelo protoxilema que são as artérias principais. Os vasos vasculares são cercados por células parenquimatosas.

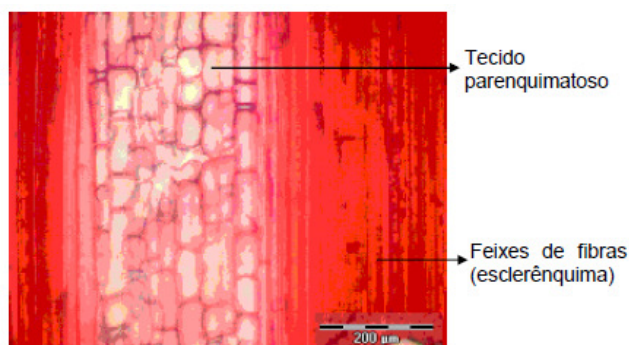
Segundo Hidalgo López (2003), a espessura da parede do colmo decresce da base até o seu topo, devido à redução da parte interna, que contem mais parênquimas e menos vasos vasculares. A parte superior do colmo que contém mais vasos vasculares e menos parênquimas, implicando em maior densidade. Assim, as resistências à tração e em flexão aumentam com o aumento de altura. O colmo do bambu é formado por feixes fibro-vasculares (60 a 70% de sua massa) e tecido parenquimatoso rico em amido (LIESE, 1998), como observado na figura 15.

Figura 14 - Detalhe dos conjuntos vasculares, parênquima e fibras do bambu, seção transversal do gênero *Dendrocalamus giganteus*



Fonte: MISKALO, 2009.

Figura 15 - Seção longitudinal indicando os elementos anatômicos do *Dendrocalamus giganteus*. Feixes de fibras e células parenquimatosas



Fonte: MISKALO, 2009.

Esta particularidade anatômica também foi constatada no estudo conduzido por Amada et al. (1996), a microestrutura do bambu, de modo genérico, pode ser considerada como material compósito constituído de fibras longas e alinhadas de celulose imersas em

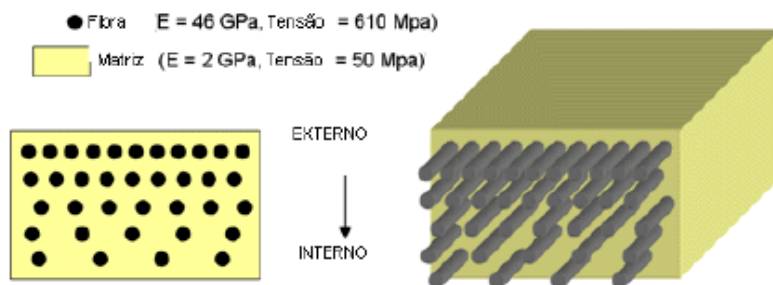
matriz de lignina. Em estudos realizados sobre a microscopia do bambu, constataram que os feixes de fibras são mais concentrados à medida que se situam mais próximos da parede externa, figuras 16 e 17, de forma que possa resistir à força do vento que é a maior solicitação durante a vida deste material na natureza.

Figura 16 - Características anatômicas do bambu.



Fonte: LEE et al., 1996.

Figura 17 - Corte ortogonal esquemático do bambu, conforme modelo, mostrando diferentes tensões entre os feixes e a matriz.



Fonte: LEE et al., 1996.

O comprimento das fibras varia através da parede do colmo, sendo mais curtas na parte externa, mais longas no centro e decrescem em comprimento em direção à região interna.

## 1.4 Propriedades Físicas

Para o uso apropriado de cada espécie de bambu e madeira, é muito importante estudar suas propriedades físicas (densidade, umidade, dureza, etc.) que são relacionadas com as características do material; e também suas propriedades mecânicas que são relacionadas com a resistência do material (forças de tração e compressão, etc.). Existe uma boa relação entre as características físicas e mecânicas, por exemplo, as propriedades de resistência do bambu são influenciadas pela massa específica e teor de umidade do bambu. Devido às estas razões, cada espécie de bambu pode ter uma ou várias aplicações em um ou vários campos de atuação, dependendo de suas propriedades físicas e mecânicas (HIDALGO LÓPEZ, 1974). As principais propriedades físicas do colmo estão a seguir:

### 1.4.1 Densidade

Segundo Liese (1998), cerca de 50% das fibras das paredes dos colmos estão localizadas no terço externo da parede do colmo e isto aumenta sua densidade. Isto indica que a resistência da parede do colmo aumenta gradualmente de dentro para a parte externa da parede, e que a parte mais resistente do colmo é a da camada externa correspondente a 1/3 da parede do colmo. A densidade dos bambus aumenta a partir das camadas mais internas para a parte periférica do colmo e, ao longo do colmo, a partir da base até o topo com o aumento da porcentagem de fibras.

Segundo Lee (1994), a densidade do bambu varia de 0,50 a 0,79 g/cm<sup>3</sup>. Estes valores corroboram aos encontrados por Rivero (2003), que se situou na faixa de 0,58 a 0,79 g/cm<sup>3</sup> e aos de Garbino et al. (2002), com valores da ordem de 0,57 a 0,75 g/cm<sup>3</sup>.

A densidade aparente é reconhecida como sendo um dos mais importantes parâmetros para avaliação da qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e por estar relacionada às suas demais características (SHIMOYAMA e BARRICHELLO, 1991). Esse valor depende de forma acentuada do teor de umidade, sendo convencionado, no Brasil, para a madeira, o valor de 12%, de acordo com a NBR 7190/97 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1977).



A densidade aparente é definida pela equação 1:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (1)$$

onde:

$\rho_{ap}$  = densidade aparente, em kg/m<sup>3</sup>;

$m_{12}$  = massa do corpo-de-prova a 12% de umidade, em kg;

$V_{12}$  = volume do corpo-de-prova a 12% de umidade, em m<sup>3</sup>.

#### 1.4.2 Teor de Umidade

Segundo Hidalgo López (2003), além da estrutura anatômica da parede do colmo, as propriedades de resistência do bambu são afetadas pela umidade como vapor no ar ou como um teor de umidade. Teor de umidade é o peso da água contida na parede e no lúmen celular de uma seção do colmo expressa como a porcentagem do seu peso seco no forno. De acordo com a NBR 7190, o teor de umidade é calculado conforme a equação 2:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:  $m_1$  = massa inicial da madeira, dada em g;

$m_2$  = massa seca, dada em g;

$U(\%)$  = teor de umidade, dado em %

Assim como a madeira, o bambu contém quantidades variáveis de água ao longo do seu processo de preparação para aplicação; logo após o corte, a porcentagem de água é bastante elevada. A umidade tende sempre a diminuir até atingir o equilíbrio entre a umidade do bambu e o grau higrométrico do meio ambiente (RIVERO, 2003)

De acordo com Berndsen (2008), o teor de umidade do bambu varia de acordo com a idade, posição e época do corte. Em geral, os colmos mais velhos possuem um teor de

umidade menor que os mais novos. Além disso, o teor de umidade diminui gradativamente da base para o topo e da parte externa para a interna do colmo. O teor de umidade é um fator importante que influencia nas propriedades mecânicas do bambu, pois quando o teor de umidade aumenta, o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, tração, cisalhamento e flexão paralela às fibras, diminuem.

Garbino et al. (2002), realizaram experimentos para avaliar o teor de umidade, utilizando a espécie *Dendrocalamus giganteus*, verificando que, quanto à idade do colmo, o teor de umidade das amostras apresentou pequena variação: entre 87% e 98% para amostras sem nó e entre 66% a 75% para amostras com nó. Sendo o teor de umidade sempre menor para as amostras com nó, em todas as idades de colmo investigadas.

#### 1.4.2.1 Teor de umidade de equilíbrio

Ainda de acordo com Hidalgo López (1974), bambu e madeira são higroscópicos. Isto significa que qualquer parte seca do bambu ou madeira em uso, colocado em um ambiente úmido, irá absorver umidade do ar, porém, o bambu molhado irá ceder parte de sua umidade para a atmosfera seca até que o total de umidade no colmo chegar ao equilíbrio com a atmosfera. O teor de umidade do colmo no ponto de equilíbrio é chamado “Teor de Umidade de Equilíbrio” e é expressa como uma porcentagem do peso da seção do bambu seco em forno. À temperatura constante, a umidade de equilíbrio depende inteiramente da umidade relativa da atmosfera que envolve o colmo e da higroscopicidade da madeira de bambu.

#### 1.4.3 Ponto de saturação da fibra de bambu

A umidade no bambu verde é parcialmente absorvida nas paredes celulares e parcialmente presente nas cavidades celulares ou lúmen celular por forças capilares. Como a madeira de bambu seca e perde umidade, as paredes celulares não fornecem umidade, até que as cavidades celulares estejam vazias. A condição na qual as paredes celulares estão completamente saturadas e os lúmens celulares estão vazios é conhecido como o “Ponto de Saturação da Fibra”. Nas madeiras, o ponto de saturação da fibra varia de acordo com as

espécies num intervalo de 28 a 30%, sendo comum a utilização do valor de 30%. O ponto de saturação das fibras de bambu é influenciado pela composição dos tecidos e variações no colmo, e varia entre as espécies num range de 13 a 20%.

#### 1.4.4 Estabilidade dimensional

A determinação do grau de estabilidade dimensional do bambu é realizada por meio de suas propriedades de retração e inchamento. Para (COLLA, 2010), a estabilidade dimensional (retratibilidade) é um fenômeno relacionado a sua variação dimensional, em função da troca de umidade do material com o meio que o envolve, até que seja atingida uma condição de equilíbrio, chamada de umidade de equilíbrio higroscópico (em torno de 30%). Esse valor depende da temperatura e da umidade relativa do local. Para o bambu, podem se adotar os procedimentos descritos na ABNT NBR 7190 (1997).

Segundo Hidalgo López (1974), o bambu, assim como a madeira, é anisotrópico e possui como direções principais, a longitudinal ou axial, radial e tangencial quando levado em consideração a forma cilíndrica do colmo de bambu. Ao contrário de madeira, o bambu começa a encolher desde o início da secagem. A retração afeta tanto a espessura da parede do colmo como o diâmetro, e mostra uma tendência em diminuir de baixo para cima (LIESE, 1985). A porcentagem de inchamento diminui com o aumento da densidade básica (KISHEN et al. 1958; SEKHAR e RAWAT, 1964).

Comparado com a madeira, a anisotropia de retração (relação na variação dimensional entre a direção tangencial e radial) do bambu é bem menor. Enquanto a retração tangencial da madeira é quase o dobro da retração na direção radial, no bambu a retração radial é comumente reportado como sendo maior ou igual a retração na direção tangencial (LIESE, 2015).

A variação no teor de umidade, densidade e resistência ao longo da espessura da parede de bambu é a provável responsável pelo comportamento adverso do bambu em uso. Experiências com o bambu verde mostram retração irreversível e excessiva quando acima do ponto de saturação da fibra com recuperação parcial nos estágios intermediários. Este comportamento está ligado ao colapso. Abaixo do ponto de saturação da fibra, o comportamento é semelhante ao da madeira (HIDALGO LÓPEZ, 1974).

Em estudo de 6 espécies de bambu, em relação à comparação entre as resistências do bambu verde e do seco, foi visto que o teor de umidade do bambu verde diminui da base para o topo do colmo, devido à quantidade de parênquima na parede do colmo que também decresce da base até o topo (PRAWIROHATMODJO, 1988).

Algumas propriedades físicas de algumas espécies de bambu estão na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas de algumas espécies de bambu.

ESPÉCIES	DENSIDADE (seco em forno) (g/cm <sup>3</sup> )	RETRAÇÃO (%)			
		DIÂMETRO (%)	ESPESSURA DA PAREDE (%)	LONGITUDINAL (%)	VOLUMÉTRICO (%)
<i>Bambusa longispiculata</i>	0.73	6.7	10.3	0.17	16.8
<i>B. burmanica</i>	0.76	12.4	14.8	0.20	25.1
<i>Dendrocalamus calostachyus</i>	0.77	9.0	8.1	0.26	23.5
<i>D. giganteus</i>	0.68	4.8	5.0	0.19	9.0
<i>D. hamiltonii</i>	0.72	6.9	11.4	0.12	20.3
<i>D. maclellandii</i>	0.83	7.3	10.2	0.12	17.7
<i>Melocanna baccifera</i>	0.61	7.9	11.9	0.14	26.8
<i>Thyrsostachys oliveri</i>	0.80	5.5	6.4	0.16	11.2
<i>T. siamensis</i>	0.81	7.2	9.9	0.13	20.6

Fonte: adaptado de SINT, 2008.

### 1.5 Propriedades mecânicas

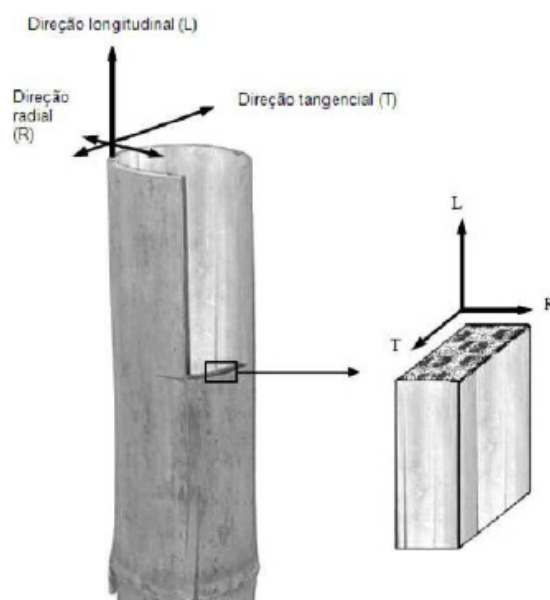
O bambu é único entre as madeiras devido às suas propriedades físicas e mecânicas, que variam significativamente com o teor de umidade, idade, diâmetro, tipo, posição ao longo do colmo, e comprimento ou altura do colmo. A literatura indica que a resistência ótima nos bambus é atingida entre dois anos e meio a quatro anos de idade, a partir da qual a resistência dos bambus começa a diminuir (AMADA e UNTAO, 2001; e LO, 2004).

O bambu é um material natural e como tal existem diversos fatores que influenciam suas características mecânicas. De forma semelhante à madeira, tais características variam com a espécie, idade da planta e tempo de corte. Mesmo para uma dada espécie de bambu, a variação nas propriedades mecânicas é considerável, devido a influência de fatores que fogem ao controle do homem (solo do bambuzal, condições climáticas, teor de umidade das

amostras), mas isto pode ser controlado e assim produzir bambu com mínimo de variação na sua resistência. Mesmo desta forma, a idade e a espécie devem ser consideradas como variáveis na determinação das suas propriedades, sendo uma suposição geral dizer que o bambu maduro, com idade entre três e cinco anos apresente sua máxima resistência mecânica (NOGUEIRA, 2008).

Para uso estrutural, ou quando se necessitam de colmos com maior resistência mecânica, deve-se cortá-los com, mínimo, três anos, devido ao amadurecimento de seus tecidos constituintes. A maior resistência mecânica dos colmos de bambu ocorre entre os três e os sete anos, que é seu período de vida útil antes que comece a secar na touceira. Além disso, sendo o bambu um material anisotrópico (especificamente ortotrópico), possui propriedades mecânicas particulares nas três direções: longitudinal, tangencial e radial (PEREIRA e BERALDO, 2007), como pode ser visto na figura 18.

Figura 18 - Eixos ortogonais do bambu.



Fonte: AHMAD, 2000.

Em virtude da orientação das fibras ser paralela ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão. O módulo de elasticidade varia em função da posição do colmo, sendo maior nos nós por apresentarem maior concentração de sílica (LIESE, 1998). Por ser o nó um ponto de descontinuidade das fibras e de mudanças dimensionais, nele originam-se concentrações de tensões quando submetido a ensaio. Em estudos realizados à tração, Ghavami e Hombeck (1981) observaram que na maioria dos testes a ruptura ocorreu próximo

ao nó. Eles observaram ainda que a parte basal, por possuir maior seção transversal, apresentou maior carga de ruptura.

A variação na densidade dentro do colmo e entre as espécies é o principal fator que influencia na resistência (ANWAR, 2005). Com exceção do módulo de ruptura (MOR), a resistência ao cisalhamento, resistência à compressão paralela as fibras, módulo de elasticidade (MOE), e a tensão limite proporcional possuem correlação positiva com o aumento na altura dos colmos. A correlação negativa do MOR com a altura do colmo indica que a carga de flexão máxima dos colmos com parede mais fina é muito menor do que a parte basal do colmo com paredes espessas, devido a um momento de inércia desfavorável. (LATIF e LIESE 1995; KAMRUZZAMAN, 2008).

A distribuição dos feixes vasculares possui correlação positiva com todas as propriedades de resistência, com exceção do MOR. Isso implica que um aumento no total de feixes vasculares será acompanhado em um incremento da densidade e, conseqüentemente, um aumento nas propriedades de resistência.

Segundo diversos autores da literatura, o principal inconveniente para determinar as características mecânicas dos colmos está na realização de ensaios precisos, não havendo uma padronização, pois cada pesquisador adota uma metodologia diferenciada, tornando difícil a comparação de resultados.

### 1.5.1 Resistência à tração paralela às fibras

As antigas pontes pênseis asiáticas foram construídas com tecidos trançados provenientes das camadas externas de colmos de bambus. Tais pontes tornaram-se exemplos de uma combinação de leveza e de excelente resistência mecânica à tração. A grande longevidade das pontes deveu-se à ausência de tecidos provenientes das camadas internas do colmo, as quais apresentam também maior concentração de substâncias atrativas aos insetos (LÓPEZ, 1974).

Segundo Lima (2000), a grande dificuldade na realização do ensaio à tração do bambu consiste na idealização do corpo de prova. Isto se deve às baixas resistências à compressão transversal e ao cisalhamento paralelo as fibras deste material. Assim, quando solicitado em uma máquina de ensaio, o corpo de prova não rompe à tração pura e sim por esmagamento ou cisalhamento do trecho fixo à garra. Então, Ghavami (1989) concluiu que era necessária a

colocação de um reforço no trecho de fixação à garra da máquina. Lima (2000) ensaiou 100 corpos de prova dos colmos, sendo 50% da região intermodal e 50% com a presença do nó na seção central da espécie *Dendrocalamus giganteus*. A tensão média de ruptura à tração foi de 277,19 e 97,51 MPa, para a região sem nó e com nó, respectivamente. O módulo de elasticidade à tração foi de 23,75 e 13,14 GPa, sem e com nó, respectivamente.

De acordo com Culzoni (1986), que avaliou as propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* provenientes do Rio de Janeiro, os resultados obtidos foram 106,2 e 214,1 MPa, para resistência à tração de corpos de prova com e sem nó, respectivamente. Além disso, foi obtido valor de 11,75 e 14,5 GPa para o módulo de elasticidade do bambu de mesma espécie com nó e sem nó, respectivamente.

Ghavami e Marinho (2001), determinaram a resistência à tração das partes basal, intermediária e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*. Foram testados corpos de prova com nó nivelado, com nó não nivelado e sem nó. Os resultados médios obtidos são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Tensão à tração nas partes basal, intermediária e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do bambu	Carga aplicada P (kN)			Tensão à tração $\sigma_t$ (MPa)			Módulo de elasticidade E (GPa)
	P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>médio</sub>	$\sigma_t$ (min)	$\sigma_t$ (max)	$\sigma_t$ (médio)	
Topo s/ nó	2,23	2,60	2,46	129,45	160,49	147,16	-
Topo c/ nó	2,75	2,86	2,79	76,31	119,25	119,00	18,31
Intermediário s/ nó	3,28	5,51	4,62	142,59	245,36	224,08	-
Intermediário c/ nó	4,02	4,70	4,36	156,25	184,31	170,28	20,76
Base s/ nó	6,57	8,00	7,28	140,12	178,57	159,35	23,12
Base c/ nó	4,13	4,60	4,38	101,37	117,49	109,43	13,61

Fonte: CRUZ, 2002.

Observa-se que o bambu estudado atinge tensão mínima de 76,31 MPa, nas amostras de topo com nó. Na região intermediária foram reportadas as maiores solicitações, oscilando os valores entre 142,59 e 156,25 MPa. Como esperado, nos nós a resistência diminui devido à

descontinuidade das fibras nestes pontos. O módulo de elasticidade oscilou entre 13,61 e 23,12 GPa.

Ainda de acordo com Ghavami e Toledo Filho (1992), que também estudaram a espécie *Dendrocalamus giganteus*, provenientes da Paraíba e obtiveram a resistência à tração de 110,4 135,0 MPa para corpos de prova com nó e sem nó, respectivamente. Deste modo, com base nestes estudos, percebe-se que a resistência à tração, assim como outras propriedades mecânicas, variam em função de clima, solo e outros fatores.

A resistência à tração do bambu é alta e para algumas espécies e pode atingir até 370 MPa. Isto torna atrativo o uso do bambu como um substituto para o aço, especialmente quando for considerada a razão entre sua resistência à tração e sua massa específica aparente, como pode ser visto na tabela 6. Pode ser notado que a razão entre a resistência à tração do bambu e sua massa específica aparente, definida como  $\frac{\sigma}{\gamma}$  é superior a 2,34 vezes daquela obtida para o aço CA 50. Em geral, a resistência à tração do bambu, com ou sem nó, situa-se entre 40 MPa e 215 MPa, e o seu módulo de elasticidade varia entre 5,5 e 18,0 GPa.

Tabela 6 - Razão entre tensão de tração e a massa específica de alguns materiais.

Tipo de material	Resistência à tração $\sigma_t$ (MPa)	Peso específico $\gamma$ (N/mm <sup>3</sup> × 10 <sup>-2</sup> )	$R = \frac{\sigma_t}{\gamma} \times 10^2$	$\frac{R}{R_{aço}}$
<b>Aço CA 500</b>	<b>500</b>	<b>7,83</b>	<b>0,64</b>	<b>1,00</b>
Alumínio	300	2,79	1,07	1,67
Ferro fundido	280	7,70	0,39	0,61
<b>Bambu</b>	<b>120</b>	<b>0,8</b>	<b>1,5</b>	<b>2,34</b>

Fonte: CRUZ, 2002.

Para fins de comparação, são exibidos nas tabelas 7 e 8, valores para resistência à tração resultantes da literatura que variam entre 100 – 400 MPa, em estudos realizados por Janssen (1981a,b) e Arce-Villalobos (1993).



Tabela 7 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à tração de bambus (continua)

<u>Autor</u>	<u>Ano da Publicação</u>	<u>Método e resistência à tração ou descobertas</u>
H.F Meyer and B. Ekelund	1923	<b>Método:</b> Vigas reforçadas com bambu <b>Resultados:</b> 100 MPa
C.H Duff	1941	<b>Método:</b> Tiras de bambu <i>Phyllostachys pubescens</i> foram testados <b>Resultados:</b> Camada externa = 342 MPa Camada interna = 54 MPa Resistência no nó = 80% da resistência
M .Ota	1953	<b>Método:</b> estudos sobre o efeito do teor de umidade na resistência à tração na falha <b>Resultados:</b> relação linear entre o teor de umidade e a resistência à tração
K.P. Karamchandani	1959	<b>Método:</b> explorar a capacidade de utilização do bambu como material de construção. <b>Resultados:</b> Camada externa = 100 - 335 MPa Camada interna = 150 - 160 MPa
Cox and Geymeyer	1969	<b>Método:</b> foco na resistência à tração do bambu <i>Arundinaria tecta</i> relacionados à idade, solo, morfologia e influências externas <b>Resultados:</b> Módulo de elasticidade = 18,670 MPa Máx tensão de tração = 153 MPa
J.L. Atrops	1969	<b>Método:</b> estudo utilizando corpos de prova de duas dimensões (dog-bone) <b>Resultados:</b> Camada externa = 290 MPa Camada interna = 153 MPa
E.C. McLaughlin	1979	<b>Método:</b> <i>Bambusa vulgaris</i> foi utilizado para estudar a relação entre resistência à tração e densidade. <b>Resultados:</b> foi provado que a resistência à tração possui relação direta com a densidade.
L. Xiu-Xin and W. Liu-Keqing	1985	<b>Método:</b> Espécie <i>Phyllostachys</i> colhidas de 4 regiões diferentes para avaliação das propriedades mecânicas com relação à resistência à tração, idade e densidade. <b>Resultados:</b> equações de regressão foram desenvolvidas relacionando resistência à tração com a idade.
T. Soeprayitno et al.	1988	<b>Método:</b> experimentos com a espécie <i>Gigantochloa pseudoarundinacea</i> oriundos de regiões de montanha e de vale. <b>Resultados:</b> Montanha a - resistência à tração = 177,9 MPa b - Módulo de elasticidade = 27.631 MPa Vale a - Resistência à tração - 149,4 MPa b - Módulo de elasticidade = 19.643 MPa

Tabela 8 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à tração de bambus (conclusão)

S. Prawirohatmodjo	1988	<b>Método:</b> determinação da resistência à tração de bambus da Indonésia <b>Resultados:</b> Bambu verde = 297 MPa Bambu seco = 315 MPa
A. Sharma	1990	<b>Método:</b> viabilidade do bambu <i>Bambusa vulgaris</i> como reforço de concreto em vigas. <b>Resultados:</b> resistência à tração (nó) = 145 MPa resistência à tração (internó) = 200 MPa

Fonte: adaptado de JANSSEN, 1981a, b; ARCE-VILLALOBOS, 1993.

### 1.5.2 Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras é a capacidade das fibras de bambu de resistir à compressão longitudinal, assim como os bambus que são utilizados como colunas. Quanto maior a fibra e a área das fibras, maior a resistência à compressão. A relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e o teor de umidade da lasca de bambu é similar àquele para madeira, ou seja, há um aumento na tensão de esmagamento máxima do bambu verde para o bambu seco (HIDALGO LÓPEZ, 1974).

Em testes realizados em 76 espécimes da espécie *Guadua Angustifolia* Hidalgo (1978), descobriu-se que a resistência à compressão do colmo aumentava de acordo com a idade e altura do mesmo. Como mencionado anteriormente, o comprimento da fibra possui uma correlação positiva com o módulo de elasticidade e resistência à compressão, que assim como a porcentagem de fibras aumente verticalmente da base para o topo, e horizontalmente das camadas internas para as externas.

Ghavami e Marinho (2001), determinaram a resistência à compressão das partes basal, intermediário e topo da espécie *Dendrocalamus Giganteus*. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 9, onde se observa que na região do topo a resistência à compressão é maior. Ghavami (1990), obteve valores entre 38,96 MPa e 45 MPa para esta espécie com e sem nó, respectivamente.

Em relação a diferença entre a resistência à compressão e à tração, resultados parecidos foram obtidos, de que a resistência à compressão é geralmente 70% menor do que a resistência à tração (LIMA JR, 2000), (GHAVAMI E BOZA, 1998), (GHAVAMI E RODRIGUEZ, 2000) e (CULZONI, 1986).

Tabela 9 - Resistência à compressão nas partes basal, intermediária e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do bambu	Carga aplicada P (kN)		Tensão de compressão $\sigma_c$ (MPa)		Módulo de elasticidade $E_{long}$ (GPa)	Coef. Poisson ( $\mu$ )	$\sigma_c/\sigma_t$
	$P_{min}$	$P_{max}$	$\sigma_c$ (min)	$\sigma_c$ (max)			
Topo s/ nó	5,00	66	6,03	96,75	17,14	0,40	0,60
Topo c/ nó	3,00	74	4,53	75,49	17,75	0,42	0,63
Intermediário s/ nó	5,00	197	2,00	78,79	18,00	0,25	0,32
Intermediário c/ nó	10,00	200	3,64	72,72	26,25	-	0,39
Basal s/ nó	10,00	310	2,33	72,62	26,6	0,27	0,41
Basal c/ nó	10,00	295	2,42	71,43	20,5	0,19	0,61

Fonte: GHAVAMI e MARINHO, 2001.

Para fins de comparação, são exibidos nas tabelas 10 e 11, valores para resistência à compressão resultantes da literatura antiga.

Tabela 10 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à compressão do bambu (continua)

Autor	Ano da Publicação	Método e resistência à compressão ou descobertas
H.F Meyer and B. Ekelund	1923	<b>Método:</b> Falhas foram descritas como uma série de rachaduras verticais <b>Resultados:</b> resistência à compressão = 44 e 39,27 MPa
Espinosa	1930	<b>Método:</b> <i>Bambusa Spinosa</i> altura de 1200 e 350mm foram utilizadas <b>Resultados:</b> altura de 1200mm = 27 - 32 MPa altura de 350mm = 51,8 - 82,8 MPa
M .Ota	1950	<b>Método:</b> amostras cúbicas retiradas das partes externa, interna e da parede inteira com teor de umidade entre 10 e 14,7% foram usados. <b>Resultados:</b> resistência à compressão decresce com a proximidade do nó. Espécies com densidades 965 e 866 kg/m <sup>3</sup> possuem resistência a compressão de 81,6 e 83,1 MPa, respectivamente

Tabela 11 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à compressão do bambu  
(conclusão)

Limaye	1952	<b>Método:</b> <i>Dendrocalamus strictus</i> foi utilizado para determinar a influência do teor de umidade, idade e a posição da amostra no bambu. <b>Resultados:</b> módulo de elasticidade maior no topo do que no meio e base do colmo. Sazonalidade aumenta a resistência em até 40%. Também aumenta a partir do 3º ano. Resistência à compressão de 44 MPa
Sekhar and Rawat	1957	<b>Método:</b> tentativa de padronização dos testes, usando 10 como a razão máxima de comprimento/espessura da parede. O estudo recomenda a utilização de 2 amostras, uma com teor de umidade = 12% seco em forno e o outro bambu verde.
J.L. Atrops	1969	<b>Método:</b> três amostras com internós, nó ao centro e nó nas extremidades foram usados. O teor de umidade médio foi de 18,1% e a amostra possui razão diâmetro/altura de 1:4. <b>Resultados:</b> Min e máx resistência à compressão foram obtidos Internó = 407 e 537 MPa Nó ao centro = 407 e 537 MPa Nó na extremidade = 528 e 433 MPa
Janssen	1981a,b	<b>Método:</b> Estudo consiste em uma série de testes para determinar a capacidade de compressão com ênfase no teor de umidade, nó, internó e posição ao no colmo. <b>Resultados:</b> resistência à compressão = 60 - 176 MPa Para o bambu verde = $0,0075 \rho$ Com teor de umidade 12% = $0,094 \rho$ onde $\rho$ = densidade
L. Xiu-Xin and W. Liu-Keqing	1985	<b>Método:</b> desenvolvimento de uma equação relacionando a resistência à compressão com a idade de colheita. <b>Resultados:</b> $\sigma = 588,4 + 53,9t - 4,75t^2$ onde t = idade do colmo na colheita
Sotela	1992	<b>Método:</b> estudos de comparação do bambu com madeiras de lei. Teste de flexão foi realizado na determinação do módulo de elasticidade <b>Resultados:</b> $\sigma = 41,1$ MPa

Fonte: adaptado de JANSSEN, 1981a,b; ARCE-VILLALOBOS, 1993.

### 1.5.3 Resistência à flexão

O córtex ou tecido mecânico que está arranjado em volta da parte mais externa do colmo cilíndrico, desempenha a função de proteção ao colmo, para que este possa resistir aos esforços de flexão. Quando o colmo é flexionado pelo vento ou pelo peso da neve, ele se torna elíptico em sua seção transversal.

O colmo flexionado é assim comprimido ao longo da parte inferior, e expandido ao longo da parte superior. Se esta força de compressão ou tração se tornar maior do que a suportada pelo bambu, o colmo irá quebrar ao longo do centro do cilindro ou eixo neutro. Quando o colmo, uma vez cortado, é utilizado em vigas, possui o mesmo o mesmo comportamento estrutural (HIDALGO LÓPEZ, 1974).

Testes de flexão realizados por Bauman (1912) apud Hidalgo López (1974), os corpos de prova foram colocados em dois suportes que eram separados pela distância igual a vinte e cinco vezes o tamanho do maior diâmetro do bambu a ser testado, e a carga era colocada no meio entre os dois suportes. A resistência à flexão dos cilindros de bambu variou entre 70 e 270 MPa.

Berndsen (2008) realizou ensaios para determinação das propriedades mecânicas, utilizando bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*. Para a tensão de ruptura à flexão, obteve-se um valor máximo de 182,87 MPa no topo dos colmos de cinco anos e um valor mínimo de 145,28 MPa na base dos colmos de 3 anos de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos iguais a 159,59; 166,11 e 176,41 MPa, respectivamente.

Beraldo et al (2004) comentaram que o comportamento à flexão estática do bambu, como um todo ou de seus segmentos, é muito importante na análise estrutural e vários trabalhos experimentais estão sendo desenvolvidos para estabelecer este tipo de resistência. Em geral, os resultados observados na literatura disponível situam a resistência do bambu à flexão estática entre 30 e 170 MPa. Esta variação deve-se não apenas à sua própria resistência à flexão estática, mas também pode ser causada pelo tipo de teste de flexão e pelo tamanho da amostra usada na execução dos testes. O módulo de elasticidade dos colmos de bambus estudados na flexão, usando segmentos do bambu, variou entre 6,0 a 14,0 GPa, e sua resistência à flexão variou de 57,0 a 133,0 MPa.

Nas tabelas 12 e 13, seguem alguns resultados oriundos da literatura antiga a respeito da resistência à flexão dos bambus.

Tabela 12 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à flexão do bambu (continua)

<u>Autor</u>	<u>Ano da Publicação</u>	<u>Método e resistência à flexão ou descobertas</u>
H.F Meyer and B. Ekelund	1922	<b>Método:</b> testes de 3 e 4 pontos foram utilizados <b>Resultados:</b> $\sigma = 90$ MPa (3p) e 96 MPa (4p)
Teodoro	1925	<b>Método:</b> teste 3 pontos com bambu seco de <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa spinosa</i> (BS) foram utilizados <b>Resultados:</b> $\sigma = 55$ MPa (BS) e 33 MPa (BV) E = 10.300 MPa (BS) e 18.400 MPa (BV)
Espinosa	1930	<b>Método:</b> testes de flexão realizados em <i>Bambusa spinosa</i> secos <b>Resultados:</b> $\sigma = 146$ MPa E = 14.800 MPa
Trojani	1930	<b>Método:</b> Introdução a um guia para determinação da resistência a flexão do bambu <b>Resultados:</b> $\sigma = 20$ MPa
Suzuki	1948	<b>Método:</b> estudo sobre a influência da flexão em diferentes posições ao longo do colmo de bambu.
Glenn	1950	<b>Método:</b> testes de flexão realizados para a determinação da tensão de flexão e módulo de elasticidade em bambus secos de <i>Phyllostachys</i> . <b>Resultados:</b> $\sigma = 143$ MPa E = 14.300 MPa
Limaye	1952	<b>Método:</b> <i>Dendrocalamus strictus</i> foi utilizado. Entre dois internós um vão de 700mm foi determinado, e esta configuração afetou os resultados. Bambu seco e verde com teor de umidade 12 e 80%, respectivamente, foram testados. A influência da flexão ao longo do colmo também foi estudada. <b>Resultados:</b> $\sigma = 68$ MPa (verde) e 107 MPa (seco) E = 12.000 MPa (verde) e 15.600 MPa (seco). Também foi observado que a tensão de flexão diminui com a altura e aumenta com a idade, porém o módulo de elasticidade aumenta com a altura.
Sekhar and Bhartari	1961	<b>Método:</b> <i>Dendrocalamus strictus</i> seco, com teor de umidade 12% foi utilizado. Os efeitos da idade na resistência à flexão foram estudados para bambu seco. <b>Resultados:</b> Para bambus com 6 anos de idade $\sigma = 97$ MPa E = 13.700 MPa Não há diferença significativa na tensão de flexão com a idade.
Sekhar et al.	1962	<b>Método:</b> <i>Bambusa Nutans</i> foi testado, e observou-se a influência da idade na tensão de flexão em bambus seco e verde. <b>Resultados:</b> Para bambus com 5 anos de idade $\sigma = 100$ MPa (seco) e 79 MPa (verde) E = 15.400 MPa (seco) e 13.000 MPa (verde). Resultados foram inconclusivos

Tabela 13 - Literatura antiga fundamental sobre a resistência à flexão do bambu (conclusão)

Artrops	1969	<b>Método:</b> Bambu seco foi utilizado nos testes de flexão <b>Resultados:</b> $\sigma = 113$ MPa
Janssen	1981a,b	<b>Método:</b> Bambus com 3 anos, com 5m de comprimento, seco e com teor de umidade 12%. Bambus com vão livre de 3,6 (curto) e 4,5m (longo), respectivamente <b>Resultados:</b> Curto: $\sigma = 84$ MPa E = 20,500 MPa Longo: $\sigma = 73$ MPa

Fonte: adaptado de JANSSEN, 1981a,b; ARCE-VILLALOBOS, 1993.

#### 1.5.4 Resistência ao cisalhamento

Apesar de bambus e árvores serem lenhosas, suas anatomias, morfologias e processos de crescimento são diferentes, assim como seu comportamento estrutural. Bambus não possuem células radiais como nas madeiras, que fazem com que estas possuam maior resistência ao cisalhamento paralelo ao eixo. Essa é a razão do bambu possuir pequena resistência ao cisalhamento e a presença dos nós possuem pequeno efeito nesta propriedade. As amostras de bambu normalmente quebram facilmente na direção paralela ao eixo (HIDALGO LÓPEZ, 1974).

De acordo com Akinlab (2017), os bambus possuem diversas aplicabilidades ao longo dos séculos devido a facilidade em se dividir. Essa propriedade de se dividir facilmente deve ser atribuída diretamente ao seu comportamento no cisalhamento. Pesquisadores antigos, como Meyer e Ekelund (1922), observaram que, em comparação com outras madeiras, o bambu possui resistências à flexão e tração parecidas, porém, os bambus são mais fracos em resistência ao cisalhamento, em torno de 8% de sua resistência à compressão. Apesar da fragilidade ao cisalhamento ser uma vantagem dos bambus quando utilizados em trabalhos manuais ou artesanais, esta característica representa enorme desvantagem quando os bambus são utilizados em aplicações estruturais. Na realidade, a falha devido à flexão deve ser atribuída diretamente ao cisalhamento entre as fibras de bambu. Conseqüentemente, o

comportamento do bambu no cisalhamento é difícil de ser entendido e previsto quando usado em membros estruturais.

Em geral, quanto maior o teor de umidade do bambu, bem menor será sua resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento transversal às fibras do bambu situa-se em torno de 30% de sua resistência à flexão, ou seja, em torno de 32,0 Mpa (variação entre 20,0 a 65,0 MPa). A resistência ao cisalhamento longitudinal às fibras é de, aproximadamente, 15% de sua resistência à compressão, ou seja, em torno de 6,0 MPa, com variação de 4,0 a 10,0 MPa (PEREIRA, 2012).

Segundo Cruz (2002), a resistência ao cisalhamento aumenta com a diminuição da espessura da parede, ou seja da base para o topo dos colmos de bambu. Com a diminuição da espessura da parede do colmo a porcentagem de esclerênquima (tecido que proporciona resistência ao colmo) aumenta, por este motivo amostras extraídas do topo são mais resistentes ao cisalhamento que amostras extraídas da parte basal de um mesmo colmo.

#### 1.5.4.1 Resistência ao cisalhamento interlaminar

Ghavami e Marinho (2001), testaram tiras de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* no intuito de verificar a tensão ao cisalhamento com dois e três cortes. Os resultados, conforme demonstrados na tabela 14, apresentaram poucas diferenças. Os valores obtidos foram maiores para a parte intermediária e menor para a basal.



Tabela 14 - Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Partes do colmo			Carga máxima P (kPa)	Tensão de cisalhamento $\tau$ (MPa)
Base	com nó	2 cortes	2,926	3,243
		3 cortes	1,572	3,556
	sem nó	2 cortes	2,076	2,338
		3 cortes	2,167	4,947
Intermediário	com nó	2 cortes	1,582	3,237
		3 cortes	1,048	4,100
	sem nó	2 cortes	1,787	4,199
		3 cortes	0,895	4,015
Topo	com nó	2 cortes	1,259	4,197
		3 cortes	0,798	4,717
	sem nó	2 cortes	1,069	3,591
		3 cortes	0,499	3,341

Fonte: CRUZ, 2002.

#### 1.5.4.2 Resistência ao cisalhamento transversal

Os esforços de cisalhamento transversal às fibras são os mais comuns na prática. Culzoni (1986), determinou estes esforços para diferentes espécies de bambu, com tiras de 12 cm de comprimento e espessura própria à espessura do bambu. O procedimento foi realizado de forma que esforços de flexão não interferiram. A tabela 15 apresenta os resultados obtidos no estudo citado, para a parte basal, intermediária e topo da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Tabela 15 - Resistência ao cisalhamento transversal às fibras. Valores obtidos para a parte basal, intermediária e topo da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do colmo	Tensão média de ruptura (MPa)	Erro (%)
Topo	49,0	5,5
Intermediário	45,6	4,7
Base	47,0	4,3

Fonte: CRUZ, 2002.

## 1.6 Preservação e tratamento

Existem dois métodos para o tratamento do bambu: os físicos e os químicos. O tratamento físico é conhecido também como cura, e possui o propósito de remover, destruir ou diminuir a quantidade de amido no colmo e, conseqüentemente, reduzir o ataque do inseto *Dinoderus minutus*. Entretanto, o bambu não fica protegido do ataque de cupins e fungos. Como este método é o mais barato, ele é muito utilizado em áreas rurais e aldeias. Existem alguns tipos de cura para os bambus, apresentadas a seguir:

### 1.6.1 Métodos tradicionais

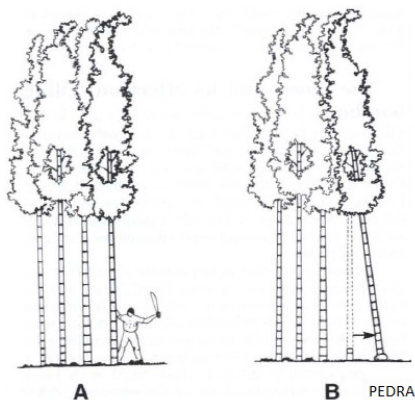
#### 1.6.1.1 Cura na moita de bambu

Os colmos são cortados na base, acima do primeiro nó acima do solo, e é deixado na posição vertical com todos os galhos e folhas por quatro semanas, inclinado sobre os outros bambus da moita. A base do colmo deve ficar separada do solo por uma pedra, e então o amido será reduzido. Como resultado, é esperado que a resistência à infestação de brocas seja aumentada, porém, não há influencia nenhuma na resistência ao ataque de cupins e fungos.

Por outro lado, esse tipo de tratamento pode também ser utilizado como tratamento químico. Neste caso, a base do colmo de um bambu verde recém cortado com galhos e folhas

é colocado em um barril contendo o preservativo. A transpiração das folhas, que ainda está em progresso, extrai a solução para os vasos do colmo. O preservativo deve ser trocado regularmente. Este método demanda muito tempo, e frequentemente os vasos não absorvem líquido suficiente para preservar as fibras e as células do parênquima através de difusão, esquema na figura 19.

Figura 19 - Cura na moita



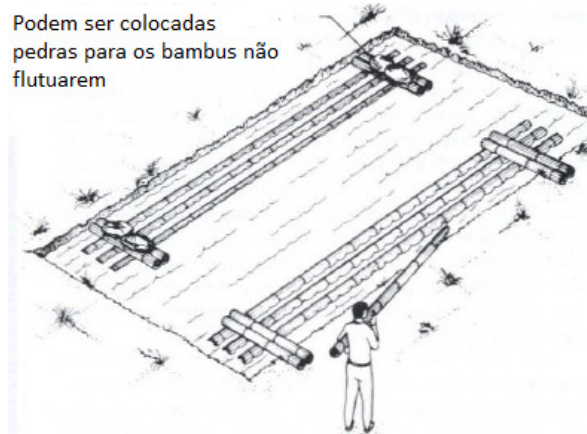
Fonte: HIDALGO LÓPEZ, 1974.

#### 1.6.1.2 Cura por imersão

Os colmos são colocados em água corrente ou parada, por um período de algumas semanas. Os bambus devem permanecer imersos, e então o açúcar e o amido nas células de parênquima serão lixiviados ou degradados por bactérias, o que irá melhorar a resistência às brocas. Este método não aumenta a durabilidade contra cupins e fungos, a estagnação pode levar a descoloração dos colmos. Este processo pode melhorar a captação de preservativos por processos de difusão e pressão. No entanto, se os colmos ficarem imersos por mais de 45 dias, eles se tornarão frágeis.

Segundo Souza (2014), esse método objetiva-se em reduzir ou eliminar o amido do colmo, através da fermentação biológica anaeróbia (ausência de ar), com a eliminação do amido minimiza-se ou evita o ataque de carunchos. Esse tratamento deve ser realizado em curto espaço de tempo, não ultrapassando a sete semanas, pois após esse período pode ocorrer degradação do colmo. A figura 20 demonstra o método de cura por imersão.

Figura 20 - Cura por imersão.

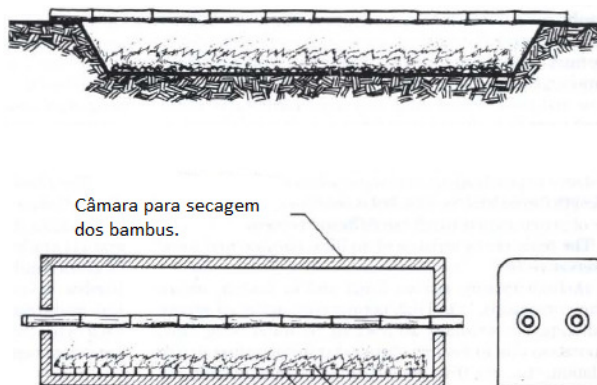


Fonte: HIDALGO LÓPEZ, 1974.

### 1.6.1.3 Cura por calor

A cura por calor pode ser feita utilizando uma vala cavada no chão com profundidade de 30 a 40 cm e carvão em brasa ou em um forno a gás. Em ambos os casos, os colmos devem ser virados manualmente. Este método também é utilizado para endireitar colmos curvados. Um esquema demonstrando o método de cura por calor, na figura 21.

Figura 21 - Cura por calor



Legenda: (acima) - Vala no chão; (abaixo) - forno a gás.

Fonte: HIDALGO LÓPEZ, 1974.

#### 1.6.1.4 Cura por fumaça

A cura por fumaça deve ser realizada posicionando-se os bambus acima de lareiras em casas rurais, onde eles estarão expostos a vapores, fogões ou queima de combustível, possuem sua vida estendida em 10 a 15 anos. Substâncias tóxicas podem ser depositadas, o que leva a um aumento de resistência. Devido ao aquecimento, o amido dentro das células do parênquima pode ser destruído.

Devido a ação do calor e da fumaça, provavelmente se formem substâncias tóxicas nas superfícies externas dos colmos, além da degradação do amido, tornando os colmos menos atraentes aos carunchos. O inconveniente desse tipo de tratamento é a maior tendência de ocorrer rachaduras nos colmos (PEREIRA e BERHALDO, 2008).

#### 1.6.1.5 Cura por lama

Na cura com lama, os bambus são encharcados com uma espécie de lagoa de lama (latosol) por 1 a 8 semanas, e depois são secos na sombra.

Suhrman (1987), realizou testes em laboratórios sobre o efeito do tratamento por submersão à lama de 2 espécies, *Dendrocalamus asper* e *Dendrocalamus giganteus*. Os resultados mostraram que este tratamento aumenta a durabilidade dos bambus, e que a relação entre a duração da submersão e a perda de peso devido a fungos é linear.

#### 1.6.2 Tratamento químicos

De acordo com a NMBA (National Mission on Bamboo Applications, 2006) os preservantes químicos comuns são: Boro contendo compostos; Cloreto de Zinco/Sulfato de Cobre; Pentaclorofenato de Sódio (NaPCP); Cobre Cromo e Arsênio (CCA); Cobre Cromo Boro (CCB); Tio Ciano Metil Tio Benzotiazol (TCMTB), juntamente com Metileno Bis Tiocianato (MBT); Arseniato de cobre cromatado (ACA); Triclorofenol (TCP).

Os produtos preservativos quando utilizados nas concentrações adequadas, deverão ser tóxicos aos organismos xilófagos sem que sejam tóxicos aos homens e animais. Para um tratamento eficiente, os produtos químicos devem penetrar profundamente no colmo, não devendo evaporar ou ser eliminado pelas águas pluviais ou pela umidade do solo (PEREIRA e BERARDO, 2008).

### 1.6.3 Tratamentos sob pressão

#### 1.6.3.1 Método de substituição de seiva

Também chamado de método de Boucherie, aplica-se a colmos recém-cortados e consiste na substituição da seiva por substâncias preservativas. Pode-se utilizar apenas a pressão atmosférica e o próprio colmo como se fosse um reservatório. A solução é colocada no topo do colmo e ocorre a penetração da solução ao longo da parede do colmo, empurrando a seiva para a outra extremidade.

Uma modificação importante no método precedente foi também proposta por Boucherie, em 1873, valendo-se do uso da pressão, a qual permite diminuir acentuadamente a duração do tratamento químico dos colmos. Vários fatores interferem na eficiência desse método, tais como, natureza da substância preservativa e sua respectiva concentração, espécie de bambu, comprimento do colmo e intervalo de tempo decorrido entre seu corte e a aplicação do tratamento (ESPELHO, 2007)

#### 1.6.3.2 Método de Boucherie modificado

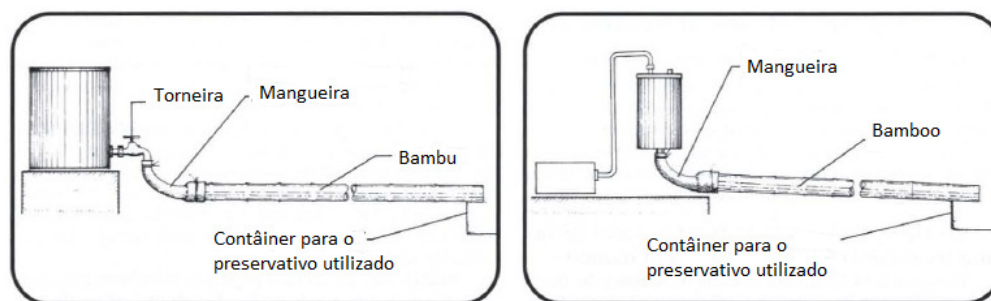
Esse método consiste em introduzir o defensivo pela extremidade superior do bambu, por meio de pressão hidrostática do produto preservativo. É uma variante do método de substituição da seiva. Porém, tal método não se aplica a bambus que apresentem paredes de pequena espessura, pois, dependendo da pressão aplicada, pode ocorrer a explosão dos colmos.

De acordo com Liese (2004), o método pode ser considerado como “ambientalmente correto e amigável”, pois se consegue efetuar o controle das substâncias preservativas utilizadas, de forma que seus rejeitos não contaminem o meio ambiente, inclusive existindo a possibilidade de se efetuar o tratamento dos colmos no próprio local de sua colheita (utilizando-se da tomada de potência de um trator, por exemplo). De acordo com o autor, colmos de 9 m de comprimento podem ser tratados entre 30 min a 50 min, utilizando-se pressão entre 1,0 bar e 1,3 bar. Considera-se que o tratamento tenha alcançado seu final quando a solução efluente apresente concentração suficientemente elevada. Porém, a duração do tratamento e sua eficiência dependem principalmente da espécie de bambu, das características do colmo, de seu teor de umidade e do tipo de preservativo utilizado.

O Método de Boucherie Modificado deve ser aplicado aos colmos de bambus recém cortados, e sua eficiência depende de uma série de fatores, tais como: espécie considerada, época de corte, idade, comprimento e teor de umidade do colmo, do tipo e da concentração da solução preservativa, da pressão utilizada (KUMAR et al., 1994).

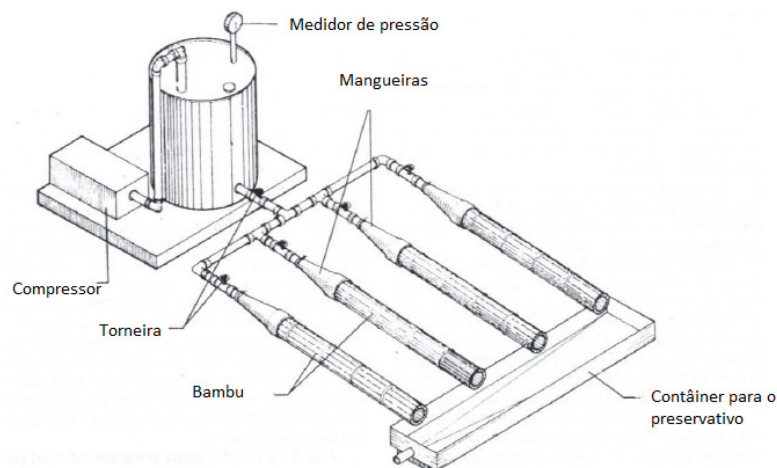
A diferença entre os dois métodos pode ser notada na figura 22. E um esquema detalhado do método de Boucherie modificado pode ser visto na figura 23.

Figura 22 - Método de Boucherie com pressão hidrostática, e o método de Boucherie modificado utilizando pressão pneumática.



Fonte: HIDALGO LÓPEZ, 1974.

Figura 23 - Esquema detalhado do método de Boucherie modificado.



Fonte: HIDALGO LÓPEZ, 1974.

## 1.7 Secagem

A secagem dos colmos, dependendo da utilização a que se destina, é um aspecto relevante na qualidade do produto final. O uso de peças de bambu nas estruturas e construções, sem a devida secagem, acarreta retração das peças após as montagens, ocasionando a falha da estrutura (HIDALGO LÓPEZ, 2003). A secagem após a cura pode ser realizada de duas maneiras:

- a) Secagem ao ar: os colmos são empilhados horizontalmente, em local coberto e bem ventilado, por 2 meses ou mais, conforme a umidade relativa do ar, variando assim de uma região a outra. Na espécie *Bambusa arundinacea* foram constatados teores de umidade, quando verde, na ordem de 48,5%, 38,5%, 31,6%, na base, meio e topo respectivamente, e após secos ao ar foram obtidos 15,7%, 15,6% e 15,2%, respectivamente, demonstrando a eficácia do sistema (HIDALGO LÓPEZ, 2003);
- b) Secagem em estufa: pode-se utilizar os mesmos equipamentos empregados para madeiras convencionais, controlando-se a temperatura, umidade e velocidade do ar em contato com o bambu. Recomenda-se, porém, utilizar somente em régua de bambu ou taliscas, pois a rápida secagem dos colmos ocasiona fissuras e até o colapso da peça. Este sistema resulta em



melhor qualidade e rapidez de secagem, porém necessita de maiores investimentos em instalações, energia e equipamento.

### **1.8 Adesivos/resina de laminação e Adesão**

Os adesivos podem ser entendidos como sendo substâncias com propriedade de aderir, unir fortemente a um substrato, mantendo vários substratos de um mesmo material ou materiais diferentes unidos por meio de uma ligação superficial. Esta propriedade, não intrínseca à substância, desenvolve-se sob determinadas condições enquanto interage com a superfície do aderente/substrato (WELLONS, 1977).

Os adesivos são substâncias que permitem aderir (unir) seguramente diferentes partes ou materiais, mantendo vários substratos de um mesmo material ou materiais diferentes ligados segundo uma interação química e/ou mecânica na superfície dos substratos, introduzindo novas funções e propriedades ao conjunto final, que apresenta um maior valor agregado. Estas propriedades, não intrínsecas à substância, desenvolvem-se durante o período de cura do adesivo, que ocorre em determinadas condições, enquanto o mesmo interage com a superfície do aderente (LIMA, 2013)

A colagem entre componentes de madeira, bem como entre outros materiais, depende de uma série de parâmetros relacionados às interações físico-químicas do adesivo e do material a serem colados, do procedimento adotado na colagem, da rugosidade, da forma geométrica e do tamanho das peças a serem coladas e, ainda, das condições de carregamento e de meio ambiente a que as peças serão expostas, quando em serviço (SOBRAL FILHO, 1982; MARRA, 1992).

A adesão é um dos fenômenos mais importantes para a compreensão da formação da ligação adesiva, podendo ser por atração e química. A adesão por atração pode ser entendida como sendo a interação entre duas superfícies causada por um forte campo de forças atrativas provenientes dos constituintes de cada superfície. A adesão química se processa através de ligações chamadas primárias (iônicas, covalentes, coordenadas e metálicas) e através de forças secundárias intermoleculares. Os aderentes são os materiais sólidos ligados ao adesivo. Podem ser chamados também de substratos (RIVERO, 2003).

Knight (1952), cita que a adesão mecânica é o mecanismo de adesão que ocorre através de enganchamento mecânico. A penetração e fluidez da resina em substratos porosos

levam à formação de ganchos fortemente presos ao substrato, após a solidificação deste. Este tipo de adesão é eficaz quando a força é aplicada paralelamente à interface, aumentando a tensão de cisalhamento. Em muitos casos, a adesão mecânica não ocorre sem auxílio de outro mecanismo. Já a adesão química corre através de ligações primárias (iônicas, covalentes, coordenadas e metálicas) e/ou através das forças intermoleculares. Adesão química é formada pela adesão entre grupos químicos sobre as superfícies do compósito. Há também a adesão específica, processo ocorre entre duas superfícies lisas, onde as forças de adesão entre as macromoléculas são atribuídas às ligações químicas secundárias de atração, em especial as pontes de hidrogênio. Consideram-se também as forças entre as moléculas não polares, também conhecidas como forças de dispersão, responsáveis pela formação de cristalitos dos adesivos.

#### 1.8.1 Propriedades do adesivo na madeira e no bambu

Segundo Rivero (2003), devem-se levar em consideração as propriedades abaixo, presentes na madeira e no bambu, a fim de se obter uma boa ligação com adesivos:

- a) Estrutura anatômica, porosidade, densidade e anéis de crescimento (sendo esta para caso específico da madeira);
- b) Anisotropia: consiste nas diferenças entre as propriedades físico-mecânicas ao longo dos três eixos principais do colmo de bambu, sendo necessária a consideração da anisotropia, no projeto das ligações;
- c) Teor de umidade da madeira e do bambu: controla o bom desempenho dos adesivos, necessitando ser acompanhado e controlado rigorosamente, conforme as características de cada adesivo. A durabilidade das ligações adesivas é afetada pelas mudanças no teor de umidade, pois em peças laminadas coladas a variação dimensional pela absorção de água gera um gradiente de tensões entre lâminas, resultando no descolamento destas;
- d) Resistência a esforços estáticos e dinâmicos;
- e) Distribuição dos nós (no caso do bambu);
- f) Natureza da superfície a ser colada: rugosidade, textura, capacidade de absorção, etc.

- g) Aproveitamento dos resíduos de processamento, minimizando os defeitos técnicos e valorizando propriedades como resistência e aparência estética da superfície.

No processo de adesão, o adesivo deve umedecer as fibras. Em seguida, deve fluir de forma controlada e durante a prensagem, adquirir a forma sólida. Uma ótima ligação requer íntimo contato entre o adesivo e fibra. Isto é conseguido utilizando pressão e aquecimento (se for o caso da resina escolhida), ajustando a viscosidade do adesivo, transferindo o fluxo através dos pontos de contato. É bem conhecido que a compatibilidade entre o material lignocelulósico e a resina tem um papel fundamental na determinação das propriedades dos compósitos. Os materiais lignocelulósicos possuem grupos hidroxilas polares na superfície devido à celulose e à lignina, sendo que estes grupos têm grande facilidade em interagir com matrizes poliméricas polares, como no caso de resinas fenólicas.

### **1.9 Tipos de resinas**

Entre os diversos tipos de resinas utilizadas para a colagem de madeira e/ou bambus, destacam-se 5 tipos que serão explicitados abaixo, as resinas poliuretanos, resinas à base de poliacetato de vinila (PVA), à base de resina resorcinol-formaldeído, as resinas à base de resina ureia-formaldeído, e as resinas à base de resina epóxi. Segue ainda na tabela 16, uma lista com diversas variedades de adesivos e suas respectivas condições de uso.

Tabela 16 - Tipos de resinas para união de bambu, usos e condições

<b>ADESIVO</b>	<b>BASE</b>	<b>USO</b>	<b>CONDIÇÕES DE USO</b>
Origem animal	Proteínas de peixe, de cartilagem, de osso, de tendões.	Carpintaria de móveis	Ambientes internos não agressivos
Sangue	Albumina de sangue	Compensados	Ambientes internos não agressivos
Caseína	Proteína do Leite	Móveis, compensados, estruturas	Ambientes internos não agressivos, boa resistência mecânica
Soja	Amido, farinha de soja	Compensados	Ambientes internos e externos, baixa resistência ao intemperismo
Tanino	Acácia, Quebracho	Compensados, aglomerados	Ambientes internos e externos, baixa resistência ao intemperismo
Fenol-formaldeído	Resina termofixa, fenólica	Compensados, aglomerados	Exteriores, boa resistência mecânica
Uréia-formaldeído	Resina termofixa, fenólica	Compensados, aglomerados	Ambientes internos, boa resistência mecânica
Resorcinol-formaldeído; Fenol-resorcinol-formaldeído	Resina termofixa, fenólica, resorcínica	Compensados, estruturas, madeira laminada.	Interiores, exteriores, boa resistência mecânica
Isocianato	Resina termofixa, isocianato, metano	Aglomerados	Interiores
Acetato de polivinil	Resina termoplástica	Uso não estrutural	Interiores
Poliuretano/mamona	Resina termofixa, de mamona	Uso estrutural	Interiores e exteriores, resistente ao intemperismo, boa resistência mecânica
Epóxi	Resina termofixa multi-componente.	Reparos estruturais	Exteriores e interiores úmidos, boa resistência mecânica.

Fonte: JESUS, 2000.

### 1.9.1 Resinas poliuretanos

Segundo Rivero (2003), devido à grande variedade de materiais que se pode obter a partir da tecnologia de poliuretanos, o ramo dos adesivos na área de polímeros foi o que mais se desenvolveu nas últimas décadas. Além das espumas rígidas e flexíveis, a partir da década de 60 cresceu também a produção de outros tipos de poliuretanos, como elastômeros, tintas, adesivos, etc.

As resinas à base de poliuretanos apresentam uma gama de aplicações que derivam da baixa viscosidade e da alta polaridade de seus materiais formadores, que possibilitam:

- a) Facilidade de cura e polimerização à temperatura ambiente;
- b) Alta força de coesão da própria poliuretana;
- c) O polímero final tem estrutura e polaridade variáveis, permitindo muitas oportunidades de ligação com o substrato.

### 1.9.2 Resinas à base de Poliacetato de Vinila (PVA)

Consiste em um adesivo de emulsão aquosa vinílico, indicado para colagens de artefatos de madeira, laminados plásticos (fórmica, por exemplo), papel, papelão, cartuchos (não envernizados), sacos de papel e materiais porosos em geral, devendo ser utilizado pelos processos convencionais de colagem (prensagem a frio e a quente). Apresenta vantagem em relação a outros adesivos, no que se refere a não apresentar características tóxicas (com relação à manipulação ou inalação), além do seu baixo custo. As superfícies a serem coladas devem apresentar teor de umidade entre 8 e 15%.

### 1.9.3 Resinas à base de resina resorcinol-formaldeído e ureia-formaldeído

Segundo Rivero (2003), o adesivo à base de resina resorcinol-formaldeído, em solução de água e álcool, é recomendado para colagens resistentes à água, solventes orgânicos, fungos, intemperismo, etc. Este adesivo apresenta dois componentes: a resina

e o endurecedor. Os dois componentes, depois de misturados, resultam numa “cola” de alto desempenho. É pouco viscoso e apresenta uma resistência razoável na ausência de pressão devido à sua maior fluidez entre os poros do aderente.

O adesivo à base de ureia-formaldeído é uma resina sintética aquosa, indicada para colagem de madeiras em geral: folhações, chapas duras e fabricação de compensados. Mas não resiste à umidade excessiva, diferentemente do resorcinol-formaldeído.

### 1.9.4 Resinas à base epóxi

De acordo com Targa (2011), 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.

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.

### **1.10 Painéis de bambu e os tipos de fabricação**

A primeira produção de painel de bambu, em caráter experimental, foi na China na década de 40, durante a Segunda Guerra Mundial. Era um painel do tipo “esteira de bambu” colado com adesivo à base de caseína, um material alternativo na substituição de painéis compensados para os interiores das aeronaves. Na mesma época, a Índia iniciou pesquisa de desenvolvimento na área de resina para ser aplicada a esse material. Décadas mais tarde as tecnologias para produção de painéis foram disponibilizadas para diversos países da Ásia como a China, Indonésia, Laos, Malásia, Filipinas, Taiwan, Tailândia e Vietnam (GANAPATHY et al., 1999).

Dentre os diversos recursos renováveis, o bambu foi redescoberto pelo mundo como um material futurístico, a ser utilizado não somente na sua forma natural, mas também como produto manufaturado. Um bom exemplo desses produtos são os painéis de bambu. Os produtos à base de bambu apresentam vantagens como: painéis de grandes dimensões, alta resistência, estabilidade dimensional e alta resistência mecânica (KAI e XUHE, 2014).

Apesar das formidáveis propriedades físicas e mecânicas aqui mencionadas, o bambu, por vezes, tem sido pouco utilizado como material constituinte das estruturas, basicamente, por dois fatores: sua configuração geométrica, pois apresenta várias limitações para seu emprego em construções devido à sua geometria particular, já que os colmos se assemelham a longos troncos de cone de pequena espessura das paredes (variável ao longo da altura do colmo) e com muitos nós, os quais representam pontos de menor resistência mecânica, impossibilitando a confecção de peças estruturais usuais como vigas e pilares de seções transversais retangulares; e à sua baixa resistência ao cisalhamento, que não permite a cravação de pinos e a execução de entalhes, tornando difícil o projeto de estruturas de maior porte que necessitem de emendas ou ligações (LIMA, 2013).

De acordo com Hidalgo López (2003), todos os tipos de painéis produzidos com madeira podem ser manufaturados com bambu, utilizando os mesmo princípios e equipamentos, exceto para a produção de compensado de bambu, pois necessita maquinário específico. Os compósitos de bambu são produzidos a partir dos elementos do colmo, tal as fibras, lâminas, partículas e cavacos, unidos através de adesivo, resultando em produtos com diferentes aplicações, porém a grande maioria é direcionada para a construção, como por exemplo, o compensado de bambu.

Ainda de acordo com Moizés (2007), os painéis são classificados com base no processo de fabricação e se dividem de acordo com o material usado, ou seja, lâminas (strand), ripas de bambu (strips), lascas ou cavacos finos (sliver) e partículas (particles), conforme figura 24. A classificação dos compósitos manufacturados com tiras ou ripas engloba: compensado de bambu, bambu laminado colado e piso. Para os painéis manufacturados com lascas ou cavacos finos estão os compensados de bambu rasgado, placas de cortinas de bambu, placas de laminados, esteiras e cortinas de bambu. Há também as chapas compostas de bambu onde estão classificados: piso composto de madeira e bambu, chapa de bambu e ripas de madeira, assoalho de bambu composto de madeira, chapas de partículas de bambu reforçado, bambu sobre chapas de partículas, compensado de bambu folheado com lâmina de madeira.

Figura 24 - Amostras de material empregado nos painéis



Fonte: MOIZÉS, 2007.

Ainda segundo Qisheng e Shenxue (2001) apud Moizés (2007), os painéis de bambu são divididos conforme o material em:

- a) Lâminas (Strand)
- b) Tiras ou ripas de bambu (Strips);
- c) Lascas ou fatias finas de bambu (Sliver);
- d) Partículas (Particles).

Tomando como base esta divisão, classificam-se as chapas de bambu processado em:

- a) Painéis de tiras: compensado de bambu, bambu laminado colado e piso de madeira e bambu;



- b) Painéis de lascas: compensados de bambu rasgado, placas de cortinas de bambu, placas de laminados, esteiras e cortinas de bambu;
- c) Painéis de partículas: painéis de partículas;
- d) Painéis ou Chapas compostas de bambu: piso composto de madeira e bambu, chapa de lâminas de bambu e ripas de madeira, assoalho de bambu composto de madeira, chapas de partículas de bambu reforçado, bambu sobre chapas de partículas, compensado de bambu folheado com lâmina de madeira.

### 1.11 Bamboo Scrimber

Entre os diversos tipos de produtos manufaturados a partir de bambu, existe um em especial, comumente chamado de “*Bamboo Scrimber*”, que será observado com mais detalhes adiante, uma vez que o processo de fabricação do compósito de bambu proposto neste trabalho terá como base o processo de fabricação utilizado, principalmente, na China.

“*Scrimber*”, originalmente proposto por Coleman (1980), significa numerosas lascas de madeira coladas umas às outras. A pesquisa sobre o *bamboo scrimber* é normalmente realizada em países asiáticos. Nos anos 80, o *bamboo scrimber* foi desenvolvido em um laboratório na China. O módulo de ruptura e o módulo de elasticidade eram muito maiores do que aqueles encontrados em painéis à base de madeira e à base de bambu. (ZHANG, 2008 e YU, 2011). A resistência à tração e à compressão paralela ao grão do *bamboo scrimber*, espécie *Neosinocalamus affinis*, são 248,2 e 129,2 MPa, respectivamente. (ZHANG et al, 2012)

De acordo com Zhang et al (2014) em sua patente, *bamboo scrimber* inclui uma pluralidade de ripas de bambu prensadas sob pressão, impregnadas com adesivo e modificadas através de tratamentos com calor. Cada ripa de bambu é formada com uma pluralidade de ranhuras ao longo da ripa, substancialmente na direção da espessura definida pela ripa de bambu. A direção longitudinal definida pelas ranhuras é substancialmente consistente com a direção longitudinal definida pelas fibras da ripa de bambu.

*Bamboo scrimber* é um novo tipo de material de engenharia à base de bambu comercialmente produzido na China. Vem ganhando popularidade na indústria de construção como um material estrutural para pisos e um substituto para madeiras duras em indústrias de

móveis e marcenaria na China, com alguns produtos à base de *bamboo scrimber* sendo exportados para os Estados Unidos e alguns países europeus em pequena escala. Em seu estudo, foi observado que, considerando sua densidade, o *bamboo scrimber* possui rugosidade comparável ou melhor do que a espécie de carvalho (*Quercus acutissima*) muito utilizada na indústria de mobília na China (GUAN et al, 2012).

*Bamboo scrimber* possui textura desejável, alta dureza, e boas propriedades de resistência na direção longitudinal. Pode ser usado como mobília, pisos, construção, e outras aplicações na engenharia civil. Existem aproximadamente 60 fábricas de manufatura para o *bamboo scrimber* na China, com capacidade anual de produção de 600.000 m<sup>3</sup> (YU e YU, 2013).

O efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da espécie *Phyllostachys pubescens* foi observado por Zhang et al (2013), que concluiu que a secagem em forno em temperaturas entre 100 e 220°C por 1 a 4 horas pode piorar as propriedades mecânicas e químicas do bambu, além de também influenciar na coloração da superfície da amostra. A perda de massa em amostras tratadas em altas temperaturas é devido à alta degradação de celulose e hemi-celulose, onde a diminuição do módulo de ruptura também está relacionada a mudança química.

Shangguan et al (2014), desenvolveram um modelo 2D para avaliação dos parâmetros de resistência do *bamboo scrimber*, concluindo que a combinação de dois parâmetros, ângulo do grão e densidade, no modelo proposto, podem evitar o problema de variação na densidade.

Du (2014), estudou as influências dos retardantes de fogo nas propriedades do *bamboo scrimber*, concluindo que os métodos de aplicação dos retardantes de fogo terão certa influência nas propriedades físicas e mecânicas do compósito.

De acordo com Sharma (2015), *bamboo scrimber* consiste em um fardo de fibras esmagadas saturada em resina, e comprimidas em um bloco denso, conforme é mostrada na figura 25. *Bamboo scrimber* foi comparado com outro produto à base de bambu, o bambu cru natural e produtos à base de madeira. Os resultados estão mostrados na tabela 17. O estudo utilizou normas para madeira, para que as comparações pudessem ser feitas corretamente com madeira e produtos à base de madeira. Os resultados indicaram que tanto o laminado colado, como o *bamboo scrimber* possuem propriedades comparáveis ou que ultrapassam aquelas para a madeira.

Figura 25 - Processo geral de manufatura do *bamboo scrimber* na China

Fonte: SHARMA, 2015.

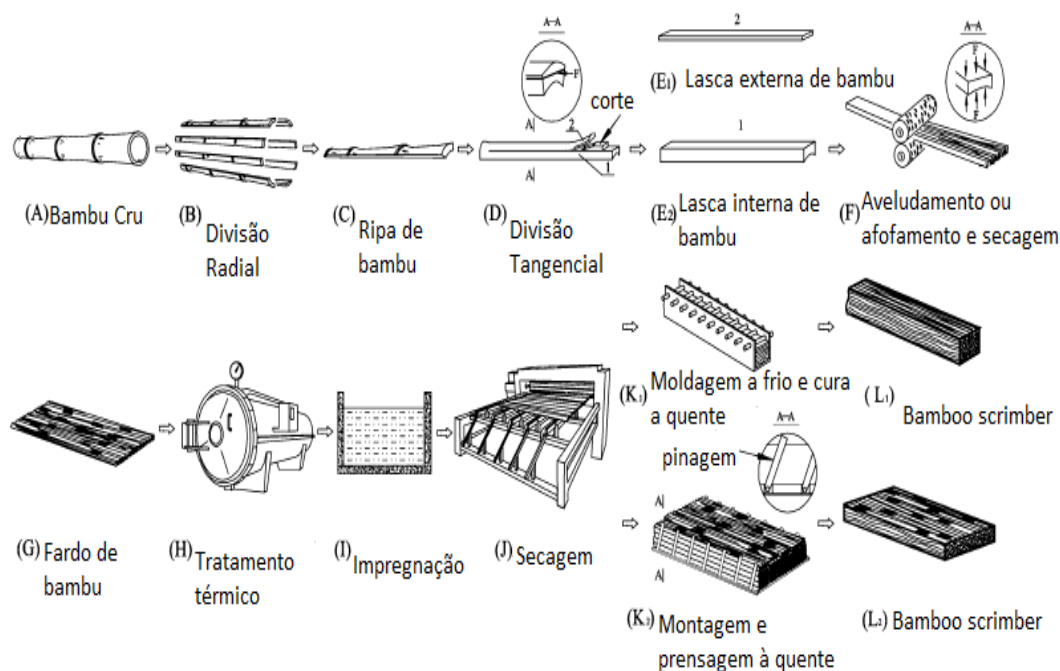
Tabela 17 - Propriedades de materiais estruturais de bambu, bambu natural, madeira natural e produto à base de madeira

	Densidade $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compressão		Tração		Cisalhamento $\tau$ (MPa)	Flexão	
		$f_c$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$f_t$ (MPa)		$f_b$ (MPa)	$E_b$ (GPa)
Bambu Laminado Colado	686	77	22	90	2	16	77-83	11-13
Bamboo Scrimber	1163	86	37	120	3	15	119	13
Bambu Cru	666	53	-	153	-	16	135	9
Strika Spruce	383	36	-	59	-	9	67	8
Douglas-fir LVL	520	57	-	49	-	11	68	13

Fonte: adaptado de SHARMA, 2015

O processo de prensagem do *bamboo scrimber* inclui principalmente moldagem a frio, cura a quente e prensagem a quente, como mostrado no esquema da figura 26. A densidade do *bamboo scrimber* pode ser aumentada para 1,05 – 1,25 g/cm<sup>3</sup>, melhorando assim os problemas de resistência, de adesão e de aparência na superfície do *bamboo scrimber* (YU et al, 2015).

Figura 26 - Esquema geral de processo de manufatura de bamboo scrimber.



Fonte: adaptado de YU et al, 2015.

Huang (2018), analisou a influência do processo de maturação nas propriedades físico-mecânicas do *bamboo scrimber*, e concluiu que este processo melhorou o aumento do módulo de ruptura e módulo de elasticidade de bambu original. A idade de 4 anos se mostrou apropriada para a fabricação de *bamboo scrimber*. A dosagem de resina otimizada foi de 11% para a produção de *bamboo scrimber* de alta performance.

Em estudo realizado por Zhong (2016), os efeitos da temperatura na resistência à compressão paralela ao grão do *bamboo scrimber* foram analisados, simulando uma construção sob fogo. A resistência à compressão paralela às fibras média do *bamboo scrimber* foi de 133 MPa a 20 °C, 61,4 MPa no grupo designado como “durante o fogo” e 115 MPa no grupo chamado pós-fogo a 225 °C. Além de serem afetados pela temperatura, outros fatores devem ser levados com consideração como teor de umidade, o adesivo utilizado e o tipo de bambu.

Outro estudo de importante valor, conduzido por Kumar (2016), observou-se a relevância da densidade do *bamboo scrimber* em suas propriedades mecânicas, assim como a orientação das fibras. O módulo de elasticidade foi avaliado nas direções paralela e

perpendicular à direção das fibras. O presente estudo é bastante útil para o desenvolvimento de *bamboo scrimber* com densidade uniforme. Também foi realizada uma pesquisa sobre a literatura existente sobre o *bamboo scrimber*, a tabela 18 está apresentada com alguns valores de propriedades mecânicas para serem comparados, porém, com a falta de padronização dos testes para este produto, os resultados foram obtidos a partir de diferentes normas, o que ainda é um dos problemas para a caracterização deste compósito.

Tabela 18 - Pesquisa sobre as propriedades mecânicas estimadas na literatura existente.

Referência	Densidade $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Tração			Resistência à compressão		Módulo de compressão $E_{c1}$ (GPa)	Resistência ao cisalhamento $\tau_{ij}$ (MPa)	Resistência à flexão $f_{ij}$ (MPa)	Módulo de flexão $E_f$ (GPa)
		$f_{t1}$ (MPa)	$E_{t1}$ (GPa)	$f_{t\perp}$ (MPa)	$f_{c1}$ (MPa)	$f_{c\perp}$ (MPa)				
Kumar et al. 2016	1215	144.75	14.02	6.7	115.7	77.00	17.05	17.00	166.5	18.65
Kumar et al. 2016	1127	115.5	13.22	5.55	113.4	64.16	15.24	14.25	155.33	16.39
Kumar et al. 2016	1054	111.00	12.18	4.18	104.71	49.33	12.95	11.89	131.83	14.68
Yu et al. 2015	1150	-	-	-	-	-	-	19.2	150	10.5
								18.0	150	14.3
								10.1	75	12.3
Sharma et al. 2015	1163	120	-	3	86	37	-	15	119	13
Yu et al. 2014	1100	115.73	-	-	77.9	-	-	-	149.93	11.1
Shangguan et al. 2014	1210	-	-	-	143.9	-	-	-	-	-
	880	-	-	-	-	11.2	-	-	-	-
Guan et al. 2012	1090	-	-	-	-	-	-	-	202.73	11.4
	1240	-	-	-	-	-	-	-	265.88	15.21
	1350	-	-	-	-	-	-	-	257.73	14.08
	1290	-	-	-	-	-	-	-	229.65	13.08
Dixon et al. 2016	997 ± 124	-	-	-	-	-	-	-	~100-250	~5-20
Liu and Lee	680	-	-	-	54.2 (6.0)	-	-	8.4 (1.7)	80.2 (15.1)	11.89 (1.4)
Liu and Lee	620	-	-	-	48.6 (6.0)	-	-	8.4 (1.7)	87.5 (11.5)	10.96 (1.17)
Kurt et al	460	-	-	-	48.23 (7.34)	-	-	-	68.62 (4.60)	7.073 (0.43)
Ahmad and Kamke	783	-	-	-	66.3 (8.2)	-	7.8 (1.6)	-	133 (32.6)	12.3 (1.7)

Fonte: adaptado de KUMAR, 2016.

Em estudos realizados seguindo a norma ASTM D2915 (2003) e o método de design de tensão admissível chinesa, Gong et al (2016) calcularam a resistência à tração e à compressão do *bamboo scrimber*, e os comparou com outras madeiras, outros painéis de bambu e bambu verde. Os resultados estão demonstrados nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Propriedades físicas e mecânicas de madeiras Larch, Abeto chinês (chinese fir) e Masson pine e do bamboo scrimber.

Material	Densidade		Resistência à tração		Resistência à compressão	
	médio (g/cm <sup>3</sup> )	COV (%)	médio(MPa)	COV(%)	médio(MPa)	COV(%)
Bamboo scrimber	1.24	7.64	170.65	15.61	104.82	10.75
Larch	0.53	10.12	122.60	26.00	52.20	14.60
Chinese fir	0.31	9.87	86.10	21.20	35.60	17.30
Masson pine	0.52	9.10	104.90	28.10	46.50	17.50

Fonte: adaptado de GONG, 2016.

Tabela 20 - Propriedades físicas e mecânicas de bambu verde, laminado colado de bambu e bamboo scrimber.

Material	Densidade		Resistência à tração		Resistência à compressão	
	médio (g/cm <sup>3</sup> )	COV (%)	médio(MPa)	COV (%)	médio(MPa)	COV (%)
Bamboo scrimber	1.24	7.64	170.65	15.61	104.82	10.75
Bambu verde	0.68	11.93	114.08	17.10	59.81	9.45
Bambu Laminado Colado	0.84	9.28	144.29	10.95	92.28	2.62

Fonte: adaptado de GONG, 2016.

Yu (2017), realizou estudos com *bamboo scrimber* e suas propriedades, os parâmetros ideais deste estudo foram 16% de resina fenol formaldeído utilizada e densidade de 1,30 g/cm<sup>3</sup>, absorção de 2,35%, inchamento de 2,09% e 0,78% na espessura e largura, respectivamente, resistência à flexão e módulo de flexão de 310,0 MPa e 29,7 GPa, respectivamente, e resistência ao cisalhamento de 28,2 MPa. Os altos valores encontrados para as propriedades mecânicas sugerem que o *bamboo scrimber* pode ser utilizado como material estrutural.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e a metodologia referentes ao processo de fabricação e aos ensaios experimentais de corpos de prova de compósito estrutural de bambu sujeitos aos ensaios para determinação de propriedades físicas e mecânicas. As dimensões dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram baseadas na norma ABNT NBR 7190-1997, especificamente o Anexo B (normativo) – “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, e adaptações feitas às normas ASTM D 143 - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber; e International Standard ISO 22157-1: 2004 (E), Bamboo–determination of physical and mechanical properties–Part I: Requirements.

Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Adesão e Aderência – LAA, localizado no IPRJ - Instituto Politécnico da UERJ, Nova Friburgo/Rio de Janeiro – Brasil. O LAA possui vasta experiência na pesquisa e desenvolvimento de reparos com materiais compósitos laminados para a indústria de petróleo.

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Coleta do Material

Os colmos de bambu para este trabalho foram coletados na fazenda “Rancho Santa Mônica”, localizada no município de Cachoeiras de Macacu/RJ. Foram utilizados bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus* Munro em idade adulta. A espécie foi escolhida em função das suas características físico mecânicas, como comprimento das hastes, diâmetro e espessura da parede do colmo.

Os colmos foram coletados com idade de aproximadamente 4 anos, esta idade foi escolhida por ser neste período que os colmos de bambu alcançam sua maturidade em relação às características físicas e mecânicas. Na figura 27, fotos do local aonde foram retirados os colmos de uma mesma touceira para análise. Esta escolha de colmos foi realizada de modo visual (aparência externa do colmo e moita) e seguindo o estudo realizado por Murad (2007),





compósito estrutural de bambu. Nas figuras 29 e 30 estão demonstrados o corte de divisão transversal e os bambus já igualmente divididos, respectivamente.

Figura 29 - Divisão dos colmos de bambu em comprimento de 1,5m com auxílio de motosserra.



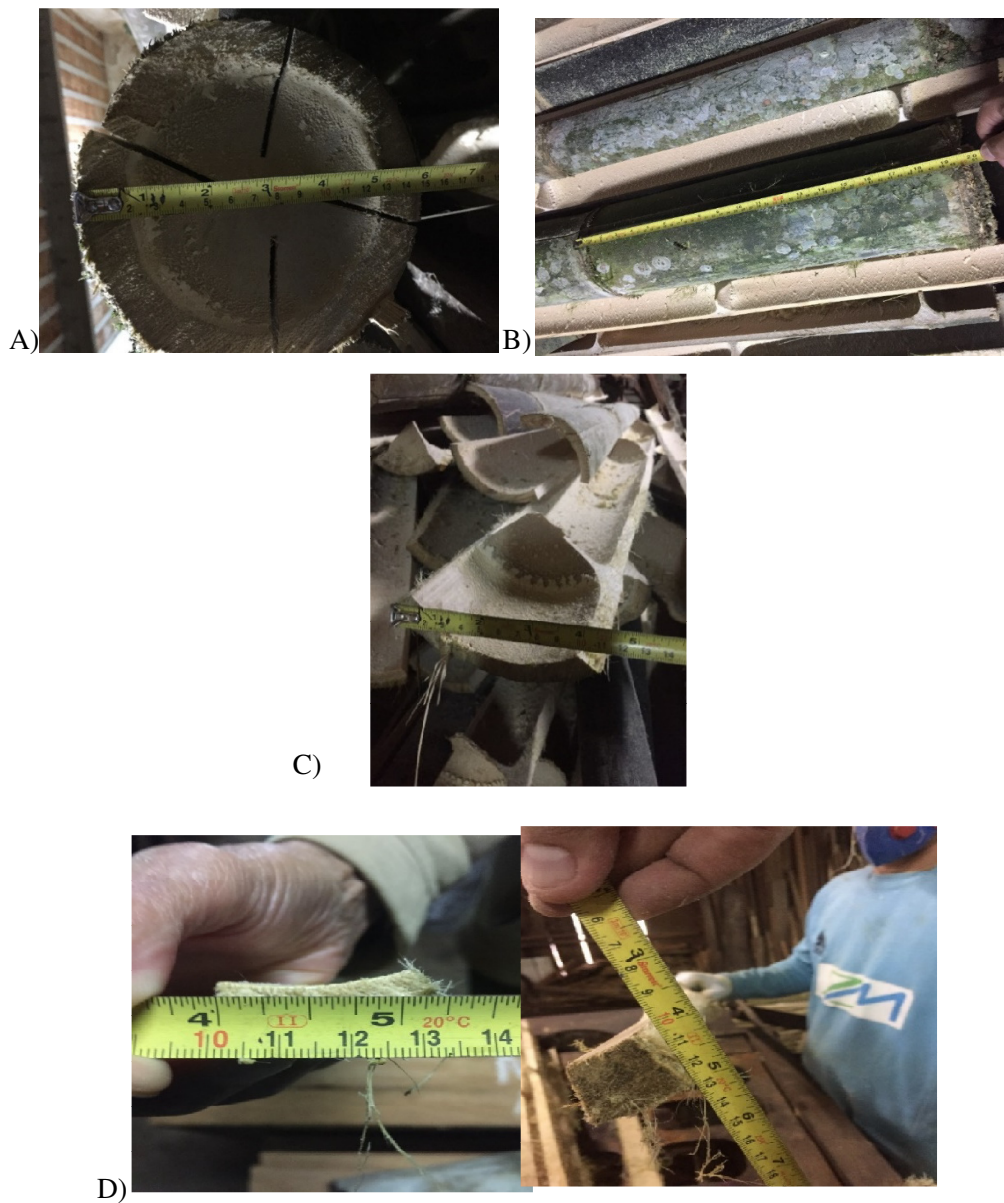
Fonte: O autor, 2019.

## 2.1.2 Usinagem dos colmos

### 2.1.2.1 Corte longitudinal dos colmos

A usinagem dos colmos foi realizada em marcenaria, localizada no distrito de Mury em Nova Friburgo/RJ. Os colmos de bambu com diâmetro médio de 15 cm e entrenós com 50 cm em média, foram cortados longitudinalmente a partir de serra circular, e foram reduzidos em taliscas com 10 a 12 cm de largura em média, e posteriormente em ripas de 2 a 3 cm de largura e espessura, conforme figura 30.

Figura 30 – Usinagem dos colmos

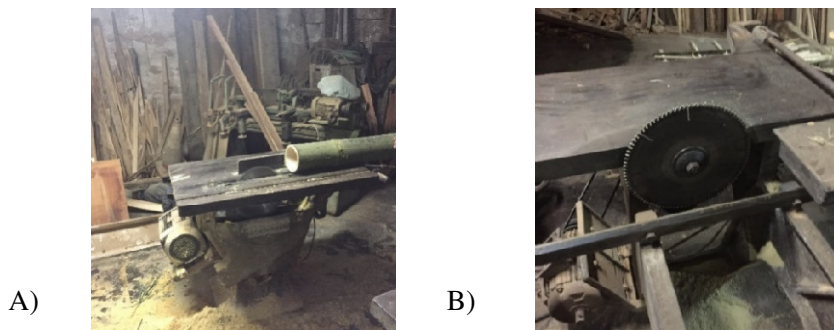


Legenda: A) Colmos de bambu com diâmetro médio de 15 cm. B) Colmos de bambu com entrenós de 50 cm.  
C) Corte das ripas com largura média de 10 a 12 cm. D) Ripas com largura e espessura final de 2 e 3cm em média, respectivamente.

Fonte: O autor, 2019.

Após os cortes longitudinais, uma esquadrejadeira, demonstrada na figura 31, foi utilizada para a padronização das ripas no comprimento desejado de 1,3m.

Figura 31 - Esquadrejadeira utilizada



Legenda: (A) - Serra circular utilizada nos cortes longitudinais dos colmos de bambu; (B) - Esquadrejadeira utilizada para padronização do comprimento das ripas de bambu.

Fonte: O autor, 2019.

A figura 32 demonstra as ripas já padronizadas, porém, ainda com os cavacos ou diafragmas, a serra fita utilizada na remoção dos cavacos e as ripas padronizadas sem cavacos.

Figura 32 – Ripas de bambu padronizadas



Legenda: (A) - Ripas de bambu com comprimento padronizado, porém, ainda com cavacos; (B) - Serra fita utilizada na remoção dos cavacos; (C) - Ripas de bambu com comprimento padronizado e sem cavacos.

Fonte: O autor, 2019.

Por fim, as casas foram retiradas utilizando o desengrosso, finalizando a etapa de usinagem das ripas para posterior tratamento, secagem e prensagem dos compósitos.

### 2.1.3 Tratamento

O tratamento utilizado neste estudo foi o de imersão prolongada em água, utilizado para eliminação dos carunchos, a partir da diminuição do nível de amido nas ripas. O procedimento adotado foi a utilização de uma piscina para imersão das ripas de bambu já usinadas. A água utilizada no tratamento foi trocada a cada 2 dias em média. Na figura 33, o procedimento adotado para o tratamento mencionado. Ao todo, o material ficou exposto ao tratamento por aproximadamente 5 semanas.

Figura 33 - Tratamento dos bambus pelo método de imersão prolongada



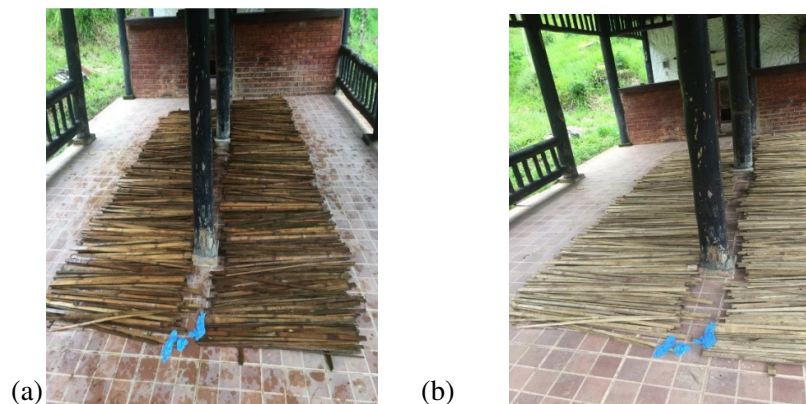
Fonte: O autor, 2019.

### 2.1.4 Secagem

O procedimento de secagem ao ar foi utilizado após o tratamento nas ripas de bambu, até a estabilização do teor de umidade, que foi de 15% de acordo com a tabela de classes de umidade referente a NBR 7190 (1997).

Na figura 34, os bambus secando ao livre em 2 momentos diferentes, logo após o término do tratamento em imersão prolongada em água (a), e após 45 dias de secagem (b).

Figura 34 - Dois momentos da secagem



Legenda: (a) logo após o tratamento em água; (b) após 45 dias de secagem..  
 Fonte: O autor, 2019.

## 2.1.5 Resina utilizada

### 2.1.5.1 Resina PIPEFIX

De acordo com o fabricante, NOVATEC S.A., Rio de Janeiro/Brasil, a resina de laminação PIPEFIX epóxi bi componente. A resina é indicada na laminação de materiais compósitos para o reforço e reparo de estruturas. Este material pode ser usado em colagem de diferentes tipos de materiais. Na tabela 21, algumas especificações técnicas da resina.

Tabela 21 - Especificações técnicas do PIPEFIX.

#### Dados Técnicos

Aparência A + B	Massa líquida clara
Razão de mistura - Volume	-----
Razão de mistura - Peso	100:17,6
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,38
Rendimento (kg/m <sup>2</sup> )	1,38

#### Informações Técnicas de Cura

Temperatura	Tempo de Aplicação	Cura Inicial	Cura Funcional
25°C	30 min	6 h	24 horas

Obs.: Caso necessário pós-cura: 130°C por 1 hora.

#### Propriedades do Material Curado

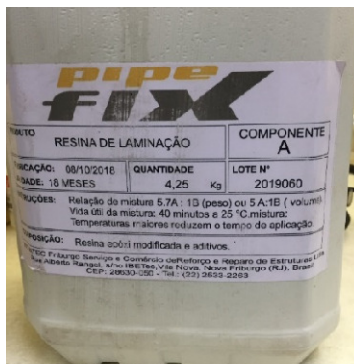
Parâmetros	Valores
Temperatura de Transição Vítrea (T <sub>g</sub> ) - DMA (°C)	116,0

\* A T<sub>g</sub> foi obtida a partir da curva do módulo de armazenamento, E.

Fonte: NOVATEC, 2009

Na figura 35, a resina de laminação utilizada no experimento.

Figura 35 - Resina de laminação PIPEFIX



Fonte: O autor, 2019

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Desenvolvimento do molde

Levando-se em consideração que este estudo possui como base a metodologia de fabricação do “*bamboo scrimber*” produzido principalmente na China, tentou-se seguir os passos de produção, ou pelo menos, próximos aos encontrados na bibliografia sugerida.

Um dos impedimentos em relação ao seguimento fiel do método chinês, baseou-se no fato de que os recursos financeiros disponíveis no desenvolvimento desta metodologia ainda é muito aquém do que àqueles destinadas à esta tecnologia no país oriental, onde todos os processos já estão plenamente desenvolvidos e estudados e possuem, em sua ampla maioria, maquinário automatizado já especializado para cada etapa do processamento, o que acarreta em grande quantidade de tempo e recurso poupados no decorrer do processo.

Como a fabricação de um molde de aço ficou inviável devido ao seu alto custo, o molde foi produzido a partir de um chassi de caminhão que foi cedido pela empresa ECOTRAL, situada em Nova Friburgo. Foram utilizados equipamentos de desbaste e lixamento para acabamento, além de máquina de solda e um cortador de plasma para recorte e posterior união entre as peças do chassi. O molde, com dimensões de 120 cm de comprimento, 12cm de largura e 40 cm de altura, foi produzido sob medida da prensa

mostrada na figura 36, que mais adiante seria utilizada para a prensagem das peças. Imagens durante a usinagem do molde pode ser vista na figura 37.

Figura 36 - Prensa utilizada na prensagem dos compósitos estruturais de bambu



Fonte: O autor, 2019

Figura 37 – Fabricação do molde para prensagem a partir de chassi de caminhão



Fonte: O autor, 2019

Após terminado o molde, composto por três peças (as duas laterais e a base), a base do molde foi encaixada na mesa da prensa e foi furada em 5 posições de cada lado para que as laterais do molde pudessem se encaixar e serem parafusadas à base do molde, mantendo assim

a largura especificada de 12 cm da peça final durante a prensagem e também para suportar os esforços que seriam causados pela prensagem. Também foram soldadas barras na lateral do molde como reforço, no comprimento correspondente ao tamanho da peça a ser prensada. Este processo de montagem do molde na prensa pode ser observado a seguir na figura 38.

Figura 38 - Encaixe do molde na prensa.



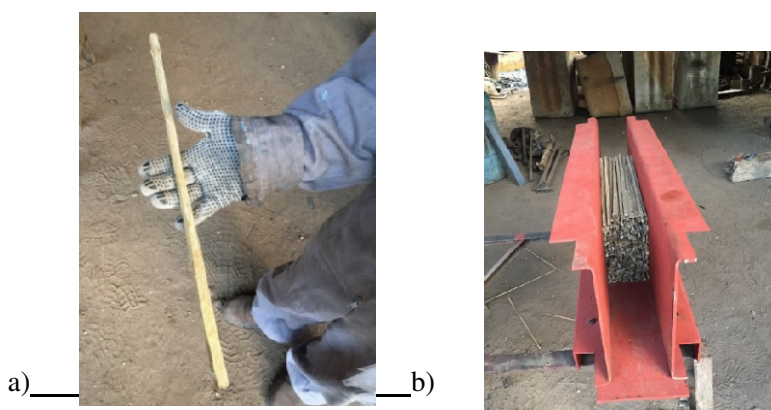
Fonte: O autor, 2019



### 2.2.2 Produção das fibras

Buscando melhorar a molhabilidade da resina nas fibras, um segundo processamento das ripas foi realizado após o tratamento e secagem. Primeiramente, as ripas foram todas reduzidas ao comprimento de 500 mm, conforme figura 39, uma vez que este seria o comprimento da peça final prensada.

Figura 39 - Padronização das ripas

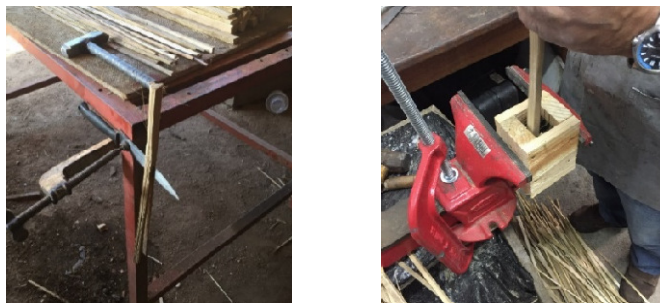


Legenda: (A) Padronização das ripas em 500 mm; (B) Molde sob medida pronto com as ripas com 500 mm de comprimento.

Fonte: O autor, 2019

Após a padronização do comprimento, as ripas foram reduzidas à espessura ainda menor, já que esta redução se mostrou conveniente para melhorar a compactação das ripas no molde, o esforço exigido pela prensa e, conseqüentemente, a produção de uma peça final com distribuição das fibras e resina mais uniforme e eficiente no molde. Foram desenvolvidos dois métodos para redução da espessura das ripas. O primeiro método foi prender uma faca com um sargento numa superfície, conforme figura 40, e forçar a passagem da fibra pela lâmina da faca, de cima para baixo, com ajuda de um martelo. O segundo método criado baseou-se no mesmo conceito de funcionamento, porém, se mostrou mais eficiente, menos tempo e energia foram gastos para realização do mesmo processo, uma vez que a ripa pode ser dividida em partes menores com apenas uma passagem no dispositivo criado, ao invés de passar por algumas vezes pela lâmina da faca explicada no método anterior.

Figura 40 - Métodos para diminuição da espessura das fibras de bambu.



Fonte: O autor, 2019

Após a redução das ripas para as espessuras desejadas, foi realizada a tentativa da primeira prensagem de acordo com o método que será descrito mais adiante. As ripas foram banhadas na resina, posicionadas no interior do molde e a primeira prensagem foi realizada. A peça produzida não possuía a resina devidamente espalhada ao longo do compósito, algumas partes da peça apresentavam aspecto seco das fibras, demonstrando claramente que o processo de mistura da resina com as fibras não estava eficiente o suficiente. Na figura 41 está demonstrada a peça produzida na prensagem de teste, e o comparativo da redução de volume entre as peças depois diminuição das espessuras e larguras, e depois de prensada.

Figura 41 - Diminuição dos tamanhos das fibras até peça prensada C > A.



Fonte: O autor, 2019

A resina deveria preencher o interior das fibras ao invés de cobrir apenas a superfície externa, o que ajudaria no alcance da densidade aproximada desejada da peça final, um espalhamento mais eficiente da resina no interior da peça, e também um melhor aproveitamento da força aplicada pela prensa com as fibras abertas e resina espalhada em seu interior e exterior.

A solução encontrada foi de martelar as fibras de bambu usinada contra uma superfície de metal, de modo que este esmagamento abrisse as ripas maciças em um material fibroso poroso e espalhado. As ripas com 500 mm de comprimento e apresentando menor espessura após a segunda usinagem, foram marteladas contra a superfície dura do metal, de modo que suas fibras se soltaram e as ripas passaram a apresentar maior área superficial disponível para contato e posterior colagem com a resina, promovendo maior uniformidade e densidade no compósito final. Uma imagem desta etapa do processo pode ser vista na figura 42.

Figura 42 - Ripas com espessuras menores sendo marteladas contra o metal.



Fonte: Autor, 2019.

### 2.2.3 Secagem das Fibras abertas

Após a preparação e o esmagamento para abertura das fibras, as ripas foram levadas ao forno com temperatura média de  $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24h, como pode ser visto na figura 43, e foram prensadas logo depois. Esta etapa do processo teve como objetivo a retirada da umidade presente na fibra antes da prensagem, com o intuito de obter a maior área superficial de contato possível entre resina e fibra e melhorar o processo de cura, já que a umidade prejudica a cura e consequentemente impacta negativamente na resistência mecânica.

Figura 43 - Secagem das ripas antes da prensagem.



Fonte: Autor, 2019.

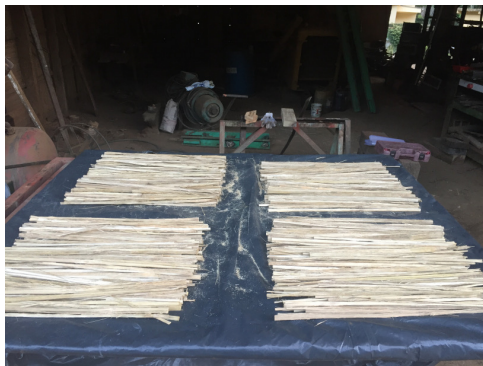
#### 2.2.4 Metodologia de Prensagem

Para realizar a prensagem de fato, a proporção média foi de 70% fibra e 30% resina. Esta proporção foi alcançada fixando o peso de fibras no interior do molde em 3,5 kg e a peso de resina em 1,5kg em média, com a capacidade máxima atingida pela prensa. Foram produzidas 6 amostras (peças) do compósito, utilizando a mesma metodologia de prensagem. A relação percentual entre a quantidade de fibras e resina foi delimitada pela capacidade da prensa, que atingiu máximo de 40 ton. Foi realizada outra prensagem com porcentagem maior de fibras, o que acarretou pouca molhabilidade da resina na fibra e consequente falha na peça final, devido à pequena quantidade de resina disponível para o total de fibras.

Dessa forma, adotou-se a padronização do peso de 3,5 kg de fibras banhadas em 2,0 kg de resina, onde as peças produzidas possuíam peso final de 5,0 kg, sendo 3,5 kg de fibras e 1,5 kg de resina, alcançando a relação 70/30 %. O volume médio da peça produzida foi constante, restrito à capacidade de prensagem, e então as peças prensadas possuíam volume médio de 50 cm de comprimento, 12 cm de largura e 8 cm de altura. Esse volume e peso médio final foram alcançados durante todas as prensagens.

As fibras foram depositadas numa mesa forrada com plástico e divididas em 4 partes iguais, conforme pode ser observado na figura 44. Após esta divisão, a resina total também foi igualmente dividida, de modo que existisse durante o processo de encharcamento das fibras, uma uniformidade maior da quantidade de resina total nas fibras, e assim, garantir melhor qualidade do compósito.

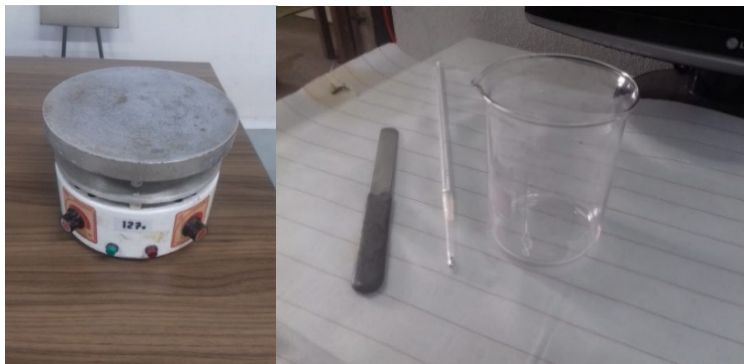
Figura 44 - Separação da quantidade de fibras a serem prensadas.



Fonte: O autor, 2019

Devido à alta viscosidade apresentada pela resina Pipefix em temperaturas de inverno da cidade de Nova Friburgo/RJ, em torno de 18 °C, decidiu-se que a resina deveria ser aquecida até a temperatura de 45 °C antes da prensagem, para melhora do manuseio da resina de alta viscosidade, e se deu através de um agitador magnético com aquecimento, um copo Béquer, uma espátula e um termômetro manual, identificados na figura 45.

Figura 45 - Agitador magnético e béquer para aquecimento da resina



Legenda: (A) - Agitador magnético com aquecimento usado para aquecer a resina; (B) Béquer de vidro, espátula e termômetro utilizados no procedimento de aquecimento da resina.

Fonte: O autor, 2019

Na figura 46, o aquecimento da resina antes da prensagem.

Figura 46 - Aquecimento da resina antes da prensagem.



Fonte: O autor, 2019

Depois de manualmente misturados, as fibras banhadas pela resina foram levadas a um segundo molde, de aço galvanizado, mostrado na figura 47. Este molde de aço galvanizado flexível com 2mm de espessura, 500 mm de comprimento e 400 mm de altura foi colocado dentro do molde original, com a função de facilitar a retirada da peça após a prensagem. Também foi envolto com fita plástica adesiva, com o intuito de facilitar a extração do compósito de bambu após a prensagem.

Figura 47 - Molde de aço galvanizado flexível revestido com fita plástica.

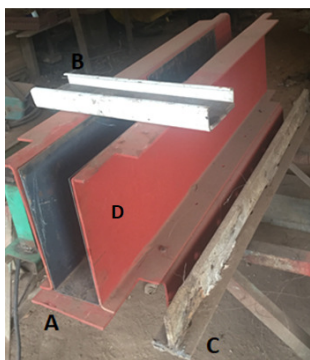


Fonte: O autor, 2019

Afim de garantir uma melhor distribuição da força aplicada pela prensa ao material a ser prensado, o êmbolo produzido a partir de aço estrutural de chassi de caminhão e uma chapa de aço de 20mm foram colocados entre o cilindro de atuação da prensa e o material.

Uma base foi soldada na parte superior do êmbolo, de modo que o cilindro de atuação da prensa pudesse ser apoiado nesta base. Também foram soldadas barras de ferro na lateral do embolo de modo a aumentar sua resistência. Esta solução garantiu que a peça fosse prensada por igual, evitando assim, elevados gradientes de densidade entre o meio e as extremidades da peça final. Na figura 48, as três peças que foram utilizadas na prensagem, o molde de aço galvanizado, posicionado dentro do molde original, a chapa de aço com espessura de 20mm colocada entre o material e o embolo que serviu de suporte para o cilindro de atuação da prensa.

Figura 48 – Peças utilizadas na prensagem



Legenda: A) Molde de aço galvanizado, posicionado no interior do molde original; B) chapa de aço 20mm, posicionada entre o material e o êmbolo; C) êmbolo antes do reforço e da base de suporte serem soldadas D) Molde original antes dos reforços soldados nas laterais.

Fonte: O autor, 2019

Na figura 49, uma imagem do êmbolo em questão, e outra da vista frontal do cilindro da prensa apoiado no suporte do embolo. Na figura 50, momentos da prensagem, e adiante na figura 51, os blocos após serem prensados e aparelhados.

Figura 49 - Embolo e cilindro da prensa



Legenda: A) Embolo utilizado na prensagem, com reforços dos lados e a base superior quadrada de apoio para o cilindro da prensa. B) Cilindro da prensa apoiado na base superior do embolo.

Fonte: O autor, 2019

Figura 50 - Momento da prensagem.



Fonte: O autor, 2019

Figura 51 - Blocos após prensagem.

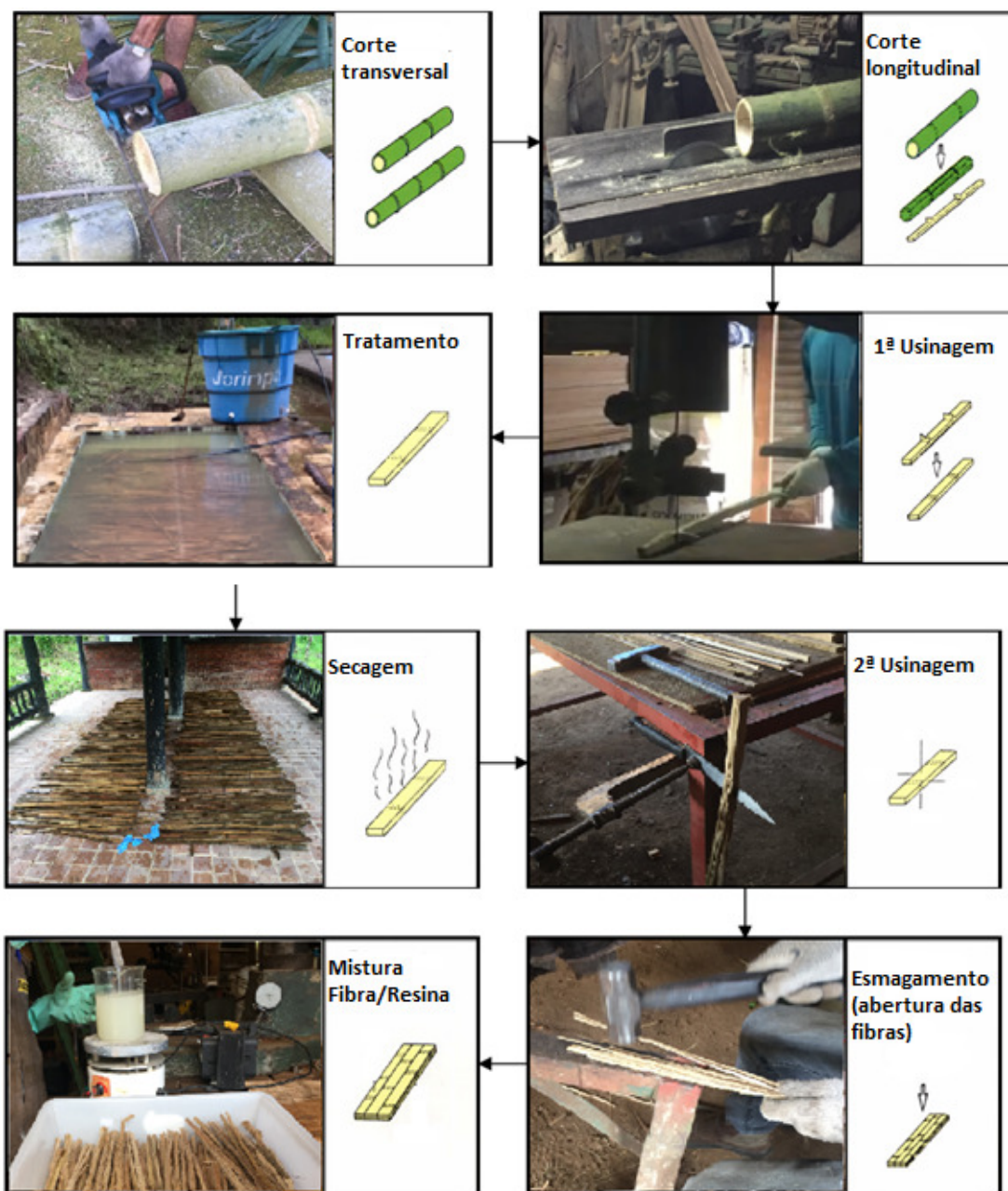


Fonte: O autor, 2019

Segue na figura 52, um esquema simplificado do método de fabricação do composto de bambu de alta densidade, desde o manejo do bambu até o último processo antes da prensagem, desenvolvido neste estudo.



Figura 52 - Fluxograma simplificado do procedimento de fabricação do compósito de bambu de alta densidade até a prensagem.



Fonte: Adaptado de BERNDSEN, 2008..

### 2.2.5 Preparação dos corpos-de-prova

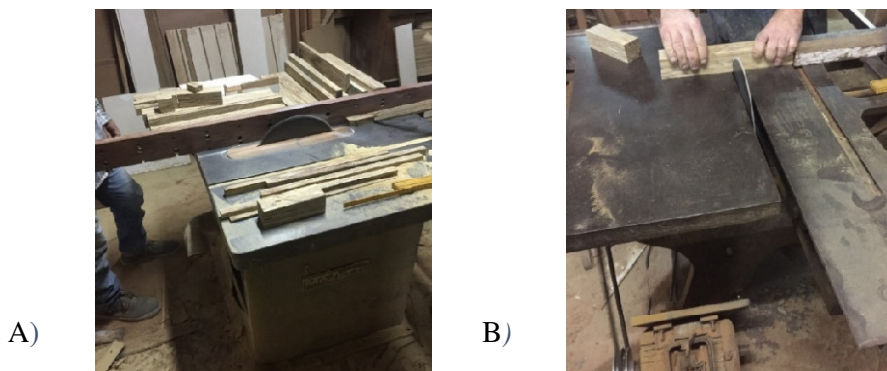
Ainda não existe uma norma específica para os ensaios das propriedades mecânicas para compósitos de fibras de bambu prensado com resina, e então os corpos de prova foram feitos com adaptações das normas NBR 7190 – Projeto de estruturas de Madeira (ABNT, 1997), ASTM D 143 - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber; e ISO 22157-1 (E), Bamboo–determination of physical and mechanical properties–Part I (2004).

A principal adaptação feita neste trabalho foi quanto às dimensões dos corpos de prova, porque a razão de material lenhoso em relação ao diâmetro dos colmos é pequena, o que limita a confecção de corpos de prova quanto aos tamanhos demandados pelas normas de ensaio de madeira, principalmente madeira estrutural.

A avaliação das características mecânicas do bambu não é tarefa muito simples. Traçando-se um paralelo com os estudos de caracterização mecânica das madeiras, pode-se afirmar que no caso do bambu, nem sempre os procedimentos prescritos pela norma NBR 7190 (1997), específica para madeira, podem ser diretamente aplicados (PEREIRA & BERALDO, 2008).

Os corpos de prova exigidos pela norma, foram adaptados e extraídos das peças do compósito de bambu de alta densidade, produzidos a partir do método explicitado anteriormente. Foram utilizadas serra circular de mesa e esquadrejadeira, conforme mostrado na figura 53.

Figura 53 - Confecção dos corpos-de-prova.



Legenda: A) serra circular de mesa; B) esquadrejadeira.  
Fonte: O autor, 2019

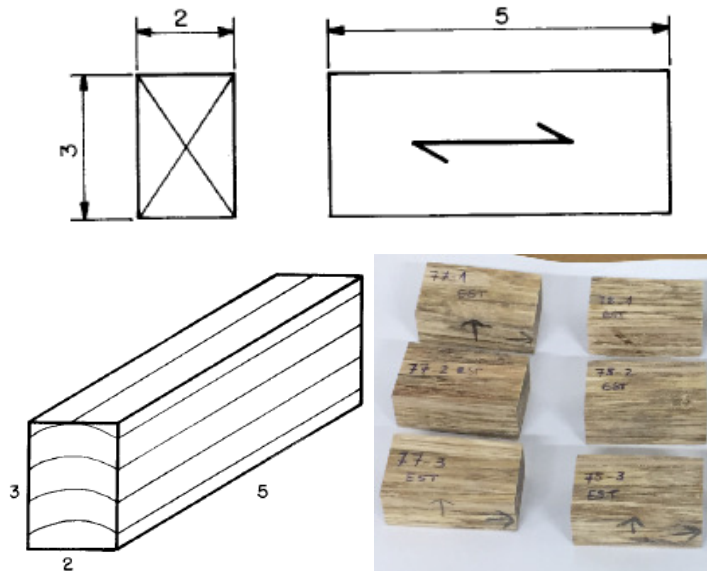
As adaptações nos corpos de prova dos ensaios de tração paralela às fibras e flexão estática, tiveram como referência as normas: ISO 22157-1 (ISO, 2004), e ASTM D - 143 (ASTM, 2009), respectivamente.

## 2.3 Determinação das propriedades físico-mecânicas

### 2.3.1 Ensaio Físicos

Para todos os ensaios físicos: umidade, densidade e estabilidade dimensional, os corpos de prova tiveram o mesmo formato, de acordo com orientações da NBR 7190 (ABNT,1997), e estão demonstrados na figura 54.

Figura 54 - Dimensões e formato do corpo de prova para ensaios físicos.



Fonte: O autor, 2019

### 2.3.1.1 Umidade

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, dado pela Eq. 3:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$$

onde:

$m_i$  é a massa inicial da madeira, em gramas;

$m_s$  é a massa da madeira seca, em gramas.

A massa seca foi obtida a partir da secagem do corpos-de-prova em forno à temperatura de  $103 \pm 3^\circ\text{C}$ , foram realizadas pesagens em intervalos de 24, 48, 72 e 96 horas.

### 2.3.1.2 Densidade

A densidade constitui uma das principais propriedades físicas para o projeto de estruturas, pois a partir da qual se calcula o peso próprio dos elementos estruturais.

#### Densidade básica

É definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, dada pela Eq. 4:

$$\rho_{básica} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (4)$$

Na qual  $\rho_{básica}$  é a densidade básica; e  $V_{sat}$  é o volume saturado da amostra determinado pelas dimensões finais do corpo de prova submerso em água até que atinja massa constante ou com variação máxima de 0.5% em relação à medida anterior. Foi utilizada balança com precisão de 0.001g na realização dos ensaios.

### Densidade aparente

É definida pela razão entre a massa e o volume, para a amostra a 12% de umidade, Eq. 5:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (5)$$

Na qual,  $\rho_{ap}$  é a densidade aparente;  $m_{12}$  e  $V_{12}$  são a massa e volume do corpo de prova a 12% de umidade, respectivamente.

#### 2.3.1.3 Estabilidade dimensional

Adotou-se o mesmo procedimento utilizado para madeira, para o cálculo da retratibilidade, conforme as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Calculou-se a contração e o inchamento das amostras para as direções correspondentes a espessura (radial), largura (tangencial) e comprimento (longitudinal) dos corpos de prova.

As amostras foram levadas a estufa, durante 24, 48, 72 e 96 horas, no intervalo de 24 em 24 horas, foram realizadas medições, a estufa foi mantida à temperatura de  $100 \pm 3$  °C. Após a reumidificação, os corpos de prova foram submersos em água pelo mesmo período de tempo e seguiu-se o mesmo procedimento, para medições a cada 24 horas. Foi utilizado paquímetro digital com sensibilidade 0,01 mm para mensurar o comprimento, espessura e a largura dos corpos de prova, que foram devidamente identificados nas três direções. Foram encontrados os resultados das porcentagens de contração e inchamento pela razão entre a diferença da dimensão da amostra saturada e anidra.

Os cálculos correspondentes aos ensaios de retração e inchamento estão demonstrados nas equações 6 a 11. A figura 55 mostra o paquímetro, a balança e o forno utilizados nos ensaios físicos.

$$\varepsilon_{r,1} = \frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,sat}} \times 100 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{r,2} = \frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,sat}} \times 100 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{r,3} = \frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,sat}} \times 100 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{i,1} = \frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,seca}} \times 100 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{i,2} = \frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,seca}} \times 100 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{i,3} = \frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,seca}} \times 100 \quad (11)$$

A variação volumétrica é determinada em função das dimensões do corpo de prova nos estados saturado e seco, sendo dada pelas equações 12, 13 e 14.

$$\Delta V = \frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \quad (12)$$

Onde:

$$V_{sat} = L_{1,sat} \times L_{2,sat} \times L_{3,sat} \quad (13)$$

$$V_{seca} = L_{1,seca} \times L_{2,seca} \times L_{3,seca} \quad (14)$$

Figura 55 – Paquímetro, balança e forno



Legenda: A) paquímetro; B) balança; C) forno.  
Fonte: O autor, 2019

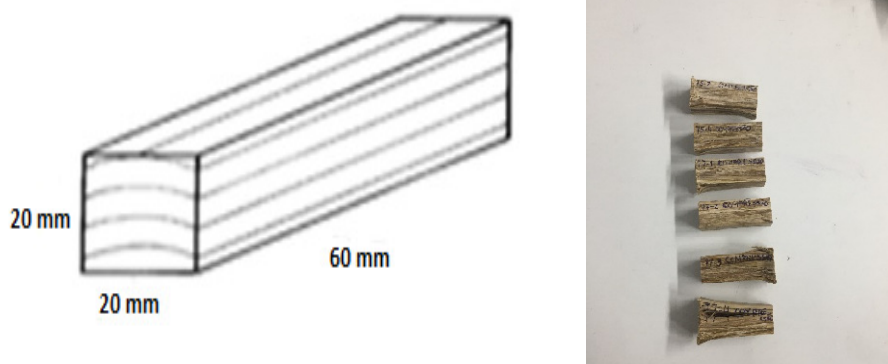
### 2.3.2 Ensaio Mecânicos

Todos os ensaios mecânicos foram realizados no Instituto Politécnico da UERJ, campus Nova Friburgo – RJ, em máquina de ensaio universal SHIMADZU AG-X Plus com 100kN de capacidade.

#### 2.3.2.1 Compressão paralela às fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na NBR 7190 (ABNT, 1997), os corpos de prova foram dimensionados de acordo com a referida norma, possuindo seção quadrada de 20mm, comprimento de 60 mm na direção longitudinal e pode ser observado na figura 56.

Figura 56 - Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: O autor, 2019

A direção longitudinal das peças é coincidente com a orientação das fibras. Nesta direção, têm-se os maiores valores de resistência de compressão. A resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão em um corpo de prova de seção transversal quadrada, conforme Eq. 15:

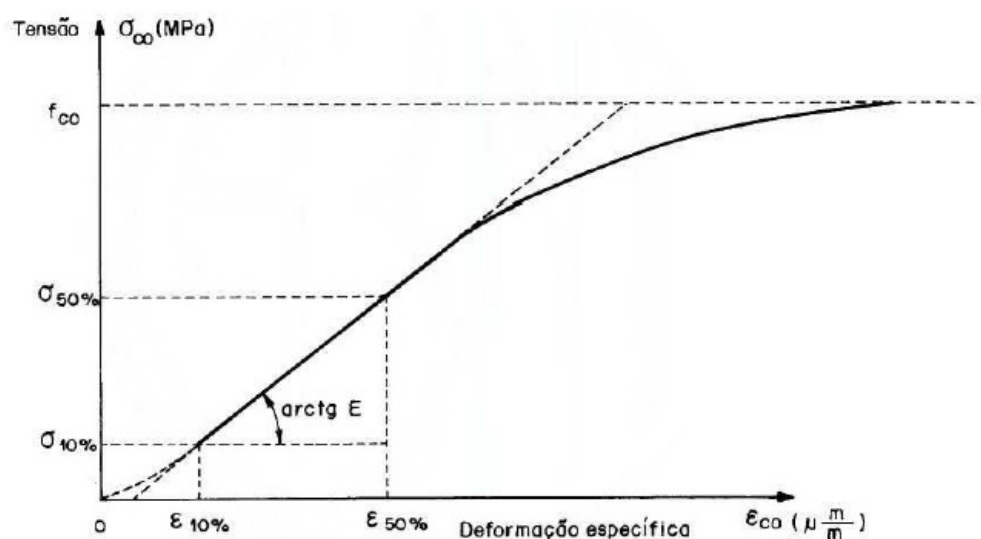
$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A_{c0}} \quad (15)$$

Na qual,  $f_{c0}$  é a resistência à compressão paralela às fibras;  $F_{c0,max}$  é a máxima força de compressão aplicada sobre o corpo de prova; e,  $A_{c0}$  é a área inicial da seção transversal comprimida. Por meio do ensaio de compressão às fibras obtém-se a rigidez através do módulo de elasticidade à compressão, o qual é extraído do trecho linear do diagrama tensão x deformação nos pontos de 50% e 10% da resistência a compressão paralela às fibras, figura 57, conforme Eq.16:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (16)$$

Na qual,  $E_{c0}$  é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;  $\sigma_{50\%}$  e  $\sigma_{10\%}$  são as tensões de compressão a 10% e 50% da resistência  $f_{c0}$ ; e,  $\varepsilon_{50\%}$  e  $\varepsilon_{10\%}$  são as deformações específicas medidas no corpo de prova.

Figura 57 - Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras.



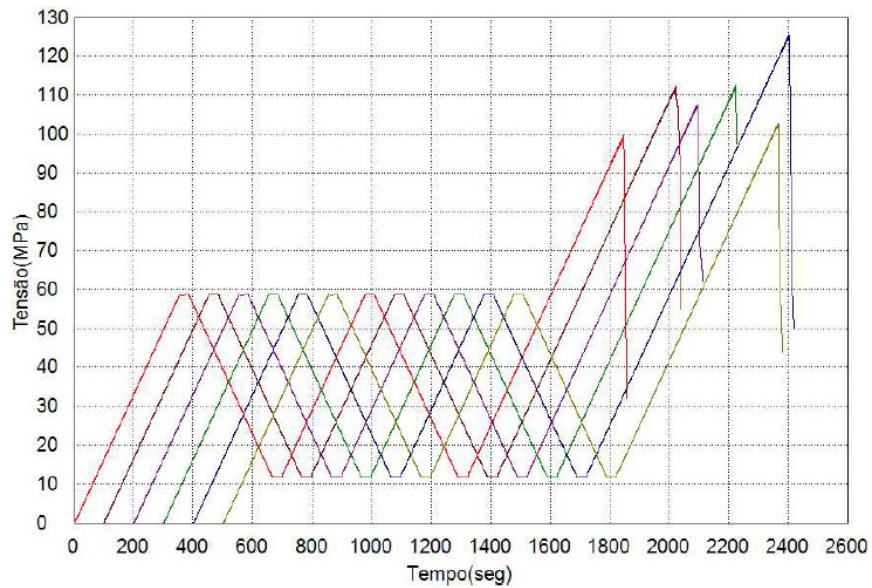
Fonte: ABNT, 1997.

Primeiramente, um corpo de prova foi comprimido até sua ruptura, essa tensão foi considerada para a realização do ensaio, já que o diagrama de carregamento para determinação da rigidez do compósito à compressão possui 2 ciclos de carregamento. Compressão até 50% da tensão de ruptura e 30 segundos com esta tensão constante e retorno até 10% da tensão de ruptura e 30 segundos com esta tensão constante. Este ciclo foi repetido



2 vezes até o corpo de prova ser submetido a tensão total até sua ruptura. O gráfico deste ensaio está demonstrado na figura 58, e a figura 59, demonstra o ensaio de compressão.

Figura 58 - Gráfico tensão x tempo de acordo com o diagrama de carregamento do ensaio.



Fonte: O autor, 2019

Figura 59 - Ensaio de compressão.



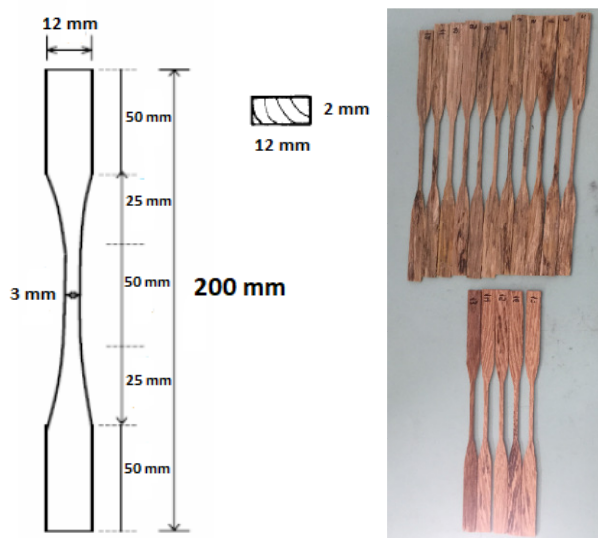
Fonte: O autor, 2019

### 2.3.2.2 Tração paralela às fibras

Similarmente à compressão, a resistência à tração apresenta sua maior magnitude na direção paralela às fibras, já que na direção perpendicular às fibras se tem baixíssimos valores de existência, de tal forma que, para condições de projeto, não deve-se considerar qualquer contribuição de resistência devido à tração perpendicular as fibras.

O ensaio de tração paralela às fibras foi realizado de acordo com a norma ISO 22157-1 (ISO, 2004), os corpos de prova utilizados no referido ensaio podem ser observados na figura 60.

Figura 60 - Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras.



Fonte: O autor, 2019

Considerando que esta norma se refere a determinação das propriedades do bambu, e não da madeira estrutural, optou-se por realizar o mesmo ensaio, seguindo os mesmos procedimentos e dimensões do corpo de prova, na madeira Angelim, comumente utilizada como madeira estrutural. Com este método foi possível a obtenção de um resultado qualitativo, com a possibilidade de comparação entre os dois materiais.

Para a determinação das propriedades de resistência à tração máxima, segue a equação 17:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (17)$$

Onde,

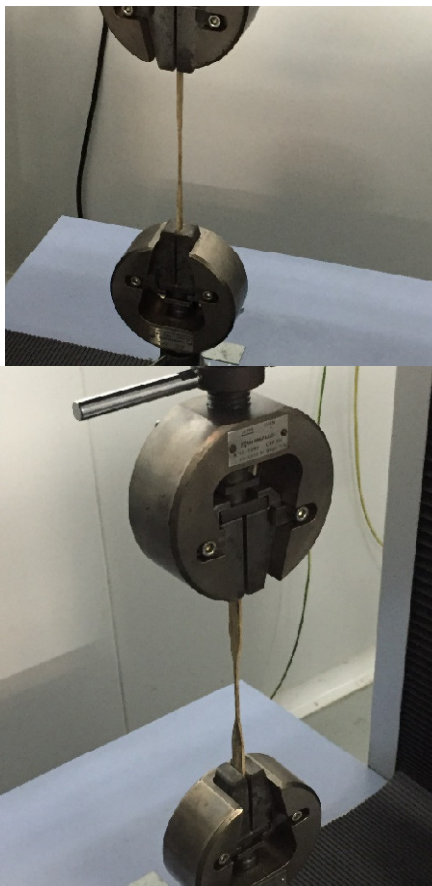
$\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão máxima de resistência em MPa

$F_{m\acute{a}x}$  = força máxima de ruptura da peça, em N

A = área da seção transversal da área de ruptura, em mm<sup>2</sup>

O módulo de elasticidade foi calculado a partir do trecho linear do diagrama tensão x deformação nos pontos de 20% e 80% da força máxima de ruptura do compósito. A representação do ensaio pode ser vista na figura 61:

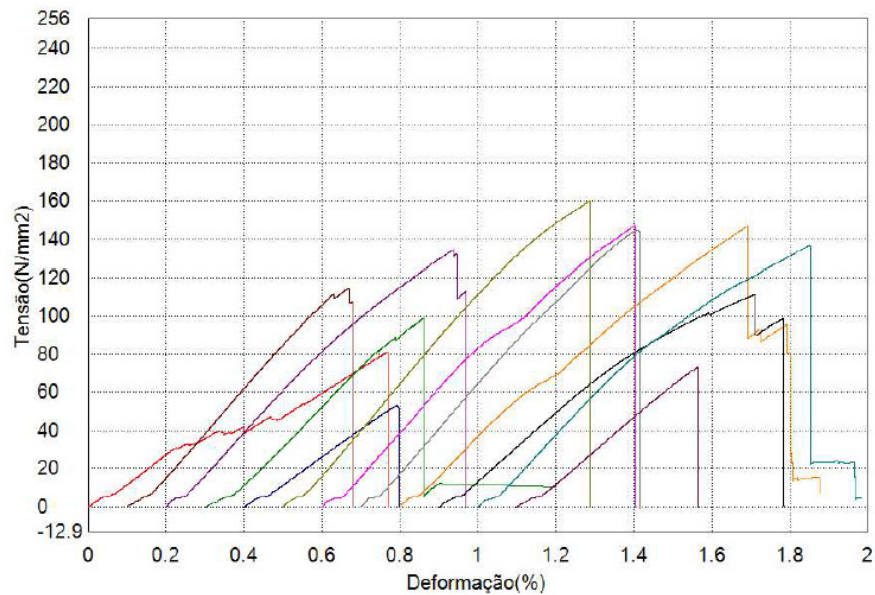
Figura 61 - Ensaio de tração.



Fonte: O autor, 2019

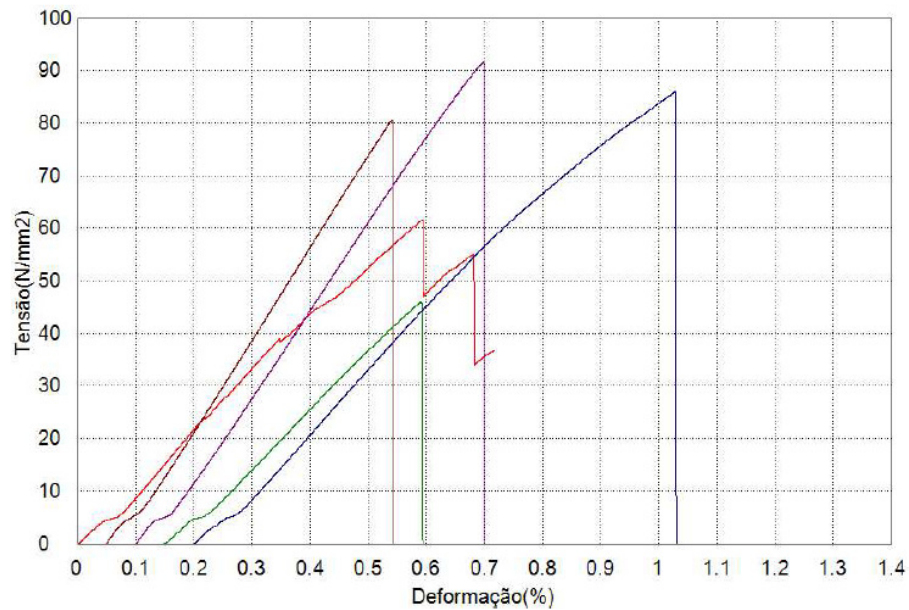
Nas figuras 62 e 63, os gráficos tensão x deformação do compósito de bambu produzido e da madeira Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*), respectivamente.

Figura 62 - Gráfico tensão x deformação do compósito de bambu.



Fonte: O autor, 2019

Figura 63 - Gráfico tensão x deformação da madeira Angelim-pedra.



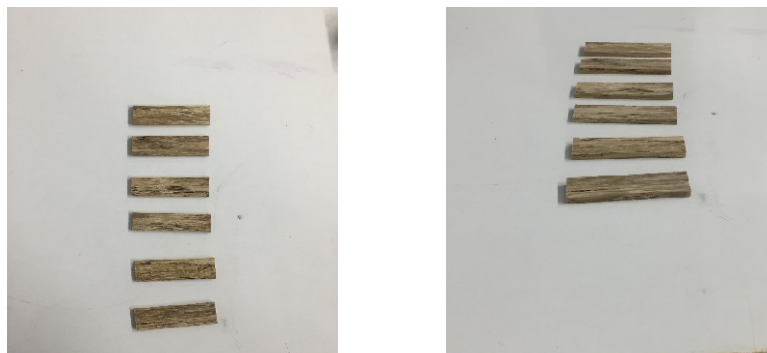
Fonte: O autor, 2019

### 2.3.2.3 Flexão estática

De forma geral, o modo de ruptura em peças submetidas à flexão simples se dá inicialmente pela formação de pequenas falhas de compressão seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos macroscópicos de compressão. Este fenômeno resulta em um deslocamento da linha neutra devido ao aumento da área comprimida e a diminuição da área tracionada na seção, o que eventualmente é seguido pela ruptura à tração da peça fletida.

Devido ao equipamento disponível para realização dos ensaios e às dimensões elevadas dos corpos de prova na norma para madeira estrutural, para este ensaio foi utilizada a norma ASTM D-143 – Standard Test Methods for Small clear Specimens of Timber (ASTM, 1996). Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões reduzidas àquelas estipuladas pela norma, seguindo as proporções mantidas por Ahmad (2000) e Berndsen (2008 e 2013), com dimensões de 4 x 16 x 64 mm, conforme figura 64.

Figura 64 - Corpos de prova para ensaio e flexão.



Fonte: O autor, 2019

O vão entre os apoios foi de 56 mm e a velocidade do ensaio foi de 2mm/min. O ensaio para a determinação da resistência à flexão consiste na aplicação de uma carga a um corpo de prova que repousa sobre dois apoios, na metade do seu comprimento, para causar tensões e deformações mensuráveis, até sua ruptura, conforme figura 65.

Neste ensaio foram determinados os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) conforme as equações 18 e 19, respectivamente.

$$MOR = \frac{1,5xPl}{bxh^2} \quad (18)$$

$$MOE = \frac{P'x l^3}{4xD'.b.h^3} \quad (19)$$

Onde:  $MOR$  = módulo de ruptura na flexão estática (MPa);

$MOE$  = módulo de elasticidade da flexão estática (MPa)

$P$  = carga de ruptura (N);

$P'$  = carga no limite de proporcionalidade (N)

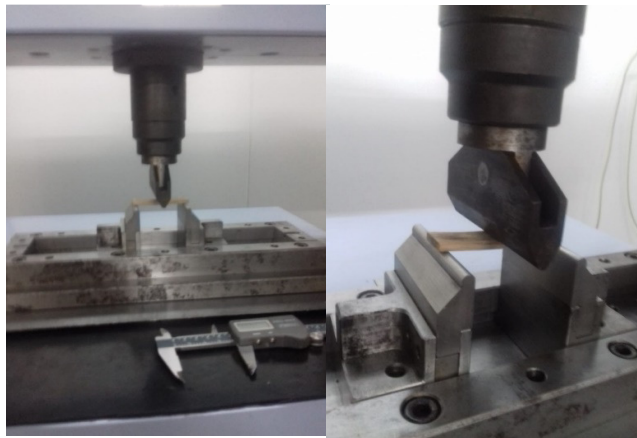
$l$  = distância entre os suportes (mm);

$D'$  = deformação no limite de proporcionalidade (mm);

$b$  = largura do corpo de prova (mm)

$h$  = altura do corpo de prova (mm)

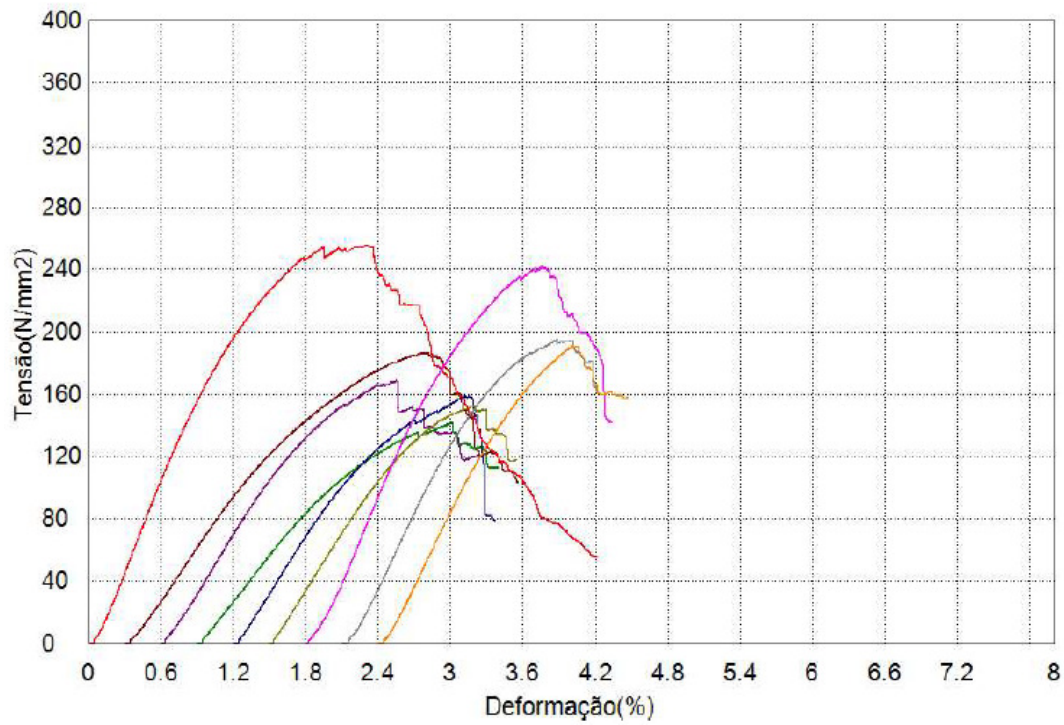
Figura 65 - Ensaio de flexão.



Fonte: O autor, 2019

O gráfico tensão x deformação do teste está demonstrado na figura 66.

Figura 66 - Gráfico tensão x deformação para o ensaio de flexão.



Fonte: O autor, 2019

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Comparação compósito de bambu x madeiras estruturais

##### 3.1.1 Ensaios Físicos

###### 3.1.1.1 Umidade

O ensaio de umidade, realizado em seis amostras (n=6), apresentou boas características para o compósito de bambu produzido. Os corpos de prova ensaiados tiveram teor de umidade médio de 3,08%, com desvio padrão de 0,78%.

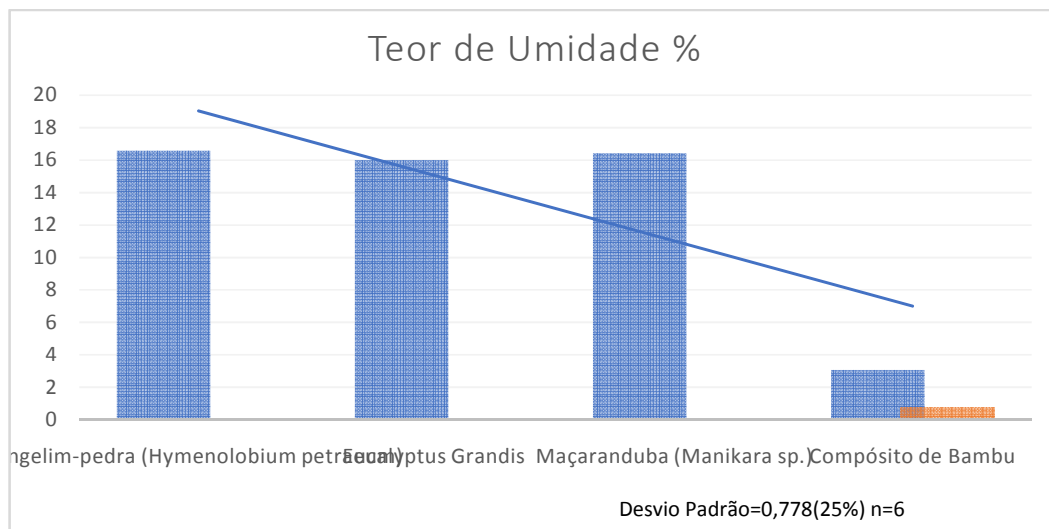
De modo geral, a presença de água na madeira reduziu substancialmente os valores de elasticidade e resistência, conforme estudo conduzido por Stangerlin (2010). A alteração dos valores de elasticidade e resistência ocorre de forma distinta, em termos de magnitude, para cada tipo de ensaio mecânico, sendo que, normalmente, há uma diminuição das propriedades com o aumento do teor de umidade, até o ponto de saturação das fibras.

Utilizando a mesma norma como referência, Prim (2011) encontrou valores médios de 15,98% para a espécie angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*) e 16,58% para a espécie *Eucalyptus Grandis*. Em estudo conduzido por Rosa (2014), foi encontrado valor médio de teor de umidade de 16.42% para a madeira de maçaranduba (*Manikara sp.*).

Estes valores de teor de umidade para diferentes espécies de madeira, quando comparados aos encontrados para o compósito de bambu produzido neste estudo, figura 67, demonstram que o material apresenta excelente teor médio de umidade.



Figura 67 - Comparativo entre teor de umidade do compósito de bambu e outras madeiras.

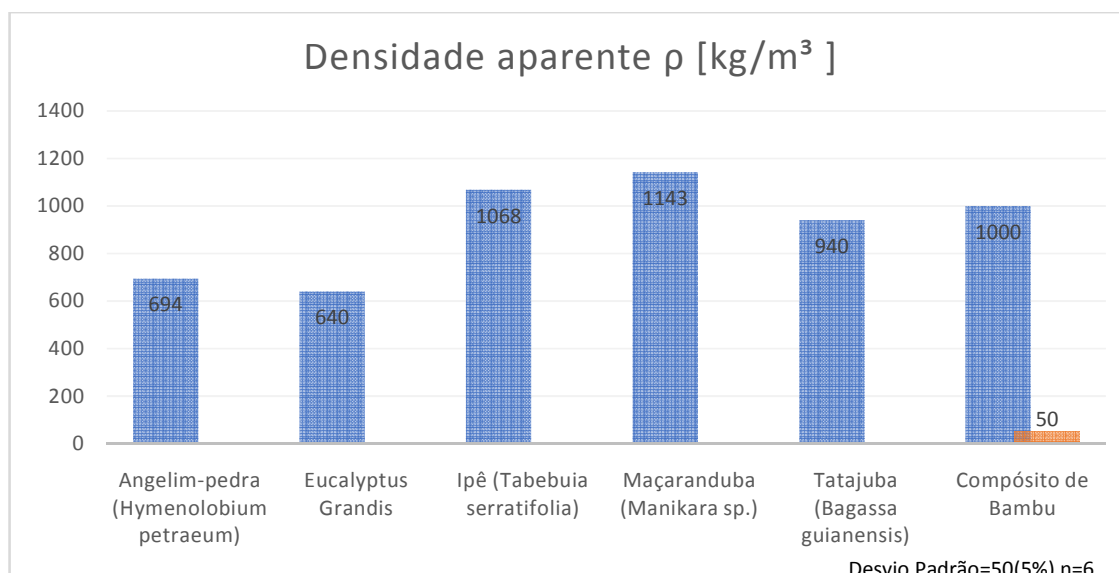


Fonte: O autor, 2019

### 3.1.1.2 Densidade

O compósito de bambu produzido apresentou densidade aparente média  $1.000 \text{ kg/m}^3$ . Considerando que a prensa hidráulica utilizada na prensagem dos compósitos conseguiu atingir apenas 40 ton de carga e a possibilidade de melhora de diversos processos ao longo da produção do material, pode-se considerar que a densidade alcançada foi satisfatória. Comparativamente com a densidade aparente de outras madeiras estruturais, utilizando como referência os dados obtidos da NBR 7190 (ABNT, 1997), o compósito de bambu se situa entre as madeiras consideradas nobres, como pode ser observado na figura 68.

Figura 68 - Comparativo entre as densidades aparentes de compósito de bambu e outras madeiras.



Fonte: O autor, 2019

### 3.1.1.3 Estabilidade Dimensional

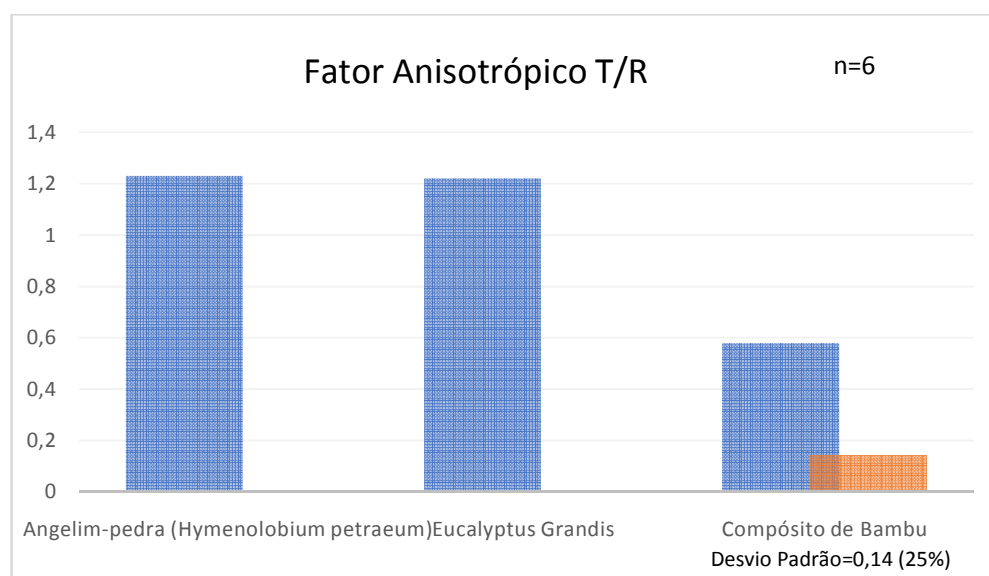
Para as seis amostras testadas (n=6), foram obtidos valores médios de retração de 5,91% na direção radial (espessura), 3,25% na direção tangencial (largura) e 0,23% na direção longitudinal. Os valores de inchamento determinados foram de 6,31% na direção radial, 3,36% na direção tangencial e 0,23% na direção longitudinal. A variação volumétrica média foi de 10,15%. Os resultados demonstram que o compósito de bambu de alta densidade produzido possui maiores valores de retração e inchamento nas direções radial e tangencial, e variações pouco significativas na direção longitudinal, o que condiz com a bibliografia pesquisada para madeiras.

Conforme esperado e já discutido anteriormente, a retração radial do bambu é normalmente reportada como sendo maior ou igual a retração na direção tangencial, o que é um comportamento diferente daquelas apresentadas nas madeiras, onde as variações na direção tangencial, comumente são maiores do que àquelas na direção radial.

A anisotropia de retração ou fator anisotrópico, que é a relação na variação dimensional entre as direções tangencial e radial (T/R) e é um parâmetro de demonstração que as espécies não apresentarão trincas, rachaduras, empenamentos, encanoamentos, torcimentos

e outros defeitos do processo de secagem, foi de 0,58, valor bem menor do que aos encontrados por Prim (2011), para as espécies de *Eucalyptus Grandis* e Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), onde T/R foram de 1,22 e 1,23 respectivamente. De acordo com a classificação estabelecida por Nock et al (1975), este fator apresenta-se como ótimo até 1,50; normal entre 1,50 e 2,00 e ruim, quando é superior a 2,00, o que indica que o compósito de bambu produzido possui excelente anisotropia de retração ou fator anisotrópico, conforme mostrado na figura 69.

Figura 69 - Comparativo entre o fator anisotrópico do compósito de bambu e outras madeiras.



Fonte: O autor, 2019

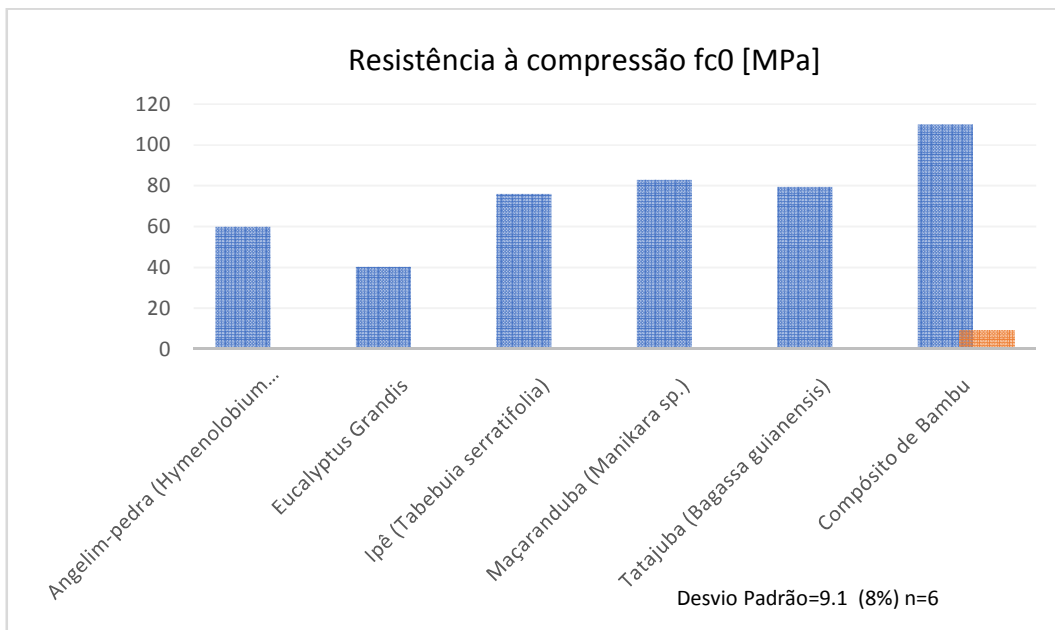
### 3.1.2 Ensaios Mecânicos

#### 3.1.2.1 Ensaio de Compressão

Para o ensaio de compressão, o resultado médio obtido para a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade foi de 109,99 MPa e 10,63 GPa, respectivamente. A norma utilizada, NBR 7190 (ABNT, 1997), possui dados sobre essas mesmas propriedades em relação à madeira estrutural. Algumas madeiras foram usadas como comparativo, conforme visto na figura 70, e os valores encontrados durante os ensaios colocam o compósito

de bambu de alta densidade produzido em posição de destaque em termos de resistência à compressão paralela às fibras.

Figura 70 - Comparativo entre as resistências à compressão paralela às fibras do compósito de bambu e outras madeiras.

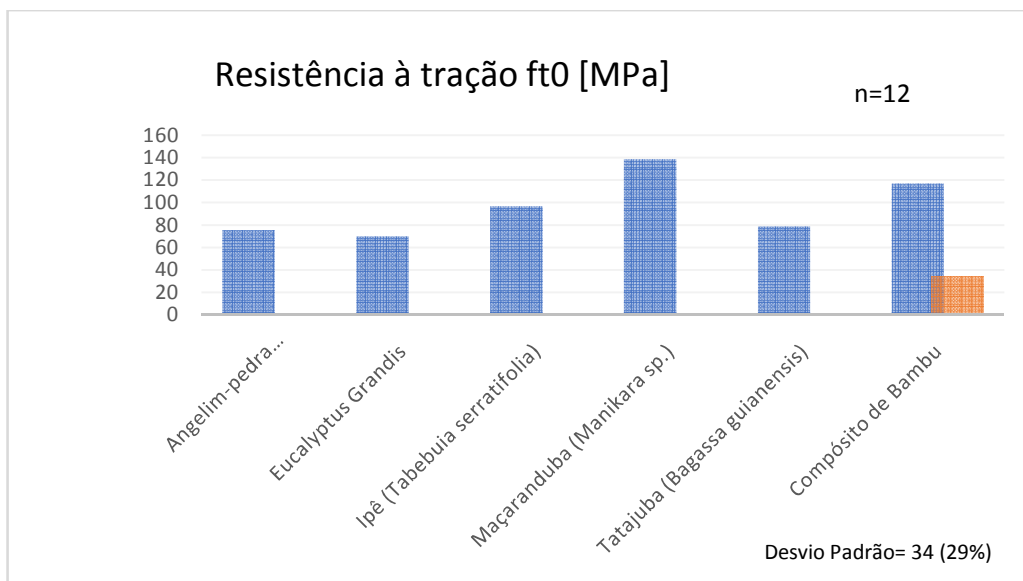


Fonte: O autor, 2019

### 3.1.2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado no compósito de bambu de alta densidade produzido e em uma amostra comercial da espécie Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*). Foram obtidos valores médios de resistência à tração paralela às fibras de 116,88 MPa e 73,19 MPa, respectivamente. Considerando que este valor médio obtido para o Angelim-pedra está muito próximo do valor encontrado na NBR 7190 (ABNT, 1997), que é de 75,5 MPa, optou-se por comparar os valores ensaiados com os dados fornecidos pela norma brasileira para outras madeiras. O resultado comparativo pode ser visto na figura 71. Os valores encontrados para o compósito de bambu de alta densidade produzido, o colocam entre as madeiras nobres em termos de resistência à tração paralela às fibras.

Figura 71 - Comparativo entre as resistências à tração do compósito de bambu e outras madeiras.



Fonte: autor, 2019.

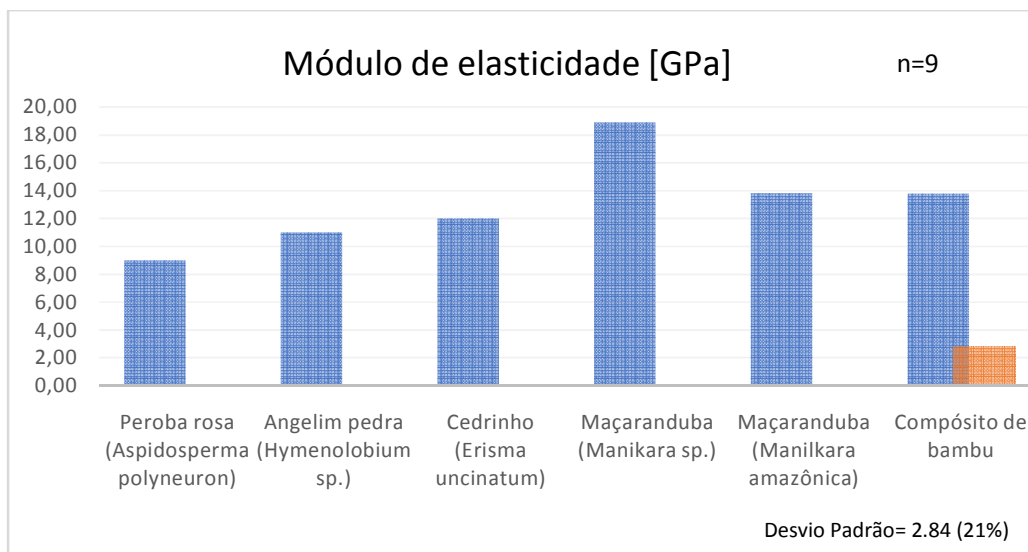
O compósito e o Angelim testados produziram resultados médios de 20,1 GPa e 13,9 GPa para os módulos de elasticidade à tração, respectivamente.

### 3.1.2.3 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão no compósito de bambu de alta densidade demonstrou resultados aparentemente satisfatórios. Os valores médios de resistência à flexão e do módulo de elasticidade obtidos foram de 188,1 MPa e 13,77 GPa, respectivamente.

Em estudo conduzido por Zenid (2009), algumas madeiras comumente utilizadas para uso estrutural no mercado brasileiro foram analisadas, valores para o módulo de elasticidade foram determinados. Valores para o módulo de elasticidade da madeira de maçaranduba foram analisados por Rosa (2014) e Souza et al (2002). Estes valores estão comparados com o compósito de bambu de alta densidade na figura 72. Ainda que tenham sido comparados resultados obtidos a partir de diferentes normas, os resultados comparados estão coerentes com as outras propriedades analisadas neste trabalho, e podem ser levadas em consideração na caracterização do protótipo produzido neste trabalho. O compósito de bambu produzido encontra-se entre as madeiras de lei utilizadas em aplicações estruturais.

Figura 72 - Comparativo entre os módulos de elasticidade do compósito de bambu e outras madeiras.

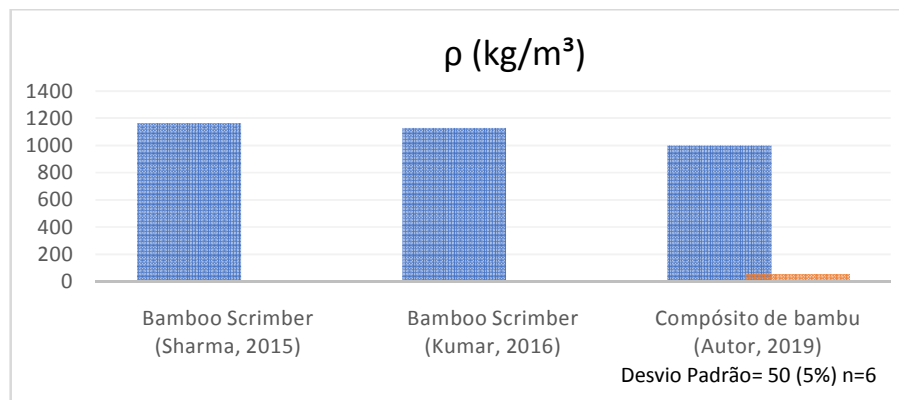


Fonte: autor, 2019.

### 3.2 Comparação compósito de bambu x *bamboo scrimber*

#### 3.2.1 Densidade

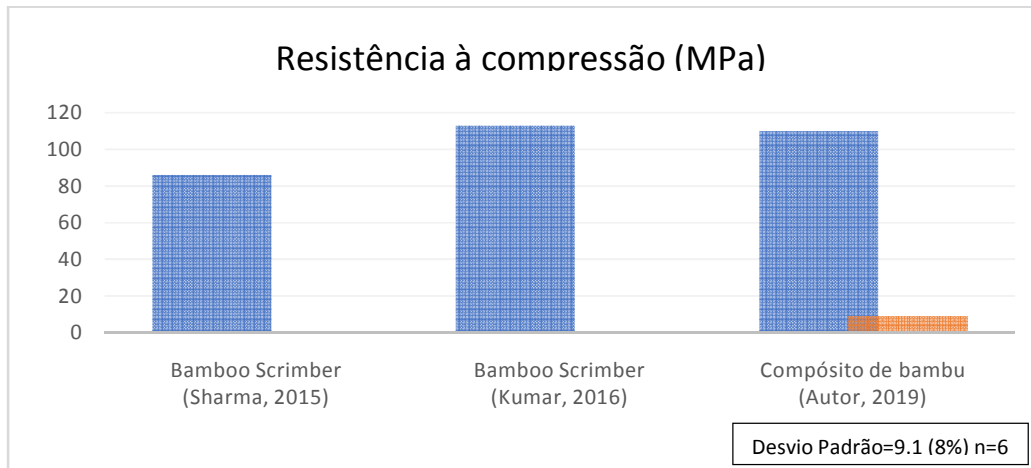
Figura 73 - Comparativo entre as densidades aparentes de compósito de bambu e *bamboo scrimber*.



Fonte: autor, 2019

### 3.2.2 Resistência à compressão

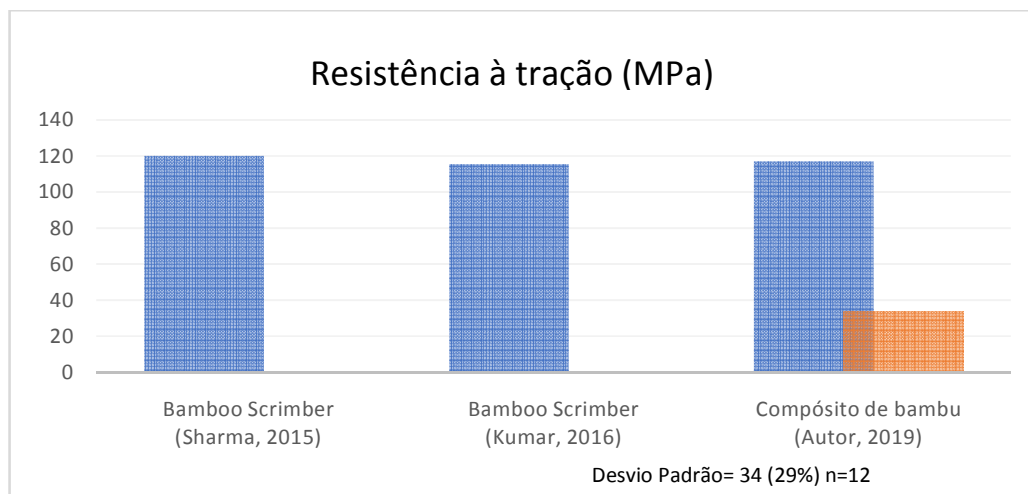
Figura 74 - Comparativo entre as resistências à compressão de compósito de bambu e *bamboo scrimber*.



Fonte: autor, 2019

### 3.2.3 Resistência à tração

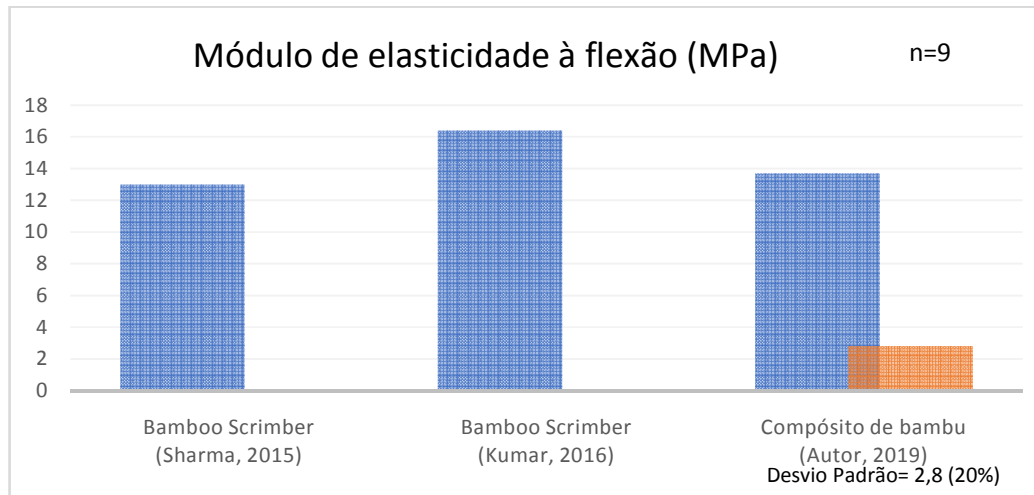
Figura 75 - Comparativo entre as resistências à tração de compósito de bambu e *bamboo scrimber*.



Fonte: autor, 2019.

### 3.2.4 Módulo de Elasticidade à flexão.

Figura 76 - Comparativo entre os módulos de elasticidade à flexão de compósito de bambu e *bamboo scrimber*.



Fonte: autor, 2019.

Os resultados comparativos entre o compósito de bambu de alta densidade produzido com a resina epóxy Pipefix, e os valores encontrados na literatura para o *bamboo scrimber* produzido com resina fenólica, demonstraram ótimos resultados para o compósito. Mesmo tendo alcançado densidade aparente um pouco menor do que os outros materiais, o que normalmente acarretaria em menores propriedades mecânicas, o compósito de bambu apresentou resultados semelhantes e até superiores do que o *bamboo scrimber*.



## CONCLUSÃO

Com base no que foi exposto neste trabalho, o processo de fabricação do compósito de bambu para uso estrutural foi considerado satisfatória para a fabricação dos corpos de prova e identificação de variáveis do processo. Considerando que o processamento comercial de produção do *bamboo scrimber* na literatura pesquisada, encontra-se em estágio muito mais avançado ao apresentado para a produção deste protótipo, podem-se considerar excelentes as propriedades apresentadas pelo compósito.

A resina epóxi PIPEFIX produzida no Laboratório de Adesão e Aderência do IPRJ/UERJ apresentou bons resultados na resistência do compósito, comprovados pelas propriedades superiores do compósito de bambu quando comparados ao *bamboo scrimber* produzido em outros países, à base de resina fenólica.

A metodologia de produção do compósito permitiu a identificação de variáveis que irão promover melhorias no processo de produção e também nas propriedades mecânicas do produto final: o processo de desfibrilamento e secagem das fibras antes da prensagem, a capacidade da prensa hidráulica, a viscosidade da resina no momento da prensagem, aperfeiçoamento do êmbolo e molde.

O objetivo de produzir um compósito de alta densidade foi alcançado com a densidade média das amostras testadas igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , demonstrando que o processo de produção foi satisfatório. O baixo teor umidade, e os resultados de estabilidade dimensional, com excelente valor para o fator anisotrópico comparado às madeiras.

Apesar da utilização de diferentes normas, os resultados mecânicos apresentados pelo compósito de bambu foram considerados bons, posicionando o compósito entre as madeiras nobres utilizadas em aplicações estruturais. As propriedades de resistência à tração, compressão e flexão estática tiveram resultados comparados às madeiras de lei e ao *bamboo scrimber* presentes na literatura pesquisada, e sugerem que o compósito de bambu de alta densidade produzido poderia ser utilizado estruturalmente.

Por se tratar de um protótipo, os resultados encontrados cumpriram com o objetivo de iniciar a pesquisa do Laboratório de Adesão e Aderência na área de compósitos de fibras naturais, identificando variáveis de estudo e apontando a direção a ser seguida em trabalho futuros, buscando atingir melhores propriedades do compósito.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

- a) Levantamento de propriedades considerando outras variáveis como: idade do bambu, umidade dos colmos, densidade do bambu utilizado, posição do colmo a ser utilizada (base, meio e topo), clima e solo do bambu a ser utilizado.
- b) Utilização de diferentes métodos de tratamento.
- c) Utilização de diferentes métodos de secagem.
- d) Condução de testes de abrasão no compósito de bambu.
- e) Utilização de outras resinas.
- f) Análise do compósito produzido em microscópio eletrônico de varredura e método de digestão ácida.
- g) Determinação das propriedades do compósito de bambu sob fluência.
- h) Desenvolvimento de equipamentos para automatização dos processos de produção.
- i) Comparação do compósito produzido sob diferentes porcentagens de fibra e resina.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Mansur. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials. 2000. Tese de Doutorado. Virginia Tech.
- AKINLABI, Esther Titilayo; ANANE-FENIN, Kwame; AKWADA, Damenortey Richard. Bamboo: The Multipurpose Plant. Springer, 2017.
- AMADA, S.; MUNEKATA, T.; NAGASE, Y.; ICHIKAWA, Y.; KIRIGAI, A.; ZHIFEI, Y. The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite material. Journal of Composite Material, Japan, v.30, n.7, p.801-819. 1996.
- AMADA, Shigeyasu; UNTAO, Sun. Fracture properties of bamboo. Composites Part B: Engineering, v. 32, n. 5, p. 451-459, 2001.
- ANWAR, U. M. K. et al. Physical and mechanical properties of Gigantochloa scortechinii bamboo splits and strips. Journal of tropical forest science, p. 1-12, 2005.
- ARCE-VILLALOBOS, Oscar Antonio. Fundamentals of the design of bamboo structures. 1993. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven.
- ASTM INTERNATIONAL. Standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM D143-09. 2009.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ATROPS, J.L - Elastizitaetund festigkeit von bambusrohren. Der Bauingenieur 44:220–225 (1969).
- AZZINI, A.; CIARAMELLO D.; SALGADO, A. L. B. Velocidade de crescimento dos colmos de algumas espécies de bambu. O Agrônomo, Campinas, v.41, n.3, 1989.
- BANIK, Ratan Lal. Silviculture and field guide to priority bamboos of Bangladesh and South Asia. 2000.
- BANIK, Ratan Lal. Morphology and growth. In: Bamboo. Springer, Cham, 2015. p. 43-89.
- BANIK, R. L. The edibility of shoots of Bangladesh bamboos and their continuous harvesting effect on productivity. Bangladesh Journal of Forest Science, v. 26, n. 1, p. 1-10, 1997.
- BERALDO, A. L.; AZZINI, A. ; GHAVAMI, K. ; PEREIRA, M.A. dos R. Bambu: Características e Aplicações. In: Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção. Editora da Unicamp, 2004. Campinas.333p.
- BERNDSSEN, Rodrigo S. Caracterização anatômica, física e mecânica de lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*). UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2008.

BERNDSSEN, Rodrigo Strzelecki et al. Resistência à flexão estática e à compressão paralela do bambu-Mossô (*Phyllostachys pubescens*). *Floresta*, v. 43, n. 3, p. 485-494, 2013.

BONGARDE, U. S.; SHINDE, V. D. Review on natural fiber reinforcement polymer composites. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, v. 3, n. 2, p. 431-436, 2014.

BRIEF, Lucintel. Opportunities in natural fiber composites. Lucintel LLC, Irving (TX), 2011.

BRITO, Flávia Maria Silva. Efeito da termorretrificação nas propriedades tecnológicas do bambu. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 7 Edição. Rio de Janeiro, LTC editora, 2008.

CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo taxonomy and habitat. In: *Bamboo*. Springer, Cham, 2015. p. 1-30.

CHATTERJI, R. N.; RAIZADA, M. B. Culm-sheaths as aid to identification of bamboos. *Indian Forester*, v. 89, n. 11, p. 744-758, 1963.

COLLA, Wandivaldi Antonio. Efeito do tratamento térmico nas características físicas e mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* (Munro). 2010. 111 f. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientação)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

COLEMAN J.D, Hills S. Reconsolidated wood product. US Patent 4232067 -1980.

COSTA, TMS. Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Shrad. como carvão vegetal. 2004. 74f. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências de Tecnologia Nuclear-Materiais) –Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

COX F.B, Geymayer HG. Expedient reinforcement for concrete for use in S. E. Asia. Monograph - 1969

CRUZ, M. L. S.; Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys aurea*: Comportamento à flambagem. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2002, 114p

CULZONI, R. A M. Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto. Rio de Janeiro, 1986. 134 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio.

DOS REIS PEREIRA, Marco Antonio; BERALDO, Antonio Ludovico. *Bambu de corpo e alma*. Canal6, 2007.

DU, Chun Gui; SONG, Jian Gang; CHEN, Yong Xing. The effect of applying methods of fire retardant on physical and mechanical properties of bamboo scrimber. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2014. p. 465-468.

DUFF C.H - Bamboo and its structural use. In: *The Engineering Society of China session 1940–41, Paper ICE*. Institute of Civil Engineers of Shanghai, pp 1–27 – 1941.

ESPINOSA J.C - Bending and compressive strengths of the common Philippine bamboo. *Philippine J Sci* 41(2):121–135 – 1930.

ESPELHO, Jean Claudio Chiozzini et al. *Tratamento químico de colmos de bambu pelo método de Boucherie modificado*. 2007.

FILGUEIRAS, T.S & GONÇALVES, A.P.S. A Checklist of the Basal Grasses and Bamboos in Brazil (Poaceae). *Bamboo Science & Culture. The journal of the American Bamboo Society*. Vol. 18. 2004.

GANAPATHY, P. M.; ZHU, H. M.; ZOOLAGUD, S. S.; TURCKE, D.; ESPILOY, Z. B. Bamboo panel boards – a state of the art review. *Technical Report n. 12*, p.1-119, 1999.

GARBINO, L. V.; GONÇALVES, MTT; PEREIRA, MAR. Métodos de ensaio para amostras de bambu laminado. *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, v. 8, 2002.

GHAVAMI, K.; HOMBEECK, R. V. Application of bamboo as a construction material: Part I—Mechanical properties and water repellent treatment of bamboo, Part II—Bamboo reinforced concrete beams. In: *Latin American Symposium on Rational Organization of Building Applied to Low Cost Housing*. São Paulo: IPTCIB, 1981.

GHAVAMI, K. Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering. In: *Symposium Materials for Low Income Housing*. 1989. p. 526-536.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo custo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 1, n. 1, p. 1-19, 1992.

GHAVAMI, Khosrow. Bambu: um material alternativo na engenharia. *Revista do Instituto de Engenharia*, n. 492, p. 23-27, 1992.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo custo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 1, n. 1, p. 1-19, 1992.

GHAVAMI, K.; BOZA, B. *Influência do Tratamento na Resistência do Bambu*. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Relatório interno, 1998. 25 p.

GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C.S. *Engineering Materials and Components with Plants*. Proceedings of the Construction and Environment Symposium. IPT CIB. São Paulo, Brasil, 2000. p. 33-38.

GHAVAMI, K e MARINHO, A. B. Determinação das propriedades dos bambus das espécies: Moso, Matake, Guadua angustifolia, Guadua tigoara e Dendrocalamus giganteus para utilização na engenharia. Publicação – RMNC Bambu 01/2001 do Departamento de engenharia civil da PUC-Rio. 2001. 53 p.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A.B. Propriedades Geométricas e Mecânicas de Colmos dos Bambus para Aplicações em Construções. Engenharia Agrícola, Jaboticabal-SP, v. 23, n.3 p.415-424, set/dez. 2003.

GLENN H.E - Bamboo reinforcement in portland concrete. Engineering Experiment Station, South Carolina, 4 – 1950.

GONG, Yingchun et al. Experimental study on tensile and compressive strength of bamboo scrimber. BioResources, v. 11, n. 3, p. 7334-7344, 2016.

GUAN, Ming Jie et al. Performance Evaluation of Bamboo Scrimber under Planner Machining. In: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, 2012. p. 101-106.

HIDALGO, O. [Comparative data on the use of bamboo and peach palm fiber as strengthening of concrete [Guadua angustifolia, Bactris gasipaes]].[Spanish]. Serie Informativa Secretaria de Agricultura y Fomento del Valle, 1978.

HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Manual de construcción con bambú. Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos LTDA-Editores, 1981.

HIDALGO LÓPEZ, O. H. Bamboo, the gift of the gods. Hidalgo Lopez editor, Bogota – Colombia, 2003. 553p.

HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Bambú; su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. 1974.

HUANG, Xingyan et al. Differences in physical–mechanical properties of bamboo scrimbers with response to bamboo maturing process. European journal of wood and wood products, p. 1-7, 2018.

ISO/TC165 N314 - International Organization For Standardization. Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo, 1999, 20 p.

ISO. International Standard ISO 22157-1: 2004 (E), Bamboo–determination of physical and mechanical properties–Part I: Requirements. 2004.

JAIN, S., KUMAR, R., JINDAL, U.C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. Journal of Material Science. Amsterdam, v. 27, n. 17, p. 4598-4604. 1992.

JANSSEN, Jules JA. The relationship between mechanical properties and the biological and chemical composition of bamboo. In: Bamboo production and utilization. Proceedings of the XVII IUFRO World Congress. 1981a. p. 6-17.

JANSSEN J.JA - Bamboo in building structures. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands - 1981b.

- JANSSEN, J. Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo. INBAR (The International Network on Bamboo and Rattan), p. 16-18, 1999.
- JANSSEN, Jules JA. Designing and building with bamboo. Netherlands: International Network for Bamboo and Rattan, 2000.
- JESUS, José Manoel Henriques de. Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- JIANGHUA X. Multi-Function Values and Classified Management in Bamboo Forest. Presentation on: 2007 Training Course on Bamboo Technology for Developing Countries at China National Bamboo Research Center, Hangzhou, 2007.
- JUDZIEWICS, E. J.; CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; STERN, M. J. American bamboos. Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press. 1999. 392p.
- KAI, Zheng; XUHE, C. Potential of bamboo-based panels serving as prefabricated construction materials. 2014.
- KAMRUZZAMAN, M. et al. Effects of age and height on physical and mechanical properties of bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*, p. 211-217, 2008.
- KARAMCHANDANI KP - Role of bamboo as a constructional material. In: Proceedings of a Symposium on Timber and Allied Products, Building Organisation of India, New Delhi, 18–22 May 1959, pp 430–435 – 1959.
- KISHEN J, GHOSH D.P, REHMAN M.A - Studies in moisture content, shrinkage, swelling and intersection point of mature *Dendrocalamus strictus* (male bamboo). *Indian For Rec Dehra Dun, India* 1(2):11–30 – 1958.
- KNIGHT, R.A.G. Adhesives for wood. London. Chapman & Hall. 1952.
- KUMAR S.; SHUKLA K. S.; DEV T.; DOBRIYAL P. B. Bamboo preservation techniques: a review. International Network for Bamboo and Rattan. Indian Council of Forestry Education. 1994. 30p.
- KUMAR, Anuj et al. Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties. *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 815-827, 2016.
- LATIF, A. M.; LIESE, W. Utilization of bamboo. Planting and utilization of bamboo in Peninsula Malaysia. FRIM research pamphlet, n. 118, p. 50-102, 1995.
- LEE, Andy WC; BAI, Xuesong; PERALTA, Perry N. Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grown in South Carolina. *Forest Products Journal*, v. 44, n. 9, p. 40, 1994

- LEE, A.W.C.; BAL, X. and PERALTA, P.N. Anatomical Features of Bamboo Internodes. 1996.
- LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: Bamboo research in Asia: proceedings of a workshop held in Singapore, 28-30 May 1980. IDRC, Ottawa, ON, CA, 1980.
- LIESE, W. Preservation of bamboos. In: Bamboo research in Asia: proceedings of a workshop held in Singapore, 28-30 May 1980. IDRC, Ottawa, ON, CA, 1980.
- LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. In: Bamboo Workshop Hangzhou. 1985. p. 196-207.
- LIESE, W. et al. Structure and functions of the nodes in bamboo. 1994.
- LIESE, W. The anatomy of bamboo culms. Beijing, Technical Report, International Network for Bamboo and Rattan, 203 p., 1998.
- LIESE, W. The Anatomy of Bamboo Culms. Technical Report. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing. Peoples Republic of China, 1998. 203p.
- LIESE, W. Preservation of a bamboo culm in relation to its structure. In: Memórias del Simposio Internacional Guadua 2004. Pereira, Colômbia, CD-ROM, p. 20-30. 2004.
- LIESE, Walter; KÖHL, Michael (Ed.). Bamboo: the plant and its uses. Springer, 2015.
- LIMA JR, H. C. et al. Características mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*: análise teórica e experimental. Sustainable construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials. João Pessoa: SNT, p. 394-406, 2000.
- LIMA, Douglas Mateus de. Bambu laminado colado (*Dendrocalamus giganteus*) aplicado à treliça plana tipo Howe e à viga retangular. 2013.
- LIMAYE LD - Strength of bamboo (*Dendrocalamus strictus*). Indian For 78:558-575 – 1952.
- LIN, W.C. The bamboos Thailand. Taiwan: Taiwan Forestry Research Institute, 1968, 52 p.
- LO, Tommy Y.; CUI, H. Z.; LEUNG, H. C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. Materials Letters, v. 58, n. 21, p. 2595-2598, 2004.
- MARA, Alan A. Technology of wood bonding, principle in practice. 1992.
- MARINELLI, Alessandra L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.
- MCLAUGHLIN EC - A note on the strength of Jamaica grown bamboo. Wood Fibre 11(2): 86-91 – 1979.
- MEYER HF, EKELUND B - Tests on the mechanical properties of bamboo. The Engineering Society of China, session 1922-1923 22(7):141-169 – 1923.



- MISKALO, Eugênio Polistchuk. Avaliação do potencial de utilização de bambu (*Dendrocalamus giganteus*) na produção de painéis de partículas orientadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2009.
- MOIZÉS, Fábio Alexandre. Painéis de bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo. 2007.
- MONTIEL, M.; SÁNCHEZ, E. Ultraestrutura de bambúes del gênero *Dendrocalamus* (Poaceae: Bambusoideae) cultivados en Costa Rica III: *Dendrocalamus giganteus*. Ver. Biol. Trop. 2006. v.54 (Supl.2):p.59-63.
- MURAD, J. R. L. As propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural do bambu *Guadua weberbaueri* do Acre. 2007. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NASCIMENTO, A. M. Estrutura do colmo e propriedades físicas do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* (Wall) Munro). 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 1990.
- NATIONAL MISSION ON BAMBOO APPLICATIONS, Technology, information, Forecasting and Assesment Coucil (TIFAC) Government of India, 2004. 56 p.
- NATIONAL MISSION ON BAMBOO APPLICATIONS – NMBA. Preservation of bamboo. New Delhi, Índia. 60f. 2006
- NAXIUM, Ma. Biodiversity and resources exploitation of Bamboo in China. Sustainable development of bamboo and Rattan sectors in tropical China. Sector proceedings, n. 6, 2001.
- NOCK, P.H.; Richter, H.G.; Burger, L.M. Tecnologia da madeira. Curitiba: UFPR, 1975. 216p.
- NOGUEIRA, C. L. Paineis de bambu laminado colado estrutural. 2008. 94f. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)-Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba.
- NOGUEIRA, Cláudia de Lima. Paineis de bambu laminado colado estrutural. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- NOMURA, T; TOMAZELLO FILHO M; AZZINI A. Production and utilization of bamboo in Brazil. In: XVII IUFRO WORD CONGRESS, Ljubjana, Iugoslávia, p.61-69, 1986.
- OTA M - Studies on the properties of bamboo stem (part 10). On the relation between the tensile strength parallel to the grain and the moisture content of splint bamboo. Bull Kyushu Univ For 23:155–164 – 1950.
- OTA M - Studies on the properties of bamboo stem. Part 9: On the relation between compression strength parallel to grain and moisture content of bamboo splint. Bulletin Kyushu University Forestry, 22: 87–108 – 1953.

PEREIRA, Marco A. R.; BERALDO, Antonio L. Bambu de corpo e alma. 1. ed. Bauru, SP: Canal6, 2008.

PEREIRA, Marco Antonio dos Reis. Projeto Bambu: Introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações. 2012.

PRAWIROHATMODJO, Soenardi. Comparative Strength of Green and Air-dry Bamboo. In: International Bamboo Workshop held in Cochin, India from 14-18 November 1988. 1990. p. 218.

PRIM, Joeli Aparecida; PIOVESAN, Angela Zamboni. Estudo sobre as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil. Unoesc & Ciência-ACET, v. 2, n. 1, p. 77-86, 2011.

RIVERO, Lourdes Abbade et al. Laminado colado e contraplacado de bambu. 2003

ROSA, Rafael Amorim et al. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), v. 5, n. 1, p. 10-12953/2177-6830. v05n01a07, 2014.

SILVA, RM de C. O Bambu no Brasil e no mundo. 2005.  
Schroder S (2011) Bamboo identification: bamboo stem anatomy.  
<http://www.guaduabamboo.com/identification/bamboo-stem-anatomy>. Acesso em 27/02/2019.

SEKHAR AC, RAWAT BS - Strength test on bamboo: *Bambusa nutans*. Indian For Leaflet (147) – 1957.

SEKHAR AC, BHARTARI RK - A note on strength of dry bamboo (*Dendrocalamus strictus*) from Madhya Pradesh. Indian For 99:611–613 – 1961.

SEKHAR AC, RAWAT BS, BHARTARI RK - Strength of bamboo: *Bambusa nutans*. Indian For, 67–73 – 1962.

SEKHAR AC, RAWAT MS - Some studies on the shrinkage of *Bambusa nutans*. Indian For Dehra Dun 91:182–188 – 1964.

SHARMA A (1990) Bamboo reinforced concrete beams. In: Proceedings of the IABSE Symposium, Brussels, pp 677–682

SHARMA, Bhavna; GATÓO, Ana; RAMAGE, Michael H. Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo. Construction and Building Materials, v. 83, p. 95-101, 2015.

SHANGGUAN, Weiwei et al. 2D model of strength parameters for bamboo scrimber. BioResources, v. 9, n. 4, p. 7073-7085, 2014.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Influências de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica de madeira de *Eucalyptus* spp. Trabalhos Apresentados, 1991.

SINT, K. M.; HAPLA, F.; MYINT, C. C. Investigation on physical and mechanical properties of some Myanmar bamboo species. *J Bamb Rattan*, v. 7, n. 3&4, p. 183-192, 2008.

SOBRAL FILHO, Manoel. Adesão e adesivos para madeira. IBDF, 1982.

SOEPRAYITNO T, TOBING L, WIDJAJA EA - Why the Sundanese of west java prefer slop-inhabiting *Gigantochloa pseudoarundinacea* to those growing in the valley. In: *Proceedings of the International Bamboo Workshop, Cochin, India, 14-18 November 1988*, pp 215-217 - 1988.

SOTELA, J. Propiedades físicas y mecánicas de la *Gaudua* de Costa Rica. Seminario Centroamericano Usos del Bambu, Pocora, Limon, Costa Rica - 1992.

SOUZA, A. M. Os Diversos Usos do Bambu na Construção Civil. 2014. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

SOUZA, M. H.; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A.; SOUZA, M. R. Madeiras tropicais brasileiras. 2ed. Brasília: Edições IBAMA, 2002. 152p.

STANGERLIN, Diego Martins et al. Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoensis* em duas condições de umidade. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 1, n. 2, p. 10-12953/2177-6830. v01n02a06, 2010.

SUHIRMAN, K. T.; KHUSNIATI, Tatick. Laboratory study on the effect of mud-submersion treatment on the durability of two bamboo and one wood species against fungi *Mater. Org.(Berl.)*, v. 22, n. 4, p. 289-296, 1987.

SUZUKI Y - Distribution of specific gravity and bending strength along the culm. *Bull Tokyo Univ For* 36:188 - 1948.

TARGA, Gabriel Norcia et al. Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica. 2011.

TAYLOR, David et al. The biomechanics of bamboo: investigating the role of the nodes. *Wood science and technology*, v. 49, n. 2, p. 345-357, 2015.

TEODORO AL - A preliminary study of the transverse strength of structural bamboos. *Agric Eng* 6(11):266 - 1925.

TOMALANG, F.N.; LOPEZ A.R.; SEMARA, J.A.; CASIN, R.F.; ESPILOY, Z.B.; Properties and utilization of Philippine erect bamboo. In *International Seminar on Bamboo Research in Asia held in Singapore*, proceedings edited by G.Lessard and A. Chouinard. Singapore: International Development Research Center and the International Union of Forestry Research Organization. 1980.

TROJANI F - Passerelles en bambous. *Bull. Econ. Indo-China, London*, pp 369B-373B - 1930.

VENTANIA, L. Bambu e suas mil e uma utilidades. Artigo. Revista Bem Público, Curitiba, n.8, ano 2, p.46-50, Junho- 2008.

XIU-XIN L, Liu-Keqing W - A study on the physico-mechanical properties of culm wood of *Phyllostachys glauca* of Shandog. *J Bamboo Res* 4(2) – 1985.

YU WJ - Development of bamboo-fiber based composites. *China Wood Ind* 25:6–8 – 2011.

YU WJ, YU YL - Development and prospect of wood and bamboo scrimber industry in China. *China Wood Ind* 27(1):5–8 2013.

YU, Yanglun et al. Fabrication, material properties, and application of bamboo scrimber. *Wood science and technology*, v. 49, n. 1, p. 83-98, 2015.

YU, Yanglun et al. Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 1032-1039, 2017.

ZENID, Geraldo José et al. Madeira: uso sustentável na construção civil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, v. 2, n. 1, p. 1-103, 2009.

ZHANG FW, Yu WJ (2008) Research status and prospect of wood/ bamboo reconstituted structural material. *China For Prod Ind* 35:7–12

ZHANG JZ, REN HQ, ZHONG Y, ZHAO RJ - Analysis of compressive and tensile mechanical properties of bamboo scrimber. *J Nanjing For Univ* 36:107–111 -2012.

ZHANG, Ya Mei; YU, Yang Lun; YU, Wen Ji. Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of *Phyllostachys pubescen* bamboo. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 71, n. 1, p. 61-67, 2013.

ZHANG, Qisheng et al. Bamboo scrimber and manufacturing method thereof. U.S. Patent n. 8,709,578, 29 abr. 2014.

ZHONG, Yong; REN, Hai-Qing; JIANG, Ze-Hui. Effects of temperature on the compressive strength parallel to the grain of bamboo scrimbe. *Materials*, v. 9, n. 6, p. 436, 2016.

## APÊNDICE A – Ensaio de Umidade

### Ensaio de Umidade

CP	Massa inicial [g]	Dimensões [mm]		
		Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	30,326	19,7	29,89	50,41
75-2	32,185	20,28	29,93	50,25
75-3	27,894	19,55	30	50,29
77-1	28,855	20,49	29,98	50,3
77-2	32,157	20,2	30,22	50,41
77-3	30,567	19,93	30,27	50,67

CP	Secagem		
	Após 24h Massa [g]	Após 48h Massa [g]	Após 72h Massa [g]
75-1	29,449	29,383	29,355
75-2	31,522	31,45	31,421
75-3	27,151	27,081	27,055
77-1	27,714	27,651	27,625
77-2	31,483	31,416	31,385
77-3	29,919	29,85	29,816

### Após 96h

#### Massa Seca [g]

29,345  
31,41  
27,045  
27,617  
31,375  
29,803

Tabela 22 - Dados do ensaio de Umidade

Teor de umidade U	CP	U (%)
$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$	75-1	3,343
	75-2	2,467
	75-3	3,139
	77-1	4,483
	77-2	2,492
	77-3	2,564
	Média	3,081
Desvio Padrão	0,778	

Fonte: autor, 2019.

## APÊNDICE B - Ensaio de Densidade

CP	Massa Seca [g]	Dimensões Saturado [mm]			Volume Saturado [mm <sup>3</sup> ]
		Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)	
75-1	29,345	20,73	31,02	50,53	32493,04364
75-2	31,41	21,82	31,3	50,49	34482,95334
75-3	27,045	20,57	31,01	50,48	32199,96534
77-1	27,617	21,17	30,77	50,5	32895,74545
77-2	31,375	21,9	31,23	50,44	34497,78228
77-3	29,803	20,9	31,54	50,76	33460,28136

Tabela 23 - Dados do ensaio de densidade básica.

Densidade Básica		CP	$\rho$ [g/mm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho = \text{massa seca} / \text{volume saturado}$		75-1	0,000903116	0,903116382
		75-2	0,000910885	0,910884856
		75-3	0,000839908	0,839907736
		77-1	0,000839531	0,839531059
		77-2	0,000909479	0,909478753
		77-3	0,000890698	0,89069783
		Média	0,882269436	
		Desvio		
		Padrão	0,033722113	

Fonte: O autor, 2019.

CP	Massa inicial [g]	Dimensões [mm]			Volume (12% umidade)
		Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)	[mm <sup>3</sup> ]
75-1	30,326	19,7	29,89	50,41	29683,07153
75-2	32,185	20,28	29,93	50,25	30500,76510
75-3	27,894	19,55	30	50,29	29495,08500
77-1	28,855	20,49	29,98	50,3	30898,79706
77-2	32,157	20,2	30,22	50,41	30772,48204
77-3	30,567	19,93	30,27	50,67	30568,25334

Tabela 24 - Dados do ensaio de densidade aparente

Densidade Aparente	CP	$\rho$ [g/mm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho = \text{Massa (12\% umidade)} / \text{volume (12\% umidade)}$	75-1	0,00102166	1,021659769
	75-2	0,001055219	1,055219431
	75-3	0,000945717	0,945716888
	77-1	0,000933855	0,933855125
	77-2	0,001044992	1,04499208
	77-3	0,000999959	0,999958999
Média			1,000233715
Desvio Padrão			0,050722959

Fonte: O autor, 2019.



### APÊNDICE C - Ensaio de Estabilidade Dimensional

CP	V(12% umidade) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,46	30,05	50,22
75-2	20,26	30,18	50,45
75-3	20,24	30,26	50,24
77-1	19,95	30,07	50,34
77-2	20,11	30,21	50,32
77-3	20,03	29,91	50,23

#### Após 24h de secagem

CP	V(24h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,44	29,91	50,2
75-2	20,14	30,06	50,43
75-3	20,11	30,1	50,27
77-1	19,91	29,96	50,3
77-2	20	30,12	50,32
77-3	19,89	29,71	50,2

#### Após 48h de secagem

CP	V(48h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,5	29,89	50,28
75-2	20,16	30,05	50,41
75-3	20,36	30,08	50,27
77-1	19,89	29,96	50,34
77-2	19,96	30,09	50,36
77-3	19,89	29,7	50,3

#### Após 72h de secagem

CP	V(72h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,49	29,86	50,29
75-2	20,16	30,09	50,44
75-3	20,08	30,11	50,28
77-1	19,91	30	50,38
77-2	20	30,19	50,34
77-3	19,99	29,78	50,32

## Após 96h de secagem = Lseco

CP	V(96h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,5	29,85	50,28
75-2	20,15	30,08	50,45
75-3	20,07	30,11	50,27
77-1	19,92	29,99	50,38
77-2	19,99	30,18	50,35
77-3	19,98	29,79	50,31

## Após reumidificação

CP	V(12% umidade) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	20,56	29,91	50,45
75-2	20,13	30,11	50,47
75-3	20,12	30,18	50,32
77-1	19,92	29,98	50,39
77-2	19,98	30,16	50,34
77-3	20	29,96	50,31

## Após 24h de imersão em água

CP	V(24h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	21	30,41	50,44
75-2	20,74	30,53	50,54
75-3	20,56	30,57	50,35
77-1	21,08	30,67	50,46
77-2	21,15	30,72	50,37
77-3	20,86	30,34	50,36

## Após 48h de imersão em água

CP	V(48h) [mm <sup>3</sup> ]		
	Espessura (r)	Largura (t)	Comprimento (l)
75-1	21,15	30,49	50,45
75-2	21,2	30,78	50,53
75-3	20,84	30,81	50,36
77-1	21,36	30,88	50,47
77-2	21,43	30,92	50,46
77-3	21,14	30,76	50,38

## Após 72h de imersão em água

CP	Espessura (r)	V(72h) [mm <sup>3</sup> ]		
		Largura (t)	Comprimento (l)	
75-1	21,17	30,55	50,47	
75-2	21,37	30,82	50,55	
75-3	20,93	30,94	50,37	
77-1	21,62	31,08	50,47	
77-2	21,67	31,12	50,45	
77-3	21,28	31,02	50,39	

## Após 96h de imersão em água = Lsat

CP	Espessura (r)	V(96h) [mm <sup>3</sup> ]		
		Largura (t)	Comprimento (l)	
75-1	21,18	30,56	50,47	
75-2	21,47	30,88	50,56	
75-3	20,93	31,01	50,38	
77-1	21,61	31,18	50,47	
77-2	21,67	31,24	50,46	
77-3	21,35	31,18	50,4	

Tabela 25 - Dados do ensaio de estabilidade dimensional.

CP	Estabilidade Dimensional					
	$\epsilon_{r,1}$ (%)	Retração			Inchamento	
		$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	$\epsilon_{i,1}$ (%)	$\epsilon_{i,2}$ (%)	$\epsilon_{i,3}$ (%)
75-1	3,211	2,323	0,376	3,317	2,379	0,378
75-2	6,148	2,591	0,218	6,551	2,660	0,218
75-3	4,109	2,902	0,218	4,285	2,989	0,219
77-1	7,820	3,817	0,178	8,484	3,968	0,179
77-2	7,753	3,393	0,218	8,404	3,512	0,218
77-3	6,417	4,458	0,179	6,857	4,666	0,179
Média	5,910	3,247	0,231	6,316	3,362	0,232
Desvio Padrão	1,892	0,802	0,074	2,123	0,859	0,074

fonte: autor, 2019.

Tabela 26 - Dados do cálculo de variação volumétrica.

Variação Volumétrica				
CP	Vsat [mm <sup>3</sup> ]	Vseco [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$	T/R
75-1	32667,25258	30767,589	6,17%	0,723639128
75-2	33520,95642	30578,3504	9,62%	0,421376982
75-3	32698,59993	30378,54808	7,64%	0,706336291
77-1	34006,67591	30097,0523	12,99%	0,488021452
77-2	34159,94657	30376,06437	12,46%	0,437667673
77-3	33550,9272	29944,7233	12,04%	0,694729918
Média	33434,05977	30357,05458	10,15%	0,578628574
Desvio Padrão	633,2305029	301,977469	2,81%	14,40%

Fonte: O autor, 2019.

## APÊNDICE D - Ensaio de Compressão paralela às fibras

Tabela 27 - Dados do ensaio de compressão paralela às fibras (continua)

### Compressão paralelo às fibras

Palavra-chave		Nome do produto	Compressão
Nome do arquivo do ensaio	Teste compressão 4.xtak	Nome do arquivo do método	Compressão dois ciclos.xmak
Data do relatório	7/8/2019	Data do ensaio	7/8/2019
Temperatura	18°C	Umidade:	50
Máquina de ensaios	AG-X/MST-X/X-Type	No. da máquina	I333256B0284
Capacidade	100kN	Modo de ensaio	Controle
Tipo de ensaio	Compressão	Velocidade	10MPa/min
Placa	Placa	Lote No:	1
Sub-Lote No:	6		

Nome Parâmetros Unidade	Elástico Tensão 11.74 – 58.7 MPa GPa	Máx_Tensão Cálculo de áreas completas MPa	Máx_Deformação Cálculo de áreas completas %	Máx_Força Cálculo de áreas completas kN
1_1	10.5839	99.7837	3.26361	39.9135
1_2	11.6860	112.360	3.01865	44.9442
1_3	10.0199	107.425	3.82944	42.9701
1_4	10.2730	112.521	3.35087	45.0083
1_5	10.0841	125.410	3.32021	50.1638
1_6	11.1490	102.458	3.21938	40.9830
Média	10.6327	109.993	3.33369	43.9972
DesvioPadrão	0.66095	9.13541	0.26962	3.65412
Faixa	1.66610	25.6263	0.81079	10.2503

Nome Parâmetros Unidade	CapturarDados1_Fo rça kN	CapturarDados1_Te nsão MPa	CapturarDados1_De slocamento mm	CapturarDados1_De formação %
1_1	23.4736	58.6840	0.43981	0.73302
1_2	23.4748	58.6870	0.38748	0.64580
1_3	23.4730	58.6825	0.60569	1.00948
1_4	23.4725	58.6812	0.54971	0.91618
1_5	23.4740	58.6850	0.50935	0.84892
1_6	23.4724	58.6810	0.51867	0.86444
Média	23.4734	58.6835	0.50179	0.83631
DesvioPadrão	0.00093	0.00234	0.07790	0.12983
Faixa	0.00240	0.00600	0.21821	0.36368

Nome Parâmetros Unidade	CapturarDados1_Te mpo seg	CapturarDados2_Fo rça kN	CapturarDados2_Te nsão MPa	CapturarDados3_Fo rça kN
1_1	354.100	23.4504	58.6259	4.67876
1_2	352.750	23.4701	58.6752	4.67706
1_3	353.650	23.4640	58.6600	4.67807
1_4	353.750	23.4646	58.6616	4.67811
1_5	353.900	23.4686	58.6715	4.67957
1_6	354.600	23.4650	58.6625	4.67990
Média	353.792	23.4638	58.6595	4.67858
DesvioPadrão	0.61108	0.00699	0.01751	0.00105
Faixa	1.85001	0.01970	0.04930	0.00284

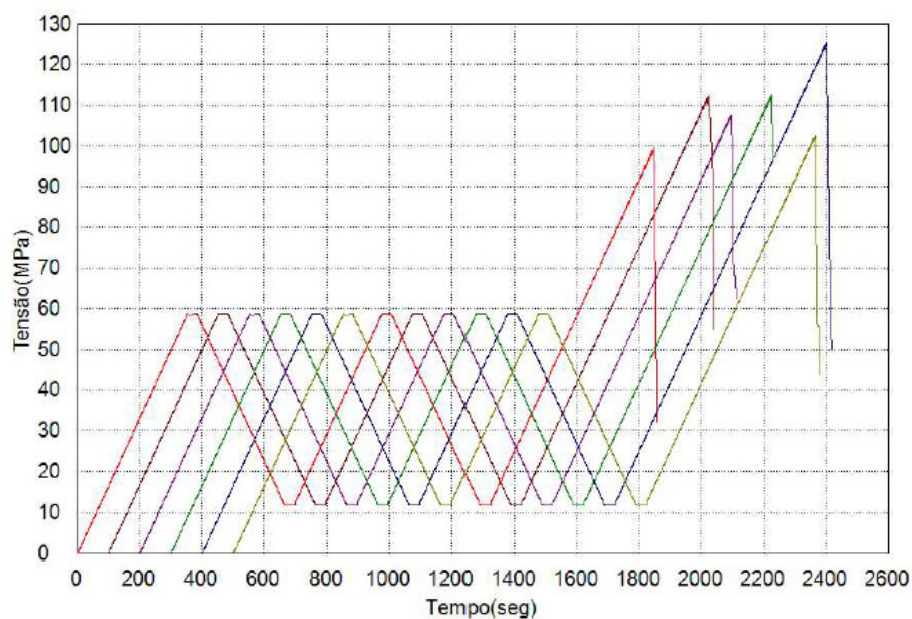
Tabela 28 - Dados do ensaio de compressão paralela às fibras (conclusão)

Nome Parâmetros Unidade	CapturarDados2_Te nsão MPa	CapturarDados3_Fo rça kN	CapturarDados3_Te nsão MPa	CapturarDados3_De formação %
1_1	58.6900	4.67741	11.6935	0.36465
1_2	58.6897	4.67690	11.6923	0.28649
1_3	58.6788	4.67911	11.6978	0.62910
1_4	58.6944	4.67874	11.6969	0.53913
1_5	58.6897	4.67997	11.6999	0.46743
1_6	58.6786	4.67933	11.6983	0.50684
Média	58.6869	4.67858	11.6965	0.46561
DesvioPadrão	0.00657	0.00118	0.00294	0.12338
Faixa	0.01580	0.00307	0.00760	0.34261

Nome Parâmetros Unidade	CapturarDados4_Fo rça kN	CapturarDados4_Te nsão MPa
1_1	4.68078	11.7019
1_2	4.67800	11.6950
1_3	4.68138	11.7035
1_4	4.68400	11.7100
1_5	4.68478	11.7120
1_6	4.68470	11.7118
Média	4.68227	11.7057
DesvioPadrão	0.00270	0.00677
Faixa	0.00678	0.01700

fonte: autor, 2019.

Figura 77 - Gráfico tensão x tempo do ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: autor, 2019.

## APÊNDICE E - Ensaio de Tração paralela às fibras

### Compósito de Bambu

Tabela 29 - Dados do ensaio de tração paralela às fibras.

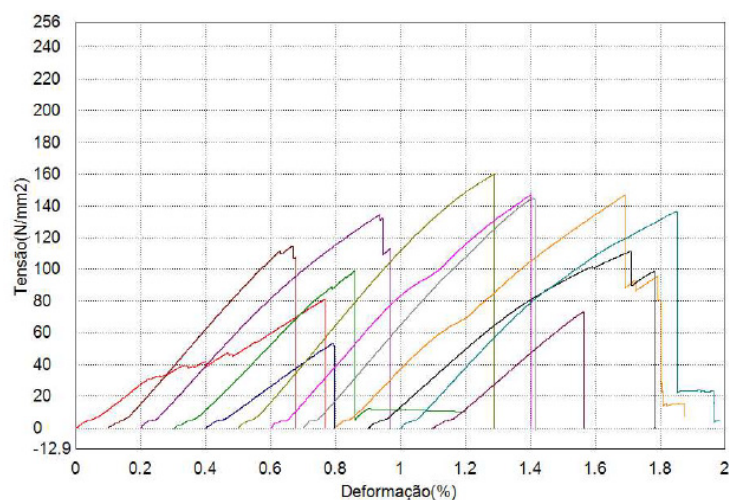
Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	tracao 2_20190712_1338.xtak	Nome do arquivo do método	teste.xmak
Operador	Ricardo Hudson	Data do relatório	7/12/2019
Data do ensaio	7/12/2019	Temperatura	22°C
Umidade:	50%	Modo de ensaio	Simplex
Tipo de ensaio	Tração	Velocidade	0,6mm/min
Placa	Placa	Lote No:	1
Sub-Lote No:	12		

Nome	Elástico	Máx. Tensão	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deformação
Parâmetros	Tensão 10 – 20	Cálculo de áreas	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	completas	N/mm2	%
	N/mm2	N/mm2	N/mm2	
1_1	15671.1	81.1055	81.1055	0.76811
1_2	22626.1	114.461	111.964	0.57106
1_3	21870.7	134.300	131.471	0.74611
1_4	19696.9	99.1945	99.1945	0.56133
1_5	14815.3	53.4178	51.5911	0.39611
1_6	22801.2	160.117	160.117	0.78836
1_7	22981.3	147.202	147.202	0.80361
1_8	22713.0	144.768	144.029	0.71444
1_9	20520.3	146.931	146.931	0.89279
1_10	18223.7	111.296	111.296	0.81279
1_11	21714.6	136.478	136.083	0.85378
1_12	17420.9	73.2720	73.2720	0.46532
Média	20087.9	116.879	116.188	0.69782
Desvio Padrão	2909.68	33.9999	34.1349	0.16019

Fonte: autor, 2019.

Figura 78 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração paralela às fibras.



Fonte: autor, 2019.

## Madeira Angelim

Tabela 30 - Dados do ensaio de tração paralela às fibras.



MADEIRA  
ANGELIM

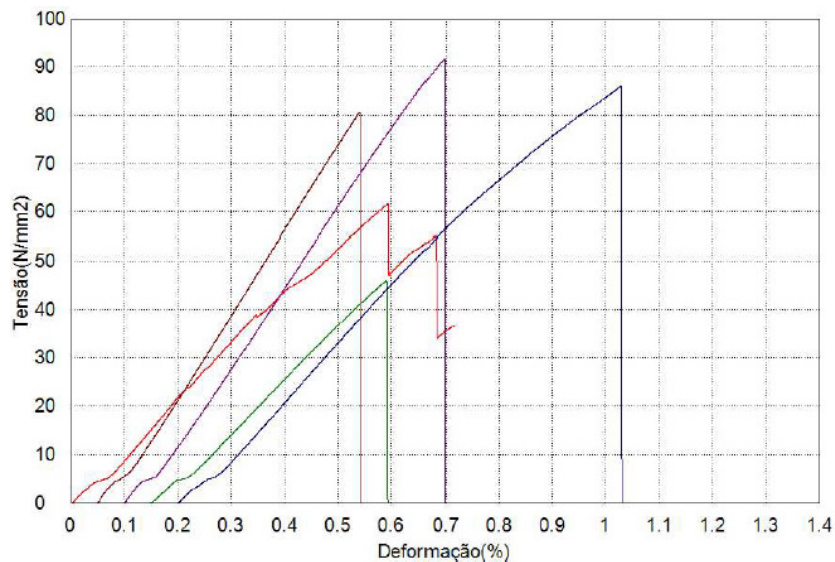


Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	MADEIRA ANGELIM_20190712_142 5.xtak	Nome do arquivo do método	teste.xmak
Operador	Ricardo Hudson	Data do relatório	7/12/2019
Data do ensaio	7/12/2019	Temperatura	22°C
Umidade:	50%	Modo de ensaio	Simplex
Tipo de ensaio	Tração	Velocidade	0.6mm/min
Placa	Placa	Lote No:	1
Sub-Lote No:	5		

Nome	Elástico	Máx. Tensão	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deformação
Parâmetros	Tensão 10 - 20	Cálculo de áreas	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	completas	N/mm2	%
	N/mm2	N/mm2	N/mm2	%
1_1	13133.8	61.6692	61.6692	0.59451
1_2	16971.1	80.6369	80.6369	0.49146
1_3	15736.5	91.6625	91.6527	0.59939
1_4	11474.2	45.9505	45.6217	0.44306
1_5	12324.1	86.0362	86.0362	0.82967
Média	13927.9	73.1911	73.1233	0.59162
Desvio Padrão	2332.14	18.9502	19.0661	0.14903

Fonte: autor, 2019.

Figura 79 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração paralela às fibras.





Fonte: autor, 2019.



## APÊNDICE F - Ensaio de flexão

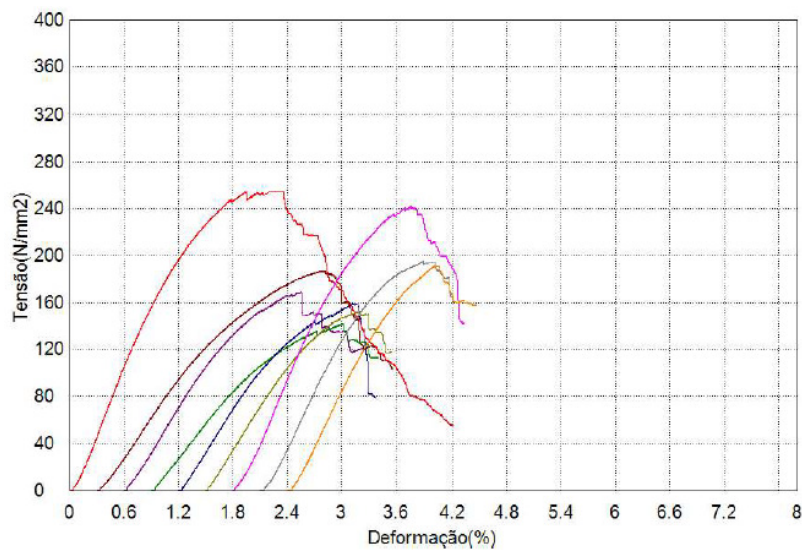
Tabela 31 - Dados do ensaio de flexão estática.

		Flexão			
Palavra-chave		Nome do produto			
Nome do arquivo do ensaio	flexão 3 pontos_20190709_0921.xtak	Nome do arquivo do método			
Operador	Ricardo Hudson	Data do relatório	7/9/2019		
Data do ensaio	7/9/2019	Temperatura	22°C		
Umidade:	50%	Modo de ensaio	Simples		
Tipo de ensaio	Dobr.3ptos	Velocidade	2mm/min		
Placa	Placa	Lote No:	1		
Sub-Lote No:	9				

Nome Parâmetros	YS1_Tensão 0.2 % Unidade N/mm2	Máx.Tensão Cálculo de áreas completas N/mm2	Elástico Tensão 20 - 40 N/mm2
1_1	220.547	254.787	18867.4
1_2	150.555	187.016	11050.5
1_3	148.123	168.772	12596.8
1_4	118.753	141.769	9845.36
1_5	133.231	159.168	12290.2
1_6	139.449	152.894	12379.7
1_7	232.870	242.389	15939.9
1_8	180.259	195.272	15406.2
1_9	178.512	191.215	15556.5
Média	166.922	188.142	13770.3
DesvioPadrão	39.3198	38.8159	2847.33

Fonte: autor, 2019.

Figura 80 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de flexão.



Fonte: autor, 2019.