UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

CARACTERIZAÇÃO DO BAMBU LAMINADO COLADO PARA USO ESTRUTURAL

Mônica Azevedo Smits

TESE DE DOUTORADO

Belo Horizonte
2018

Mônica Azevedo Smits

CARACTERIZAÇÃO DO BAMBU LAMINADO COLADO PARA USO ESTRUTURAL

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Prof. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

2018

Smits, Mônica Azevedo.
S665c Caracterização do bambu laminado colado para uso estrutural [manuscrito] / Mônica Azevedo Smits. - 2018.
xv, 147 f., enc.: il.

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 138-147.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Materiais laminados - Teses. 3. Adesivos - Teses. 4. Aspereza de superfície - Teses. 5. Testes não-destrutivos - Teses. 6. Bambu - Teses. I. Mantilla Carrasco, Edgar Vladimiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

À minha mãe coruja, todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, pela receptividade, orientação, paciência, apoio incondicional, confiança e por compartilhar seu conhecimento.

Ao Prof. Luis Eustáquio Moreira, pela motivação, incentivo ao estudo do bambu na engenharia e por me fortalecer.

Ao Prof. Antônio Ludovico Beraldo, que sempre esteve presente e apoiou meu trabalho.

Ao suporte contínuo dado pelo Afonso e Geraldo dos laboratórios LAEES, LACAF e LACAM, com sua ajuda e apoio na preparação e execução dos ensaios.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À minha mãe Francina, pela vida.

À Lulu e Fons por serem meu norte, sempre.

Ao incentivo e carinho da minha querida irmã Fátima.

À Andrea Bazzoli e à Cristina Drumond, que me indicaram o caminho.

Aos queridos amigos, irmãos de alma e coração, que se envolveram e contribuíram para a realização deste desafio: Borges, Deffarges, Firmo, Jouyeux, Lisboa, Menezes, Nunes e Sagazio.

Aos amigos companheiros desta tão intensa caminhada, Vinnicius, Ana, Cezar, Raquel, Rafaella e Roze e a todas as pessoas que colaboraram para a realização desta pesquisa.

Vencedor não é aquele que vence, mas aquele que nunca pára de lutar

(Autor desconhecido)

RESUMO

O bambu se apresenta bastante promissor como um material orgânico, possibilitando reduzir o impacto ambiental e trazendo conforto térmico para a construção. A sua desconstrução em lâminas traz flexibilidade de uso, engenheirando o material. Foi estudada a influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu; a influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu; as propriedades físicas e mecânicas em temperatura ambiente do Bambu Laminado Colado (BLC) para definir a matriz de constantes elásticas, considerando-o um material ortotrópico; e as propriedades mecânicas em temperatura ambiente e em altas temperaturas. Buscou-se, então, caracterizar o BLC, avaliando a interface do bambu com o adesivo, para a produção de um material estrutural, por meio Ensaios Destrutivo e Não Destrutivos (END) sob temperatura ambiente e sob alta temperatura. Foram adotados o adesivo termo endurecedor bicomponente resorcinol formaldeído e o bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*. Primeiramente foi avaliada a melhor pressão de colagem, com o resultado da melhor ligação, foram avaliados a absorção do adesivo, a resistência e a tensão de cisalhamento de ruptura na conexão. Para isso, foram montados Corpos de Prova (CP), aplicando-se o mesmo adesivo com prensagens diferentes. Em seguida, foi avaliada a rugosidade na superfície de colagem dos CPs. As lâminas foram submetidas a tratamento com lixas e ao corte na serra. Como terceiro objetivo, procedeu-se à caracterização física do bambu sendo investigados a densidade, a umidade, a retração e o fator anisotrópico das amostras e em seguida foi estudada a caracterização mecânica do bambu e a do BLC, inicialmente por meio de ensaio destrutivo de compressão, e posteriormente através de ensaios não destrutivos (END) de ultrassom e de excitação de ondas. Com os resultados obtidos foi possível obter a matriz de flexibilidade do BLC. Como último objetivo foram pesquisadas as propriedades mecânicas do BLC sob alta temperatura. A pressão de colagem escolhida a partir do primeiro objetivo foi de 2,5 MPa; devido ao custo benefício, foi adotada a rugosidade da superfície cortada na serra comum, que ofereceu uma boa resistência na ligação. Entretanto o maior desempenho do BLC foi obtido com tratamento superficial das lâminas utilizando lixa 220, sendo conferido um ganho de 50 % na tensão de cisalhamento. Para os ensaios submetidos a alta temperatura, foi conferido um acréscimo mínimo de 20 % e máximo de 50 %, no módulo elástico dos CPs. Os resultados dos ensaios não destrutivos se apresentaram bem similares aos ensaios destrutivos comprovando a possibilidade de uso de um método mais simples, barato e eficiente. Foram utilizados os parâmetros da madeira para avaliação do BLC. Os ensaios experimentais e as metodologias aplicadas para coletar os dados seguem como referência as prescrições da International Standard ISO 22157-1, EUROCODE e ABNT NBR7190: 1997. Tal avaliação busca ampliar os estudos do BLC para estrutura, verificando seu potencial como um novo sistema de construção, abrindo novas possibilidades de uso. Ele oferece um cenário bastante inovador, como parâmetro para engenheiros e arquitetos, fazendo uso de materiais naturais, configurando assim uma importante contribuição ao desenvolvimento sustentável, influindo ainda na redução do impacto ambiental.

Palavras-chave: Laminado. Adesivo. Rugosidade. Fator anisotrópico. END.

ABSTRACT

Bamboo presents itself as a promising organic material, which allows reducing the environmental impact and brings thermal comfort to construction. Its deconstruction into veneers brings usage flexibility, which transforms the bamboo into a engineering material. It was studied the influence of the gluing pressure on the shear strength for the bamboo-bamboo connection; the influence of the roughness on the gluing surface for the bamboo-bamboo connection; the physical and mechanical properties at room temperature of the Glued Laminated Bamboo (GLB) to define the elastic constant matrix, considering it as orthotropic material; and the mechanical properties at high temperature for destructive and non-destructive tests. This project sought, thus, to detail the GLB characteristics for structural use, assessing the bamboo interface with the adhesive, as to produce a structural material, through destructive and non-destructive tests at room temperature and high temperature. It was adopted the thermal hardener bicomponent resorcinol-formaldehyde adhesive and the *Phyllostachys pubescens* bamboo species. Firstly it was evaluated the best gluing pressure and, with these results, it was analysed the adhesive absorption, resistance and the shear strength tension on the connection breakup. To this end, some specimen were created applying the same adhesive with different crushings. Following that, it was evaluated the roughness on the gluing surface of these specimen. The veneers were submitted to sandpaper treatment and to cutting on a saw. As a third objective, it was detailed the physical characteristics of the bamboo, investigating density, moisture, retraction and the anisotropic factor of the specimens and then it was studied the mechanical characteristics of the bamboo and the GLB, firstly with compression destructive tests and, secondly through ultrasound and waves excitement non-destructive tests. As a last objective it was searched the GLB mechanical properties at high temperature. The chosen gluing pressure stemmed from the first objective was 2,5 MPa; due to cost-benefits, it was adopted the roughness of the surface cut by a common saw, it offered a good connection resistance. However, the best GLB performance was obtained through veneers superficial treatment using a 220 sandpaper, it was verified a 50 % gain on shear strength. As for the high temperature tests, it was verified a minimum 20 % and a maximum 50 % gain on the elastic modulus. The non-destructive test results presented themselves very similar to the destructive test results, which prove the usage possibilities for a simpler, cheaper and more efficient method. It was utilized the wood parameters to evaluate the GLB. The tests e the used methodologies to collect data followed the International Standard ISO 22157-1, EUROCODE and ABNT NBR7190: 1997 prescriptions. Such evaluation seeks to broaden the studies about GLB as a structure, verifying its potential as a new building system, opening new ways to use it. It brings an innovative scenario, as a parameter for engineers and architects, using natural materials, thus making an important contribution to sustainable development, also influencing the reduction of environmental impact.

Key-words: Laminated. Adhesive. Roughness. Anisotropic factor. Specimen.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 | (a) e (b) Piso em Bambu laminado colado, CBRC 19
Figura 1.2 | (a) e (b) Seção transversal (a) de árvore; (b) de bambu 21

Capítulo 3

Figura 3.1 | Estoque de bambus 51
Figura 3.2 | Combinação dos CPs e esquema do conjunto 52
Figura 3.3 | Corte radial do bambu, desdobramento 53
Figura 3.4 | Sequência de montagem dos CPs de pressão de colagem 53
Figura 3.5 | Lote de CPs prensados 54
Figura 3.6 | Rótula Universal e Medidores de deslocameto 55
Figura 3.7 | Sistema completo montado conectado ao SAD 55
Figura 3.8 | Correção na dimensão do CP 56
Figura 3.9 | Módulo de deslizamento 57
Figura 3.10 | Módulo de deslizamento específico 58
Figura 3.11 | Gabarito e sistema de corrediça para lixar as amostras 61
Figura 3.12 | Confecção das amostras da rugosidade 62
Figura 3.13 | Aparelho Taylor Hobson precision 63
Figura 3.14 | Seção da parede do bambu 64
Figura 3.15 | Esquema de corte dos CPs 65
Figura 3.16 | Direções principais do CP 66
Figura 3.17 | Estufa: vista externa e vista interna 67
Figura 3.18 | Dissecador e medição dos CPs 68
Figura 3.19 | Esquema de deslocamentos em um MD 71
Figura 3.20 | Roseta trevo 71
Figura 3.21 | Esquema de carga do CP-I solicitado à compressão 71
Figura 3.22 | Posição dos 6 medidores de deslocamento 73
Figura 3.23 | Direção de retirada dos prismas de BLC 74
Figura 3.24 | Sequência do preparo do BLC prismatico 78
Figura 3.25 | Confecção dos CPs prismáticos 79

Figura 3.26 | Esquema de retirada dos CPs prismáticos a 45º 79
Figura 3.27 | Cubo prensado 80
Figura 3.28 | CPs de BLC primático 80
Figura 3.29 | CP com espera para receber o medidor de deslocamento 81
Figura 3.30 | CP instrumentado na máquina EMIC 82
Figura 3.31 | Esquema de do CP poliédrico 83
Figura 3.32 | CPs poliedros BLC 84
Figura 3.33 | Aparelho de ultrassom 85
Figura 3.34 | CPs prismáticos e poliédricos.....86
Figura 3.35 | Ensaio de ultrassom no CP prismático 87
Figura 3.36 | Ensaio de ultrassom no CP poliédrico 87
Figura 3.37 | Suporte do sistema acústico para ensaio de excitação de ondas 93
Figura 3.38 | Ensaio de excitação de ondas na amostra do bambu 94
Figura 3.39 | Gráfico resultante do ensaio de excitação de ondas 94
Figura 3.40 | Captadort acústico ….....95
Figura 3.41 | Ensaio de excitação de ondas no prisma de BLC 97
Figura 3.42 | Determinação teórica do coeficiente de Poisson 97
Figura 3.43 | Prisma original e desdobrado 99
Figura 3.44 | Prismas desdobrados em todas as direções 100
Figura 3.45 | Forno instrumentado 102
Figura 3.46 | Início dos ensaios em alta temperatura 103

Capítulo 4

Figura 4.1 | CPs após o ensaio de cisalhamento 104
Figura 4.2 | Relação da pressão de colagem com a tensão de ruptura 105
Figura 4.3 | Módulo de deslizamento de serviço em função da pressão de colagem 106
Figura 4.4 | Relação de superfície de colagem com a tensão de ruptura 107
Figura 4.5 | Relação da rugosidade com a lixa paralela às fibras 108
Figura 4.6 | Relação da rugosidade com a lixa normal às fibras 108
Figura 4.7 | Amplitude da rugosidade x tratamentos 109
Figura 4.8 |Médias resultante dos 4 tratamentos 110
Figura 4.9 | Relação da tensão de ruptura com gramatura da lixa 110
Figura 4.10 | Relação do coeficiente de deslizamento com gramatura da lixa 111
Figura 4.11 | Gráfico Boxplot Dap,12 % x posição na parede do bamboo 112

Figura 4.12 | Gráfico relacionando a Dap,12 % x espessura da parede do bambu 113
Figura 4.13 | Retração (RR), (RT) e (RV) x espessura da parede do bambu 113
Figura 4.14 | Fator anisotrópico em função da espessura da parede do bambu 114
Figura 4.15 | Módulo de elasticidade, E_L 116
Figura 4.16 | Coeficiente de Poisson 116
Figura 4.17 | Módulo de deformação transversal, G'_{TL} 117
Figura 4.18 | Módulo de deformação transversal, G'_{LR} 117
Figura 4.19 | Módulo de elasticidade E_{LR} 117
Figura 4.20 | Coeficiente de Poisson 118
Figura 4.21 | Módulo de elasticidade, E_T 118
Figura 4.22 | Coeficiente de Poisson 118
Figura 4.23 | Módulo de elasticidade, E_{LR} 119
Figura 4.24 | Módulo de elasticidade, E_{RT} 119
Figura 4.25 | Módulo de elasticidade, E_{LT} 119
Figura 4.26 | Matriz de Flexibilidade …….....122
Figura 4.27 | Matriz de Flexibilidade, CP poliédrico pequeno ……..…..…..…126
Figura 4.28 | Matriz de Flexibilidade, CP poliédrico grande. …….……..…..…..…126
Figura 4.29 | Matriz de Flexibilidade, CP prismático……..……..……126
Figura 4.30 | Relação do módulo de elasticidade com a parede do bambu ...…….....…128
Figura 4.31 | Relação do módulo de elasticidade L com a parede do bambu ……...…131
Figura 4.32 | Relação do módulo de elasticidade R com a temperatura 132
Figura 4.33 | Relação do módulo de elasticidade T com a temperatura 132
Figura 4.34 | Relação do módulo de elasticidade RL com a temperature 132
Figura 4.35 | Relação do módulo de elasticidade TR com a temperatura 133
Figura 4.36 | Relação do módulo de elasticidade LT com a temperatura 133
Figura 4.37 | Relação das medias das médias dos módulos elásticos com a temperatura 133

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3

Tabela 3.1 | Corpos de Prova e correspondentes constantes elásticas 74
Tabela 3.2 | Obtenção dos termos da Matriz de rigidez 89

Capítulo 4

Tabela 4.1 | Diagonal da matriz de rigidez [C] do BLC - ensaios de ultrassom 89
Tabela 4.2 | Módulo Elástico do BLC - ensaio de compressão 123
Tabela 4.3 | Módulo Elástico do prisma BLC - ensaios de ultrassom 125
Tabela 4.4 | Módulo Elástico do poliedro BLC - ensaios de ultrassom 126
Tabela 4.5 | Módulo Elástico comparativo do BLC - ensaios de ultrassom 127
Tabela 4.6 | Módulo Elástico do BLC – ensaio de excitação de ondas 129

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E DE SIGLAS

A.T. | Alta Temperatura

Atn | Atenuações

BLC | Bambu Laminado Colado

CP | Corpo de prova

D_{ap} | Densidade aparente

E.E. | Extensômetro Elétrico

F_A | Fator Anisotrópico

R_T| Retração Tangencial

R_R | Retração Radial

MM | Miolo com Miolo

MC | Miolo com Casca

CC | Casca com casca

MM | Miolo com Miolo

L | Direção Longitudinal às fibras

R | Direção Radial às fibras

T | Direção Tangencial às fibras

LR | Direção Longitudinal Radial às fibras

R T | Direção Radial Tangencial às fibras

LT | Direção Longitudinal Tangencial às fibras

c | Constante elástica

E | Módulo elástico

E_L | Módulo elástico na direção Longitudinal

E_R | Módulo elástico na direção Radial

E_T | Módulo elástico na direção Tangencial

E_{LR} | Módulo elástico na direção Longitudinal Radial

E_{RT} | Módulo elástico na direção Radial Tangencial

E_{LT} | Módulo elástico na direção Longitudinal Tangencial

G | Módulo de cisalhamento

G_{TL} | Módulo de cisalhamento na direção Tangencial Longitudinal

G_{LR} | Módulo de cisalhamento na direção Longitudinal Radial

G_{RT} | Módulo de cisalhamento na direção Radial Tangencial

ε | Deformação

ε_L | Deformação na direção Longitudinal

ε_R | Deformação na direção Radial

ε_T | Deformação na direção Tangencial

ν | Coeficiente de Poisson

ν_L | Coeficiente de Poissonna direção Longitudinal

ν_R | Coeficiente de Poissonna direção Radial

ν_T | Coeficiente de Poissonna direção Tangencial

ν_{LR} | Coeficiente de Poissonna direção Longitudinal Radial

ν_{RT} | Coeficiente de Poissonna direção Radial Tangencial

ν_{LT} | Coeficiente de Poissonna direção Longitudinal Tangencial

END | Ensaio Não Destrutivo

$K_{serv.}$ | Coeficiente de deslizamento de Serviço

K_u | Coeficiente de deslizamento último

MOE_{din} | Módulo de Elasticidade dinâmico

MD | Medidor de deslocamento

SAD | Sistema de Aquisição de Dados

SD | Sensor de deslocamento

US | Ultrassom

U | Umidade

V | Velocidade de propagação da onda

V_{LL} | Velocidade de propagação da onda na direção Longitudinal

V_{RR} | Velocidade de propagação da onda na direção Radial

V_{TT} | Velocidade de propagação da onda na direção Tangencial

V_{LR} | Velocidade de propagação da ondana direção LR $\Leftrightarrow$ RL

V_{LT} | Velocidade de propagação da ondana direção LT $\Leftrightarrow$ TL

V_{RT} | Velocidade de propagação da onda na direção RT $\Leftrightarrow$ TR

δ | Variação na dimensão

ρ | Densidade aparente do bambu

σ | Tensão nas direções L, R e T

τ | Tensão de cisalhamento nas direções L, R e T

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO 17
1.1 – Considerações preliminares 17
1.2 – Justificativa do estudo 19
1.3 – Objetivo do estudo 23
1.3.1 – Objetivo geral 23
1.3.2 – Objetivos específicos 23
1.4 – Estrutura do projeto de tese 24

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25
2.1 - Influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 25
2.1.1 - Adesivo 27
2.2 - Influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 31
2.3 – Propriedades físicas e mecânicas em temperatura ambiente do bambu laminado colado 33
2.3.1- Característica física do bambu 33
2.3.1.1 – Densidade 34
2.3.1.2 – Retração 35
2.3.1.3 – Fator anisotrópico 35
2.3.2 – Características mecânicas 36
2.3.2.1 - Resistência ao cisalhamento das ligações coladas 36
2.3.2.2 - Resistência à tração 37
2.3.2.3 - Resistência à compressão 38
2.3.2.4 - Módulos elásticos 39
2.3.2.5 - Matriz de constantes elásticas de um material ortotrópico - Obtenção dos termos da Matriz de flexibilidade para BLC por meio de ensaios de compressão 40
2.3.2.5 1 - Definição da matriz de flexibilidade para BLC 40
2.3.3 - Ensaios Não Destrutivos (END) 41

2.3.3.1 - Método Dinâmico, Excitação de ondas e Ultrassom.....43
2.4 – Propriedades mecânicas em altas temperaturas por ensaios não destrutivos (END) 45
2.5 - Considerações Gerais 47

3 - MATERIAIS E MÉTODOS 49
3.1 - Materiais 49
3.1.1 - Adesivo 49
3.1.2 - Bambu para fabricação do BLC 50
3.2 – Metodologia 51
3.2.1 - Influência da Pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 50
3.2.1.1 - Corpos de Prova (CPs) 52
3.2.1.2 - Instrumentação 54
3.2.1.3 - Ensaio de Cisalhamento 56
3.2.1.3.1 - Módulo de Deslizamento 57
3.2.2 - Ensaio da influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 59
3.2.2.1 - Corpos de prova (CPs) 60
3.2.2.2 - Instrumentos para ensaio da rugosidade 62
3.2.2.3 - Ensaio de cisalhamento 63
3.2.3 - Ensaio de caracterização física em temperatura ambiente do bambu e determinação da matriz de flexibilidadedo para o BLC - "Destrutivo" 63
3.2.3.1 - Caracterização física 64
3.2.3.1.1 - Corpo de prova 64
3.2.3.1.2 - Ensaio caracterização física 65
3.2.3.2 - Determinação da matriz de flexibilidade 67
3.2.3.2.1 – Ensaio "destrutivo" 74
3.2.3.2.1.1 - Corpos de prova 74
3.2.3.2.1.2 – Instrumentação 80
3.2.3.2.1.3 – Ensaio destrutivo 81
3.2.3.2.2 - Caracterização mecânica Método de ultrassom 82
3.2.3.2.2.1 - Corpo de prova (CP) 83

3.2.3.2.2.2 – Instrumentação 84
3.2.3.2.2.3 - Ensaio de ultrassom 86
3.2.3.2.3 - Caracterização mecânica - excitação de ondas – END 91
3.2.3.2.3.1 - Método de Excitação de Ondas para o Bambu 92
3.2.3.2.3.1.1 - Corpo de prova 92
3.2.3.2.3.1.2 - Instrumentação e equipamentos 92
3.2.3.2.3.1.3 - Ensaio excitação de ondas 93
3.2.3.2.3.2 - Método de Excitação de Ondas para o BLC.....94
3.2.3.2.3.2.1 - Corpo de prova 95
3.2.3.2.3.2.2 - Instrumentação e equipamentos 95
3.2.3.2.3.2.3 – Ensaio excitação de ondas 95
3.2.3.2.4 - Determinação Teórica dos Módulos e do Coeficiente de Poisson 97
3.2.4 - Ensaio de caracterização mecânica em altas temperaturas – END - Ensaio Não Destrutivo 99
3.2.4.1 - Corpo de prova (CP) 99
3.2.4.2 - Instrumentação e equipamentos 101
3.2.4.3 – Ensaio de excitação de ondas em alta temperatura 102

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO 104
4.1 - Influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 104
4.2 - Influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu 107
4.3 - Caracterização física do bambu e da determinação da matriz de flexibilidade do BLC 111
4.3.1 - Caracterização física 112
4.3.2 - Matriz de flexibilidade 115
4.3.2.1 - Ensaios “destrutivos” de compressão 115
4.3.2.2 - Ensaios não destrutivos de ultrassom 123
4.3.2.3 - Excitação de ondas em temperatura ambiente e em alta temperatura 128

5 – CONCLUSÕES 135

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 138

1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações preliminares

Com sua estrutura naturalmente eficiente, o bambu tem desenvolvido uma estratégia de sobrevivência na natureza por anos. Em continentes como Ásia, África e América Latina, o bambu tem desempenhado importante papel, não só na cultura como na vida cotidiana das pessoas, sendo utilizado desde a fabricação de utensílios domésticos até grandes obras como pontes e coberturas, entre outras, que são verdadeiras obras de arte.

O bambu não é uma novidade para os investigadores. Encontra-se monografia com observações das propriedades botânicas de diversas espécies de bambu, escrita na China, durante a Dinastia Jin (265-420 AC) e Wang (2003). Nos tempos modernos, os pesquisadores têm estudado o bambu, a partir de diferentes perspectivas: MCClure (1966) pertence à primeira geração de pesquisadores de bambu que estudou suas propriedades biológicas.

Liese (1981, 1987 e 1982) dedicou sua pesquisa à microestrutura do bambu e fez progressos notáveis nos estudos sobre as espécies de bambu. A pesquisa sobre as propriedades de materiais, especialmente as propriedades mecânicas e físicas, também, foi feita por Janssen (1981).

A aplicação concreta do laminado colado, teve início no século XIX, primeiramente, com o uso da madeira. O emprego na fabricação de elementos estruturais, a serem utilizados na construção civil, só foi possível com o surgimento de colas de alta resistência. Daí para a frente, materiais laminados colados evoluíram em paralelo com o progresso ocorrido com as colas, que foram se tornando cada vez mais eficientes. No entanto, foi em 1940, com o aparecimento das colas sintéticas, que o sistema laminado-colado conheceu o seu grande progresso.

Laminação por definição são pequenos pedaços de bambu colados entre si, formando um único membro grande, forte, estrutural. O bambu laminado colado, como outros produtos

laminados, representa o uso eficiente do bambu disponível, para isso, faz-se o uso de menores dimensões do bambu. O Bambu Laminado Colado (BLC) é projetado para ser mais forte e pode apresentar maiores dimensões que o tamanho original do colmo.

Novos materiais foram inventados e desenvolvidos para atender às necessidades cada vez maiores das pessoas no mundo industrializado. O processo artesanal foi substituído por máquinas adaptadas aos materiais de uso convencional da época e local, como a madeira, o ferro, o aço, o alumínio, o plástico e o cerâmico. Esses novos materiais foram desenvolvidos no Ocidente e amplamente utilizados, na produção em massa, desde meados do século XIX. Essas inovações não aconteceram com o bambu pelo fato de não existir ainda a cultura do bambu no Ocidente, segundo Xiao (2007).

O uso do bambu original, em formato tubular como elemento estrutural, é a maneira tradicional de sua aplicação na construção, principalmente, na engenharia (XIAO et al. 2010). Apesar das favoráveis propriedades, o bambu tem sido pouco utilizado como material, na indústria da construção civil, pelos seguintes fatores: sua configuração geométrica impossibilita a confecção de peças estruturais usuais, como vigas e pilares de seções transversais retangulares (XIAO etal., 2010).

Considerando as propriedades especiais do bambu, principalmente, seu rápido crescimento e fácil cultivo, os investigadores começaram a tentar processá-lo para que possa ser utilizado na indústria. O colmo do bambu pode ser desdobrado, para produzir elementos estruturais de alta resistência, como os que compõem as obras de Xiao et al. (2010). Entre as numerosas aplicações do processamento avançado do bambu, o painel compensado, composto por lâminas de bambu, é hoje um dos produtos industrializados mais encontrados nos mercados do Oriente.

Como o próprio nome indica, o Bambu Laminado Colado (BLC) foi concebido, a partir da técnica da colagem aliada à técnica da laminação, ou seja, da reconstituição do material a partir de lâminas (neste caso, entendidas como lâmelas). Essas lâminas são unidas por colagem e ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras estejam paralelas entre si. Chamam-se, portanto "Bambu Laminado Colado", as peças de bambu reconstituídas.

O BLC é um produto composto de bambu laminado com adesivo, um sistema engenheirado, podendo ser controlado na sua confecção. O uso final do BLC vai depender do tipo de adesivo utilizado no processo de colagem, geralmente, à base de formaldeído. As lâminas produzidas na confecção do BLC são tratadas, unidas e coladas com resinas sob temperatura e pressão específica, de tecnologia considerada simples, como se vê na Fig. 1.1.a sua aplicação em ambientes internos, externos ou em condições extremas.



(a) (b)

Figura 1.1— (a) e (b) Piso em Bambu laminado colado, CBRC, China 2004.

A tecnologia do BLC elimina os problemas de cisalhamento, a peça sofre menos retração, empenamento e torção por alterações de umidade, que quando comparado ao bambu tubular em sua forma original, (LIMA JÚNIOR; DIAS, 2001).

Após seu processamento industrial, o painel de bambu é aplicado como uma alternativa para os produtos de madeira, tais como tábuas e fôrma para concreto (ZHANG, 2001). Comparado com tábuas de madeira de baixa densidade, a tábua de bambu tem uma superfície ligeiramente mais dura, com maior resistência à abrasão e apresenta uma textura lisa de boa aparência oferencendo alta resistência mecânica.

Na China, pesquisadores como Zhang (2001) e instituições como a Nanjin Forest University e a Academia Chinesa de Silvicultura concentram-se mais no valor econômico do bambu como um material natural de rápido crescimento na industrialização. Com base no bambu laminado e produtos pré-fabricados industriais, designers e arquitetos, tais como Shigheru Bam (1997), Villegas e Velez (2002) fazem uso de materiais industrializados à base de bambu em suas obras. É conferido ao bambu o título de “aço vegetal”, devido suas altas propriedades mecânicas e ser renovável.

1.2 - Justificativa do estudo

O bambu, se apresenta bastante promissor, como um material ligo celulósico que sequestra carbono, possibilitando reduzir o impacto ambiental, trazendo conforto térmico para construção. A sua “deconstrução” em lâminas, traz flexibilidade de uso. Ele oferece um cenário bastante inovador e necessário para gerações futuras, como parâmetro para novos engenheiros e arquitetos, fazendo uso de materiais naturais. Engenheirar a biomassa de acordo

com as necessidades.

Inovação, de acordo com Christopher Freeman (1986), é o processo que inclui atividades técnicas, concepção, desenvolvimento e gestão que resultam na comercialização de novos (ou melhorados) produtos ou na primeira utilização de novos (ou melhorados) processos. Segundo Mike Baxter (2011), a pressão inovadora cresceu muito e exige uma visão mais ampla, com novas tecnologias e ferramentas gerando novos produtos. As estatísticas sobre o sucesso dos negócios mostram clara participação crescente dos novos produtos.

A crise ambiental vivida nos últimos séculos deu início a uma redefinição da relação entre seres humanos, e natureza e a construção de uma nova ética, desenhada pelos princípios do desenvolvimento sustentável. Assim, qualidade de vida e sustentabilidade tornaram-se fios condutores da postura e da prática ambiental dos dias atuais, (FRANCO, 2017). Atendender as necessidades da crescente população é um grande dilema da atualidade. A cadeia produtiva, que alimenta a industria da construção civil está diretamente ligada aos impactos ambientais da atualidade, se fazendo necessário desenvolvimentos de novos métodos e novos processos.

Correspondendo ao alerta mundial, para os problemas ambientais, surgem o *Life Cycle Design* (Design Sustentável) e a ferramenta Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que é um método de avaliação baseado em matéria-prima, energia, consumo de água, quantidade de poluentes aquosos e gasosos emitidos e lixo produzido, durante os processos de industrialização, para estabelecer um balanço quantitativo dos fluxos de matéria e energia trocados com o meio em uma produção ou sistema de produção ao longo do seu ciclo de vida. O bambu tem recebido atenção favorável como uma boa alternativa para materiais convencionais existentes. Vários autores estão avaliando o Ciclo de Vida em busca de um projeto sustentável.

O Ciclo de Vida do bambu em colmo abrange: Plantio → Crescimento → Maturação → Colheita → Corte em seções → Tratamento → Distribuição. Enquanto O Ciclo de Vida do BLC (Bambu Laminado Colado) é: Plantio → Crescimento → Maturação → Colheita → Corte em seções → Tratamento → Processamento Industrial → Corte em tiras → Padronização das ripas → montagem → Colagem → Prensagem → Acabamento → Distribuição.

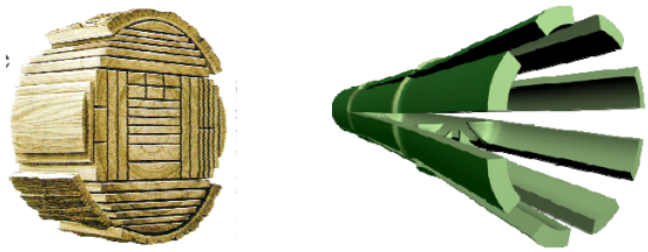
No processo de produção, o BLC utiliza o adesivo e há grande perda de material na sua padronização, que desfavorece o seu Ciclo de Vida, tornando-o menos sustentável que o material natural. Porém ele também oferece benefícios, porque possibilita grandes seções que

podem ser usadas em vãos maiores e contínuos, como os outros materiais estruturais. Estaria, assim, acrescentando ao processamento industrializado, com o uso de matéria-prima renovável e tornando-o mais acessível ao consumo.

Segundo, Andrea Franco (2017), a discussão ambiental, que envolve fatores ecológicos, econômicos, sociais e culturais, está estreita e indissociavelmente ligada ao design, à industrialização dos produtos de consumo. Deste modo, projeto e produção estão interconectados às mudanças operadas ou desejadas pela sociedade, mudanças estas que alimentam as transformações e levam a novos modos de vida. Considerando, pois, que o "produto ecológico" não existe, ou seja, produtos (e também serviços) sempre causarão algum tipo de impacto ambiental, a adoção do ecodesign configura-se como sendo um processo contínuo de melhoria dos produtos/serviços em busca do menor impacto.

A madeira é um dos materiais orgânicos naturais mais utilizados na construção; no entanto verifica-se que seu ciclo de crescimento pode ser muito longo em comparação ao do bambu. O bambu tem curto ciclo de crescimento e fácil regeneração: o primeiro corte para colheita pode ser em torno de 4 anos (quando for para uso como estrutura) e, a partir de então, pode ser manejado para colheita de dois em dois anos. Sua propagação é muito rápida e cada vez maior, podendo, assim, aliviar a demanda da madeira.

No processamento industrial, o bambu perde sua configuração estrutural: a estrutura original é destruída e convertida em material maciço. Quando comparado com a madeira (eucalípto), tal processo tem se mostrado mais eficiente, porque enquanto o bambu possui estrutura oca e diferenciada, a madeira tem estrutura maciça, relativamente mais homogênea; a taxa de utilização do bambu é inferior à da madeira. Por outro lado, a propagação do bambu oferece um rendimento muito rápido e abundante que justifica seu processamento industrial e sua aplicação como estrutura na engenharia. Na fig.1.2, são mostradas, na seção transversal, as formas de desdobramento de um tronco de árvore e de um colmo de bambu.



(a) (b)

Figura 1.2 — Seção transversal mostrando taxa de utilização: (a) de um tronco de árvore; (b) de um colmo de bambu. Fonte: XIAO, 2007.

Essa crescente preocupação inovadora tem acarretado a busca por alternativas tecnológicas mais limpas, cuja variável ambiental aparece devidamente integrada ao desenvolvimento e à sustentabilidade. A conscientização da sociedade e a legislação ambiental cada vez mais exigentes vêm induzindo as empresas a uma relação mais sustentável com o meio ambiente, (FRAZÃO, 2007).

O desenvolvimento de materiais compósitos, utilizando fibras naturais como reforço, é crescente e vem conquistando novos segmentos de mercado, pois as fibras vegetais apresentam baixo custo, biodegradabilidade, menor densidade e boas propriedades mecânicas, físicas e térmicas adequadas às aplicações industrias. É importante mostrar que esses materiais não convencionais podem apresentar propriedades semelhantes e/ou superiores a outros, (GUIMARÃES et al, 2010).

O bambu, em fase de crescimento, absorve CO2 para compor suas cadeias e, com a fotossíntese, libera oxigênio. Atinge altura máxima aos seis meses e maturação após três anos. O crescimento é vertical, sempre com o mesmo diâmetro depois de adulto, e o corte se faz de dois em dois anos depois de atingir a fase adulta, (NETTO et al. 2008).

O bambu pode ser aplicado, também, como regenerador de áreas degradadas, amenizando a devastação das florestas, possibilitando seu uso como material renovável. Seu desdobramento como BLC atende aos requisitos e as exigências do mercado que buscam atender as normas para obtenção do "Selo Verde", certificação da *International Organization for Standardization* (ISO-14000 e ISO-14020), tanto para o produto quanto para o seu processo produtivo, pois trata-se de material ecológico que mantém a mesma característica físico-mecânica do laminado de madeira.

A falta de validação, com base em teoria da mecânica, ciência dos materiais, design de estrutura e testes é o principal fator para o bambu ainda não estar inserido no mercado. O processo de obtenção do BLC como estrutura, encontra-se ainda restrito ao nível de pesquisas dentro das universidades brasileiras, sendo os primeiros resultados apresentados por Moreira e Carrasco (1995). Os autores confeccionaram BLC, da espécie *Dendrocalamus giganteus*, utilizando o mesmo adesivo usualmente empregado para madeira laminada e colada. Eles buscaram seguir as mesmas normas adotadas para a madeira, adaptando-as ao bambu para a confecção de C.Ps (corpos de provas) e para a realização de ensaios.

É essencial, para o sucesso da implementação da tecnologia e de seu processamento, o controle sistêmico de toda a cadeia de produção do bambu. Isso inclui desde o controle da sua procedência, umidade, tratamento à uniformização das lâminas do bambu, assim como criar os parâmetros de prensagem, de secagem, investigação da melhor superfície e definição do

uso do adesivo mais apropriado para o objetivo em questão.

A qualidade da colagem é fundamental, para se obter um produto com elevado desempenho estrutural, para isso, é necessário o estudo da pressão de colagem e a rugosidade da superfície a ser colada.

Na última década, estudos têm mostrado que, cada vez mais, a prática do ecodesign necessita de parâmetros específicos, sobretudo quantitativos, capazes de garantir que metas ambientais possam ser alcançadas. Iniciativas que forneçam referências ambientais quantificadas podem ajudar os engenheiros e designers em suas tomadas de decisão. A industrialização é fundamental para se atingir a escala da bioconstrução. Esta atividade traz algumas maneiras de se trabalhar com o BLC, através de método industrial, tema muito relevante na atualidade. O BLC desta tese foi confecionado sob condições específicas, como espécie, origem, tratamento, pressão aplicada, tipo de superfície e de cola aplicada.

Este trabalho fala de um material compósito, que é uma aplicação da matéria prima bambu em um novo sistema de construção. Faz-se essencial obter informações precisas acerca das propriedades físicas e mecânicas para o BLC, para avaliar seu emprego de forma apropriada e sua adequação para diversos produtos finais.

1.3 - Objetivo do estudo

1.3.1 - Objetivo geral

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de contribuir para o estudo das características físico- mecânicas do bambu e do Bambu Laminado Colado (BLC), visando à qualidade da colagem e ao elevado desempenho mecânico.

1.3.2 - Objetivos específicos

a) Estudar a influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu.
b) Estudar a influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu.
c) Estudar as propriedades físicas e mecânicas em temperatura ambiente do Bambu Laminadao Colado (BLC) e definir a matriz de constantes elásticas, considerando-o

um material ortotrópico.

d) Estudar as propriedades mecânicas em altas temperaturas por Ensaios Não Destrutivos (END).

1.4 - Estrutura da tese

- No capítulo 1, é apresentada a estrutura em que a tese está constituída.

- No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica detalhada em função do alcance de cada um desses objetivos.

- No capítulo 3, é desenvolvida a metodologia aplicada e apresentados os equipamentos utilizados nos experimentos.

Organogrâma

I - Determinar a influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu - bambu;	Pressão de Colagem Deslizamento	Lâminado de bambu	
II - Determinar a influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu - bambu;	Rugosidade Deslizamento	Lâminado de bambu	
III - Determinar as propriedades físicas e mecânicas do BLCs em temperatura ambiente - BLCs e definir a matriz de constantes elásticas, considerando-o um material ortotrópico;	Caracterização Física	Umidade	Bambu
		Densidade	Bambu
	Caracterização Mecânica	Ensaio Destrutivo - Compressão	BLC
		END - Ultrassom	BLC
		- Excitação de Ondas	Bambu
		- Excitação de Ondas	BLC
IV - Determinar as propriedades mecânicas em altas temperaturas, através de END - Ensaios Não Destrutivos.	Caracterização Mecânica	END - Excitação de Ondas	BLC

- Os resultados, os tratamentos de dados e sua discussão são apresentados no capítulo 4, que terá em sua sequência a apresentação da conclusão no capítulo 5.

- No capítulo 6, serão relacionadas as referências bibliográficas utilizadas no estudo desenvolvido.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com intuito de tornar mais fácil a compreensão deste capítulo, esta revisão bibliográfica aborda os seguintes temas: Influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação; Influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação; Propriedades físicas e mecânicas em temperatura ambiente; e Propriedades mecânicas em altas temperaturas, por meio de ensaios não destrutivos.

São apresentados aspectos teóricos gerais que embasam a utilização de métodos não destrutivos de propagação de ondas, na determinação de propriedades de materiais e, em seguida, detalha-se a determinação da matriz de flexibilidade por meio de propagação de ondas. O item que se segue apresenta referências relativas a aplicações do método. O primeiro subitem se refere ao uso de método de propagação de ondas, na determinação de correlações com ensaios estáticos, principalmente, considerando a direção paralela às fibras ou longitudinal (L). O segundo subitem apresenta referências que tratam da determinação dos parâmetros elásticos de forma mais geral, utilizando a matriz de rigidez, completa ou parcial. Por fim, são destacados alguns parâmetros que foram utilizados para a definição da dimensão do corpo de prova, da frequência do transdutor e do acoplante.

Tendo em vista que houve comparação do método, na determinação das constantes elásticas por ultrassom com o ensaio de compressão estática, um item adicional foi introduzido para detalhar a determinação dos parâmetros elásticos da madeira por meio de ensaio de compressão estática.

2.1 - Influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

Na prensagem do material, busca-se alcançar a união das lâminas, garantindo pressão

uniforme de superfície, a qual pode ser aplicada por prensas hidráulicas, pneumáticas ou manuais e permanecer na prensa até que o adesivo complete sua cura. A prensagem pode ser feita a quente ou a frio, dependendo do adesivo utilizado (BERALDO, 2003).

A aplicação de pressão produzirá enchimento dos poros e deslocamento de ar da interface do aderente (penetração). Essa pressão também é necessária para se obter uma linha adesiva fina.

Na proposta de Rodríguez et al. (2008), para o BLC ser prensado, foi utilizada a espécie *Bambusa Vulgaris Schrab,* com o adesivo fenol formaldeído. O experimento foi realizado com diferentes pressões e temperaturas, para depois ser caracterizado mecanicamente. Os valores de pressão adotados foram de 2 MPa, 4 MPa e 6 MPa, e os de temperaturas 50 ºC, 80 °C, 110 ºC e 140 ºC. Como resultados, encontraram que, nos intervalos de pressão entre 2 MPa a 4 MPa, houve um ganho na resistência com o aumento da temperatura de prensagem, na gama de 80 ºC a100 ºC.

Arancibia (2009), apresentando um estudo que propõe a utilização do bambu como uma nova tecnologia de contraplacado, fabricou painéis de bambu da espécie *Bambusa Vulgaris Schrab,* prensados a diferentes temperaturas e pressões, para que fossem caracterizados em laboratório por meio de ensaios mecânicos. A tendência da resposta elástica do material ao ser analisado é independente da pressão aplicada. Para prensagem com temperaturas acima de 110 ºC, a tendência é aumentar a sua resposta elástica. Entretanto, para temperaturas de 80 ºC, o material alcança valores de módulo de elasticidade semelhantes aos obtidos com temperaturas de 140 ºC, de maneira que não é necessário aumentar a temperatura para aumentar o seu módulo de elasticidade.

O efeito do tempo de prensagem sobre as propriedades físicas e mecânicas de tiras de bambu impregnada de resina fenólica foi avaliado por Anwar et al. (2009). A temperatura da prensa foi fixada em 140 ºC e pressão de 1,4 MPa foi aplicada durante 5, 8, 11, 14 e 17 minutos. A estabilidade das tiras aumenta, quando tratadas com adesivos fenólicos e quando o tempo de prensagem se estende de 5 a 17 minutos. Os valores do módulo de ruptura, do módulo de elasticidade e da compressão paralela às fibras tratadas com adesivo fenólico aumenta quando o tempo de prensagem aumenta. As maiores propriedades de resistência foram alcançadas com 17 minutos de prensagem.

No estudo experimental feito por Lima (2001), foi investigado o BLC, o qual foi confeccionado com dois adesivos diferentes e prensado a frio. Para colagem, as ripas foram todas dispostas em uma mesma direção, paralela às fibras do bambu e foram colocadas no dispositivo de prensagem sob uma pressão de 6,2 MPa, controlada por meio de parafusos. A

tensão de ruptura do material, no ensaio de cisalhamento, com adesivo Cascophen, apresentou-se superior ao do material colado com adesivo Cascorez.

Já Rivero e Beraldo (2003) avaliaram o BLC, também utilizando dois adesivos comerciais, indicados para prensagem a frio. A prensagem foi efetuada com o auxílio de um sistema feito com parafuso, em que cada conjunto foi travado após ser alcançada a pressão de 2 MPa. O material permaneceu prensado durante 24 h, sendo posteriormente desmoldado e preparado de acordo com o ensaio. O BLC pode ser considerado um material leve, com massa específica aparente situada na faixa de 0,50 g/cm^3 a 0,75 g/cm^3. Observou-se sobre a resistência ao cisalhamento que o BLC feito com resorcinol-formaldeído se mostrou mais estável dimensionalmente do que o BLC de ureia-formaldeído.

Para a montagem do BLC, no trabalho de Paes et al. (2009), foram utilizadas cinco lâminas sobrepostas impregnadas de adesivo, com as fibras na mesma direção, resultando em blocos de 5 cm de largura, com 2 cm de espessura e 45 cm de comprimento. Os CPs foram identificados, conforme adesivo utilizado (PVA e resorcinol-formol) e prensados em uma prensa hidráulica com pressão de 2,18 MPa, por um período de três horas. A seguir, os CPs foram retirados da prensa e mantidos sob blocos de concreto por 24 horas. O adesivo à base de resorcinol-formol proporcionou ao BLC maior resistência à umidade, quando comparado àquele à base de acetato polivinílico, quanto aos ensaios de cisalhamento.

Não foi surpresa o resultado do cisalhamento obtido por Lima (2001), como também Rivero e Beraldo (2003), tendo em vista que o adesivo, Cascophen, uma resina resorcinol, tem aderência química e mecânica, por aproximação. Já o adesivo Cascorez tem apenas resistência mecânica. Dessa forma, para o Cascophen os resultados apresentados no cisalhamento foram maiores, independentemente da pressão aplicada.

Têm sido desenvolvido, técnicas mais eficientes de laminação, propriedades de colagem e prensagem para a produção para o BLC e sua aplicação no uso estrutural.

2.1.1 - Adesivo

Conhecer as propriedades dos adesivos é muito importante para sua aplicação. Na avaliação do adesivo, devem ser considerados fatores desde sua elaboração até sua cura. Dentre estes fatores, os mais importantes são: adesão, tipo de armazenamento, vida útil após sua preparação, tempo de cura e penetração.

Hoje a adesividade se baseia nas forças de ligação ao nível molecular entre as macromoléculas dos adesivos e dos aderentes. A força de adesão se origina das ligações

químicas primárias (inter-atômicas) e secundárias (inter-moleculares).

As forças originadas pelas ligações primárias são de natureza eletrônica (ligação entre átomos e íons). As ligações atrativas secundárias são de natureza eletrostática ou magnética, associam as moléculas entre si, de maneira razoavelmente forte, mas não o suficiente para formar uma nova cadeia química, uma molécula (CARRASCO, 1984).

As ligações secundárias mais significativas para resistência da ligação são as forças de polarização e as pontes de hidrogênio. Deve ser considerado o aspecto de reciprocidade do conjunto adesivo-aderente.

De modo geral, pode-se dizer que os adesivos preparados com polímeros naturais, de origem animal e vegetal (amido, soja, goma-resina, caseína, celulose e derivados, alguns polímeros sintéticos, etc), são fortemente polares. Em oposição, situam-se os produtos não polares: borracha, elastómeros e certos adesivos sintéticos. No ramo de adesivos industriais modernos, há grupos de resina e polímeros possuindo polaridades intermediárias. Pode-se mencionar, de maneira especial, os adesivos baseados em resinas de Ureia e Melanina, Fenol e Resorcinol, Polímeros Vinílicos, Polímeros Acrílicos. Quanto aos materiais aderentes, os mais polares são as madeiras e seus derivados, papel, papelão e a maior parte dos tecidos, principalmente, por causa da estrutura da celulose (CARRASCO, 1984).

Para que essas forças possam agir adequadamente, tendo em vista alcançar o melhor resultado na ligação, é necessário considerar todos os fatores, quer da superfície do aderente, quer das características e da técnica de aplicação do adesivo. Entre estes fatores podem ser citados: a compatibilidade do adesivo com o aderente, viscosidade apropriada, acabamento e limpeza da superfície do aderente, técnica adequada na aplicação do adesivo considerando a espessura da película, tempo de espera, tempo de secagem.

As forças básicas da adesão química são por causa das ligações primárias. A utilização dos adesivos químicos reativos promotores de adesão só é justificável, quando os adesivos convencionais não produzem adesão suficiente, pois seu alto custo, fraca estabilidade no armazenamento, vida breve e grande seletividade em relação ao aderente, tornam-os inviáveis. Esta reação química, entretanto reforça significativamente a força de adesão, promovendo uma ligação muito mais resistente e durável (CARRASCO, 1984).

Os avanços tecnológicos ocorridos, no final do século XX, englobando os processos produtivos, a redução dimensional dos componentes e o surgimento de novos materiais vêm contribuindo para uma maior versatilidade de matérias-primas na manufatura de produtos industrializados. Dessa forma, o uso de substâncias adesivas com a finalidade de unir elementos de madeira (no caso da pesquisa, o bambu) promove a obtenção de peças com

dimensões maiores, para vencer grandes vãos e com a possibilidade de executar formatos retos e curvos, superiores àquelas obtidas diretamente da árvore (PAES, 2009).

Têm-se como parâmetro os resultados dos experimentos que utilizaram os adesivos PVA, resorcinol-formoldeído, ureia-formoldeído, melamina-formaldeído, polipropileno, aplicados em superfícies de madeiras e em superfícies de bambu das espécies *Phyllostachys pubescens, Gigantochloa scortechinii, Bambusa Vulgaris Schrab.*

Com a formulação dos adesivos sintéticos, conseguiu-se aperfeiçoar a indústria dos compensados de materiais orgânicos, tanto para estrutura quanto para acabamentos. Produtos fabricados com material inadequado comprometem a resistência e a aparência das peças comercializadas. O adesivo estrutural corresponde ao item de maior custo na fabricação da peça laminada colada (KALIA et al., 2009).

A utilização de adesivo numa ligação apresenta várias vantagens sobre outros tipos de ligações, tais como: possibilita a distribuição de esforços em áreas mais amplas, viabiliza ligações mais leves, a linha adesiva funciona como barreira contra a umidade, permite unir materiais diferentes e viabiliza uma execução rápida e econômica. Na formação das ligações adesivas, a natureza do material determina a seleção do adesivo e a forma da sua execução.

A escolha do adesivo mais compatível, de maior resistência mecânica e mais fácil de trabalhar é fundamental para a qualidade do material. A principal diferença dessa junção para as restantes é o uso do bambu como o único material além da cola (LIMA et al., 2001).

Xu et al. (1998), quando realizaram ensaios de cisalhamento a painéis laminados de madeira *Shorea spp* com a adição de bambu *Phyllostachys pubescens* e juta, observaram melhoria nas propriedades de flexão do material. Testes da resistência à colagem mostraram que a juta apresentou boa adesão com as lâminas de madeira, e o adesivo urea-formaldehyde caracterizou-se fraco, apresentando falha na ligação com o bambu.

Anwar et al. (2014) avaliaram algumas propriedades físicas e mecânicas do contraplacado, como painéis fabricados com tiras de bambu *Gigantochloa scortechinii* e tratadas com resinas fenol formaldeído as quais foram expostas à condição exterior, variando de 1 a 12 meses. Na avaliação dos módulo de elasticidade (E), o módulo de ruptura (G), resistência à compressão e à rugosidade da superfície, as propriedades testadas das amostras tratadas resultou em valores mais elevados do que os das amostras não tratadas. Foi mostrado que a impregnação de resina pode ser considerada alternativa para melhorar as características do BLC, expostas a condições ambientais.

Quando comparadas por (LEE et al. 1994), à quantidade de partículas com adesivo na produção chapas aglomeradas, de *Phyllostachys pubescens*, utilizando diferentes

alinhamentos de flocos com adesivos com o trabalho desenvolvido por Papadoulos et al. (2004), concluiu-se que partículas podem ser utilizadas, para produzir chapas para uso interno, empregando baixa dosagem de ureia-formaldeído (10 %).

Gindl et al. (2003) observaram que a impregnação de melamina-formaldeído (MF) pode melhorar um número de propriedades do material, tais como a dureza da superfície e resistência às intempéries. Já a melhoria encontrada por Mahlberg et al. (2001), nas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional de fibra de madeira, deveu-se à impregnação com polipropileno.

No experimento feito por Furuno et al. (2004) na madeira, a resina fenólica aplicada penetrou nas paredes das células, assim contribuindo com o aumento da estabilidade dimensional e resistência à deterioração na amostra impregnada de resina. Assume-se que o polímero de deposição, no interior das células das paredes da madeira, resultou em elevada resistência, bem como uma melhoria na estabilidade dimensional (IMAMURA et al., 1998). Assim, foi determinada a cura ideal, o tempo de tratamento com fenólicos e seu efeito sobre as características físicas e propriedades mecânicas, e os dados foram utilizados como parâmetros.

Lapo et al. (2008), porém não conseguiram evidenciar a relação entre a quantidade de linha de cola e a tensão de ruptura, pois os maiores valores ocorreram para três taliscas coladas entre si, e os menores valores para as duas taliscas coladas entre si e os CPs com quatro taliscas forneceram tensões intermediárias. Esse fato evidencia a importância do processo de colagem e da adequação do processo de fabricação das taliscas de bambu. Pelas pequenas dimensões do CP também não foi possível determinar o módulo de elasticidade nesse ensaio.

Foi comprovado pelos pesquisadores mencionados que, independente da espécie de bambu investigada, a aplicação de adesivos na superfície do laminado melhora consideravelmente sua estabilidade dimensional, a resistência à compressão, o Módulo de elasticidade e o Módulo de ruptura. Entretanto, para que o adesivo produza uma ligação resistente, deve-se analisar seu comportamento junto ao aderente. Pelo preparo e uniformidade das lâminas e pela aplicação de adesivo, no caso do BLC, é possível resultar em um material promissor, orgânico e sustentável, voltado para a engenharia, tendo possibilidades de ter alta resistência mecânica.

Foram apresentados vários experimentos de prensagem e de colagem como também painéis e contraplacados. Devida a variedade e complexidade do bambu ainda será necessária muita investigação, no estudo de pressão de colagem, para relacionar com os estudos da

rugosidade na busca da melhor ligação.

2.2 - Influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

A rugosidade pode ser definida como os desvios apresentados em uma superfície, conformados de vales e picos, os quais são produzidos pelo contato da ferramenta de corte ou abrasão sobre a superfície da peça.

A preparação da superfície do aderente, das lâminas, antes de aplicar o adesivo, é uma das etapas mais importantes na fabricação de peças laminadas coladas. A qualidade do produto final dependerá da precisão e do cuidado dispensado a esse estágio de fabricação. Com o objetivo de desenvolver a máxima resistência na linha adesiva, as superfícies devem ser preparadas mecanicamente, de maneira a se ajustarem com exatidão. O aplainamento final deve reduzir as lâminas às espessuras desejadas, removendo o excesso do adesivo e as irregularidades das emendas.

Whitehouse (1999) define a rugosidade como um dos parâmetros aceitos para controle e qualificação de superfícies. Ela é analisada, a partir de fibras naturais, que alteram suas superfícies com o objetivo de aumentar a sua área de contato.

A maioria das superfícies aderentes é apreciavelmente rugosa, com saliências e poros. Às vezes, entretanto utilizam-se banhos de ácido ou abrasão mecânica das superfícies com o objetivo de aumentar a rugosidade, aumentando também a área colada. Quanto mais rugosidade maior será a superfície, existindo maior área de contato além de existir atrito entre as saliências das superfícies. A conveniência da rugosidade está diretamente relacionada com a densidade do material e a pressão aplicada. Entretanto quanto maior a proximidade maior será a troca de íons, podendo oferecer também uma adesão muito eficiente.

A rugosidade do aderente, dependendo do tipo de solicitação, proporciona maior eficiência na ligação. Numa ligação solicitada por tensões de cisalhamento são convenientes superfícies relativamente rugosas, pois, além de existir atrito entre as saliências das superfícies, existe maior área de contato (CARRASCO, 1984).

Conforme Xu et al. (1998), as superfícies externa e interna dos colmos de bambu devem ser retiradas. A superfície externa é recoberta por cera, para prevenir a perda de água,

o que prejudica a colagem. A superfície interna apresenta propriedades mecânicas inferiores às do restante do material por menor concentração de fibras.

Autores como Ostapiv (2007), Koga et al. (2002), Whitehouse (1999), Silva e Bittencourt (2002) comentam que a rugosidade da superfície está diretamente relacionada à dureza da superfície do material. Assim, a seguir, serão apresentados alguns estudos sobre a dureza do bambu.

Em relação à resistência à abrasão, Ostapiv (2007) explica que, enquanto o Pinus tem dureza de 1,6 a 2,3 Brinell, o piso feito em bambu Mosso (*Phyllostachys pubescens*) apresenta de 4 a 6 Brinell, segundo os resultados apresentados pela Organização Holandesa de Pesquisa e Aplicações Científicas. Comparado com madeiras brasileiras, essa espécie de bambu tem dureza equivalente a madeiras de dureza média e alta. Entretanto o valor médio encontrado, para seus colmos com 5 anos de idade, foi de 8 Brinell.

Koga et al. (2002) compararam a resistência à abrasão de camadas orgânicas do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) com madeiras de espécies nativas, utilizando a norma ASTM D 4065-95 - e o equipamento denominado "Taber Abraser". Em outro estudo, Silva e Bittencourt (2002) analisaram a resistência à abrasão entre o bambu, o jatobá e o eucalipto; o bambu e o eucalipto superaram ao jatobá na resistência à abrasão.

No estudo de Boukehili et al. (2012), foi fornecida a informação sobre o comportamento durante o seu tempo de vida útil do material compósito, polipropileno reciclado com a fibra de bambu. O tratamento químico da fibra do bambu proporcionou um aumento da rugosidade da superfície das fibras; em consequência, uma dispersão mais homogênea dessas fibras aparece na matriz de polímero.

Na pesquisa de Hiziroglu; Salim et al. (2008) foram avaliadas as características da superfície de fibra de média densidade (MDF), de painéis sobrepostos, fabricados, a partir de bambu (*Dendrocalamus asper*) e palha de arroz (*Oryza sativa*), utilizando a resina de ureia-formaldeído, como matriz. Medições de rugosidade foram tomadas aleatoriamente a partir da superfície das amostras sobrepostas. A análise estatística revelou que não houve diferença significativa entre os valores de rugosidade de painéis feitos a partir de dois tipos de matérias-primas diferentes. Os resultados iniciais deste estudo sugerem que espécies subutilizadas podem ser considerados como matéria-prima, para a fabricação de painéis de MDF, sem ter qualquer influência sobre a sua qualidade de superfície.

Koga et al. (2002), Silva e Bittencourt (2002) comparam a relação da abrasão entre o bambu e a madeira. O bambu apresentou dureza de duas a três vezes maior que a madeira. Foi mostrado que a idade do bambu também altera sua superfície na resistência à abrasão,

apresentando uma dureza 4 vezes maior em relação à madeira, quando o bambu tem cinco anos de idade. Este dado também foi afirmado por Ostapv (2007).

Como não foi encontrado nenhum estudo da rugosidade para o bambu ou para o BLC, foi apresentada uma revisão bibliográfica de tratamentos de superfície o qual foi submetido alguns materiais. Nesta pesquisa, será analisada a rugosidade da superfície do bambu, investigando qual delas proporciona uma maior eficiência na ligação entre o adesivo e as lâminas de bambu, com o objetivo de alcançar melhor qualidade na interface entre elas.

2.3 – Propriedades físicas e mecânicas em temperatura ambiente do bambu laminado colado

2.3.1- Características físicas do bambu

As propriedades física e mecânica BLC, dependem diretamente da espécie, clima, manejo, técnicas de corte, idade, umidade, solos, posição dos colmos, nós e entrenós, como apresentado nos estudos de Ahmad (2000) e, também confirmado por Latif et al. (1993), que a sua resistência está diretamente ligada à complexidade do colmo do bambu como à escolha do adesivo.

Assim, na base do colmo, a resistência à flexão é 2 a 3 vezes maior na parte externa do que na interna. Essas diferenças são menores, à medida que se aproxima do topo do colmo do bambu, em virtude do aumento da densidade, na parte interna e redução na espessura da parede, que apresenta internamente menos parênquima e mais fibras. Sua umidade natural varia de 13 a 20 %, em função da umidade e do clima do local (GHAVAMI e SOLORZANO, 1995).

O bambu se dilata com o aumento da umidade e se contrai com a perda, sendo assim um material higroscópico. Essas mudanças são mais acentuadas no diâmetro que no comprimento, ou seja, nota-se que as variações dimensionais são maiores no sentido radial. O sentido tangencial apresenta pequenas variações em relação ao sentido radial e, praticamente, não existe variação no sentido longitudinal.

2.3.1.1 - Densidade

Como as demais características do bambu, suas porcentagens de fibras mudam de espécie para espécie e influenciam diretamente nas propriedades físicas e mecânicas e na espessura da parede do bambu. É comum, no estudo de bambu, haver referência à densidade real e à densidade aparente. A densidade aparente é a razão entre a massa e o volume aparente (volume do bambu e dos vazios contidos no bambu) e varia conforme a espécie de bambu e até com a configuração do corpo de prova. A densidade real é a razão entre massa real (sem umidade) e volume real (sem vazios).

De acordo com Ghavami e Solorzano (1995), os bambus são constituídos predominantemente por fibras responsáveis pela sua resistência mecânica, sendo sua distribuição de 40 % a 90 % na parede externa e de 15 % na parte interna dos colmos. A densidade das fibras na secção transversal varia com a espessura, bem como a altura do corte no bambu. Os nós o dividem em segmentos; cada segmento atua como uma coluna reforçada. Estas conclusões foram apresentadas por Ghavami (1992) e Wachaure M.R. (2010).

Englerth (1966), Wang et al. (2003 e 2006) mencionam que a qualidade da madeira sólida é quase sinônimo de sua densidade, e diversos autores recentemente se utilizam desta propriedade física, para explicar o comportamento físico e mecânico. Além de qualificar as madeiras utilizadas, no caso deste estudo, a densidade do bambu também será investigada para qualificá-lo.

A camada mais externa da casca consiste em células epidérmicas que contêm uma superfície de cera chamada cutina. A camada mais interna é constituída por células de esclerênquima. A camada do meio é formada por fibras, veias e condutores de seiva, que, por sua vez, são envolvidos num tecido chamado parênquima. Em média, os caules são compostos de 30 % de parênquima, 60 % de fibras e 10 % de veias e condutoras de seiva, Jin T. et al. (2005). A distribuição da fibra é mais uniforme na base do que no meio ou no topo.

Ghavami et al. (2003) confirmam que a densidade da camada externa do bambu é maior do que a da camada interna em todo o seu comprimento. Na composição do bambu, 60 a 70 % são fibras, 40 % parênquima e vasos e capilares. A sua densidade varia entre 0,4 e 0,8 g/cm3, dependendo, principalmente, da sua estrutura anatômica e da sua espécie.

Latif et al. (1993) afirmaram que, quando a densidade diminui, as propriedades mecânicas também diminuem e, quando o teor de umidade diminui, as propriedades mecânicas aumentam. O tamanho dos feixes fibrovasculares e o comprimento das fibras são correlacionados com a resistência à compressão, à flexão e ao módulo de elasticidade (E).

2.3.1.2 - Retração

Como outras plantas, o bambu possui alto teor de umidade. Seu corte, quando ainda fresco, pode ter até 100 % de umidade em sua base, 150 % de umidade nas camadas mais internas e 70 % nas camadas periféricas. O teor de umidade do bambu varia verticalmente, a partir da base para o topo e, horizontalmente, a partir da camada externa para a camada interna (JANSSEN,1981).

A disposição química e o arranjo heterogêneo diferenciado de componentes básicos na composição do bambu formam espaços vazios, tornando-o um material poroso. Isso deixa seus elementos visíveis em nível macroscópico. O bambu pode reter água às paredes e no seu interior, sendo portanto um material higroscópico, sujeito à retração (SIQUEIRA et al., 2003).

A perda d'água do bambu provoca redução nas dimensões, retração, mudança da forma da peça e, frequentemente, resulta na fissuração do material. Inversamente, a absorção de água provoca o inchamento por orientação das fibras, o que significa ser material anisotrópico e apresenta retrações diferentes para cada direção. Anwar et al. (2005) observaram que a retração da lâmina de bambu é significativamente maior quando a camada epiderme externa e interna são removidas.

No trabalho de Sales e Ghavami (2006), foi analisado o comportamento do material compósito, cimento reforçado com a polpa do bambu, quanto à retração e à fluência. Foram obtidos parâmetros, que descrevem seu modo de fratura. Enquanto a capacidade de sofrer retração plástica foi reduzida, a retração livre na secagem cresceu com o aumento do teor de polpa de bambu no compósito. No estudo da reversibilidade da retração, mostrou-se que para os compósitos predominam as deformações de contração. Houve aumento da fluência sob compressão simples, com a inserção do reforço fibroso na mistura.

2.3.1.3 - Fator anisotrópico

Para usos que envolvam estabilidade dimensional, o material mais recomendado é aquele que apresentar menor fator anisotrópico, ou coeficiente de anisotropia, definido como a relação entre a retração tangencial e a radial, $F_A = R_T / R_R$. Quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento do material (WANG et al., 2003; GONÇALVES et al., 2009; VIDAURRE et al., 2012).

Segundo Hearn (1997), a análise mecânica é o estudo do comportamento de um material quando sujeito a uma dada carga. O bambu, assim como a madeira, é material

anisotrópico, ou seja, do ponto de vista tecnológico, comporta-se diferentemente nos três eixos anatômicos, possui propriedades mecânicas particulares nas direções longitudinal, tangencial e radial (SIQUEIRA, 2003).

Quanto maior a relação entre as direções tangencial e radial maior será a magnitude do problema. É esta relação que frequentemente explica as deformações do bambu com as variações da umidade. Washunsen et al. (2001), Silva; Oliveira (2002) utilizaram a densidade e o coeficiente de anisotropia para qualificar as madeiras quanto à estabilidade dimensional. Neste trabalho será aplicado ao bambu.

2.3.2 –Características mecânicas

As características mecânicas do BLC constituem um assunto já bastante investigado, entretanto há necessidade de um maior domíno do assunto devido a complexidade do material. A característica mecânica de maior influência na ligação do BLC é a interface do bambu e o adesivo, onde ocorre uma transmissão contínua de carga em toda superfície. De acordo com a resistência do material, o deslizamento irá variar tanto no (E) como na compressão.

2.3.2.1 - Resistência ao cisalhamento das ligações coladas

Resistência, é o ramo da mecânica que estuda as relações entre as cargas *externas* aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças *internas* que agem no interior do corpo. Em um projeto estrutural, é necessário usar o princípio da estática para determiner as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior. Por consequência, a determinação precisa e a compreenção fundamental do comportamento do material é de vital importância para o desenvolvimento das equações necessárias usadas na resistência dos materiais, (HIBBELER, 2010).

Defini-se como tensão de cisalhamento, a tensão de cisalhamento que ocorre no plano de ruptura, no instante da ruptura, (EUROCODE 5). O estado de Tensão é caracterizado por três componentes que agem em cada face do elemento.

Tensão normal é a intensidade da força, ou força por unidade de área, que, age perpendicularmente ΔA, é definida como tensão normal, σ (sigma). Visto que ΔF_z é normal à área, então

$$\sigma z = \lim \Delta A \to 0 \; \Delta F 2 \Delta A$$

A *Tensão de cisalhamento* é a intensidade da força, ou força por unidade de área, que, age tangente ΔA, é definida como tensão de cisalhamento, τ (tau).

$$\tau zx = \lim \Delta A \to 0 \; \Delta Fx \Delta A; \qquad \tau zy = \lim \Delta A \to 0 \; \Delta Fy \Delta A$$

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais. Um dos testes mais importantes nesses casos é o ensaio de compressão e de tração, (HIBBELER, 2010).

2.3.2.2 - Resistência à tração

A resistência à tração é definida como uma tensão, que é medida como força por unidade de área e é a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado ou puxado antes de falhar ou quebrar. O seu valor é dependente de fatores como a preparação da amostra, da presença ou ausência de defeitos de superfície e da temperatura de teste e do material (SMITH et al., 2006).

No estudo de Liese W. (1998), é mostrado que o bambu resiste mais à tração do que à compressão, em virtude da orientação das fibras, no caso de ser paralela ao eixo do colmo. O módulo de elasticidade (E) varia, em função da posição do colmo, sendo maior nos nós por apresentarem maior concentração de sílica. O limite de resistência à tração é usualmente encontrado pela realização de um ensaio de tração e registrando-se a tensão aplicada versus a deformação (GARCIA, 2000).

Chun (2012), por outro lado, explica que a resistência do bambu aumenta gradualmente, durante os primeiros cinco anos e é reduzida depois dos nove. E, de acordo com Li (2004), a resistência à flexão não é significativamente diferente, conforme a posição dos colmos, mas aumenta conforme a idade deles.

Conforme Menta e Beraldo (2004), a resistência à tração paralela às fibras pode atingir

valores de 260 a 370 MPa, a resistência à compressão tem valores entre 20 a 120 MPa e o módulo de elasticidade (E), obtido no ensaio de compressão, varia entre 2,6 e 20 GPa, dependendo da espécie e idade das plantas.

2.3.2.3 - Resistência à compressão

Resistência à compressão é o resultado da aplicação de uma força de compressão a um material, resultando na redução de uma de suas dimensões: axial com a atuação da força e um aumento da seção transversal a este mesmo eixo, neste caso, seu volume é mantido constante.

A compressão ocorre, quando a força axial aplicada estiver atuando com o sentido dirigido para o interior da peça. Com isso, a peça sofre deformações. A compressão pode ser denominada como tal, quando a peça estiver sendo "empurrada", ao contrário da tração, em que ela está sendo "puxada".

A tensão de ruptura obtida por Lapo et al. (2008) nos corpos de prova, no ensaio de compressão simples, variou de 42,6 MPa a 72,4 MPa, enquadrando o BLC na categoria de madeira de média a elevada resistência à compressão.

A compressão tem muitas implicações na resistência dos materiais, na física e na engenharia estrutural, pelo fato de produzir quantidades consideráveis de fadiga, stress e tensão.

Resistência à compressão ou tração, junto com o módulo de elasticidade, são parâmetros importantes da engenharia de materiais utilizados nas estruturas e dispositivos mecânicos. As propriedades tais como o peso, flexibilidade, densidade e resistência, conferem ao colmo do bambu uma ótima resistência, por suas paredes finas com nós distribuídos, entretanto em função de tantas variáveis dificulta a sua caracterização para uma possível normatização.

2.3.2.4 - Módulos elásticos

Os módulos elásticos estão relacionados com as propriedades mecânicas, que são propriedades intrínsecas dos materiais que descrevem a relação entre tensão e deformação no regime elástico e que dependem da sua composição química, microestrutura e defeitos como, por exemplo, poros e trincas.

O conhecimento dos módulos elásticos é alvo da atenção de diversos profissionais, com necessidades e aplicações distintas. Consequentemente, torna-se necessário que haja uma consistência na maneira segundo a qual os ensaios são conduzidos e na interpretação de seus resultados. Essa consistência é obtida mediante o uso de técnicas de ensaio padronizadas.

A medição das propriedades mecânicas é realizada por experimentos de laboratório, cuidadosamente programados, de acordo com condições regidas por normas. No caso específico dos módulos elásticos, os métodos empregados podem ser dinâmicos, por vibrações com pequenas amplitudes de deformação, ou estáticos, que submetem o corpo de causa da prova a uma tensão conhecida e, simultaneamente, mensuram a deformação induzida. Esses ensaios podem ser conduzidos tanto em temperatura ambiente como em altas temperaturas com ou sem atmosfera controlada.

Os módulos elásticos se dividem em: Módulos elásticos para material isotrópico, em que as propriedades não dependem da direção e Módulos elásticos para material anisotrópico, cuja anisotropia está associada à diferença do espaçamento atômico ou iônico entre as diversas direções. O grau de anisotropia aumenta em função da diminuição da simetria estrutural das cadeias moleculares (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Tomak, Eylem et al., (2012) investigaram o efeito do envelhecimento acelerado na resistência à compressão (MOR), (MOE), mudança de cor, inchaço e retração volumétricos das amostras de bambu com e sem seções de nós. A propriedade de resistência aumentou de baixo para cima dos colmos de bambu. A presença de nós nas amostras reduziu a resistência à compressão, módulo de ruptura e afetou ligeiramente o módulo de elasticidade.

Vários estudos foram desenvolvidos sobre a microestrutura do bambu: a idade da planta, análise e tratamentos de superfície e parâmetros de suas variadas seções, como base, meio e ponta da vara. A partir destes estudos foi desenvolvido o BLC, bambu laminado colado, para uso em fechamentos e estruturas em geral.

Hiziruglu et al. (2008), Lee et al. (1994, 2012) e Xu et al. (1998) descreveram como principal vantagem da inclusão de bambu em painéis o aumento das propriedades relacionadas à flexão (MOR), módulo de ruptura, e (MOE) módulo de elasticidade.

No trabalho apresentado por Lee et al., (2012), foi analisada a inclusão de tiras de bambu *Phyllostachys pubescens* nas faces de vigas produzidas com chapas de pinus. Foi observado que houve aumento do (E) módulo de elasticidade e do (MOR) módulo de ruptura de 2,0 e 3,4 vezes, quando comparados às vigas sem reforço de bambu.

As primeiras pesquisas mostram que o BLC pode ter desempenho estrutural comparável ao da madeira para construções, (FLANDER; ROVERS 2009). No entanto este

tema ainda não está maduro o suficiente, há muito que ser estudado, já que para cada pesquisa é investigado um sistema específico de construção, com uma espécie determinada, sob condições de tratamentos e combinação com adesivo únicos.

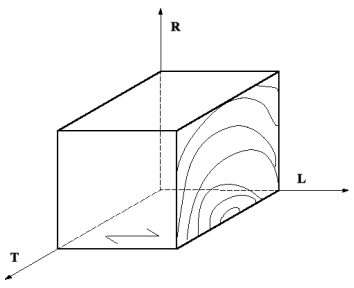
Nesse sentido, há um campo imenso a ser aprofundado sobre o assunto das propriedades mecânicas do BLC, como também o domínio do melhor processo e o mais eficiente na sua fabricação. Em todo trabalho já pesquisado, o bambu se apresentou como excelente alternativa e é, comprovadamente, um material promissor pelas suas altas propriedades mecânicas, sendo importante a realização de mais buscas de mais parâmetros para sua consolidação e aplicação.

2.3.2.5 - Matriz de constantes elásticas de um material ortotrópico - Obtenção dos termos da Matriz de flexibilidade para o BLC por meio de ensaios de compressão

2.3.2.5 1 - Definição da matriz de flexibilidade

A determinação das constantes elásticas para o BLC pode ser simplificada, ao ser considerada como sólido ortogonalmente anisotrópico ou simplesmente ortotrópico. A forma tensorial tem três componentes de tensão e seis componentes de deformação. Dessa maneira, é possível distinguir, em uma peça de BLC, três planos de simetria estrutural que são, simultaneamente, planos de simetria elástica.

Assim, a matriz de flexibilidade pode ser escrita (BODIG e JAYNE, 1982; BUCUR, 2006; BALLARIN e NOGUEIRA, 2003), como:



$$\begin{vmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{TR}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{vmatrix} \qquad (1)$$

Ou $$\varepsilon_{ij} = \delta_{ijkl}.\sigma_{kl}$$

Sendo: ε_L = deformação encontrada na direção L;

ε_R= deformação encontrada na direção R;

ε_T = deformação encontrada na direção T;

σ = tensão nas direções do BLC, R, L e T;

τ = tensão de cisalhamento nos planos RT, LT e LR;

γ = distorção nos planos RT, LT e LR;

De acordo com Ballarin e Nogueira (2003), os elementos da matriz de flexibilidade devem respeitar as condições apresentadas abaixo:

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \; ; \tag{2}$$

$$\nu_{LR} = \frac{-\varepsilon_R}{\varepsilon_L} \;\; ; \quad \nu_{LT} = \frac{-\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \; ; \; \nu_{TR} = \frac{-\varepsilon_R}{\varepsilon_T} \;\; ; \tag{3}$$

$$E_L > E_R \approx E_T \; , \qquad \text{e que} \qquad \nu_{RT} > \nu_{LT} \approx \nu_{LR} > \nu_{RL} \approx \nu_{TL} \tag{4}$$

De acordo com Keunecke et al. (2007):

$$\frac{E_R}{E_T} \sim \frac{\nu_{RT}}{\nu_{TR}} \tag{5}$$

2.3.3 - Ensaios Não Destrutivos (END)

Frequentemente, os materiais são selecionados para aplicações estruturais em virtude de suas combinações desejáveis de características mecânicas, como, por exemplo, rigidez (módulos elásticos), resistência mecânica, durabilidade e economia dos recursos energéticos. O papel dos engenheiros estruturais é o de determinar as tensões e as distribuições de tensões nos materiais que estão sujeitos a cargas bem definidas. Isso pode ser obtido, mediante técnicas experimentais e/ou por análises teóricas e matemáticas de tensão que dependem do conhecimento dos módulos elásticos.

Engenheiros de materiais e engenheiros metalúrgicos, por outro lado, estão preocupados com a produção e fabricação de materiais para atender às exigências de serviços conforme previsto por essas análises de tensão. Isso envolve, necessariamente, compreensão das relações entre a microestrutura dos materiais (características internas) e suas propriedades

mecânicas, que estão diretamente correlacionadas com os módulos elásticos, permitindo que a caracterização dessas propriedades seja utilizada para além do projeto e também no controle de qualidade (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Muitos materiais, quando submetidos ao controle de qualidade, precisam "voltar" intactos. Os métodos de Penetração, Perfuração e de Propagação de Onda são utilizados nos Ensaios Não Destrutivos. O método de penetração estima a densidade, a partir da penetração de uma agulha; o método de perfuração utiliza uma broca; e o método de propagação de ondas ultrassônicas utiliza transdutores para gerarem ondas sonoras de altas frequências e extremamente direcionadas para medições de materiais; é utilizado, também, para correlacionar propriedades da resistência à compressão e módulo de elasticidade (E). Técnica amplamente utilizada, por exemplo, por Bucur (1984), Gonçalves e Bartholomeu (2000) e, mais recentemente, Stangerlin et al. (2010).

O resistógrafo é um aparelho desenvolvido com finalidade de executar análises, em condições de campo, do lenho das árvores, postes e estruturas de madeira (CRUZ, 2011). O objetivo do estudo é permitir a quantificação da resistência apresentada pela madeira à perfuração de uma broca com velocidade de avanço e rotação constantes. De acordo com Martins (2007), o resistógrafo vem sendo utilizado desde 1989 como complemento do método de avaliação visual de árvores.

Alguns aparelhos que utilizam a técnica de esclerometria têm surgido com a finalidade de determinar a resistência à penetração de materiais. Dentre eles, o aparelho Pilodyin foi desenvolvido, na Suíça, para avaliar o grau de podridão da madeira de postes de linhas de transmissão. A densidade é estimada a partir do índice de penetração da agulha (IP) no material. Esse aparelho consegue dar resultados rapidamente e com baixo custo (LAUNAY et al., 2002).

Alguns pesquisadores, como Garcia et al. (2012), Ghavami e Marinho (2001) utilizaram outros métodos, porém mais trabalhosos para determinar estes módulos. A determinação do (E), ao longo da espessura do bambu, é muito difícil pelo tamanho dos corpos de prova, neste caso, são indicados os métodos não destrutivos (ENDs).

Assim outro objetivo deste estudo é determinar o E, ao longo da espessura da parede do bambu, utilizando ENDs. Muito pouco foi encontrado de ensaios não destrutivos para o bambu e BLC; assim, apresentaram-se, neste estudo, ensaios com o bambu e o BLC e utilizada a madeira, como parâmetros.

2.3.3.1 - Método Dinâmico, Excitação de ondas e Ultrassom

Nos métodos dinâmicos, os módulos elásticos são determinados a partir da frequência de vibração natural (ressonância) do CP com amplitudes de vibração (deformação) mínimas. Já para métodos quase-estáticos são realizados ensaios mecânicos usualmente destrutivos a ponto de inutilizar os CPs, os quais consistem em lenta aplicação de carga e simultânea monitoração da deformação induzida.

O primeiro método dinâmico de aplicação prática foi desenvolvido por Forster em 1937. Nesse método, uma barra de seção retangular do material a ser caracterizado é pendurada por dois fios, um deles conectado a um atuador e o outro a um sensor. As frequências de ressonância são determinadas com excitação senoidal de frequência variável associada à observação do pico de resposta da amostra captado pelo sensor. Esse método é utilizado, principalmente, em ultra-altas temperaturas em atmosfera controlada (CHO, 2007). Outros métodos surgiram, na mesma época, contudo não eram práticos pela necessidade de aplicação de alta tensão elétrica e de fixação de partes metálicas no corpo de prova (BUCUR, 2006).

Os fundamentos matemáticos, para os cálculos dos módulos elásticos dinâmicos com precisão, foram desenvolvidos entre a década de 1940 e 1960. Forster apresentou, em 1945, as equações para o cálculo dos módulos elásticos e do coeficiente de Poisson a partir dos modos de vibração fundamentais. As equações propostas por ele contam com fatores de correção empíricos para barras e cilindro, apresentados por Bodig e Jayne (1993).

Kaneco (1960) apresentou equações para modos de vibração de qualquer ordem e não apenas para modos fundamentais. Nas décadas de 1960 e 1970, foi desenvolvido o método de excitação por impulso. Nesse método, a partir de determinadas condições de contorno mecânicas, o CP é excitado, em um determinado modo de vibração, por uma pancada. O equipamento capta essa vibração com um sensor piezoelétrico ou microfone e informa ao usuário a respectiva frequência de ressonância a partir da qual são calculados os módulos.

Gibson (1994) apresentou um refinamento, para as equações de Pickett, generalizando-as para modos de vibração de qualquer ordem, não apenas para os modos fundamentais. Diversos estudos já foram realizados para determinar o E, por meio de ENDs, como os de Gonçalves e Bartolomeu (2000), Lapo e Beraldo (2008), entretanto estes estudos apenas permitiram determinar o E médio na parede do bambu.

A introdução de fontes de emissão acústica tem se tornado ferramenta importante, para os ensaios não destrutivos e para aplicações de monitoramento em peças estruturais, em campo e em laboratório.

Vários autores vêm estudando o método de ultrassom, na determinação de constantes elásticas da madeira, como, por exemplo, Bucur (1984), que propôs a base teórica de utilização do ultrassom, para determinação das constantes elásticas da madeira, por meio de "carottes de sondage" (pequenos corpos-de-prova cilíndricos).

A determinação das propriedades mecânicas da madeira, usando propagação de ultrassom, é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade do material (OLIVEIRA e SALES, 2000). O ultrassom é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. A propagação das ondas acústicas na madeira depende, principalmente, das propriedades mecânicas da parede celular. A velocidade de propagação da onda longitudinal na madeira depende de seu módulo de elasticidade, na direção de propagação e de sua densidade.

Segundo Bartholomeu (2001), o emprego do ultrassom, em várias partes do mundo, tem sido relatado tanto em avaliações da qualidade de peças industrializadas quanto em determinações de propriedades físicas e mecânicas, seja na madeira serrada, em produtos à base de madeira ou, ainda, em árvores em pé. Além da facilidade de manuseio dos equipamentos de ultrassom, seu custo não é excessivo e, mundialmente, o interesse pelo uso de ensaios não destrutivos tem sido incentivado pela necessidade de preservação ambiental.

Bucur (2006) define a velocidade de propagação como a distância percorrida pela onda de ultrasssom por unidade de tempo e ela está diretamente relacionada com o comprimento de onda e frequência. Segundo Bucur (1984), os principais tipos de ondas utilizadas, para caracterizar propriedades da madeira, são as ondas de superfície. Em geral, as perdas aumentam com a frequência, e a diminuição da velocidade com o aumento da frequência se deve, provavelmente, ao fato de que o comprimento da onda se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira (BUCUR, 1983).

Gonçales et al. (2001) estimaram as constantes elásticas de quatro espécies de madeira Amazon. Observaram que a velocidade de ultrassom na madeira foi maior no sentido longitudinal do que radial, que é maior do que a tangente, mostrando que no sentido das fibras as ondas fluem mais facilmente.

Stangerlin et al. (2008), por sua vez, mencionaram que as ondas transversais e longitudinais se enquadram entre as ondas de volume, enquanto as ondas de superfície apresentam movimento elíptico e ocorrem, exclusivamente, na superfície dos sólidos.

O módulo de elasticidade dinâmico de lâminas de bambu Mosso *(Phyllosachys pubens)* e sua resistência à flexão foram investigados por Cheng et al. (2004), utilizando técnicas não destrutivas de ondas de ultrassons e da resistência à perfuração. Os valores do módulo de elasticidade dinâmico para bambu Mosso aumentou com o aumento de densidade.

O comprimento do CP é determinado a partir do comprimento de onda (λ). Existem ainda divergências sobre o valor mínimo necessário, para que a velocidade da onda seja constante; a NBR 58000 (2007) prescreve que o comprimento do CP deve ser, no mínimo, 3(λ), já Bucur (2006) estabeleceu que deve ser no mínimo 2(λ).

Gonçalves e Bartholomeu (2000) estudaram as correlações entre módulos de elasticidade dinâmicos (E_{din}) e módulos de elasticidade estáticos (E_{est}), em vigas de dimensões estruturais, na condição saturada das espécies Eucalipto Citriodora e Pinus elliotti, utilizando um equipamento de ultrassom de frequência de 45 kHz. O autor obteve correlações significativas para a correlação entre (E_{din}) e (E_{est}), os coeficientes de determinação variaram de 0,85 a 0,88. O autor conclui que o método mostrou-se eficiente como classificador de vigas de dimensões estruturais tanto na condição saturada como na condição seca ao ar.

Em virtude do método de ensaio não destrutivo apresentar-se como um método seguro, econômico e rápido, ele pode ser utilizado como uma boa alternativa aos métodos tradicionais de classificação. Além disso, seus resultados permitiram a proposição de tabelas de classificação de rigidez de peças estruturais de madeira em função da velocidade de propagação das ondas longitudinais de ultrassom na peça saturada.

No futuro, é provável que as vigas e pilares de bambu laminado sejam comuns no mercado, se forem feitos ajustes para qualificar o melhor tipo de colagem, pressão e rugosidade das tiras de bambu. A avaliação do bambu e do BLC, neste trabalho, foi feita por método de ensaios destrutivos e também não destrutivos, a partir da determinação de suas propriedades, mantendo os CPs na sua forma original, mesmo nos ensaios de compressão que não atingiram o limite máximo do material.

2.4 – Propriedades mecânicas em altas temperaturas por meio de ensaios não destrutivos (END)

No processo de fabricação do BLC, bambu laminado e colado, Xiao (2012) investiga o consumo de energia, emissão de dióxido de carbono e as principais propriedades mecânicas,

por testes do material submetido a altas temperaturas. As propriedades mecânicas do BLC são encontradas usando métodos desenvolvidos para material de madeira. Na norma de madeira diz que as propriedades elásticas e mecânicas podem ser consideradas constantes, até uma temperatura de 60 ºC.

Wu et al. (2013) pesquisaram a influência de alta temperatura e taxa de resfriamento sobre as propriedades térmicas, físicas e mecânicas de compósitos de partículas de bambu e ácido polilático na proporção de 1:1 pelo processo de prensagem. O compósito foi preparado a temperaturas maiores que 180 °C e resfriado sob taxas menores que 10 °C. Apresentam propriedades mecânicas superiores ao da matriz. Sob essas condições, ocorre interação mais forte entre o material agregado e a matriz polimérica e mobilidade das cadeias moleculares na interface do material.

Da mesma forma que algumas outras espécies florestais, o bambu é material combustível que, quando exposto à determinada quantidade de calor, gera gases derivados de sua decomposição química ou pirólise. Esse fenômeno faz com que haja perda de massa e redução da resistência (DE FLANDER; ROVERS, 2009). Sob tais condições, estruturas podem tornar-se instáveis e propensas a entrar em colapso.

Uma questão importante é a segurança quanto a incêndio em casas de bambu. Amplos estudos têm mostrado que as estruturas modernas de bambu apresentam resistência adequada ao fogo, se forem devidamente projetadas. Xiao e MAC J. (2012) realizaram o experimento de simulação de incêndio de um modelo de unidade de quarto em escala natural para estudar a segurança contra o fogo no material BLC. Os resultados proporcionam confiança ao design e validação de segurança contra incêndios em edifícios modernos de bambu. A simulação por computador usando BLC foi realizada e comparada satisfatoriamente com os resultados do teste.

Já Mena et al. (2012) apresentam uma pesquisa do comportamento do bambu Guadua *(Guadua Angustifolia)* submetido ao fogo. Essa pesquisa foi avaliada, por meio de fluxo de calor crítico para a ignição e propagação das chamas, apresentando a resistência ao fogo por taxa de carbonização e variação da resistência do bambu com a variação da temperatura. Os resultados indicam que é necessário haver mais energia, para propagar fogo no bambu Guadua *(Guadua Angustifolia)*, por isso, ele seria um material tão adequado quanto a madeira compensada, quando utilizado na construção.

Foi comprovado por todos os autores citados que a influência de alta temperatura e taxa de resfriamento sobre as propriedades térmicas e físicas do bambu em seu processamento elevam sua rigidez. Os resultados dos experimentos comprovam a possibilidade do emprego

do BLC nas construções, além de também ter se mostrado muito resistente quando submetido à situação de incêndio. Desta forma, a pesquisa pode orientar futura concepção de construções em bambu laminado colado, comprovando seu potencial na engenharia.

2.5 - Considerações Gerais

Após feito o levantamento bibliográfico, foi constatado que o bambu é um material promissor, resistente para estrutura e ajuda a reduzir o impacto ambiental, trazendo conforto térmico para construção. Foi comprovado que por falta de estudos técnico-científicos suficientes, o uso do bambu em estruturas ainda é precário.

Podem ser citadas desvantagens de padronização, como ele não ter uma geometria espacial regular, considerando-o um material ortotrópico (LIESE, 1985). Possui tendência a rachar, é altamente combustível, quando seco e não resiste à variação de umidade permanente, (CULZONI, 1986). Neste sentido, é preciso uma série de cuidados para obter um bom material para a engenharia. Estes cuidados ocorrem desde o corte até a utilização final.

Foi visto a importância da pressão na execução do BLC, Lima (2001), Rivero e Beraldo (2003). Desta forma, exercer domínio sobre a pressão de colagem, sem o desgaste do material com o uso da pressão mais eficiente para a ligação bambu-bambu, é muito importante, assim como conhecer as propriedades do adesivo é essencial para sua aplicação. A compatibilidade com o aderente é de suma importância e a utilização de adesivos químicos apropriada, quando é preciso produzir uma aderência química mais forte que os adesivos naturais. Quando há uma reação química, reforça significativamente a força de adesão (CARRASCO, 1985).

Cabe ressaltar que a qualidade e desempenho do produto final do material depende do cuidado no preparo durante sua fabricação. Desta forma, o preparo da superfície é muito importante e irá influenciar quanto à resistência à abrasão do material. A medição gráfica da rugosidade definirá o seu perfil. De acordo com a superfície do aderente, pode ocorrer a penetração do adesivo de forma mais eficiente. A busca em determinar a influência da rugosidade da superfície de colagem, na resistência ao cisalhamento para ligação bambu-bambu, ainda, não foi estudada, fazendo-se necessária.

Neste estudo, primeiramente, será investigada a parede do bambu por ensaios físicos em busca da sua densidade e umidade, ensaio mecânico não destrutivo, ensaio por excitação de ondas. No método dinâmico, os módulos elásticos são determinados, a partir das

frequências naturais do CP, em busca da resultante da deformação do material. A caracterização física mostra a complexidade do colmo do bambu, diferenciando-o de outras espécies e, principalmente, de outros materiais, podendo assim qualificá-lo quanto à sua umidade e densidade, provenientes de fatores variados. Através da confecção dos CPs, estarão sendo definidos métodos, tecnologias e processos, assim como elementos de um novo vocabulário, para uma linguagem construtiva vegetal.

Logo após, o BLC será investigado e, para isso, serão feitos ensaios destrutivos de compressão e não destrutivos de excitação de ondas e de ultrassom em busca da matriz de flexibilidade para este compósito, confecionado sob condições específicas para este trabalho.

O ensaio "destrutivo" a ser realizado consiste na lenta aplicação da carga e simultânea monitoração da deformação induzida, sem a inutilização do CP de BLC. Suas propriedades serão investigadas, utilizando a mesma metodologia apresentada por Mascia (1991) e Furlani (1995), para a madeira, já que nada foi encontrado para o BLC. Os CPs adotados serão conforme apresentados no item (3.2.3.2.1.1).

O método não destrutivo de ultrassom é feito pela propagação de ondas acústicas e é utilizado na determinação das propriedades mecânicas do material que é baseado na relação entre velocidade do som, módulo de elasticidade e a densidade do material (OLIVEIRA e SALES, 2000).

Para confirmação dos dados extraídos dos experimentos em temperatura ambiente, também, serão realizados ensaios não destrutivos, de excitação de ondas, sob alta temperatura, na busca de mais informações comparativas para o BLC.

Foi visto pelo levantamento bibliográfico a importância de um maior aprofundamento, nesta pesquisa, já que, na fronteira do conhecimento, não foram encontradas informações suficientes para o BLC, que este trabalho está querendo adquirir. Entretanto, a caracterização do BLC, é muito complexa, devida a variedade de espécies, idade da vara, tratamentos condição e localização dos plantios. Desta forma, esta pesquisa contribuirá com mais dados no estabelecimento do bambu laminado colado, para sua aplicação no mercado.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados nas instalações do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), e os ensaios não destrutivos, no Centro de Pesquisa Avançado de Madeira e Novos Materiais (CPAM^3) da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES.EE-UFMG), contando com o apoio do Laboratório de Ensaios não destrutivos, LabEND, da Faculdade de Engenharia Agrícola, Feagri, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.

Neste trabalho, foram avaliadas as características mecânicas do material estrutural de Bambu Laminado Colado (BLC). Seria a aplicação do material bambu, em um novo sistema de construção, composto por camadas de laminado de bambu Mosso *(Phyllostachys pubescens)*, coladas com adesivo bicomponente, à base de resina resorcinol formaldeído, sob uma pressão específica.

Os CPs de BLC utilizados, para determinação das constantes elásticas nos Ensaios Não Destrutivos (ENDs), foram os mesmos utilizados no ensaio destrutivo. Para determinação do teor de umidade e densidade aparente, foi utilizado o grupo de amostras retiradas do bambu. Os procedimentos de ensaio, para determinação de características mecânicas, seguiram as prescrições da ISO 22157-1 da International Standard (2004), NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT; 1997) e os rigorosos padrões dos requisitos e procedimentos dos laboratórios do Centro de Pesquisa Avançado da Madeira (CPAM^3).

3.1 - Materiais

3.1.1 - Adesivo

O adesivo utilizado foi o resorcinol formoldeído, conhecido comercialmente como CASCOPHEN. Ele é aplicado como material ligante, passa do estado líquido para o sólido, podendo reagir com a celulose, formando um só elemento. É aplicável em estruturas funcionais, formais e de elevada resistência.

O CASCOPHEN RS-216-M, conforme boletim técnico da Hexion, é uma resina sintética à base de Resorcinol-Formol, em solução álcool/água, recomendada especialmente para colagens resistentes à água fria ou fervente, a muitos solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco ou úmido. Cola todos os tipos de madeira, chapas duras e outros materiais semelhantes, proporcionando uma liga perfeitamente durável. Apropriado para trabalhos navais, hidráulicos e outros, cuja colagem deverá ficar exposta temporária ou definitivamente à ação das intempéries, água, entre outras, como é o caso de barcos, escadas e caixas d'água.

Ele é utilizado como endurecedor FM-60-M (em pó). Nas colagens de vigas laminadas estruturais, é comum utilizar-se gramaturas de 300 a 500g/m^2 de mistura por linha de cola. A espessura na linha adesiva e a pressão determinam a máxima resistência e a rigidez na junta adesiva. A linha adesiva deve ser a mais fina possível, sem faltar adesivo na ligação.

Quando o aderente é poroso, a junta fica empobrecida pelos poros. A consistência do adesivo deve ser adequada para ser esparramada no aderente com espessura desejada. A consistência é determinada pela viscosidade, pela elasticidade e pela plasticidade do adesivo. O adesivo deve ser aplicado nas duas superfícies dos aderentes a serem colados. Para uma boa colagem, a umidade do bambu deve ser de 8 % a 12 %. Bambus com maior teor de umidade podem resultar em colagem fraca ou defeituosa. O adesivo deve ser preparado, numa razão de mistura resina/pó endurecedor de 5:1 (resina: pó endurecedor), e o tempo para cura deve ser de 24 horas, segundo orientação do fabricante.

O aderente deverá ser preparado pouco tempo antes de sua aplicação. Movimentação, empenamento e deformação ocorrem, em menos de 48 horas após a preparação e, portanto, para obtenção de colagens com alta qualidade e resistência, o ideal é que a preparação do bambu seja feita próxima ao momento de aplicação do adesivo.

3.1.2 - Bambu para fabricação do BLC

O bambu é uma gramínea pertencente à família *Poaceae*, subfamília *Bambusoideae* com mais de 1.250 espécies e 75 gêneros (LIESE, 1998 e BERALDO, 2007).

Foi utilizada a parte do meio do colmo do bambu, da espécie *Phillostachys pubescens*,

de 3 a 4 anos de idade, com 3 metros de comprimento, parte intermediária, tratada a vapor e colhida na região de São Paulo, Brasil. O diâmetro externo do colmo do bambu variou de 12 a 14 cm, com a espessura da parede de 0,7 a 1,0 cm e com média de espaçamento entre nós de 35cm. A casca da parede externa e interna foram retiradas no confecção das lâminas. Para as próximas metodologias, foram utilizados 7 colmos de bambus da mesma espécie, sendo o sétimo utilizado como reserva. Foram retirados conjuntos de amostras da parede do bambu para todos os experimentos. A Fig.3.1 mostra o estoque de bambu, no LAAES-UFMG.



Figura 3.1 - Estoque de bambus.

3.2 - Metodologia

3.2.1 - Influência da Pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

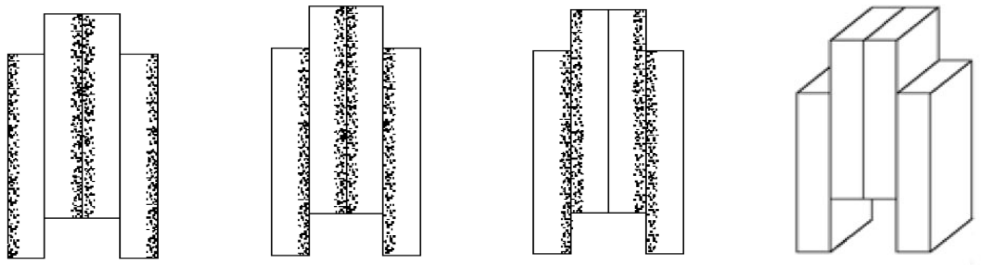
Esta investigação foi realizada com o objetivo de identificar a pressão ótima de colagem na ligação bambu-bambu.

A aplicação de pressão, antes da cura, produzirá um enchimento dos poros e deslocamento do ar da interface do aderente (penetração). Essa pressão também é necessária para se obter uma linha adesiva fina e resistente. Para obter a pressão ótima, foram aplicadas as pressões, em MPa: zero (sem pressão); 2,5; 3,75; 5; 6,25; 7,50 e 8,75.

A característica mecânica de maior influência na ligação adesiva é a resistência ao cisalhamento, pois a transmissão de carga destas ligações se dá por cisalhamento do adesivo ou da interface entre o bambu e o adesivo.

3.2.1.1 - Corpos de Prova (CPs)

Foram montados sete conjuntos de 18 CPs, compostos de três combinações diferentes: miolo com miolo (MM), miolo com casca (MC) e casca com casca (CC), totalizando 126 CPs, Fig. (3.2). Para isso foram cortadas as taliscas de bambu, retiradas as cascas externa e interna de sua parede, na confecção das lâminas. A área útil resultante desta seção para a execução de cada lamina foi de 5 x 25 mm. Os CPs foram dimensionados, em função da espessura máxima da parede do bambu e estavam compostos por quatro lâminas de 50 mm de comprimento, por 25 mm de largura e lâminas de 5 mm de espessura, coladas entre si, apresentados na Figura (3.2).



(a) (b) (c) (d)

Figura 3.2 - Combinação dos CPs: (a) MM; (b) MC; (c) CC e (d) Esquema do CP.

Primeiramente o colmo do bambu foi dividido em taliscas, em seguida, retirada a casca interna e externa, transformado-o em lâminas padronizadas, com a seção de 5 x 25 mm, com espessura de 5mm, como mostra a sequência na Fig. (3.3).

Os CPs confeccionados foram denominados como MM_i, MC_i e CC_i, sendo i = 1 até 7 de acordo com sua combinação. Eles foram colocados em cantoneiras, na direção axial da

montagem, para evitar a flambagem do conjunto. A sua fixação nas cantoneiras foi feita com braçadeiras plásticas, durante um periodo de 24 h, até sua retirada do sistema.



(a) (b)

Figura 3.3 - (a) Corte radial do bambu em taliscas; (b) Taliscas sem a casca interna e externa.

É mostrado na Fig. (3.4), a sequência de montagem dos CPs. Cada conjunto foi submetido à uma prensagem diferente nos intervalos de zero à 8,75 MPa. O bambu foi comprado já tratado no vapor pelo fornecedor. Isso é de suma importância para que o laminado não sofra tantas variações dimensionais quanto a ação de temperature e umidade.



(a) (b)

Figura 3.4 - Sequência da confecção dos CPs: (a) Lâminas padronizadas; e (b) CPs posicionados nas cantoneiras para prensagem.

São mostrados na Fig. (3.5) os CPs resultantes da prensagem com a variação da combinação das superfícies em lotes compostos de CM, CC e MM.



(a)



(b)

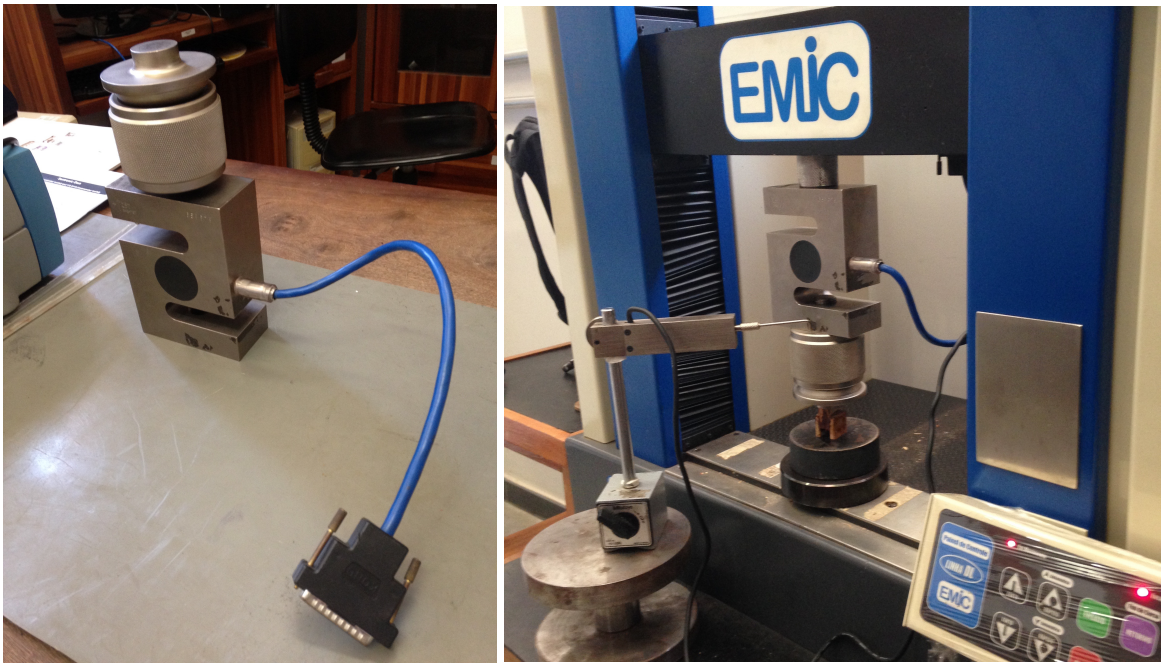


(c)

Figura 3.5 - (a) Lote de CPs na prensa hidráulica; (b) Lotes de CPs prensados; e (c) CPs prensados.

3.2.1.2 - Instrumentação

Para realização dos ensaios, foi utilizada uma rótula, célula de carga universal de 50 kN, calibrada até 30 kN e um medidor de deslocamento EMIC (MD), que trabalhou no sentido vertical como mostrado Fig. (3.6).



(a) (b)

Figura 3.6 - (a) Rótula Universal e (b) Medidor de deslocamento vertical, MD.

Na Fig. (3.7) são mostrados a conexão da máquina de compressão ao Sistema de Aquisição de Dados (SAD) e o CP posicionado para o ensaio de cisalhamento.



(a) (b)

Figura 3.7 - (a) Sistema de prensagem conectado ao SAD; e (b) CP com a rótula no sistema.

3.2.1.3 - Ensaio de Cisalhamento

Os ensaios foram realizados, de acordo com as normas técnicas estabelecidas, em condições padronizadas que permitam obter resultados de aplicação mais geral e que possam ser utilizados e reproduzidos em qualquer lugar.

Os ensaios de cisalhamento foram executados na Máquina Universal. Foi confeccionado um programa "script" na linguagem da máquina de ensaios para sua automatização.

O ensaio foi realizado com carga monotônica crescente, com controle da carga equivalente a 10 MPa / minuto. A duração foi de 12 minutos. Antes de iniciar o ensaio, o CP foi medido com paquímetro, determinando-se a área colada e o comprimento da linha cola. Em seguida, o CP foi posicionado, na máquina de ensaios, instrumentado e logo foi iniciado o experimento.

A partir do primeiro ensaio, pressão de colagem zero, foi constatada a dificuldade de ruptura da ligação, ocorrendo um esmagamento na base do CP, como mostrado na Figura (3.8). Para os ensaios seguintes a proporção dos CPs foi alterada, com o objetivo de diminuir a área de contato entre as lamina do BLCs. As amostras de dimensão de 5 x 25 x 5mm que compunha os CPs, foram alterada para a dimensão de 2,5 x 2,5 x 5 mm, sendo cortados os CPs já confeccionados, para os ensaios seguintes.



(a) (b) (c)

Figura 3.8 – (a) Ensaio compressão; (b) Esmagamento das fibras do CP e (c) CPs redimensionados.

No final do experimento, o programa forneceu a tensão de cisalhamento na ruptura e os coeficientes de deslizamento de serviço (K_{serv}) e último (K_u) que serão descritos no item a seguir.

3.2.1.3.1 - Módulo de Deslizamento

O módulo de deslizamento, é a propriedade utilizada para cálculo de deformação entre dois elementos de uma estrutura, pr EN 1995-1-1:2003 (E). A ligação bambu-adesivo-bambu pode ser considerada como linearmente elástica. Para o dimensionamento do BLC, está sendo determinado, adicionalmente, neste trabalho, o módulo de deslizamento, dado essencial para o dimensionamento de peças do material.

Segundo Mascia e Soriano, (2004), a rigidez da conexão (k) é denominada módulo de deslizamento e quantifica a resistência oferecida ao deslizamento relativo entre o adesivo e o bambu, quando a estrutura é carregada. O módulo de deslizamento pode classificar-se em de serviço (k_{ser}), para o estado limite de serviço; e módulo último (k_u) para o estado limite último. O primeiro corresponde aos níveis de carregamento iniciais e o segundo pode ser considerado como $k_u = 2/3\ k_{ser}$. Na Fig. (3.9), é apresentado um diagrama esquemático representando o módulo de deslizamento, para uma composição madeira com madeira e com a ligação feita através de pinos. Não apresenta uma continuidade, ocorrendo um escorregamento.

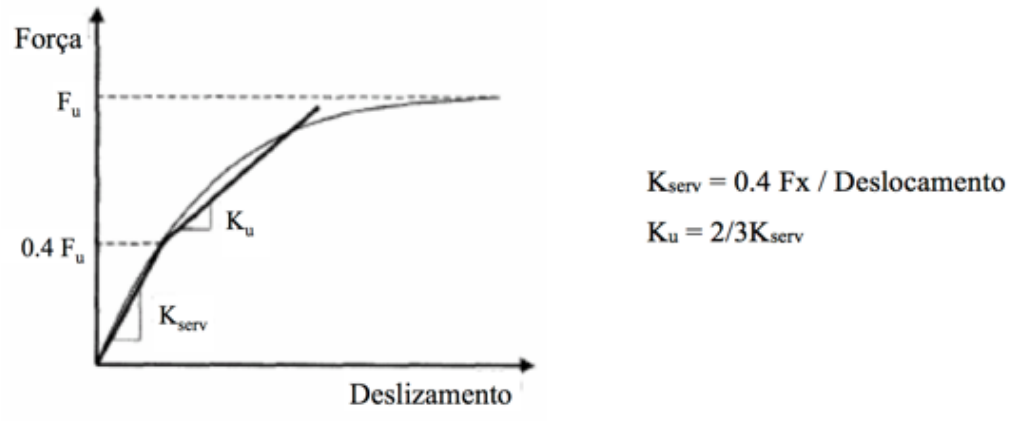
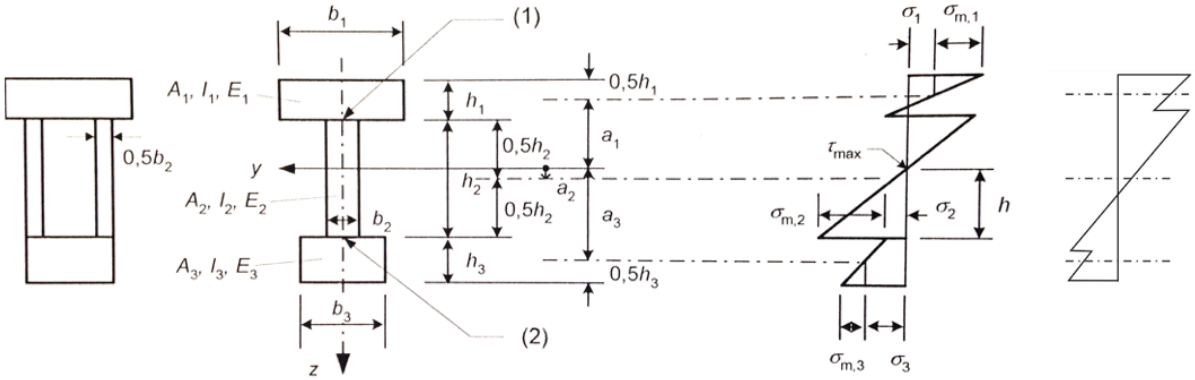


Figura 3.9 - Módulo de deslizamento. Fonte: ABNT-7190.

O k_{ser} e a resistência da conexão são parâmetros importantes para o dimensionamento das vigas mistas e podendo também ser utilizado em laminados colados. Atualmente, não existe um ensaio de cisalhamento padrão para estruturas de bambu. Os pesquisadores utilizam normas tais como a EN26891, o EUROCODE-5 e a NBR 7190, com algumas adaptações.

Com relação às expressões teóricas, o EUROCODE 5-parte 2 (draft 2003), especifica

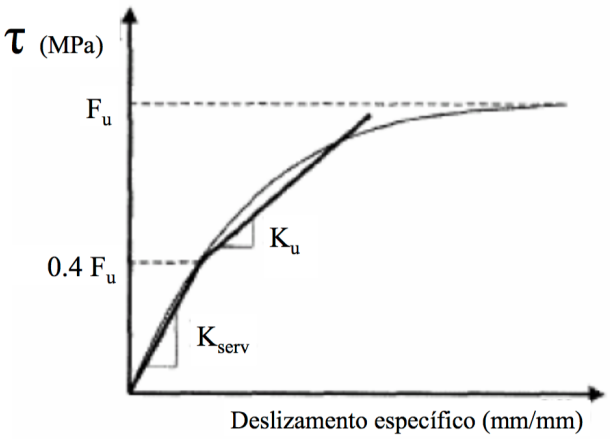
que a resistência das ligações e, para as seções mistas, no caso deste trabalho, o bambu e o adesivo poderão ser calculados, utilizando-se as mesmas expressões para ligações entre peças de madeira. Na Fig. (3.10) é mostrado a seção transversal de uma viga composta, distribuição de tensões apresentada pelo EUROCODE 5 e a distribuição de tensões prováveis para uma ligação colada (Carrasco 1989). É importante ressaltar que para o experimento deste trabalho os materiais utilizados, foram o bambu e o adesivo, unidos através de uma ligação contínua, onde o adesivo é aplicado em toda superfície. Na composição do BLC, o módulo de deslizamento será apresentado em função da área colada e o deslizamento específico e será chamado de *módulo de deslizamento específico*, Figura 3.10.



(a) (b) (c)

onde: (1) distância: S_1 módulo de deslizamento: K_1 carga: F_1

(2) distância: S_2 módulo de deslizamento: K_2 carga: F_2



(d)

Figura 3.10 – Flexão em vigas: a) Seção transversal; b) Distribuição de tensões; e c) Distribuição para peças coladas; e d) Módulo de deslizamento específico, Fonte: ABNT-7190, adaptado pela autora.

Na formulação apresentada pelo EUROCODE-5, para vigas compostas é possível fazer modificações considerando o módulo de deslizamento específico em formulação para o BLC.

Ainda é importante ressaltar que alguns pesquisadores indicam, que as expressões propostas pelo EUROCODE 5, para ligações madeira-madeira, não apresentavam valores próximos aos obtidos em trabalhos experimentais. Eles também propuseram algumas equações e citaram a importância do desenvolvimento de trabalhos que resultem na elaboração de expressões mais adequadas para as estruturas (OLIVEIRA, 2001). Isto fortalece a necessidade de determinar o módulo de deslizamento específico para o cálculo do BLC.

3.2.2 - Ensaio da influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

O ensaio foi realizado nas instalações do Centro de Pesquisa Avançado de Madeira e Novos Materiais (CPAM^3) da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES.EE-UFMG).

Objetivou-se nesta investigação determinar a rugosidade da superfície de colagem do laminado de bambu para identificar a influência na máxima resistência da ligação do BLC ao cisalhamento. Na pesquisa bibliográfica investigada, não foi encontrado nada da rugosidade visando dar a máxima resistência ao bambu, somente à madeira. Desta forma, será utilizada uma adaptação de metodologias de medição do estado da superfície da madeira para o bambu.

A preparação de superfícies e a pressão de colagem são fatores de grande importância para a qualidade da ligação. A textura de uma superfície de ligação é determinada pelo tipo e pela qualidade do processo de usinagem, da estrutura anatômica exposta e a resposta ao processo de usinagem. Durante o processo de usinagem, são deixadas marcas ou sulcos pela ferramenta na superfície. Define-se rugosidade como a textura primária, que leva em consideração os vales e picos da superfície (amplitude R_A).

Em uma primeira etapa, definiu-se estudar a rugosidade de lâminas de bambu exposta a variadas lixas, proporcionando 6 rugosidades diferentes. Assim, foram compostos 6 conjuntos de 6 CPs, preparados com lixas diferentes. Após o preparo das superfícies das amostras, elas foram analisadas com um aparelho, o rugosímetro, que fez as leituras dos variados relevos.

Na segunda etapa, as lâminas preparadas e analisadas foram montadas, coladas e prensadas, sob a melhor pressão de colagem encontrada de 2,5 MPa no primeiro objetivo desta pesquisa, definida pelo valor de tensão de ruptura. Os 6 CPs confeccionados com diferentes superfícies, foram submetidos ao cisalhamento e analisada a rugosidade mais eficiente na adesão bambu-bambu para cada um deles.

Nos ensaios, os parâmetros de usinagem podem ser variados, e as melhores qualidades superficiais obtidas determinam quais são as características ideais para esse processamento (LEMASTER; BEALL, 1996).

3.2.2.1 - Corpos de prova (CPs)

Para confecção dos CPs, no ensaio da rugosidade, na obtenção de lâminas de bambu, foram feitos os mesmos procedimentos descritos para o item (3.2.1.1), havendo alteração na composição e no dimensionamento de suas lâminas. Na primeira etapa, foram preparadas 108 lâminas, totalizando 216 superfícies (internas e internas). Na etapa seguinte, as lâminas foram coladas e prensadas na confecção de 36 CPs, 6 para cada tipo de superfície, os quais depois foram submetidos ao ensaio de cisalhamento.

Na primeira etapa, foram preparadas as superfícies interna e externa de cada uma das 108 lâminas de bambu, na dimensão de 2,5 x 2,5 x 0,5 cm. Os seis lotes, para confecção dos CPs, foram compostos com 18 amostras cada. No primeiro lote, não foi feito o uso da lixa, somente a superfície resultante do corte na serra e os lotes seguintes, submetidos às lixas nº 80, 120, 180, 220 e 320.

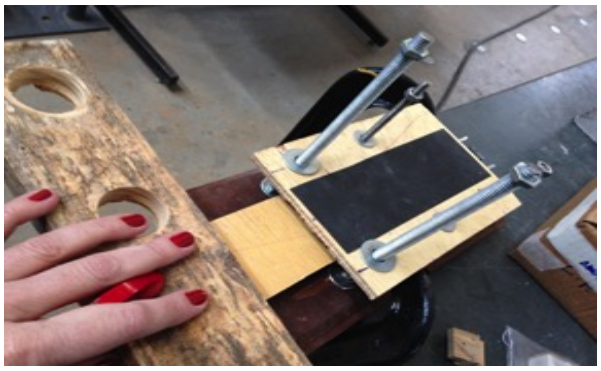
Para garantir um lixamento paralelo na superfície do bambu, foi montado um sistema constituído de uma base de madeira e corrediça telescópica, possibilitando o deslizamento da lixa paralelo à amostra. A amostra foi posicionada em um gabarito e a cada etapa foi colocada uma lixa diferente no sistema, posicionada e guiada por parafusos. Este sistema é mostrado na Fig. (3.11).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.11 - (a) Confecção da lâmina resultante do corte na serra; (b) Sistema de corrediça para lixar as amostras; (c) Placa superior com lixa; e (d) Amostras após o tratamento com lixa.

Na segunda etapa, as lâminas foram montadas, coladas e prensadas na confecção dos CPs. Cada CP foi composto de três lâminas, sempre na combinação de CM (casca com miolo), já que não apresentou nenhuma relevância a variação de CC, MM e CM no ensaio anterior de cisalhamento. Foram confeccionados 6 CPs, para cada padrão de superfície, 6 rugosidades diferentes, totalizando 36 CPs, apresentados na Fig. (3.12).



(a) (b)

Figura 3.12 – (a) Preparo dos CPs na nova configuração e (b) CPs prensados posicionados no gabarito de contoneira.

3.2.2.2 - Instrumentos para ensaio da rugosidade – Rugosímetro

Depois de preparadas as lâminas, foi utilizado o rugosímetro, na superfície de cada amostra, submetida a diferentes lixamentos.

O rugosímetro é um aparelho de circuitos eletrônicos, no qual uma pequena agulha percorre a superfície da amostra, definindo numérica ou graficamente o seu perfil (GONZALEZ, 1987). A R_a (rugosidade media) é dada em (μm), fornece-nos o parâmetro de amplitude (média) em um intervalo entre vales e picos da superfície do material analisado.

O aparelho adotado para este ensaio foi o Taylor Hobson precision, apresentado na Fig. (3.13). Ele detecta o movimento vertical do estilete, apresentando uma média de cálculo da superfície do material.

Para cada amostra, foram feitas 12 leituras, 3 leituras referentes à superfície interna e 3 leituras da superfície externa da lâmina, no sentido normal e paralelo à fibra da amostra, totalizando em 1.296 dados.

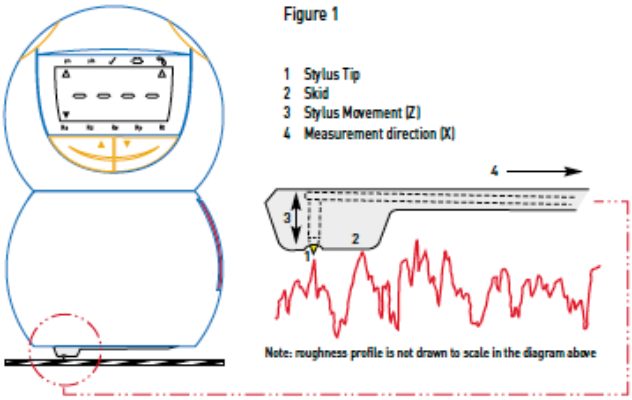


Figura 3.13 - Aparelho Taylor Hobson *precision*.

É necessária a calibração do aparelho, antes de sua aplicação no material, a qual é feita por leitura de uma placa fornecida pelo fabricante, com a rugosidade pré-estabelecida como um parâmetro de uso.

O restante dos equipamentos e instrumentação utilizados foram os mesmos apresentados no item (3.2.1.1).

3.2.2.3 - Ensaio de cisalhamento

O ensaio ocorreu da mesma forma que o ensaio já apresentado no item (3.2.1.3). Para determinar o coeficiente de deslizamento deste ensaio, foi considerado o mesmo procedimento adotado no item (3.2.1.3.1).

3.2.3 - Ensaio de caracterização física em temperatura ambiente do bambu e determinação da matriz de flexibilidade do BLC - "Destrutivo"

Este ensaio foi determinado como "Destrutivo", porque chegou-se ao limite da elasticidade do material, mas o CP não foi destruído.

Primeiramente o objetivo deste trabalho foi determinar experimentalmente as características físicas, na espessura da parede do bambu, investigando sua densidade e retrações para, na segunda etapa, determinar a sua característica mecânica, investigando seu módulo de elasticidade e o fator anisotrópico.

Posteriormente o BLC foi investigado e, para isso, foram feitos ensaios destrutivos de compressão, ensaios não destrutivos de ultrassom e de excitação de ondas, em busca da matriz

de flexibilidade para este material específico, para, assim, qualificá-la pela comparação dos resultados.

3.2.3.1 - Caracterização física

O bambu se dilata com o aumento da umidade e se contrai com a sua perda, sendo assim um material higroscópico. Essas mudanças normalmente são mais acentuadas no diâmetro do que no comprimento, ou seja, nota-se que as variações dimensionais são maiores no sentido radial.

O sentido tangencial apresenta pequenas variações, em relação ao sentido radial e, praticamente, não existe variação no sentido longitudinal. Desta forma, estas mudanças foram confirmadas com ensaios realizados no bambu.

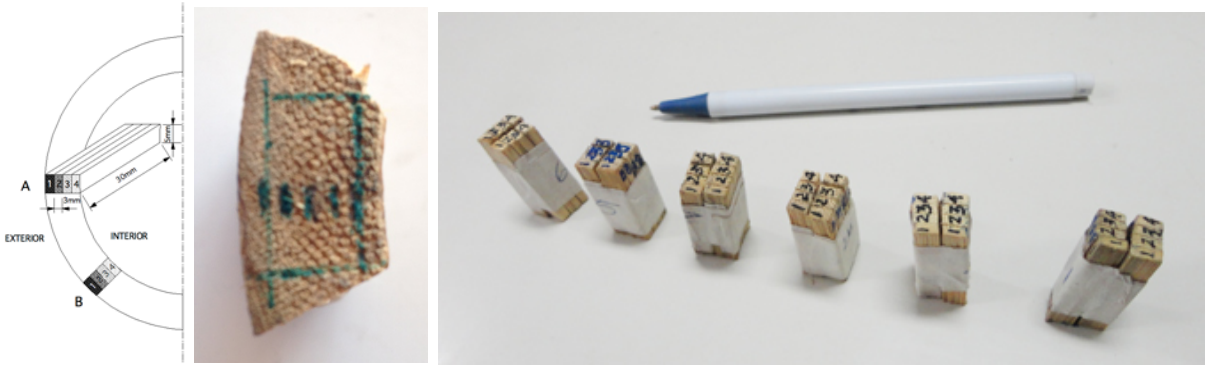
3.2.3.1.1 - Corpo de prova (CP)

Foi utilizada a parte do meio do colmo do bambu da espécie *Phillostachys pubescens*. Foram retirados 6 conjuntos de amostras da parede de cada colmo de bambu, para todos os experimentos. Na Figura (3.14), é mostrada a seção de onde foram retiradas as amostras do bambu.



Figura 3.14 - Seção da parede do bambu.

Para a preparação dos CPs, primeiramente, foi retirada 2 mm da casca externa e interna, da parede do bambu de aproximadamente 12 mm. Depois desta seção da talisca ser desengrossada sem a casca e o miolo, a espessura da parede restante foi de aproximadamente 8 mm. Ela foi dividida em quatro partes e retiradas as 4 amostras da parte externa para a parte interna da parede do bambu. As medidas dos CPs foram 3 x 5 x 30 mm, como são mostradas na Fig. (3.15).



(a) (b) (c)

Figura 3.15 - (a) Esquema dos CPs; (b) Retirada dos CPs da secão do bambu; (c) Lotes de CPs.

3.2.3.1.2 - Ensaio de caracterização física

Os ensaios experimentais e a metodologia aplicada, para coletar os dados das propriedades físicas, seguiram rigorosamente a ABNT-7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1997).

Na Fig. (3.16) são mostradas as direções principais do CP, sendo cada um pesado em balança eletrônica com sensibilidade de milésimo de grama e a medição foi feita com um paquímetro digital, com sensibilidade de centésimo de milímetros. Todos os aparelhos, dentre eles paquímetro, balança e estufa, foram calibrados por órgão competente, segundo as recomendações do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO).



(a) (b) (c)

Figura 3.16 - (a) Esquema das direções principais do CP; (b) Pesagem do CP; (c) Medição do CP.

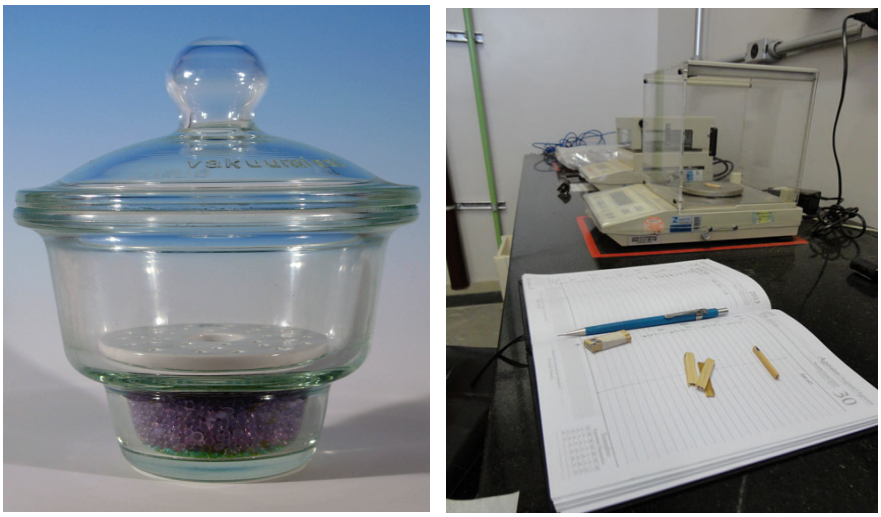
Depois que as amostras foram pesadas e medidas, elas foram colocadas numa estufa e acondicionadas em uma temperatura de 102^0 C, durante um período de 24h, para perderem a umidade como mostrado na Fig. (3.17). Uma vez totalmente secas, as amostras foram pesadas e medidas novamente.



(a) (b)

Figura 3.17– Vista estufa: (a) Externa; e (b) Interna.

No intervalo de tempo entre a retirada dos CPs da estufa até sua nova medição e pesagem, os CPs ficaram em um dissecador, para que não absorvessem a umidade do meio ambiente Fig. (3.18).



(a) (b)

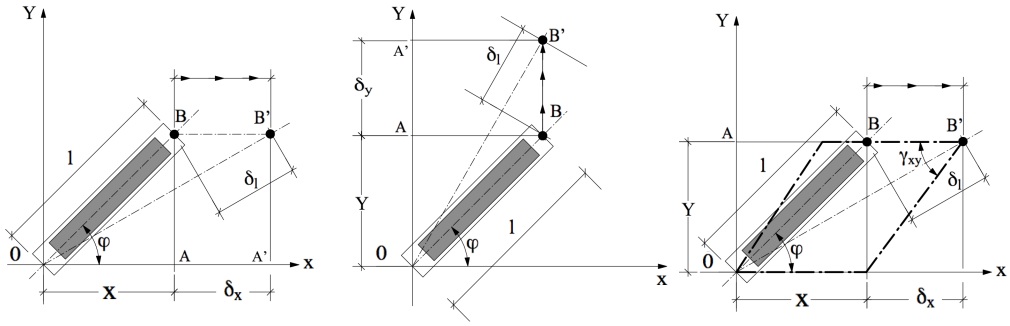
Figura 3.18 - (a) Dissecador; e (b) Segunda pesagem e medição dos CPs.

Segundo a norma brasileira, depois dos CPs ficarem na estufa por um período de 24h, eles são pesados, medidos e voltaram para estufa mais 5 minutos. Eles foram novamente retirados da estufa e pesados e medidos, para confirmar se o teor de umidade foi de 0,05 %. No trabalho aqui apresentado, não foi feita outra secagem na estufa, porque a dimensão do CP era muito pequena e foi considerado que o CP já estava totalmente seco.

3.2.3.2 - Determinação da matriz de flexibilidade

A matriz estará representando de forma similar, a uma matriz de flexibilidade, do material BLC, para as condições específicas deste trabalho. Ao determinar a matriz de flexibilidade deste compósito, foram utilizadas referências que tratam da determinação dos parâmetros elásticos de forma geral. Foram comparados os métodos para a determinação da matriz do BLC, composto com laminado de bambu específico e adesivo bicomponente, por meio de ensaio de compressão estática, ultrassom e excitação de ondas. A medida das deformações foi realizada com medidas de deslocamento para cada ensaio.

Com a composição de alguns medidores de deslocamento (MD), foram determinadas as deformações nas direções xy e a distorção por cisalhamento. A seguir, é apresentada uma descrição dos esquemas do grupo de MD utilizados e a formulação para determinar as deformações. Na Figura (3.19), é mostrado um MD, na linha OB, formando um ângulo φ com o eixo x. Após a aplicação de um deslocamento δ_x na direção x, a linha OA passou a ser OA'e a linha OB passou a ser OB'.



(a) (b) (c)

Figura 3.19 – Esquema de deslocamentos em um MD: (a) direção X; (b) Direção Y; (c) Resultante. Adaptado por Carrasco (1989).

A deformação na direção x é:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_x}{x}, \tag{6}$$

A deformação determinada pela medida do MD é:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\delta_l}{l}, \tag{7}$$

Sendo: $$l = \frac{x}{\cos\varphi}, \quad ; \quad \delta_l = \delta_x \cos\varphi \tag{8}$$

Tem-se: $$\varepsilon_\varphi = \frac{\delta x \cos^2\varphi}{x} = \varepsilon_x \cos^2\varphi \tag{9}$$

Em que:

ε_φ é a deformação em na direção OB.

δ_l é variação na dimensão l do MD.

δ_x é variação na dimensão do MD na direção x.

A seguir, é aplicado um deslocamento na direção y, Figura (3.19) - (b), por meio de relações geométricas análogas entre ε_y e ε_φ e, com o ângulo 90º - φ, tem-se:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_y \cos^2(90-\varphi) = \varepsilon_y \operatorname{sen}^2 \varphi \qquad (10)$$

Finalmente aplica-se um deslocamento, em virtude da tensão de cisalhamento, τ_{xy}, Figura (3.2)-(c). A deformação na direção do MD em decorrência do alongamento δ_l é:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\delta_l}{l} = \frac{\delta x \cos\varphi}{y/\sin\varphi} \qquad (11)$$

Com:

$$l = \frac{y}{sen\,\varphi} \qquad \text{e} \qquad \delta_l = \delta_x \cos\varphi, \text{ equação (8)} \qquad (12)$$

Sendo: $\delta_x = y \tan\gamma_{xy} \cong y\,\gamma_{xy}$, (devido ao ângulo ser muito pequeno)

Em que:

γ_{xy} ângulo resultante da deformação (distorção);

Tem-se: $\delta_l = y\gamma_{xy}\cos\varphi$ e $\varepsilon_\varphi = \frac{y\,\gamma_{xy}\cos\varphi}{y/sen\,\varphi} = \gamma_{xy}\sin\varphi\cos\varphi$ (13)

Atuando simultaneamente ε_x , ε_y e γ_{xy}, a deformação será a soma algébrica das equações (9), (10) e (13). Desta maneira, obtém-se:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_x \cos^2\varphi + \varepsilon_y \operatorname{sen}^2\varphi + \gamma_{xy} \operatorname{sen}\varphi \cos\varphi \qquad (14)$$

escrevendo em termos de ângulo duplo, tem-se:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} + cos2\varphi + \frac{\gamma_{xy}}{2} sen2\varphi \qquad (15)$$

Para se ter as deformações ε_x , ε_y e γ_{xy}, é necessário efetuar medidas de 3 deslocamentos e logo 3 deformações ε_1, ε_2 e ε_3, em três direções φ_1, φ_2 e φ_3 em relação ao eixo X. Assim:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} cos2\varphi_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} sen2\varphi_1$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} cos2\varphi_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} sen2\varphi_2 \qquad (16)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} cos2\varphi_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} sen2\varphi_3$$

Com as equações (16), podem-se determinar ε_x , ε_y e γ_{xy} . Caso seja necessário determinar as deformações em outras direções, a partir das deformações na direções x e y, a transformação tensorial das componentes de deformações é dada por:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \gamma'_{xy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} cos^2\varphi & sen\varphi\, cos\varphi & sen^2\varphi \\ sen^2\varphi & -sen\varphi\, cos\varphi & cos^2\varphi \\ -cos\varphi\, sen\varphi & (cos^2\varphi - sen^2\varphi) & 2sen\varphi\, cos\varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} \qquad (17)$$

Considerando-se a roseta da Fig. (3.20), formada por 3 MD, os ângulos de inclinação quanto ao eixo X são: $\varphi_1 = 0^o$, $\varphi_2 = \theta$ e $\varphi_3 = 90^o$, substituindo na equação (16).

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} + cos2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} sen2\theta_2$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2} = \varepsilon_y \qquad (18)$$

resolvendo para ε_x, ε_y e γ_{xy}, *tem-se:*

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_3$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1+\varepsilon_3) - (\varepsilon_1+\varepsilon_3)cos2\,\theta}{sen2\theta} \quad \text{ou} \quad \gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 cos^2\theta - \varepsilon_3 sen^2\,\theta}{sen\theta cos\theta} \qquad (19)$$

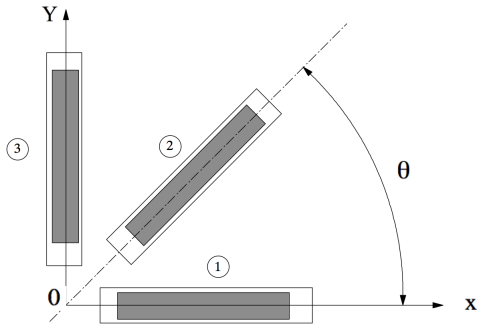


Figura 3.20 – Roseta trevo.

A princípio serão necessários 3 MD, entretanto, como o ensaio a ser realizado para determinação das constantes elásticas é a compressão simples apenas, serão necessários 2 MD para definir o estado de tensões, como será apresentado a seguir:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cos^2\theta + \varepsilon_3 \operatorname{sen}^2\theta + \gamma_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$0 = \gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 cos^2\theta - \varepsilon_3 sen^2\theta}{sen\theta cos\theta}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cos^2\theta + \varepsilon_3 \operatorname{sen}^2\theta$$

Seja o CP da Fig. 3.21 solicitado pela tensão σ_L, direção paralela às fibras, L, chamado de corpo de prova tipo I (CP-I), instrumentado com três MD formando uma roseta. As constantes elásticas, no ponto A, podem ser calculadas da seguinte maneira:

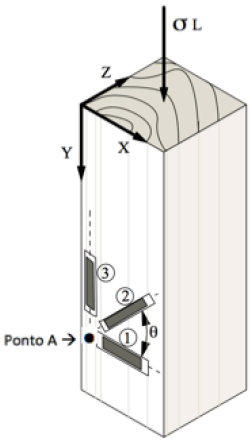


Figura 3.21 – Esquema de carga do CP-I solicitado à compressão.

Considerando que apenas é aplicada a tensão σ_y, isto é, as outras tensões são iguais a zero, substituindo-se estas tensões na equação 1 ($\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}.\ \delta_{kl}$), 14 e 19, tem-se:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 = -\frac{\upsilon_{yx}}{E_y}\sigma_y \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 = \frac{\sigma_y}{E_y} \\ \gamma_{xy} &= 0 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_1 cos^2\theta + \varepsilon_3\ sen^2\theta \end{aligned} \tag{20}$$

Assim:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_3} \tag{21}$$

$$\frac{E_y}{\upsilon_{yx}} = -\frac{\sigma_y}{\varepsilon_1} \tag{22}$$

Com as transformações tensoriais das componentes de tensão e de deformação tem-se:

$$\gamma_\theta = 2\left(\varepsilon_x - \varepsilon_y\right) sen\theta cos\theta + \gamma_{xy}(cos^2\theta - sen^2\theta)$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy}(cos^2\theta - sen^2\theta) + \left(\sigma_y = \sigma_x\right) sen\theta cos\theta$$

e com; $G_\theta = \frac{\tau_\theta}{\gamma_\theta} = G'_{xy} = G'_{TL}$

tem-se: $G_\theta = \frac{\sigma_y}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} = G'_{xy} = G'_{TL}$ (23)

Utilizando as transformações tensoriais das componentes de tensão e deformação e das constantes elásticas, dadas por Lekhnitskii (1981), é possível obter a constante G_{xy}. Observando as equações 17, 18 e 19, conclui-se que são necessários apenas 2 MD ($\varepsilon_1\ e\ \varepsilon_3$). Na Figura 3.22 é mostrada a localização dos MD. Serão utilizados 6 MD, sendo 2 na direção da força aplicada (um em cada face oposta) e 4 perpendiculares à força aplicada, sendo 1 em cada face.

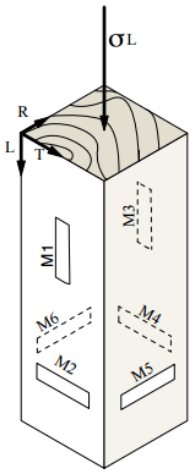


Figura 3.23 – Posição dos 6 medidores de deslocamento.

Agora aplicando as tensões na direção radial (R), CP-II e tangencial (T), CP-III, separadamente, seguindo um raciocínio análogo, obtêm-se as outras constantes elásticas. E, utilizando as equações apresentadas por Lekhnitskii (1981), obtêm-se os módulos de elasticidade transversais:

$$\frac{1}{G'_{LR}} = 4\left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{\nu_{LR}}{E_L} - \frac{1}{G_{LR}}\right) sen^2\theta\, cos^2\theta + \frac{1}{G_{LR}}$$
$$\frac{1}{G'_{LT}} = \frac{sen^2\theta}{G_{RT}} + \frac{cos^2\theta}{G_{LT}}, \qquad (24)$$
$$\frac{1}{G'_{RT}} = \frac{cos^2\theta}{G_{RT}} + \frac{sen^2\theta}{G_{LT}},$$

Os módulos de elasticidade transversais também podem ser determinados pelos CPs orientados nos planos: LT, CP tipo IV (CP-IV), LR, CP tipo V (CP-V) e RT, CP tipo VI (CP-VI), Figura 3.24 (método 1). Com estes CPs, é obtido o Eα que corresponde ao E, em cada plano. Utilizando as equações determinadas por Mascia (1991), obtêm-se todos os módulos de elasticidade transversais:

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_T(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{sen^4\alpha}{E_L(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L}$$
$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_R(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{sen^4\alpha}{E_L(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L}, \qquad (25)$$
$$\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_R(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{sen^4\alpha}{E_T(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T}$$

Na Figura 3.23 é apresentada esquematicamente a posição em que deverão ser retirados os CPs e na Tabela 3.1, as constantes elásticas que serão determinadas para cada CP, BLC.

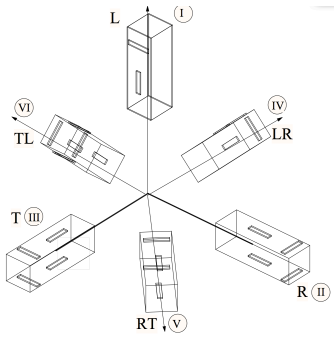


Figura 3.23- Posições para a retirada de CPs de BLC.

Tabela 3.1 - Corpos de Prova e constantes elásticas correspondentes.

Constantes Elásticas	Corpo de Prova					
	I (L)	II (R)	III (T)	IV (LT)	V (LR)	VI (TR)
	E_L, ν_{LR}, ν_{LT}, $G'_{LT} \rightarrow G_{LT}$ $G'_{LR} \rightarrow G_{LR}$	E_R, ν_{RT}, ν_{RL},	E_T, ν_{TR}, ν_{TL}, $G'_{TR} \rightarrow G_{TR}$	E_α, $\rightarrow G_{TL}$	E_α, $\rightarrow G_{LR}$	E_α, $\rightarrow G_{TR}$

3.2.3.2.1 – Ensaio "destrutivo"

3.2.3.2.1.1 - Corpos de prova (CP)

A adoção da dimensão do CP foi baseada na NBR 7190 (ABNT, 1997). O CP foi adotado tanto para o ensaio de compressão quanto para os ensaios não destrutivos. Os CPs, apresentaram forma prismática com seção transversal de 5 x 5 cm e o comprimento de 15 cm

Na excecução do CP de BLC, primeiramente as lâminas foram cortadas em seções, depois em lascas, foi retirada a casca externa e interna, padronizadas as lâminas, coladas lateralmente formando placas, as placas coladas e sobrepostas, prensadas a uma pressão de 2,5 MPa (melhor valor obtido no ensaio de pressão sem aplicação de lixa na superfície a ser colada). E, finalmente, o BLC foi aparado, na forma final de 5 x 5 x 15 cm.

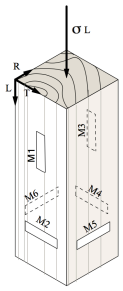
Na primeira etapa, foram confeccionados 3 CPs, um para cada uma das 3 direções: L (longitudinal), R (radial) e T (tangencial). Na segunda etapa, foi feito um cubo maciço de BLC com a dimensão de 20 x 20 x 20 cm e dele foram retirados os CP_s, um para cada direção

a 45º nos planos: LT, TR e RL. Foi usada a mesma metodologia da primeira etapa para confeccionar o cubo de BLC.

Ao todo foram confeccionados ao todo 6 CPs de BLC com 6 direções: na primeira etapa para direção: L, R e T e na segunda etapa, para direção: LT, TR, RL; como apresentado na Figura 3.23. Devida a dificuldade de confecção foram feitos poucos CPs, sendo considerado um ensaio qualitativo. A seguir, são apresentados os 6 tipos de CPs com descrições das constantes elásticas obtidas de cada uma:

Corpo de prova longitudinal – Tipo I (CP-I)

Aplicando-se o carregamento na direção longitudinal (L), obtém-se a tensão na direção longitudinal (σ_L) e, com os MD, medem-se os deslocamentos e, logo determinam-se as deformações específicas, longitudinal (ε_L), radial (ε_R) e tangencial (ε_T). Assim, desse corpo de prova obtém-se o módulo de elasticidade, na direção longitudinal (E_L); os coeficientes de Poisson ν_{LT} e $\nu_{LR,}$ utilizando regressões lineares e os módulos de deformação transversal G_{LT} e G_{LR} e as expressões:

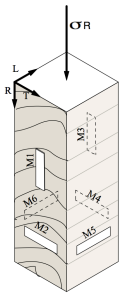


$$E_L = {}^{\sigma_L}/_{\varepsilon_L} \;;\; \nu_{LT} = {}^{\varepsilon_T}/_{\varepsilon_L} \;;\; \nu_{LR} = {}^{\varepsilon_R}/_{\varepsilon_L} \qquad (26)$$

$$\left.\begin{matrix} G'_{LT} \longrightarrow G_{LT} \\ G'_{LR} \longrightarrow G_{LR} \end{matrix}\right\}$$

Corpo de prova radial – Tipo II (CP-II)

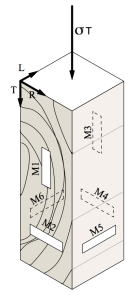
Aplicando-se o carregamento na direção radial (R) obtém-se a tensão na direção radial (σ_R) e, com os MD, medem-se os deslocamentos e, logo determinam-se as deformações específicas, longitudinal (ε_L), radial (ε_R) e tangencial (ε_T). Assim, desse CP se obtém o módulo de elasticidade, na direção radial (E_R) e os coeficientes de Poisson ν_{RT} e $\nu_{RL,}$ utilizando regressões lineares e os módulos de deformação transversal G_{LT} e G_{LR} e as expressões:



$$E_R = {}^{\sigma_R}/_{\varepsilon_R};\ \nu_{RT} = {}^{\varepsilon_T}/_{\varepsilon_R} \quad ;\nu_{LR} = {}^{\varepsilon_L}/_{\varepsilon_R} \tag{27}$$

Corpo de prova tangencial – Tipo III (CP-III)

Aplicando-se o carregamento na direção tangencial (T), obtém-se a tensão na direção tangencial (σ_T) e, com os MD, medem-se os deslocamentos e, logo determinam-se as deformações específicas, longitudinal (ε_L), radial (ε_R) e tangencial (ε_T). Assim, desse CP obtém-se o módulo de elasticidade na direção tangencial (E_T) e os coeficientes de Poisson ν_{RT} e ν_{RL}, utilizando as seguintes expressões, utilizando regressões lineares e os módulos de deformação transversal G_{LT} e G_{LR} e as expressões:

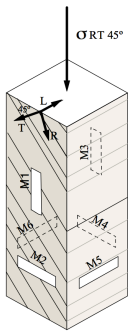


$$E_R = {}^{\sigma_R}/_{\varepsilon_R};\ \ \nu_{RT} = {}^{\varepsilon_T}/_{\varepsilon_R}\ ;\ \ \nu_{LR} = {}^{\varepsilon_L}/_{\varepsilon_R}$$

$$G'_{TR} \longrightarrow G_{TR} \tag{28}$$

Corpo de prova inclinado no plano LR – Tipo IV (CP-IV)

Para determinar o módulo de deformação transversal no ensaio de compressão simples, é necessário que o CP seja retirado com inclinação de 45º. Considerando um plano LR e inclinado de α em relação a direção tangencial, tem-se:



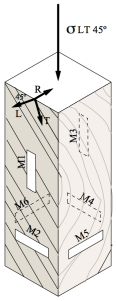
$$\varepsilon_{LR}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \rightarrow E_\alpha = E_{LR}^{\alpha} = \frac{\sigma_{LR}^{45}}{\varepsilon_{LR}^{45}}$$

aplicando-se a equação 25, determina-se o módulo de deformação transversal G_{LR}:

$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_R(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{sen^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L} \tag{29}$$

Corpo de prova inclinado no plano RT – Tipo V (CP-V)

Agora considerando um pla no TR e inclinado α em relação à direção longitudinal, tem-se:



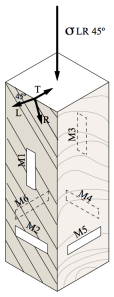
$$\varepsilon_{RT}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \rightarrow E_\alpha = E_{RT}^{\alpha} = \frac{\sigma_{RT}^{45}}{\varepsilon_{RT}^{45}}$$

aplicando-se a equação 21, determina-se o módulo de deformação transversal:

$$G_{TR}\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_R(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{sen^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha\cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T} \quad (30)$$

Corpo de prova inclinado no plano LT – Tipo VI (CP-VI)

Assim, considerando um plano LT inclinado de α em relação à direção longitudinal tem-se:



$$\varepsilon_{LT}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \rightarrow E_\alpha = E_{LT}^{45} = \frac{\sigma_{RT}^{45}}{\varepsilon_{LT}^{45}}$$

Aplicando-se a equação 25, determina-se o módulo de deformação transversal

$$G_L\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_\alpha(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{cos^4\alpha}{E_T(sen^2\alpha\, cos^2\alpha)} - \frac{sen^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \quad (31)$$

Foi constatado, no ensaio de caracterização mecânica, que utilizar qualquer lado da parede do bambu, apresentou uma boa aderência e resistência no ponto de ligação. Desta forma a montagem do BLC nesta etapa foi aleatória seguindo apenas as direções da fibra para cada lâmina e seguindo o padrão de espessura de 5 mm. É mostrada a seguir, nas Figuras (3.24 e 3.25), a sequência do preparo do BLC.



(a)



(b)

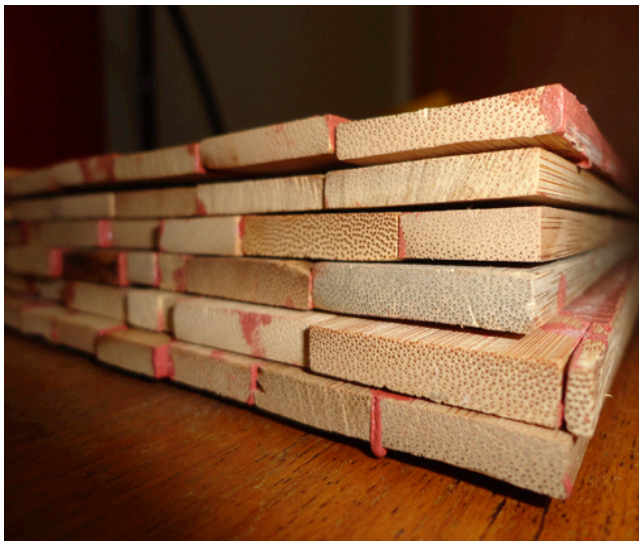


(c)



(d)

Figura 3.24 – Sequência do preparo do BLC: (a) Talisca de bambu; (b) lâminas coladas na lateral; (c) Prensagem; e (d) Placa resultante da prensagem;



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.25 – Confecção do CP de BLC: (a) Placas sobrepostas; (b) Prensagem das placas; (c) Corte na direção L; (d) na direção R e (e) na direção T.

Na segunda etapa, foram confecionados os CPs nas três direções a 45º: Tipo IV (RL), Tipo V (TR) e Tipo VI (LT). Para isto, foi feito um cubo de BLC de 20 x 20 x 20 cm de dimensão do qual foram retirados os três CPs, um em cada orientação, como mostrado no esquema da Fig. (3.26).

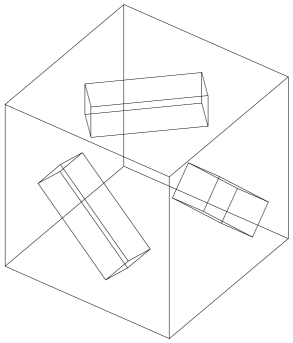


Figura 3.26- Esquema de retirada dos CPs prismáticos a 45º do cubo.

A metodologia utilizada para confecção do BLC, nesta etapa, foi a mesma da primeira etapa deste ítem (3.2.3.2.1.1). As ripas foram coladas lateralmente, para se formar as placas, depois foi aplicado o adesivo. Estas placas foram empilhadas e prensadas. Elas foram posicionadas em cantoneiras de aço na prensa hidráulica e foram submetidas à pressão de 2,5 MPa por um período de 24 h, Fig. (3.27).



(a) (b) (c)

Figura 3.27 – Confecçnao do cubo: (a) Placas; (b) Prensa hidráulica; e (c) Cubo prensado.

Do cubo maciço prensado, foram confeccionados 3CPs nos planos LR, RT e TR. Ao todo foram confeccionados 6 CPs, cortados em cada um dos seis eixos, como é mostrado na Fig. (3.28). A resposta dos ensáios serão absolutamente em função do arranjo destas fibras.



Figura 3.28 – CPs nas direções: LT, RL, TR, T, L e R.

3.2.3.2.1.2 – Instrumentação

Para realizar estes ensaios, foram utilizados a Prensa EMIC - DL 30.000 com

capacidade de carga de 300 kN; Célula de carga de capacidade igual a 100 kN; SAD (Sistema de Aquisição de Dados) com uma placa de 16 canais; Programa AqDados 7.02 e Programa AqDAnalysis 7.

Foi feita a instrumentação, nos CPs de BLC, para determinar a matriz de constantes elásticas ou de flexibilidade. As deformações ocorridas nos ensaios foram determinadas por um sensor de deslocamento (SD), confeccionado e configurado em ponte completa. O (SD) foi fixado no CP através de duas cantoneiras metálicas na distância de 4,3 cm entre as duas linhas de fixação. Para cada CP foram utilizados 6 (SD), como mostrado na Fig. (3.29), e estes sensores foram conectados ao SAD.



Figura 3.29 – (a) CP com espera para receber MD; (b) CP instrumentado.

3.2.3.2.1.3–Ensaio "destrutivo"

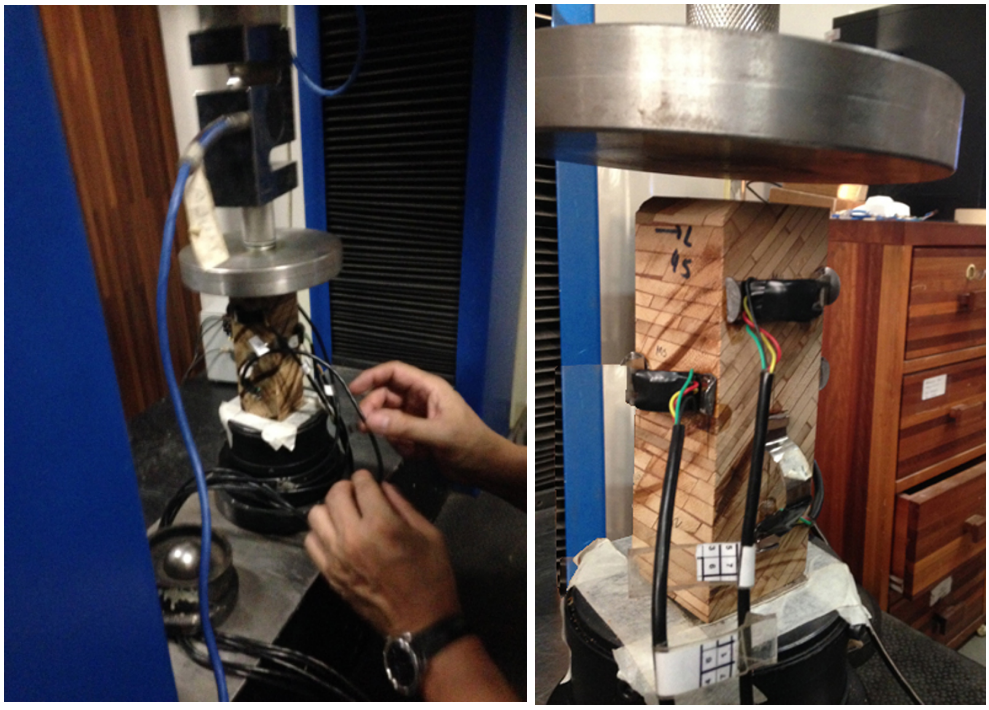
Para a medição dos deslocamentos relativos dos CPs, foram colados 4 MD, 1 em cada face, perpendicular ao eixo longitudinal do CP, e 2 MD, em faces paralelas, no sentido paralelo eixo do comprimento do CP, totalizando 6 medidores de deslocamento por CP.

O MD posicionado na direção da carga permitiu a leitura do deslocamento na direção de aplicação, enquanto os demais nas direções perpendiculares à aplicação da carga. A colocação do MD, nas mesmas direções e em faces paralelas, foi realizada para que fosse possível minimizar erros provenientes de imperfeições de paralelismo nos CPs e, também, contabilizar diferenças de medições provenientes do próprio BLC.

Para automatizar os ensaios, foi confeccionado um programa "script" na linguagem da máquina de ensaios. No final do ensaio, o programa forneceu a tensão de compressão no limite de proporcionalidade e os deslocamentos nos seis medidores, mostrado na Fig. (3.30).

A resistência foi determinada, introduzindo-se um carregamento monotônico crescente no CP, com uma taxa em torno de 7 MPa por minuto. Por meio dos resultados experimentais e da determinação da área dos CPs, obteve-se a resistência à compressão.

O ensaio de compressão foi realizado com uma carga estimada para não ultrapassar o limite de proporcionalidade. Os MD ligados ao SAD (Sistema de Aquisição de Dados) forneceram os valores dos deslocamentos sofridos pelo CP. Os dados de ensaios dos programas AqDados 7.02 (Programa de Aquisição de Sinais) e AqDAnalysis 7 (Programa de Análise de Sinais) foram, então, tratados no EXCEL, de modo a obter as constantes elásticas desejadas. Na Figura 3.30 é apresentado o CP instrumentado:



(a) (b)

Figura 3.30 – (a) Sistema montado na máquina universal EMIC; e (b) CP posicionado.

3.2.3.2.2 - Método de ultrassom (US), ensaio não destrutivo – END

Os ensáios não destrutivos END são muito mais simples e mais baratos do que os ensáios destrutivos, é um processo menos trabalhoso onde se atinge valores similares aos valores do ensáio de compressão.

Os ensaios não destrutivos com US desta fase, para obtenção da matriz de flexibilidade para BLC, foram realizados no Laboratório de Ensaios não Destrutivos, LabEND, da Faculdade de

Engenharia Agrícola, Feagri, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Os ensáios não destrutivos se mostram muito mais simples e mais baratos que os ensáios destrutivos.

3.2.3.2.2.1 - Corpo de prova (CP)

Foram confeccionados dois tipos de CPs do compósito esdpecífico deste trabalho. Primeiramente foram fabricados os CPs prismáticos, nas seis direções LT, RL, TR, T, L e R, já apresentados no item (3.2.3.2.1).

Nesta etapa, além dos CPs prismáticos, foram adotados os CPs poliédricos, com 26 faces, para a realização do ensaio de ultrassom, como mostrado no esquema na Fig. (3.31).

O poliedro de 26 faces foi proposto por François (1995 e 2000), o qual permite a obtenção de todos os termos da matriz de rigidez em um único corpo de prova. Este modelo de CP, também, foi experimentado por Gonçalves et al. (2011) e Vasques et al (2015), pelo fato deste polígono ter uma forma mais eficiente, permitindo a análise em todas as direções em um mesmo CP. Nos ensaios com US utilizaram-se como CP: 9 poliedros, apresentados na Figura (3.32) e 6 prismas já apresntados para o ensaio de compressão, mostrados na Figura (3.28), totalizando 15 CPs.

François (1995) determinou que a dimensão mínima, para o cubo do qual se vai retirar o poliedro de 26 faces, é de 53,3 mm, para que cada face tenha dimensão, capaz de abranger à dimensão do transdutor que, no caso desse autor, foi de 15 mm.

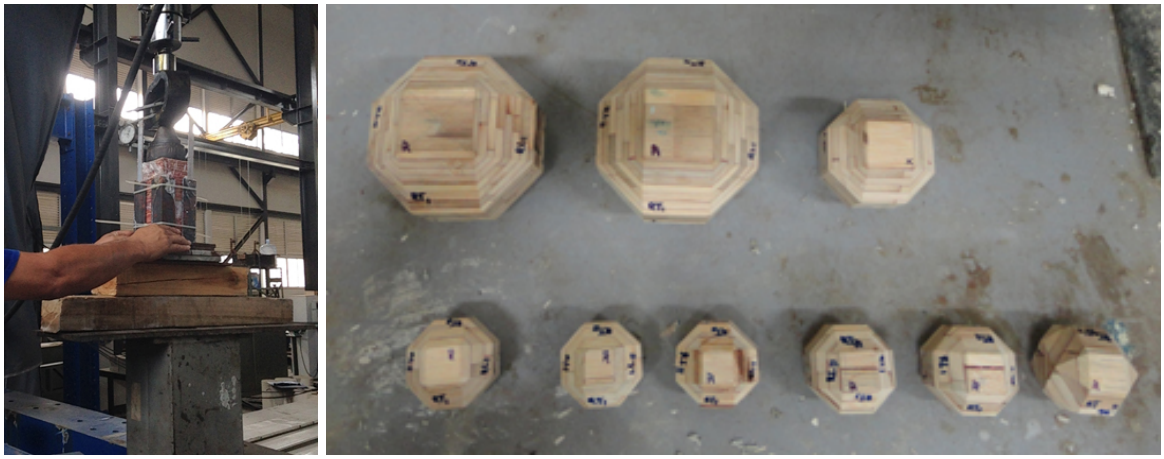
Entretanto, neste trabalho, os CPs foram adaptados do modelo apresentado por François (1995). Estes foram obtidos, a partir do truncamento do sólido platônico, o cubo, gerando o *Rombocuboctaedro*, um dos treze sólidos de Arquimedes. É um poliedro convexo cujas faces são polígonos regulares.



Figura 3.31 – Esquema do poliedro, Rhombicuboctahedron. Fonte: wikipedia.

Os CPs foram obtidos a partir de cubos cujas faces estavam orientadas nos planos RT, TL, LR, L, T e R. A dimensão dos CPs foi em função da dimensão dos transdutores e da sua frequência. Para essa geometria, foram confeccionados 6 CPs derivados de cubos de 50 mm,

1 CP derivado de cubo de 80mm e 2 CPs derivados de cubos de 100 mm. Na confecção dos CPs do BLC, foram feitos os mesmos procedimentos já descritos no item (3.2.3.2.1.1).



(a) (b)



(c) (d) (e)

Figura 3.32 - (a) Prensagem do cubo de BLC; (b) CPs rombocuboctaedro resultantes; (c) CP posicionado na direção – L; (d) CP posicionado na direção – R; e (e) CP posicionado na direção – T.

3.2.3.2.2.2 - Instrumentação

Para a determinação das velocidades da onda ultrassônica, foram utilizados transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento (ou transversal) de mesma frequência, adequados para não incluir parâmetros adicionais de variabilidade.

O transdutor de 1000 kHz adotado tem diâmetro de 18mm, o que permitiu concluir que a dimensão mínima adotada, para o cubo de 50 mm, foi correta. O equipamento de US utilizado foi um EPOCH 4 (Olympus Panametrics NDT Inc, San Diego, Ca), Figura (3.33),

com transdutores de ondas longitudinais e transversais, com uma frequência de 1 MHz. Os transdutores utilizados foram planos e foi utilizado gel medicinal como acoplante. Além do tempo da propagação da onda, foram realizadas medições da amplitude do sinal, o que permitiu o cálculo das velocidades de propagação (V), das constantes dinâmicas e das atenuações (Atn), respectivamente, em cada ponto de medição. Antes dos ensaios, o equipamento foi calibrado.



Figura 3.33 - Ultrassom EPOCH 4.

Posicionando-se os transdutores longitudinais, nas faces que são paralelas aos eixos do CP, a propagação e a polarização ocorrem nos eixos principais L, R ou T, sendo possível obter-se V_{LL}, V_{RR} e V_{TT}. Da mesma forma, posicionando-se os transdutores de cisalhamento, nas faces retas do CP, a propagação se dá em um dos eixos principais L, R ou T e a polarização no eixo perpendicular, T, R ou L, sendo possível a obtenção das velocidades V_{LR}, V_{LT}, V_{RL}, V_{RT}, V_{TR} e V_{RT}.

Para a dimensão de seção adotada nesses testes, todos os transdutores permitiram atender a questão do transdutor estar circunscrito à seção da peça, já que todos tiveram diâmetro menor do que a seção do CP.

3.2.3.2.2.3 - Ensaio de Ultrassom (US)

Foram realizados os ensaios nos CPs, seis prismas e os nove poliedros, como são mostrados na Figura (3.34).

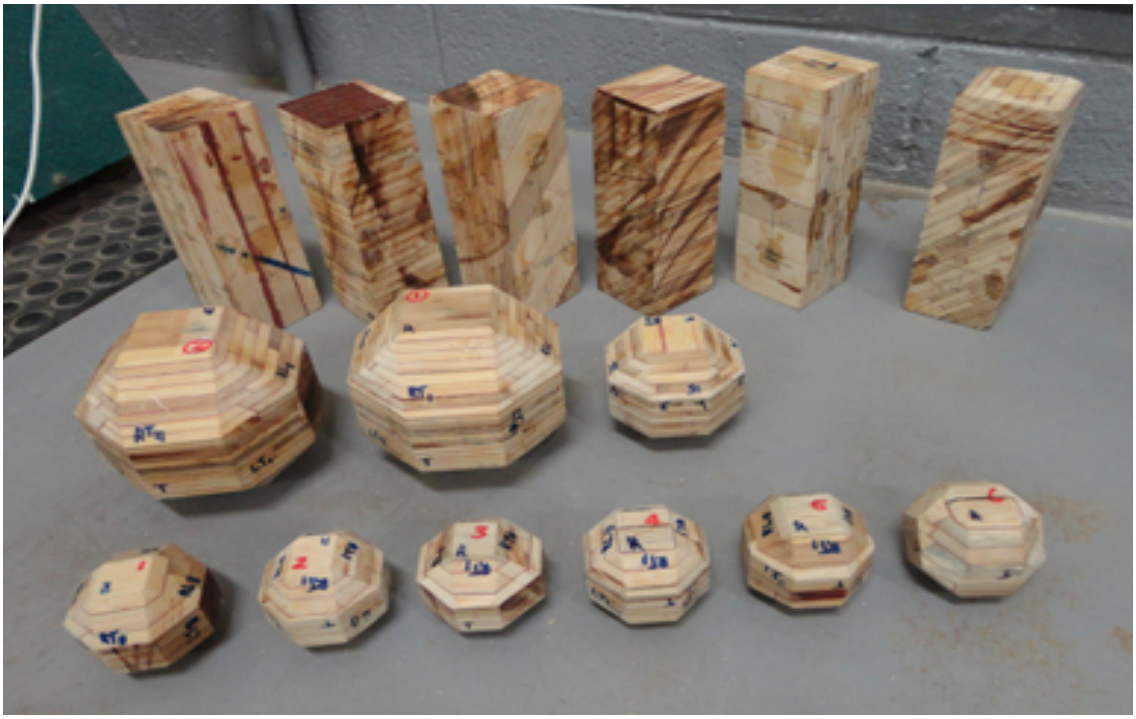
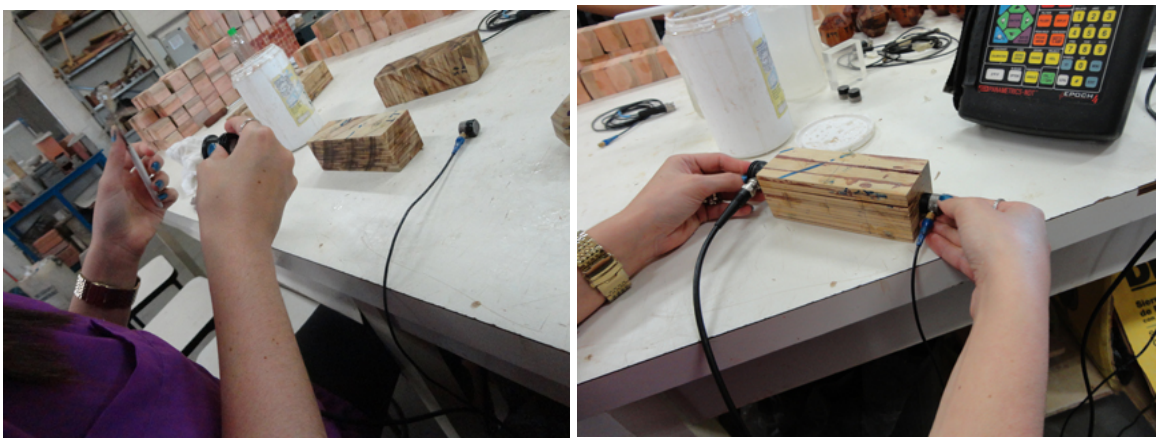


Figura 3.34 - CPs prismáticos LT, RL, TR, T, L e R e poliédricos.

Os ensaios nos CPs retirados nos eixos de simetria foram realizados, de acordo com as seguintes etapas: primeiramente, com o transdutor longitudinal posicionado, em faces opostas do CP; foram realizadas as leituras de tempo de propagação da onda nas direções LT, RL, TR, T, L e R. O ensaio de US nos CPs prismáticos é mostrado Fig. (3.35). Obtido o tempo de propagação da onda nas três direções, foram determinadas as velocidades V_{LL}, V_{RR} e V_{TT}.



(a) (b)

Figura 3.35 – Ensaio US: (a) Colocação do gel; (b); e (c) Transdutor posicionado no prisma.

Para o CP retirado em ângulo a nos planos LR, LT e RT, foram obtidas as velocidades V_a em cada plano. O procedimento de obtenção dessa velocidade foi igual aos casos anteriores, ou seja, os transdutores de cisalhamento foram posicionados nas faces opostas do CP. Nesse caso, as leituras foram realizadas, considerando-se somente a maior dimensão dos CPs (50, 80 e 100 mm).

Para a obtenção das velocidades fora dos eixos de simetria, os transdutores foram posicionados nas faces inclinadas em relação a cada um dos planos. A Fig. (3.36) mostra o ensaio sendo realizado nos poliedros.



(a) (b) (c)

Figura 3.36 - Ensaio US: (a) Colocação do gel; (b) US modelo - EPOCH 4 sendo operado; e (c) Tela do US apresentando a leitura do percurso da onda.

A leitura de propagação de ondas foi feita em todas as direções. Para cada CP, foram feitas medições de tempo de propagação (m_S) e as velocidades foram calculadas.

Com as velocidades de propagação da onda, a direção de propagação e densidade da madeira, pode-se determinar os elementos da matriz de constantes elásticas pela equação de Christoffel. A Eq. (32) foi utilizada por Gonçalves e Bartholomeu (2000) e Bucur (2006), que obtiveram bons resultados.

$$C = \rho V^2 \quad C = \rho v^2 \tag{32}$$

Sendo: C a constante de rigidez ou constante elástica.

A determinação das constantes elásticas do BLC pode ser simplificada, ao ser considerada, numa primeira aproximação, como um sólido ortogonalmente anisotrópico ou, simplesmente, ortotrópico. A matriz dos coeficientes elásticos de um sólido ortotrópico é dada por:

$$|C| = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{33}$$

Os eixos 1, 2 e 3 podem ser substituídos por L, R e T, respectivamente. Considerando que as velocidades de onda tenham sido medidas, as constantes elásticas da diagonal serão:

$$C_{11} = \rho\, V^2_{LL;} \quad C_{2\,2} = \rho V^2_{RR;} \quad C_{33} = \rho V^2_{TT;}$$
$$C_{44} = \rho V^2_{RT;} \quad C_{55} = \rho V^2_{LT;} \quad C_{66} = \rho V^2_{LR;} \tag{34}$$

Em que:

C_{11}= constante elástica determinada a partir da direção longitudinal (L).

C_{22}= constante elástica determinada a partir da direção radial (R).

C_{33}= constante elástica determinada a partir da direção tangencial (T).

C_{44}= constante elástica determinada a partir da direção radial tangencial (RT).

C_{55}= constante elástica determinada a partir da direção longitudinal tangencial (LT).

C_{66} = constante elástica determinada a partir da direção longitudinal radial (LR).

V_{TT}= velocidade da onda propagando na direção tangencial (T).

V_{RR} = velocidade da onda propagando na direção radial (R).

V_{LL} = velocidade da onda propagando na direção longitudinal (L).

V_{LR} = Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LR = RL.

V_{LT} = Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LT= TL.

V_{RT} =Velocidade da onda de cisalhamento com eixo RT = TR.

Para os 3 elementos fora da diagonal, a propagação da onda se dá fora dos eixos de simetria do material, segundo Carrasco e Azevedo (2003), estes são determinados:

$$(C_{12}) \rightarrow (C_{12} + C_{66})\, n_1\, n_2 = \pm\sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)\,(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]} \quad (35)$$

$$(C_{13}) \rightarrow (C_{13} + C_{55})\, n_1\, n_3 = \pm\sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)\,(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$$

$$(C_{23}) \rightarrow (C_{23} + C_{44})\, n_2\, n_3 = \pm\sqrt{[(C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)\,(C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$$

Sendo: V_α depende do ângulo de propagação α fora da direção principal e corresponde a velocidade quase longitudinal ou quase transversal e $n_1 = 0$, $n_2 = \cos\alpha$ e , com $\alpha = 45º$; e n_1 , n_2 e, os cossenos diretores correspondentes.

A Tabela 3.2 apresenta, de forma resumida, os termos das constantes elásticas e os conceitos para a sua determinação. São mostradas as expressões numéricas relativas à diagonal da matriz de rigidez, obtida por ensaios de ultrassom Trinca (2011).

Tabela 3.2 - Obtenção dos termos da diagonal da matriz de rigidez [C] para o BLC - ensaios de ultrassom.

Termo	Tipo de onda	Direção de propagação	Direção de polarização	Expressão*
C11	Longitudinal	Longitudinal (1)	Longitudinal (1)	$C_{11} = \rho . V_{LL}^2$
C22	Longitudinal	Radial (2)	Radial (2)	$C_{22} = \rho . V_{RR}^2$
C33	Longitudinal	Tangencial (3)	Tangencial (3)	$C_{33} = \rho . V_{TT}^2$
C44	Cisalhamento	Radial (2) ou Tangencial (3)	Tangencial (3) ou Radial (2)	$C_{44} = \rho . V_{RT}^2$ Ou $C_{44} = \rho . V_{TR}^2$
C55	Cisalhamento	Longitudinal (1) ou Tangencial (3)	Tangencial (3) ou Longitudinal (1)	$C_{55} = \rho . V_{LT}^2$ Ou $C_{55} = \rho . V_{TL}^2$
C66	Cisalhamento	Longitudinal (1) ou Radial (2)	Radial (2) ou Longitudinal (1)	$C_{66} = \rho . V_{LR}^2$ Ou $C_{55} = \rho . V_{RL}^2$

*ρ é a densidade aparente da madeira a 12% e V a velocidade de propagação da onda de ultrassom

Fonte: Adaptado Trinca (2011).

O BLC pode ser considerado um material ortrotrópico com as três direções principais longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T).

Os termos da matriz de flexibilidade (S) estão relacionados aos termos da matriz da rigidez (C) por meio da sua inversa, isto é, $S = C^{-1}$ $S = C^{-1}$, apresentados:

$$|S| = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

As equações (37) até (45) apresentam as relações entre os termos da matriz de rigidez (obtidas por métodos de propagação de ondas) e da matriz de flexibilidade (obtida por métodos estáticos) (TRINCA, 2011). Essas equações são obtidas, por meio da inversão da matriz. Os eixos 1, 2 e 3 podem ser substituídos por L, R e T, respectivamente.

$$C_{11} = C_{LL} = (1 - \nu_{RT}.\ \nu_{TR}).\ [E_R.\ E_T.\ /S/]^{-1} \quad (37)$$

$$C_{22} = C_{RR} = (1 - \nu_{LT}.\ \nu_{TL}).\ [E_L.\ E_T.\ /S/]^{-1} \quad (38)$$

$$C_{33} = C_{TT} = (1 - \nu_{LR}.\ \nu_{RL}).\ [E_L.\ E_R.\ /S/]^{-1} \quad (39)$$

$$C_{12} = C_{LR} = (\nu_{RL} + \nu_{RT}.\ \nu_{TL}).\ [E_R.\ E_T.\ /S/]^{-1} \quad (40)$$

$$C_{13} = C_{LT} = (\nu_{TL} + \nu_{LR}.\ \nu_{RT}).\ [E_R.\ E_L.\ /S/]^{-1} \quad (41)$$

$$C_{23} = C_{RT} = (\nu_{TR} + \nu_{TL}.\ \nu_{LR}).\ [E_L.\ E_T.\ /S/]^{-1} \quad (42)$$

$$C_{44} = G_{RT} \quad (43)$$

$$C_{55} = G_{LT} \quad (44)$$

$$C_{66} = G_{LR} \quad (45)$$

Onde: $$/S/ = [\ 1 - \nu_{LR}.\ \nu_{RL} - \nu_{RT}.\ \nu_{TR} - \nu_{LT}.\ \nu_{TL} - 2\ \nu_{RL}.\ \nu_{TR}.\ \nu_{TL}]\ .\ (E_1.E_2.E_3)^{-1}$$

Como exemplo, substituindo-se /S/ obtém-se a relação entre C_{LL} e $E_{L.}$

Assim, conhecendo-se para uma dada espécie, o valor de C_{LL} e os coeficientes de Poisson determina-se E_L. Da mesma forma, todos os termos da diagonal da matriz de flexibilidade podem ser conhecidos, ou seja, E_{LL}, E_{RR}, E_{TT}, G_{RT}, G_{LT} e G_{LR}.

$$C_{LL} = \frac{E_{LL}\,(1 - \nu_{TR}\,\nu_{RT}\,)}{(1 - \nu_{LR}\,\nu_{RL} - \nu_{TR}\,\nu_{RT} - \nu_{LT}\,\nu_{TL}\, - 2\nu_{RL}\,\nu_{RT}\,\nu_{LT}\,)} = \qquad (46)$$

Nas equações 50 a 51, verifica-se, de forma clara, que os valores dos módulos de elasticidade longitudinais (E_L, E_R, E_T), obtidos dos ensaios estáticos, não são numericamente iguais aos coeficientes da matriz de rigidez, obtidos por ultrassom (C_{LL},C_{RR}, C_{TT}). A diferença entre eles dependerá da magnitude do coeficiente de Poisson. Keunecke*et al.* (2007) indicam que as diferenças são da ordem de 50 % para coeficientes de Poisson da ordem de 0,40.

Ainda. de acordo com Gonçalez et al. (2001), utilizando diretamente as velocidades, obtêm-se:

$$/V/ = V_{LL}V_{RR}V_{TT} + 2(V_{LR}V_{RT}V_{TL}) - V_{LL}(V_{RT})^2 - V_{RR}(V_{TL})^2 - V_{TT}(V_{LR})^2;$$

$$E_R = \frac{/V/}{V_{RR}V_{TT} - (V_{RT})^2};\ E_T = \frac{/V/}{V_{TT}V_{LL} - (V_{TL})^2};\quad E_L = \frac{/V/}{V_{LL}V_{RR} - (V_{LR})^2};$$

$$\nu_{TR} = \frac{(V_{TL}V_{RT} - V_{LR}V_{TT})}{(V_{TT}V_{LL} - (V_{TL})^2)};\quad \nu_{LT} = \frac{(V_{LR}V_{TL} - V_{RT}V_{LL})}{(V_{LL}V_{RR} - (V_{LR})^2)};\ \nu_{RL} = \frac{(V_{RT}V_{LR} - V_{TL}V_{RR})}{(V_{RT}V_{TT} - (V_{RT})^2)}; \qquad (47)$$

$$G_{TL} = V_{44};\quad G_{LR} = V_{55};\quad G_{RT} = V_{66}$$

Em que: E_R = módulo de elasticidade ao longo do eixo radial.
E_T = módulo de elasticidade ao longo do eixo tangencial.
E_L = módulo de elasticidade ao longo do eixo longitudinal.
G_{TL} = módulo de cisalhamento no plano tangencial longitudinal.
G_{LR} =módulo de cisalhamento no plano longitudinal radial; e
G_{RT} =módulo de cisalhamento no plano radial tangencial.

3.2.3.2.3 - Caracterização mecânica em temperatura ambiente pelo método de excitação de ondas, Ensaio Não Destrutivo – END

Para estimar as propriedades elásticas, primeiramente, foi avaliado o bambu e depois foi avaliado o BLC, sendo utilizado o método de excitação por impulso para os dois experimentos. Com esta técnica, é possível determinar os módulos elásticos e do amortecimento de materiais pelas frequências naturais de vibração do CP. Esta técnica é prescrita pela norma ASTM-E1876, 2007.

O bambu, do ponto de vista tecnológico, possui propriedades mecânicas particulares nas direções: Longitudinal, Tangencial e Radial, comporta-se diferentemente nos três eixos anatômicos. As respostas dos ensaios são em função do arranjo de fibras.

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E), é utilizada a frequência de vibração na flexional (ff) em seu cálculo, enquanto, para o módulo de deformação transversal (G), é pela frequência de vibração na torção (ft) (ASTM E1876, 2006).

3.2.3.2.3.1 - Método de Excitação de Ondas para Determinação do *E* na Espessura da Parede do Bambu

A finalidade deste ensaio é a determinação do E_d, nas três direções deste material ortotrópico. Neste item, serão descritos o método e o aparelho utilizado com princípio de excitação de ondas, para correlacionar ou estimar propriedades do bambu e para o BLC. Ao sofrer um leve impacto mecânico, o CP emite um som característico que depende de suas dimensões, massa e propriedades elásticas. As frequências presentes nesta resposta acústica permitem a determinação precisa dos módulos de elasticidade, enquanto a atenuação do som, o cálculo do amortecimento.

Do ponto de vista experimental, a metodologia pode ser separada em duas partes: a primeira consiste na excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância e a segunda no emprego de relações matemáticas e dos procedimentos computacionais, para obtenção dos módulos elásticos, a partir das frequências de ressonância.

3.2.3.2.3.1.1 - Corpo de prova (CP)

Para determinação do Módulo de deformação transversal (G), Módulo de elasticidade (E) e ao coeficiente de Poisson (ν), por excitação de ondas, foi feito primeiramente o ensaio com os mesmos CPs de bambu utilizados na investigação da densidade e umidade, já apresentado no item (3.2.3.1) e, logo após, foi feito o ensaio nos prismas de BLC, os mesmos CPs já apresentados no item (3.2.3.2), utilizando a metodologia de excitação de ondas, mas com equipamentos diferentes.

3.2.3.2.3.1.2 - Instrumentação e equipamentos

Para o ensaio da amostra do bambu, foi utilizado o aparelho Sonelastic, que consiste em: um captador acústico, um suporte para amostras pequenas e barras engastadas. O

aparelho tem um sistema de aquisição de dados que apresenta, além da frequência fundamental, também, as frequências harmônicas presentes e os respectivos amortecimentos.

O suporte SB-AP é um sistema mecânico empregado, para o apoio e posicionamento de CPs de pequena dimensão, que ficam engastados no suporte; conta também com um sistema de fixação para captador acústico Fig. (3.37).

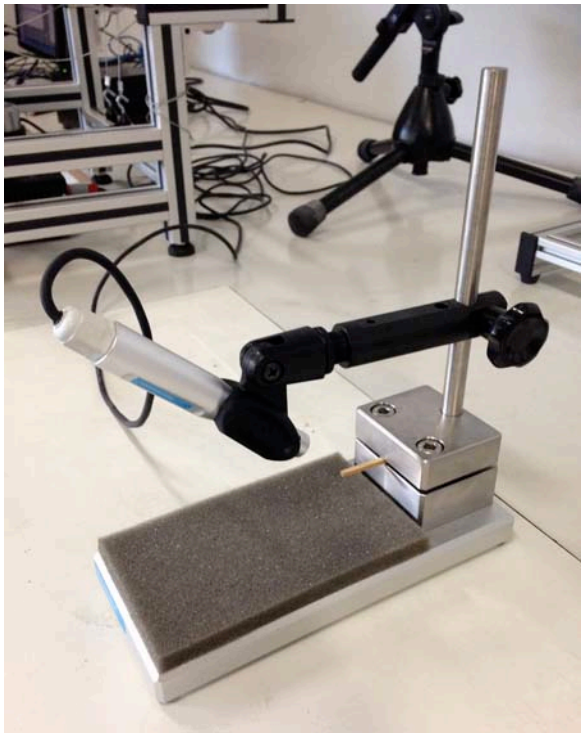
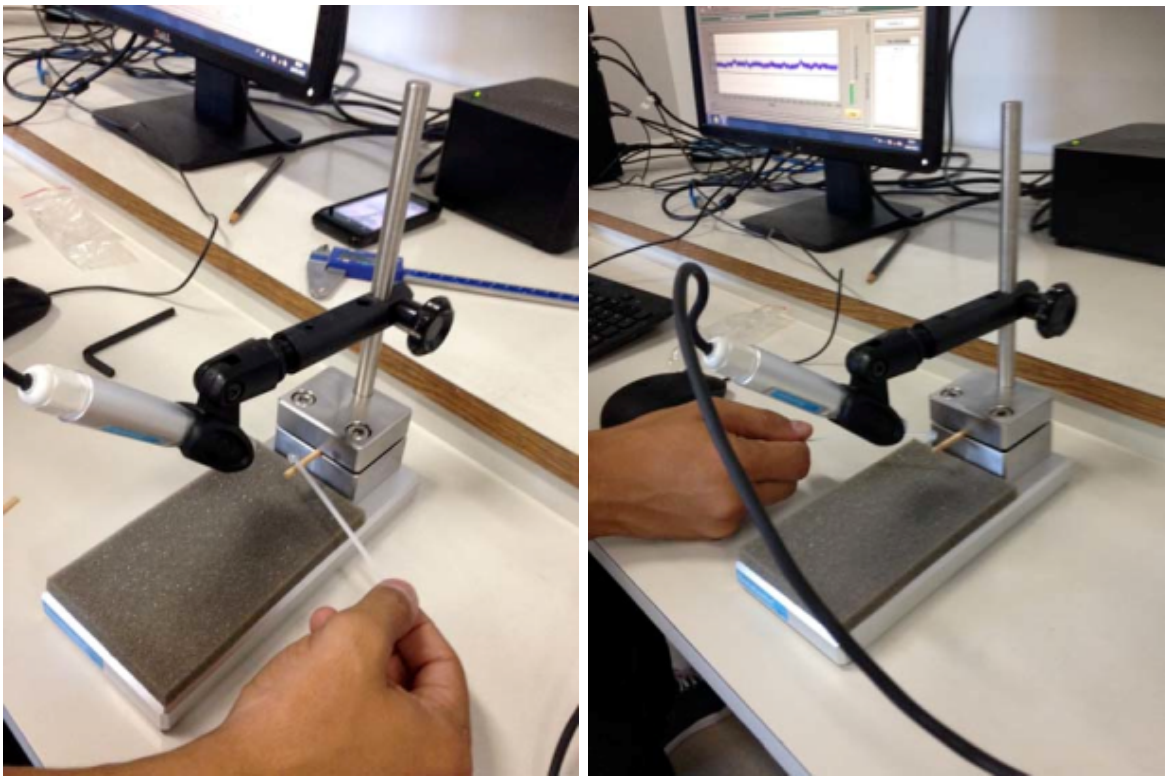


Figura 3.37 – Suporte do sistema com captador acústico.

3.2.3.2.3.1.3 - Ensaio de Excitação de Ondas

O ensaio foi realizado primeiramente inserindo, no sistema, informações sobre as dimensões e a massa de cada CP. Em seguida, o CP foi posicionado no aparelho para captação da onda, sendo iniciado o trabalho. Foi feita uma análise do movimento flexional da onda, em que a excitação e a captação do som são feitas no centro do corpo. Foi escolhida então a frequência natural desse tipo de movimento, que normalmente é o primeiro pico no gráfico amplitude (Db) x frequência. Este ensaio é denominado de flexão.

Na Fig. (3.38) são mostrados o sistema conectado ao SAD e a amostra de bambu sendo excitada por impulso.



(a) (b)

Figura 3.38 – (a) Ensaio de excitação de ondas; e (b) Sistema conectado ao SAD.

Na Fig. (3.39) são mostrados estes picos na tela do computador do programa SONELASTIC.

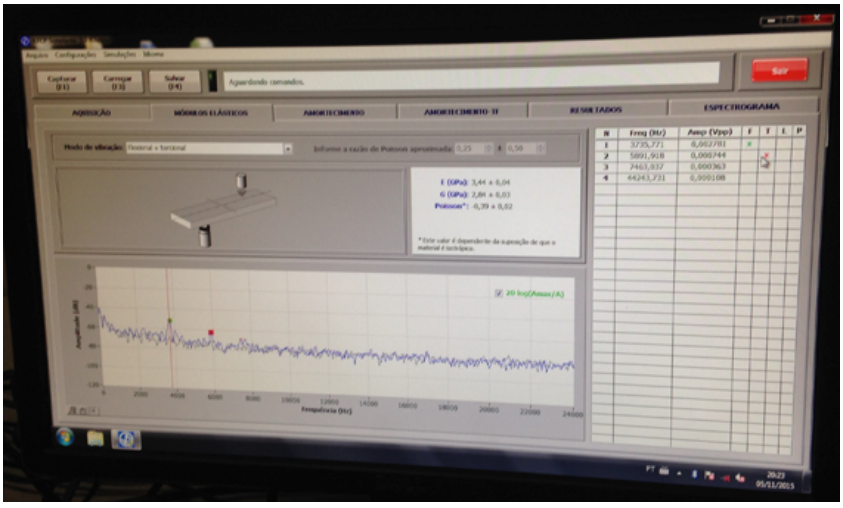


Figura 3.39 – Gráfico apresentado pelo programa durante o ensaio.

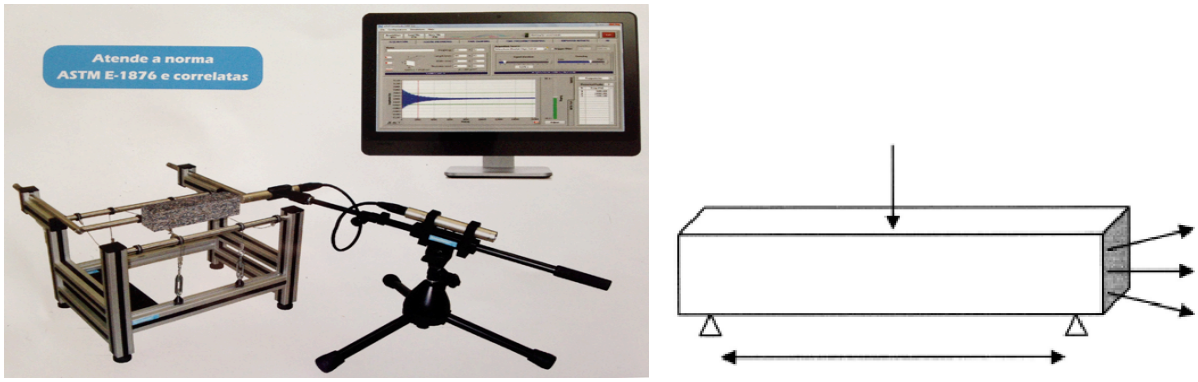
3.2.3.2.3.2 - Método de Excitação de Ondas para o BLC

3.2.3.2.3.2.1 - Corpo de prova (CP)

No segundo experimento do END, no método de excitação de ondas, foram utilizados os mesmos CPs resultantes do ensaio de caracterização mecânica em temperatura ambiente, apresentado no item (3.2.3.2).

3.2.3.2.3.2.2 - Instrumentação e equipamentos

Para realização deste ensaio, foi utilizado o aparelho Sonelastic, cuja técnica baseia-se nas frequências naturais de vibração e consiste em: software, um captador acústico, um suporte para amostras, contando também com um sistema de fixação para captador acústico, mostrado na Figura (3.40). O aparelho tem um sistema de aquisição de dados que apresenta, além da frequência fundamental, também, as frequências harmônicas presentes e os respectivos amortecimentos.



(a) (b)

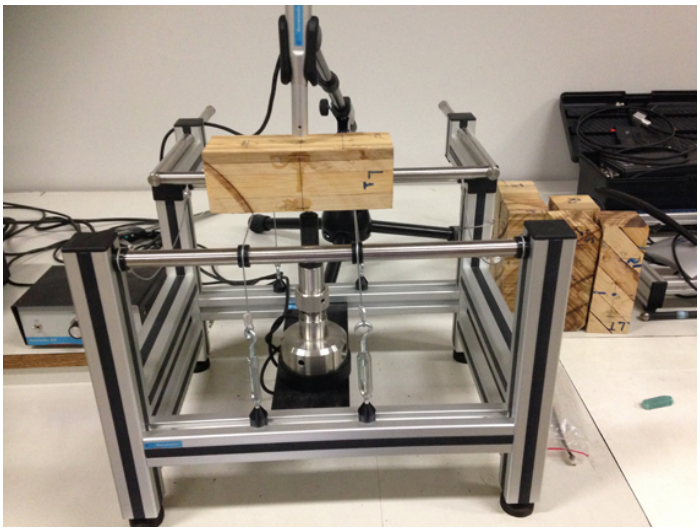
Figura 3.40 - (a) Captador acústico, Sonelastic; e (b) Esquema do CP sendo ensaiado. Fonte (ATCP – Engenharia Física).

3.2.3.2.3.2.3 –Ensaio de Excitação de Ondas no BLC

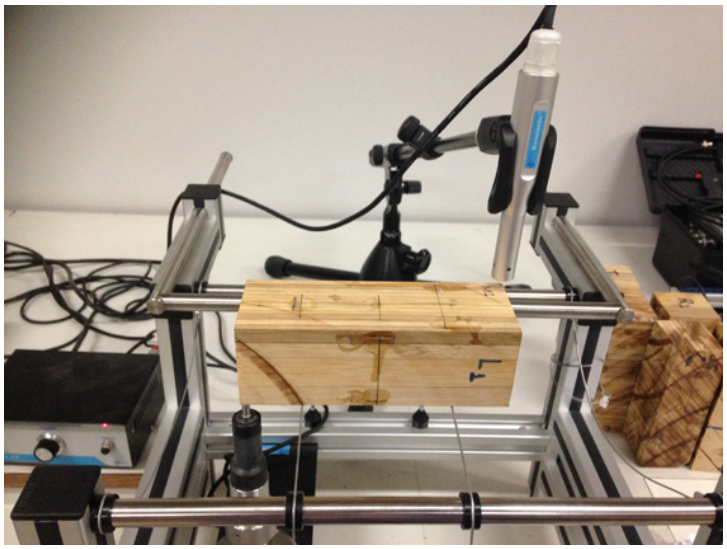
Na realização do ensaio, inicialmente foram inseridos ao sistema informações sobre as dimensões e a massa de cada CP de BLC e, em seguida, o CP foi posicionado no aparelho para captação da onda sendo iniciado o trabalho. O CP foi excitado por impulso, havendo o surgimento de ondas de vibração. Foi possível analisar diversas propriedades do material, tais como os módulos elásticos. Dependendo da posição dos apoios, da excitação e da posição de captação da onda (microfone), o comportamento da onda varia.

Após a primeira etapa dos ensaios, a posição da captação de som e da excitação foram alteradas, para a extremidade superior, em que se posiciona o microfone e, na extremidade inferior no lado oposto, posiciona-se o pulsador. Esse ensaio foi caracterizado como flexotorção, pois o primeiro pico corresponde à frequência natural encontrada anteriormente e o segundo pico corresponde à do torcional, desde que não seja um dos harmônicos do movimento de flexão. Foi escolhida, então, a frequência natural desse tipo de movimento e ocorreu a discriminação das frequências, que, além da frequência fundamental, também, listou as frequências harmônicas presentes e os respectivos amortecimentos.

Na Figura (3.41), é mostrado o CP sendo excitado e a onda de vibração sendo capturada pelo captador acústico.



(a)



(b)

Figura 3.41 – Ensaio de excitação de ondas: (a) Flexional e (b) Torcional.

3.2.3.2.4 - Determinação Teórica dos Módulos e do Coeficiente de Poisson

Módulo de elasticidade (E_d)

A determinação do (E_d) foi feita pela frequência de vibração na flexão utilizando a massa e as dimensões dos CPs. A partir da equação (48), dada pela (ASTM E 1876, ISO 12680-1, ENV 843-2), foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico ou E_d.:

$$R = \frac{1+\left(\frac{b}{t}\right)^2}{4-2{,}521\frac{t}{b}\left(1-\frac{1{,}991}{e^{\pi\frac{b}{t}}+1}\right)}\left[1+\frac{0{,}00851n^2b^2}{L^2}\right]-0{,}060\left(\frac{nb}{L}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{b}{t}-1\right)^2$$

$$T1 = 1+6{,}585\,(1+0{,}0752\mu+0{,}8109\mu^2)-\left(\frac{t}{L}\right)^2-0{,}868-\left[\frac{8{,}34\,(1+0{,}2023\mu+2{,}173\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^4}{1+6{,}338\,(1+0{,}1408\mu+1{,}536\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^2}\right]\left(\frac{t}{L}\right)^4$$

$$E_d = 0{,}9465\left(\frac{mf_f^2}{w}\right)\left(\frac{l^3}{t^3}\right)T1 \qquad (48)$$

Módulo de deformação transversal (G_d)

A determinação do (G_d) foi feita pela frequência de vibração torcional e foi calculada:

$$G = \left(\frac{4lmf_t^2}{wt}\right)(R)(53) \qquad (49)$$

Coeficiente de Poisson (ν)

A determinação do (ν) é feita, após a determinação do E_d e do G_d, utilizando a lei de Hooke. Na Fig. 3.42, é mostrado o procedimento deste cálculo (ASTM E 1876, ISO 12680-1, ENV 843-2).

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \qquad (50)$$

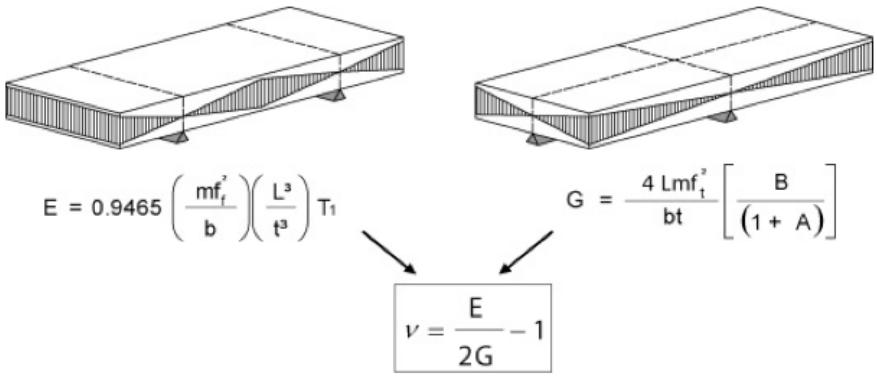


Figura 3.42 – Determinação teórica do coeficiente de Poisson.

Sendo:

(E) Módulo de Elástico.

(G) Módulo de Cisalhamento.

(ν) Razão de Poisson.

(T_1) Fator de correção para o modo de flexão fundamental para espessura infinita.

(ft) Frequência de ressonância fundamental da barra de torção, em Hz.

(ff) Frequência de ressonância fundamental do CP em flexão, em Hz.

(t) Espessura do CP em mm.

(L) Comprimento do CP em mm.

(b) Largura do CP.

(m) Massa do CP em g.

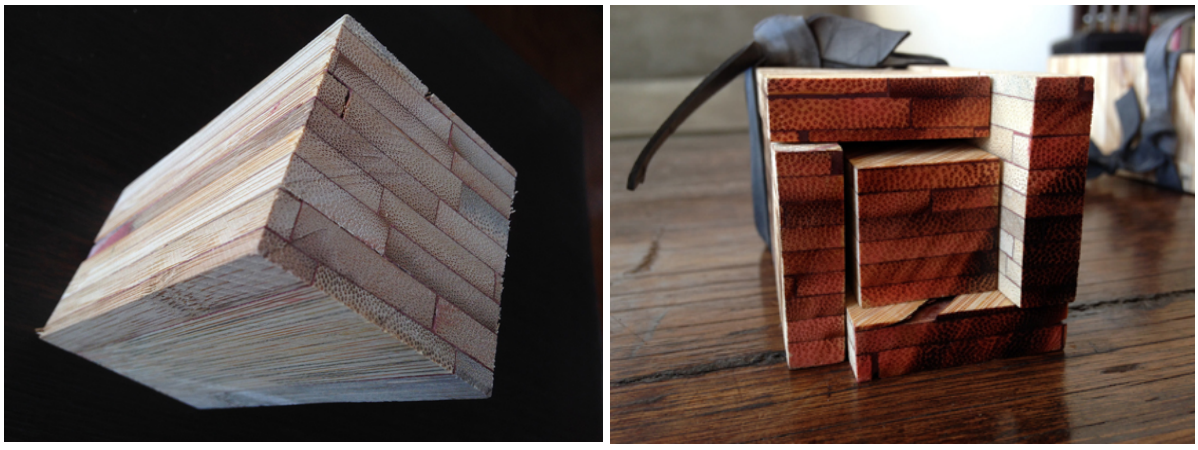
3.2.4 - Ensaio de caracterização mecânicas em altas temperaturas – END - Ensaio Não Destrutivo

Os ensaios foram realizados no CPAM[3], Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e Novos Materiais da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Foi utilizado o método de ensaio não destrutivo (END) global, com princípio de excitação de ondas, desde a temperatura ambiente até a alta temperatura, com objetivo de se obter os módulos de Elasticidade (E) do BLC. Os ensaios realizados foram feitos em caráter qualitativo e não quantitativo. A técnica de excitação por impulso em altas temperaturas utiliza como base, em suas determinações, a norma ASTM E1876 (2006). Esta norma é utilizada para materiais isotrópicos, e o BLC material desta pesquisa é um material ortotrópico entretanto se enquadrará nesta norma utilizando as três direções diferentes.

3.2.4.1 - Corpo de prova (CP)

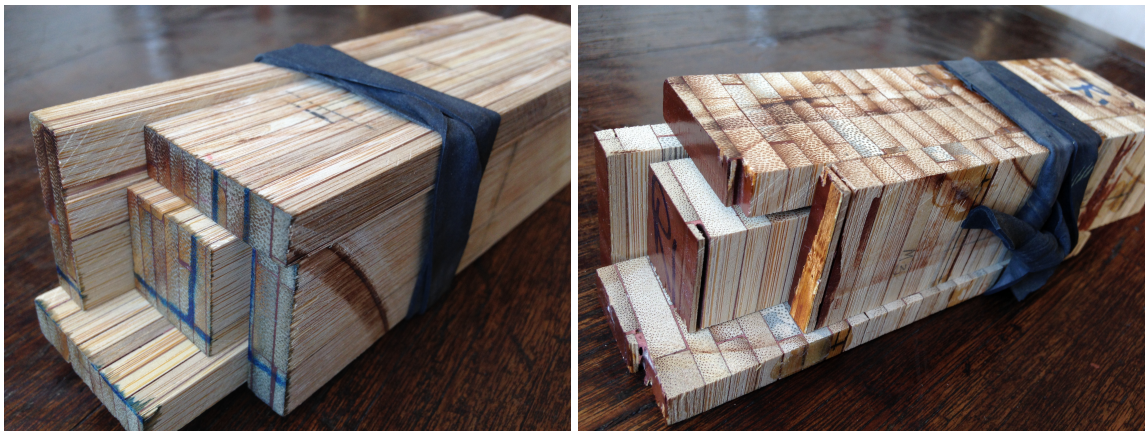
Os CPs de BLC desta metodologia foram confeccionados, a partir do desdobramento dos CPs, já apresentados no item (3.2.3.2.1), orientados nas direções: L, R, T, LT, TR e RL.

Na primeira etapa, foram retirados 4 CPs de cada um dos seis prismas, nas direções L, R, T, LT, TR e RL. Para cada prisma na dimensão 50 x 50 x 150 mm, foram retirados 4 CPs na dimensão com 40 x 10 x 150 mm, totalizando 24 CPs, como mostrado na Fig. (3.43) e, em sequência, são apresentados na Fig. (3.44) os CPs desdobrados nas 6 direções.



(a) (b)

Figura 3.43– CP prisma: (a) Original; e (b) desdobrado em 4 CPs.



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Figura 3.44 – CPs orientados nas 6 direções: (a) L; (b) R; (c) T; (d) RL; (e) LT; e (f) RT.

Os CPs foram marcados com traços distantes 0,224 L de cada extremidade (em que L representa o comprimento do CP). Essa marcação é referente à linha nodal de apoio do CP.

3.2.4.2 - Instrumentação e equipamentos

Esta pesquisa adotou, para o ensaio, o equipamento de pequeno porte, forno instrumentado HT1150 da linha Sonelastic, visando à determinação do Módulo Elástico (E), usando como princípio a vibração dos CPs, em função do aumento da temperatura. O (E) foi obtido, a partir das frequências naturais de vibração, que foram excitadas pelo impacto mecânico, um sensor capturou a resposta acústica, desde a temperatura ambiente até 235 ºC (ATCP – Engenharia Física).

O forno é composto de pulsador automático e captador acústico integrado, câmara, controlador de temperatura e sistema de refrigeração de ar. Internamente ele é de cerâmica com dimensões 200 x 200 x 300 mm, para acomodar o suporte do CP e o pulsador. Ele está conectado diretamente ao sistema.

A função do suporte é sustentar o CP, apoiando-o nas linhas nodais de tal forma que fique livre para vibrar ao receber o impulso mecânico de excitação. Os CPs são apoiados nas linhas nodais referentes à flexão, independentemente do modo de vibração que se deseja excitar. O que se altera, para cada modo, será a posição de excitação e de captação da resposta acústica (OTANI e PEREIRA, 2013).

O E é dado pela avaliação matemática do sinal resultante do CP em função da geometria e da massa. Este equipamento permite o ensaio com alta definição e utilizando-se CPs com dimensões reduzidas.

Na Figura (3.45), é possível ver o posicionamento do CP, no forno instrumentado HT1200AC, para a caracterização dos módulos elásticos e amortecimento em função da temperatura até 235°C com atmosfera controlada.



(a) (b)

Figura 3.45 – Vista do forno: (a) Externa; e (b) Interna.

3.2.4.3 - Ensaio de excitação de ondas em alta temperatura

O forno foi mantido fechado, sem ocorrer a circulação do ar, com a amostra no seu interior durante todo o experimento, desde seu aquecimento a partir da temperatura ambiente, atingindo a temperature de 235º C, ao seu resfriamento na temperatura ambiente novamente.

As frequências foram excitadas, por meio de um pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor, em função do aumento da temperatura. Na Fig. (3.46) são mostrados o início e final do ensaio com o sistema conectado ao SAD.

No aquecimento, o CP absorve a irradiação da resistência elétrica. No resfriamento o forno é também mantido fechado sem pegar influência do ambiente externo.



(a) (b)

Figura 3.46 – (a) Início do ensaio; e (b) Retirada do CP do forno.

Para a obtenção do espectro de frequências correspondente, aplica-se um tratamento matemático ao sinal (OTANI e PEREIRA, 2013). A partir daí, foram calculados os módulos elásticos dinâmicos para temperaturas de até 235° C. Para isso, é necessário considerar a geometria do CP, a massa, as dimensões e a frequência obtida pelo equipamento utilizado.

Módulo de elasticidade (E_d)

A determinação do (E_d) foi feita pela frequência de vibração na flexão, utilizando a massa e as dimensões dos CPs. Com a equação (48) dada pela (ASTM E 1876, ISO 12680-1, ENV 843-2), determina-se o E_d.

Módulo de deformação transversal (G_d)

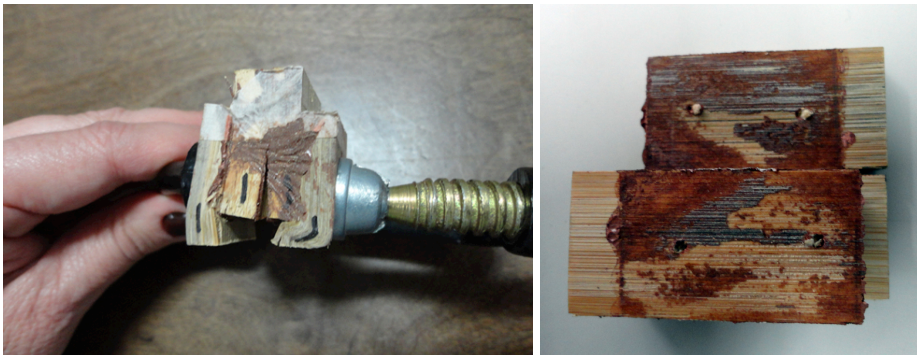
O módulo de deformação transversal foi feito, utilizando a vibração transversal e foi determinado pela equação (49).

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Influência da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

Foi verificado que estava havendo um momento e uma tração normal às fibras nos CPs, ocorrendo problemas no ensaio, pela excentricidade de carga. Esta força era tão grande que quebrou dois grampos, durante os ensaios do primeiro conjunto, não permitindo um rompimento adequado, acarretando em um esmagamento das fibras antes da sua ruptura. Os CPs confeccionados sem pressão romperam por valor de tensão de ruptura de 7,26 MPa e se apresentaram esmagados, após o ensaio de cisalhamento, como mostrado na Figura (4.1).



(a) (b)

Figura 4.1 - (a) CP após o ensaio de cisalhamento; e (b) CP rompido na ligação.

As dimensões dos CPs foram alteradas do primeiro ensaio para os ensaios seguintes, com o objetivo de diminuir a área de cola entre as amostras, que era prevista inicialmente de 10 cm^2, passando a ser de 5 cm^2, para que houvesse um rompimento adequado.

Com base nos resultados da Fig. (4.2), são apresentados os dados, para os sete tratamentos de pressão de colagem definida de zero (sem pressão) a 8,75 MPa, por valores de

tensão de ruptura correspondentes com seus devidos desvios padrões. Valores médios apresentados em MPa foram de: 6,98; 14,43; 14,73; 14,81; 14,09; 1359 e 13,56; para o conteúdo de umidade de 12 % de umidade.

Observa-se que não foi obtida uma diferença com o aumento da pressão, os valores da tensão de ruptura foram muito próximos, só havendo uma variação da pressão zero para as outras pressões, comprovando que a pressão acima de 5 MPa é desnecessária na execução dos CPs.

A partir do segundo experimento sob pressão de colagem de 2,5 MPa, os CPs se romperam por valores pressão de 14,43 MPa.

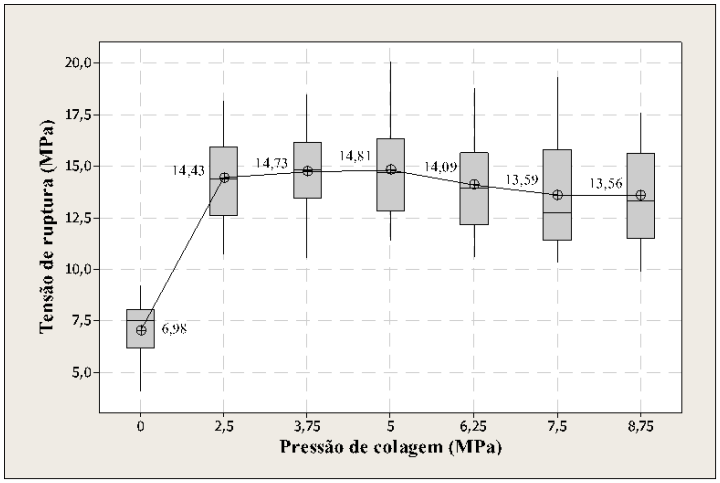


Figura 4.2 - Relação da pressão de colagem com a tensão de ruptura.

Nota-se que com o aumento da tensão de ruptura ocorre um aumento da pressão. Da pressão zero para 2,5 MPa, a tensão de ruptura praticamente dobra. De 2,5 até 5 MPa, a tensão de ruptura mantém um mesmo padrão. A partir da pressão de 5 MPa, houve um decréscimo da tensão de ruptura, diminuiu a resistência, indicando que o adesivo foi expelido e a ligação ficou empobrecida. A pressão melhora a colagem, no entanto o aumento da pressão não vai beneficiá-la.

Pode-se dizer então que, neste trabalho, para uma eficiente ligação colada de bambu-bambu, tem que ser aplicada uma pressão mínima de 2,5 e máxima de 5 MPa. Neste sentido, por questões práticas, foi adotada a pressão mínima de 2,5 MPa. Todavia de acordo com os resultados obtidos sobre a pressão de colagem neste estudo, foi visto que o intervalo entre 0 e 2,5 MPa deverá ser mais explorado.

De acordo com Lima (2001), para tensão de ruptura do material colado com adesivo à base de resorcinol (cascophen), foi aplicada a pressão no valor de 6,2 MPa, enquanto Rivero e Beraldo (2003) e Paes et al. (2009) aplicaram a pressão de 2 e 2,18 MPa. No experimento proposto por Rodrigues et al. (2008), além de serem trabalhadas as pressões no intervalo de 2 a 4 MPa, também, eles utilizaram a temperatura e conseguiram uma boa estabilidade do material. Anwar (2009) encontra a mesma estabilidade sob a pressão 1,4 MPa, utilizando as variáveis de pressão, temperatura e o tempo.

Da mesma maneira, é apresentado, na Fig. (4.3), o gráfico da relação do coeficiente de deslizamento específico em função da pressão de colagem.

Nota-se que, neste gráfico, a pressão de zero a 2,5 MPa, a média de deslizamento fica praticamente constante. No ensaio de pressão de 3,75 MPa, ocorre um decréscimo muito grande do valor do módulo de deslizamento. O resultado se apresentou incoerente devido a problema operacional do experimento, desta forma, não foi considerado o valor de pressão e colagem de 3,75 MPa na análise deste ensáio. Percebe-se, que a tensão de ruptura não foi influenciada nos resultados.

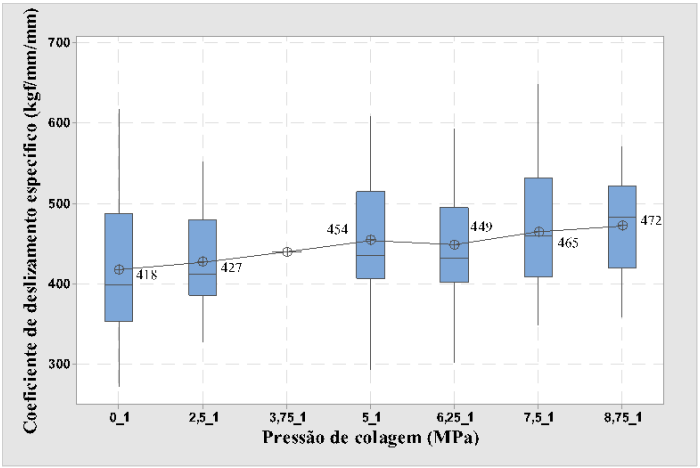


Figura 4.3 – Coeficiente de deslizamento específico em função da pressão de colagem.

Percebe-se, então, que aplicando a pressão no valor de 2,5 MPa, possibilita-se a obtenção do módulo de deslizamento na ligação, que seria equivalente a qualquer outra pressão.

Na Fig. (4.4), são apresentados os resultados de tensão de ruptura dos CPs com a combinação MC, MM e CC. A princípio nota-se que os valores médios são semelhantes e pode-se considerar que a superfície de colagem não influencia na resistência da ligação.

A combinação de superfície de colagem MC, miolo com casca, apresentou uma tensão de ruptura próxima de 12,7 MPa, enquanto a combinação MM, miolo com miolo, apresentou

um pequeno ganho, chegando nos 13 MPa e o CC, casca com casca, apresentou o valor de 12,3 MPa.

A combinação de superfície de colagem MC, miolo-casca e CC, casca-casca foi semelhante e MM, miolo-miolo foi um pouco acima da média pelo fato de que os poros estão mais abertos, ocorrendo uma maior penetração do adesivo nas duas superfícies.

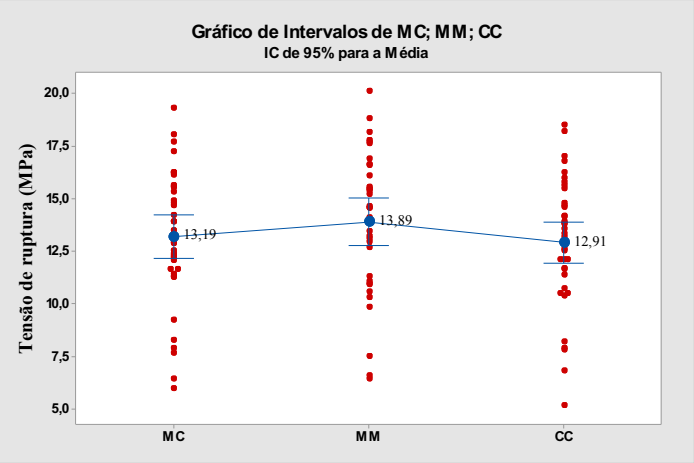


Figura 4.4 - Relação da variação da combinação de superfície de colagem com a tensão de ruptura.

Fazendo uma análise estatística ANOVA de comparação das 3 séries de medida com 95 % de confiabilidade e usando TUKEY, com intervalo de confiança de 5 %, comprova-se que, estatisticamente, os três tratamentos podem ser considerados iguais. Assim, pode-se dizer que a superfície não influencia na resistência ao cisalhamento.

4.2 - Influência da rugosidade da superfície de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu

Após os ensaios, foi constatado que a pressão ideal está no intervalo 2,5 MPa e 3,75 MPa, tendo sido adotada a pressão de 2,5 MPa.

A rugosidade está ligada a porosidade do material, no caso desta pesquisa o bambu foi tratado a vapor e borax.

A rugosidade apresentou pouca diferença da lixa paralela para o sentido normal às fibras. No lixamento paralelo às fibras, percebe-se que, até a lixa 120, o resultado não acrescentou nada na resistência da ligação, sendo lixado ou não lixado, ela será praticamente a mesma. Entre a lixa 120 a 180, os valores, para a amplitude da rugosidade dentro do intervalo

de confiança, foram praticamente iguais. Acima da lixa 220, a superfície do CP será prejudicada, pois ela se tornará muito lisa, não compensando o aumento da gramatura da lixa, porque a rugosidade permanecerá a mesma.

Na Fig. (4.5) foram apresentados os resultados da amplitude da rugosidade, em função da gramatura das lixas, quando foi feita paralela às fibras do lado interno e externo (miolo e casca).

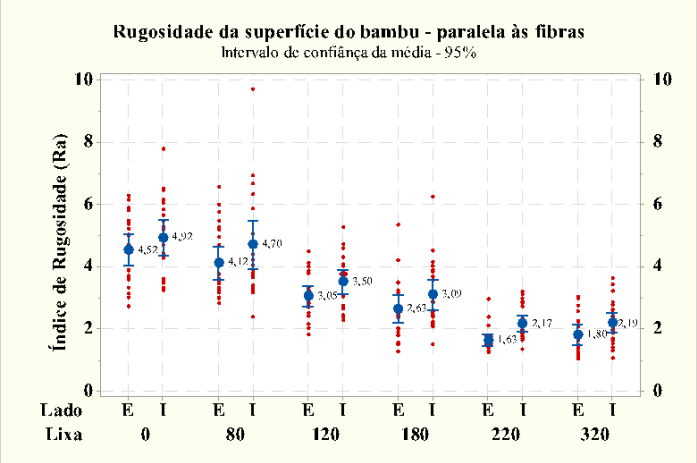


Figura 4.5 - Relação da rugosidade com a lixa paralela às fibras

Nota-se, também, uma grande variação da amplitude, quando ocorre o o lixamento no sentido normal às fibras, Fig. (4.6).

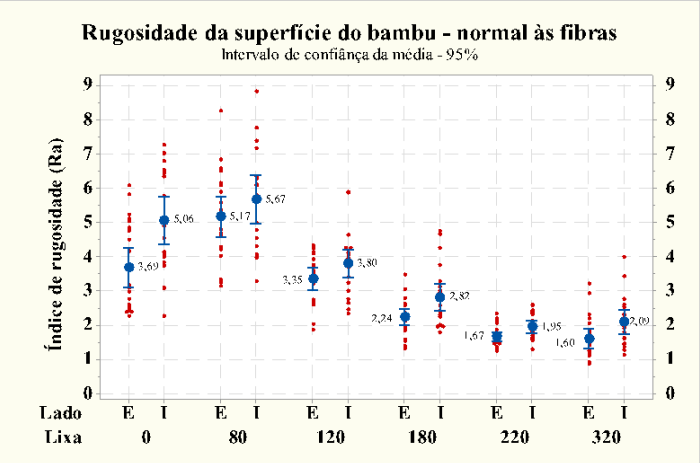


Figura 4.6 - Relação da rugosidade com a lixa normal às fibras

Quanto menos vales e picos ocorrerem, maior será a proximidade entre as superfícies, observando-se mais troca de íons, o que acarretará num pequeno ganho na resistência. Se a meta for ganhar altíssima resistência, esse lixamento deverá ser bem criterioso, para alcançar

o benefício deste tratamento, pois as lixas acima de 220 oferecem uma gramatura muito fina, acarretando um custo muito elevado. Entretanto este custo benefício não se justifica, pois não apresenta grandes vantagens, para as grandes indústrias, este beneficiamento. Seria muito caro este processo, desta forma, mais prático não lixar a superfície de colagem, já que seu ganho será praticamente o mesmo. Assim, a partir do corte do bambu em tiras para seu desdobramento, o mais interessante será colá-lo diretamente sem a etapa de lixamento.

Com o objetivo de verificar a diferença da amplitude da rugosidade, nos tratamentos paralelo e normal às fibras e externo e interno, foi feito o gráfico da Fig. (4.7).

Foi verificado que tanto fez lixar interna ou externamente, no sentido paralelo ou normal às fibras. A partir de uma certa rugosidade, ele permaneceu constante e assim foram mostrados os benefícios do experimento da rugosidade x pressão.

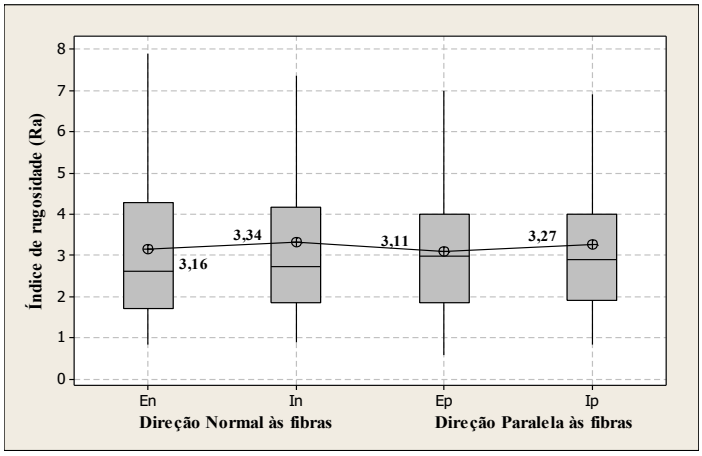


Figura 4.7 – Amplitude da rugosidade x tratamentos.

Observa-se, neste gráfico, que os desvios padrões e as médias de todos os tratamentos são muito próximos. Isso indica que, a princípio, não existe diferença entre os tratamentos. O tratamento para o aumento da rugosidade, apresentado por Boukehili et al (2012), foi químico, já o desta pesquisa foi pelo corte e com lixas.

De acordo com Whitehouse (1999), a qualificação e o controle da superfície oferecidos pela rugosidade possibilita uma boa aderência, e a quantidade exata de adesivo aplicado não permite que transborde, quando a superfície está muito lisa, nem que fique muito espessa, quando a superfície está muito grossa. Para o bambu, essa rugosidade não se apresentou muito diferente, para os quatro tratamentos aplicados, oferecendo uma eficiência na ligação em todos eles.

Para uma avaliação mais profunda, foi feita uma análise estatística de hipótese de diferença nula entre os 4 tratamentos (ANOVA), utilizando o método de TUKEY, com 5 % de nível de significância. Todos os intervalos de confiança com 95 % contêm a média, indicando que, estatisticamente, podem se considerados iguais, Fig. (4.8). Os resíduos apresentaram distribuição normal.

```
Individual 95 % CIs For Mean Based on
Pooled StDev
Level   N   Mean  StDev  -------+---------+---------+---------+--
En     126  3,164  1,729    (-----------*----------)
In     126  3,326  1,738          (-----------*-----------)
Ep     126  3,106  1,463  (----------*-----------)
Ip     126  3,268  1,716        (-----------*----------)
-------+---------+---------+---------+--
3,00      3,25      3,50      3,75
Pooled StDev = 1,665
```

Figura 4.8 – Médias resultante dos 4 tratamentos.

Na Fig. (4.9) são apresentados os resultados da tensão de ruptura em função da gramatura da lixa. Nota-se com o gráfico que o CP tratado com a lixa 220 ofereceu maior resistência.

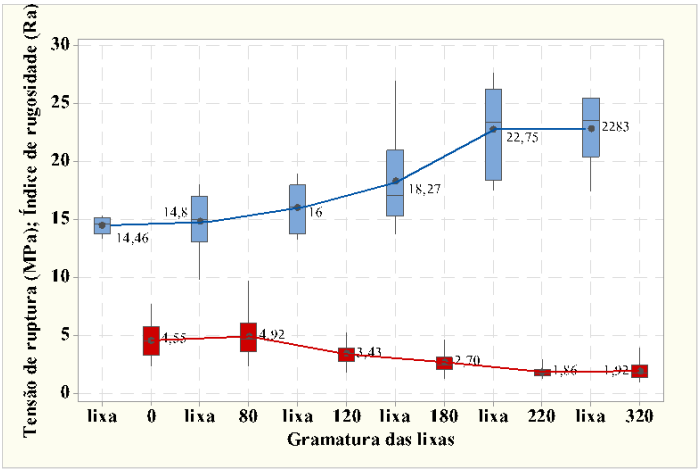


Figura 4.9 – Relação da tensão de ruptura com gramatura da lixa.

O aumento da tensão de cisalhamento com a diminuição da rugosidade se deve ao fato que na superfície de colagem há menor amplitude entre vales e picos e assim, maior será a proximidade entre as superfícies, ocorrendo mais troca de íons, o que acarretará ganho na resistência da ligação. O tratamento da superfície com lixa acima de 80 e abaixo de 220 causa aumentos consideráveis na tensão de cisalhamento podendo chegar a acréscimos de 50 %, trazendo benefícios consideráveis para de ligação bambu-bambu e para a confecção do BLC.

Na Fig. (4.10), são apresentados os resultados da relação do modulo de K de serviço em função da gramatura da lixa.

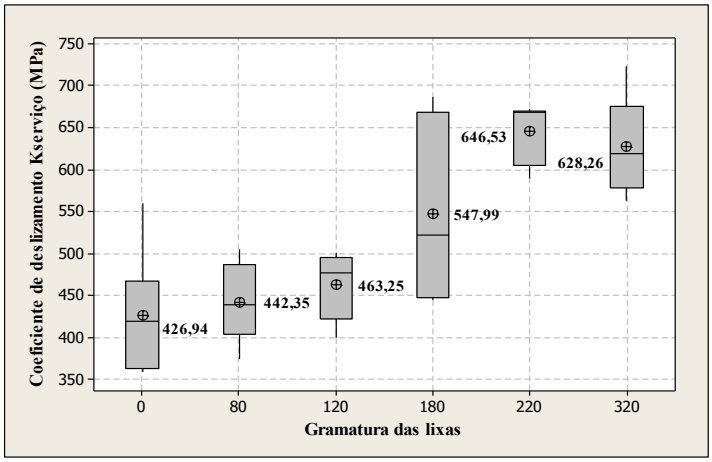


Figura 4.10 - Relação do coeficiente de deslizamento (Kserviço) com gramatura da lixa.

Nota-se um comportamento similar para todos os tratamentos. Apenas vale ressaltar que, o tratamento da superfície com lixa acima de 80 e abaixo de 220 causa aumentos consideráveis no módulo de deslizamento da ligação podendo chegar a acréscimos de 45 %. Isto trará benefícios consideráveis na rigidez do BLC, pois a linha de cola estará solidarizada aos aderentes com maior rigidez permitindo menor deslocamento entre as lâminas e consequentemente, em uma viga em flexão, terá a linha elástica menos acentuada. As características apresentadas no lixamento estão ligadas a teoria de adesão mecânica (gancho), tranferência, molhabilidade.

Os resultados obtidos foram a partir da espécie escolhida para o estudo, *Phyllostachys Pubescens*, submetido ao tratamento a vapor, nas condições em que foi comprado o material. A variação da densidade é atribuída a concentração de fibras na parte interna em relação a parte externa.

A partir da segunda etapa, foi definida a rugosidade da superfície sem lixa, já que ela ofereceu uma boa resistência na execução dos CPs de BLC, para então ser feita a definição da matriz de flexibilidade, objetivo final deste estudo.

4.3 - Caracterização física do bambu e da determinação da matriz de flexibilidade do BLC

4.3.1 - Caracterização física

A densidade aparente úmida média variou de 0,48 para 0,72g/cm^3, com umidade padrão de 12 %, valores similares foram encontrados por LIESE (1985).

Na Fig. (4.11), é apresentado um gráfico boxplot dos resultados do ensaio de densidade aparente a 12 % de umidade em função da posição na espessura da parede do bambu. A espessura média da parede do bambu foi de 8 mm. Observa-se, no gráfico, que a densidade da região mais perto da casca (posição 1) foi de 0,73 g/cm³, da parte intermediária (posição 2) e (posição3) foi de 0,58 e de 0,53 g/cm³, respectivamente e da parte interna (posição 4) foi 0,52 g/cm³. Os correspondentes desvios padrões foram pequenos indicando a boa qualidade dos resultados encontrados.

A densidade da posição 1 (casca) se apresntou 40 % maior que a da posição 4 (miolo). A variação da densidade, na espessura da parede do bambu, não é linear, tem um gradiente mais acentuado perto da casca. Embora o gradiente de distribuição de fibras seja 4/1, é importante ressaltar que se não tivesse sido retirado 2 mm da parte externa e da parte interna da parede do bambu na confecção do CP, os resultados seriam muito distintos, muito mais impactantes. Na Figura (4.12) é apresentado um gráfico da densidade aparente, D_{ap} de 12 % em função da espessura da parede do bambu. Foi realizada uma regressão, e o gráfico da curva de tendência é mostrado na mesma figura. A equação (55) representa a variação da densidade em função da espessura da parede do bambu.

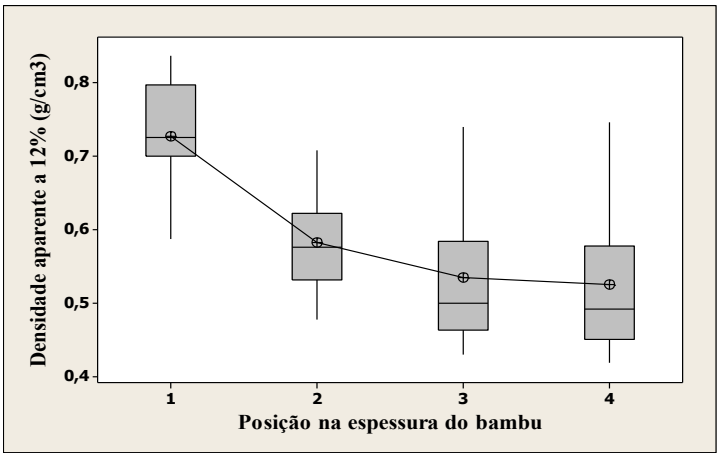


Figura 4.11 – Gráfico Boxplot $D_{ap,12\,\%}$ x posição na parede do bambu.

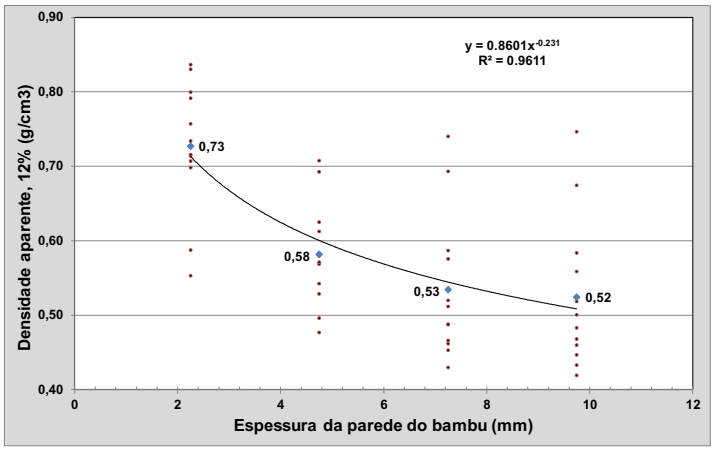


Figura 4.12 – Gráfico relacionando a $D_{ap,12\%}$ x espessura da parede do bambu.

$$Y = 0{,}8861x^{-0.231}$$
$$(R^2 = 0{,}96) \qquad (55)$$

A distância, a partir da casca até o parte interna da parede do bambu, é apresentada em milímetros. Na Fig. (4.13), é mostrado um gráfico bloxplot dos resultados das retrações em função da espessura da parede do bambu. Observa-se que a retração é maior no sentido tangencial do que no radial, independentemente da posição da amostra. Assim como na madeira, a retração axial do bambu é um valor muito pequeno, 0,07 % para todas as amostras. É importante ressaltar que a medida das retrações axiais foi dificultada pelo tamanho da amostra e pela precisão dos instrumentos, provavelmente, esta foi a causa pela qual o desvio padrão fosse muito grande.

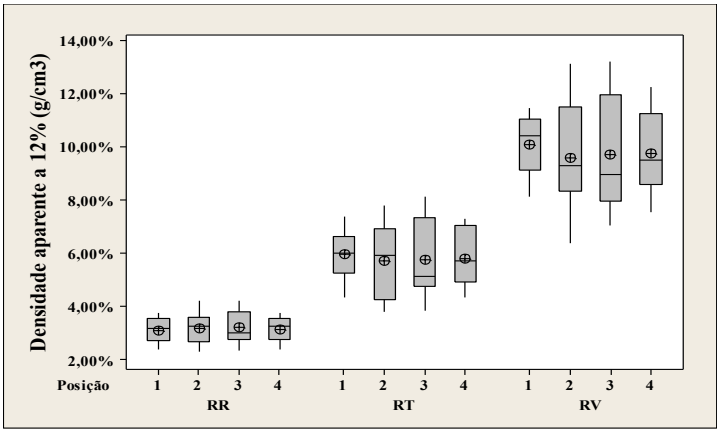


Figura 4.13 – Retração radial (RR), tangencial (RT) e volumétrica (RV) x espessura da parede do Bambu.

Foi realizada uma análise estatística ANOVA, para hipótese de diferença nula para as retrações na espessura da parede do bambu, pelo método de TUKEY com nível de significância de 95 %. O resultado indica que as retrações, na espessura da parede do bambu, podem ser consideradas estatisticamente iguais, isto é, elas não variam com a espessura da parede do bambu. Assim, os valores médios da retração foram: 5,80 tangencial, 3,16 % radial, 0,07% longitudinal e 9,80 % volumétrica.

Na Fig. (4.14), é apresentado um gráfico do fator anisotrópico (F_A) em função da espessura da parede do bambu. Observando apenas os valores médios do F_A, nota-se que, para região intermediária, são os menores seguida pela região interna, e os valores mais elevados para região da casca. Entretanto, após realizada uma análise estatística ANOVA, para hipótese de diferença nula para o F_A, na espessura da parede do bambu, pelo método de TUKEY com nível de significância de 95 %, pode-se afirmar que o F_A, para a parte intermediaria e interna, pode ser considerado estatisticamente igual. Já o F_A da região da casca não pode ser considerado igual às outras regiões. O F_A médio, para a região da casca, é de 2,03 e, para o resto da espessura, é de 1,8. O F_A médio de toda a espessura do bambu foi de 1,86, indicando que pode ser utilizado sem problemas em móveis e em material para acabamento, apenas deve se ter cuidado, quando se usa toda a espessura do bambu, pois a diferença do F_A entre a casca e as outras regiões é de 12,8, um valor considerável.

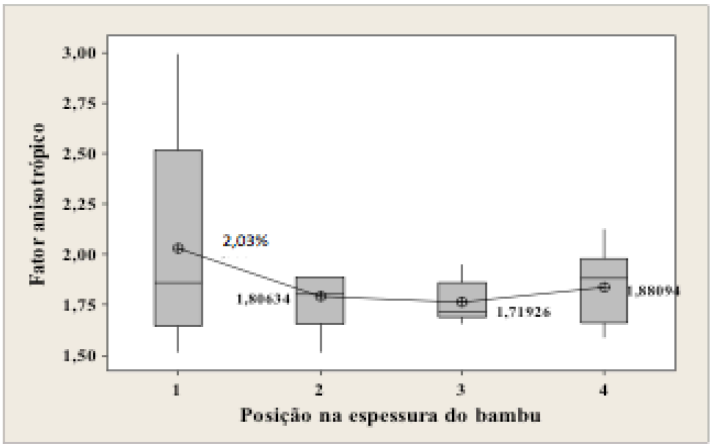


Figura 4.14 - Fator anisotrópico em função da espessura da parede do bambu.

Alguns autores já indicam que há uma variação da densidade na espessura da parede do bambu. Ahmad (2000), Latif et al. (1993) e Ghavami e Solorzano (1995) afirmam que a resistência do bambu está diretamente associada à complexidade do colmo, sendo de 40 % a 90 % de suas fibras distribuídas na parte externa e de 15 % na parte interna da espessura da

parede do bambu em todo o seu comprimento. Para Englerth (1966) e Wang et al. (2003 e 2006), a qualidade da madeira sólida é sinônimo de sua densidade.

Os valores apresentados para densidade aparente são compatíveis aos encontrados na literatura por Pereira (2002), por Rivero (2003) e Li (2004), com o menor valor da densidade encontrada, na parte interna da parede do bambu, de 0.48 g/cm^3 para o maior valor de 0.72 g/mm^3. Entretanto estes valores variam dependendo, principalmente, da estrutura anatômica e da espécie.

Quando a densidade diminui, as propriedades mecânicas também diminuem e, quando o teor de umidade diminui, as propriedades mecânicas aumentam afirma Latif (1993). Ghavami e Solorzano (1995) mensuraram a umidade natural do bambu que varia de 13 % a 20 % em função também do clima local.

Siqueira (2003) afirma que o bambu é um material anisotrópico, possui propriedades mecânicas particulares nas três direções longitudinal, radial e tangencial.

Esse resultados apresentam uma tendência a redução, pois ocorre uma porosidade maior, a medida que vai para a parte interna, com menor concentração de fibras. Os números encontrados entre o 1 e o 2, são condizentes com a literatura. A procedência, idade, espécie, método de tratamento têm grande influência no comportamento do bambu, sendo muito difícil compara-lo. Com os resultados apresentados, pode-se definir um perfil de todas as propriedades físicas analisadas na espessura da parede do bambu. Onde a densidade é maior, na região da casca que é 40 % maior que o tecido interno, a retração é igual em todas as posições e, para o fator anisotrópico, a casca apresenta o maior valor.

4.3.2 - Matriz de flexibilidade

A determinação da Matriz de flexibilidade foi feita a partir dos ensaios destrutivos e não destrutivos.

4.3.2.1 - Ensaios “destrutivos” de compressão

As propriedades elásticas foram determinadas, a partir das deformações encontradas com os medidores utilizados, durante esta pesquisa. Foram determinados os valores dos Módulo de Elasticidade (E_L, E_R e E_T), Módulo de deformação transversal (G_{LR}, G_{RT} e G_{TL}) e os coeficientes de Poisson (ν_{LR}, ν_{LT},ν_{RT}, ν_{RL}, ν_{TR} e ν_{TL}), por meio de relações entre variáveis e regressões lineares. Nas Figuras 4.15 a 4.25, são apresentados os resultados do ensaio de

compressão do BLC com a utilização do medidor de deslocamento (MD), pelos gráficos Tensão x Deformação Longitudinal incluindo as regressões lineares e os valores das propriedades elásticas. Foi aplicada baixa carga, de 10 MPa, para aproveitamento do CP nos próximos ensaios. Os modulos de elasticidade foram obtidos a partir de 2 medidores de deslocamento no 1 CP, e foi representada a media da deformação dos MD entre eles.

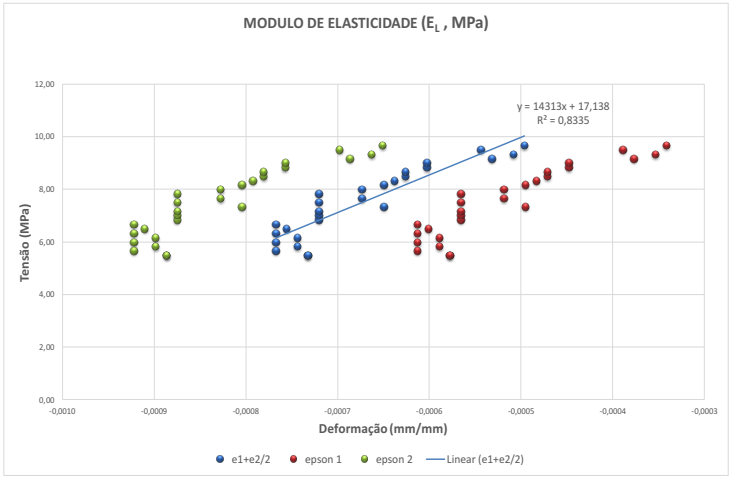


Figura 4.15 - Módulo de elasticidade, E_L.

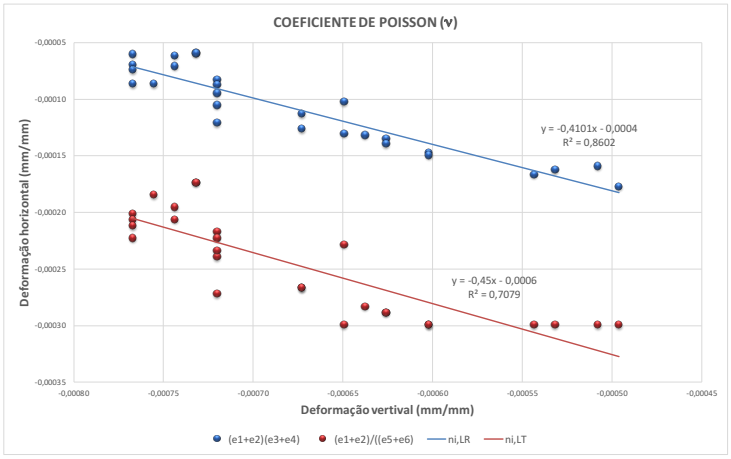


Figura 4.16 - Coeficiente de Poisson, Poisson ν_{LR} , ν_{LT}.

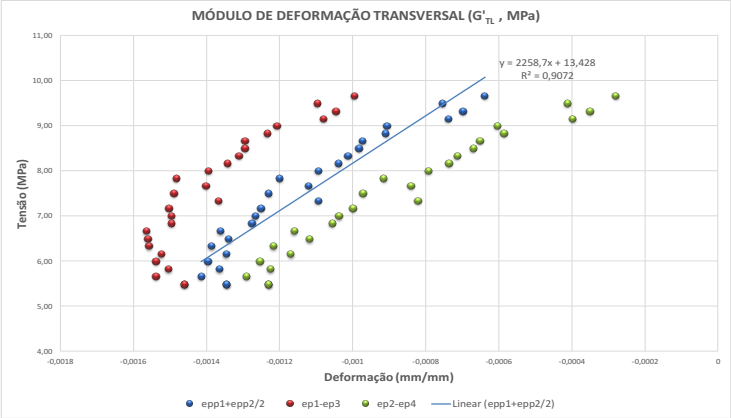


Figura 4.17 - Módulo de deformação transversal, G'_{TL}.

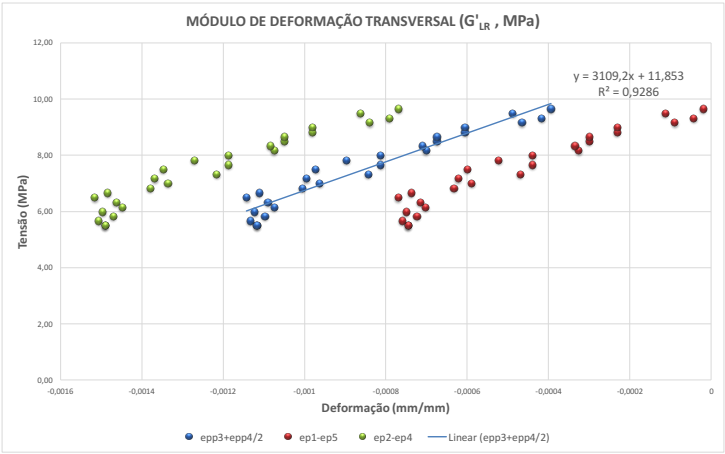


Figura 4.18 - Módulo de deformação transversal, G'_{LR}.

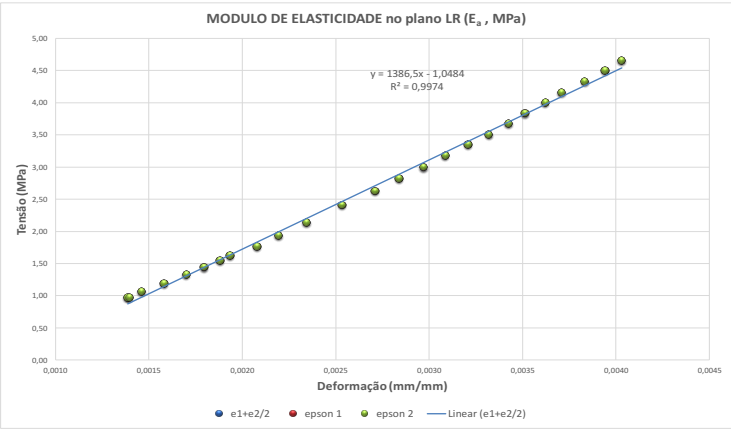


Figura 4.19 - Módulo de elasticidade, E_{LR}.

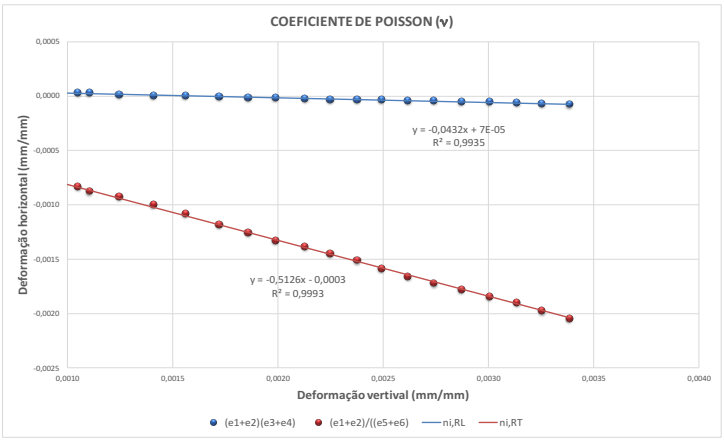


Figura 4.20 - Coeficiente de Poisson ν_{RL} , $\nu_{RT.}$

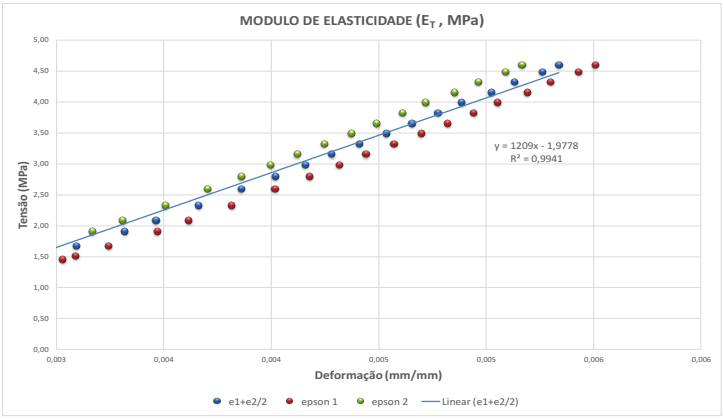


Figura 4.21 - Módulo de elasticidade, E_T.

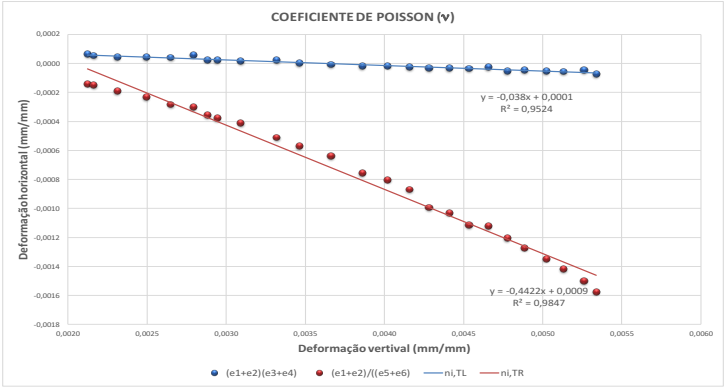


Figura 4.22 - Coeficiente de Poisson ν_{LT} , $\nu_{TR.}$

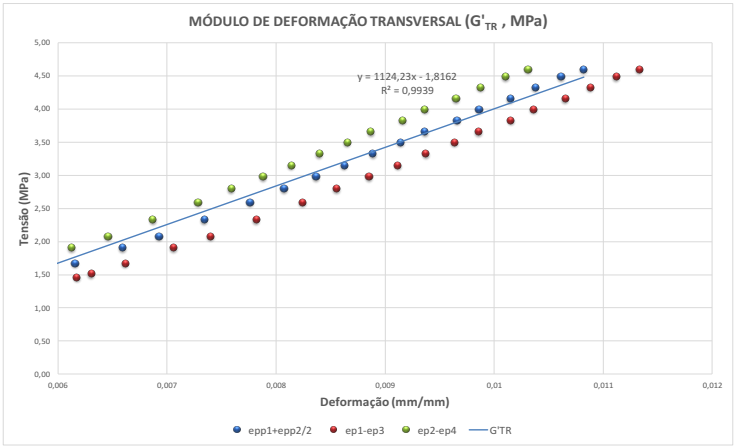


Figura 4.23 - Módulo de deformação transversal, G’$_{TR}$.

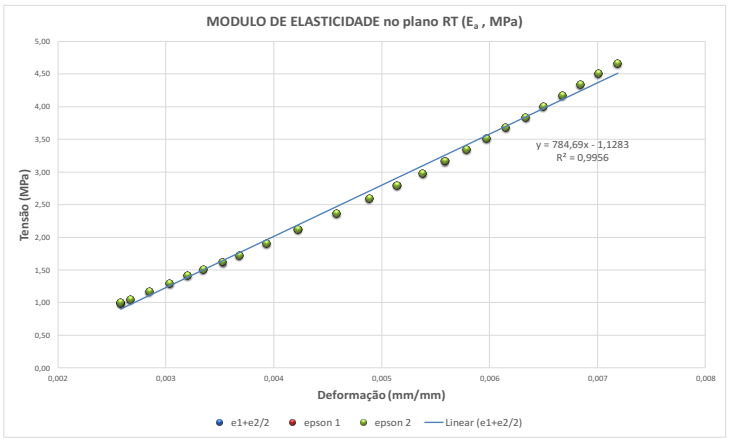


Figura 4.24 - Módulo de elasticidade, E_{RT}.

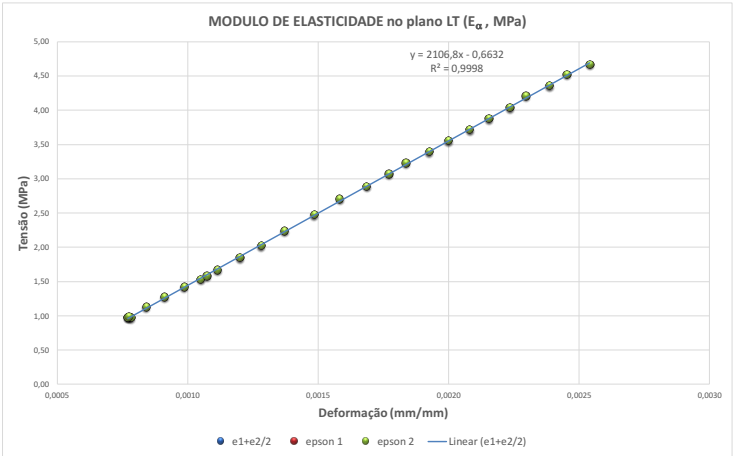
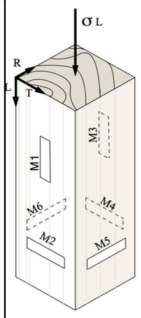
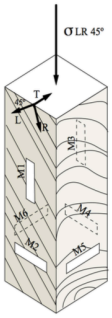
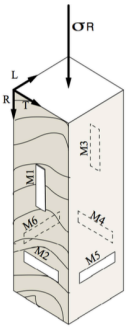
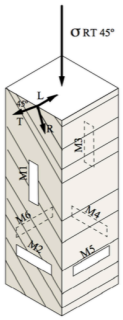
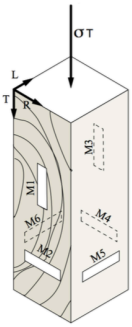
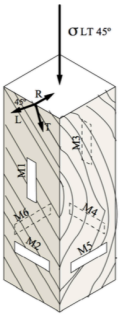


Figura 4.25 - Módulo de elasticidade, E_{LT}.

Na Tab.4.1, são apresentadas as propriedades mecânicas do BLC determinadas, a partir dos ensaios e gráficos. A determinação de $G_{LR,}$ $G_{RT\ e}$ G_{TL} foi feita pelos 2 métodos propostos e equações 24 e 25, respectivamente. Nota-se que estes valores são diferentes em razão da ortotropia do Sistema, prisma composto de fibras naturais com adesivo. O compósito deste experimento, BLC, foi confeccionado com lâminas padronizadas do material anisotrópico bambu *Phyllostachys pubescens*, e com o adesivo bicomponente resorcinol formoldeído, submetido a pressão de 2,5 MPa. Pela simplificação adotada, este compósito, foi considerado material ortotrópico. Na confecção do BLCs, as lâminas foram colocadas de forma aleatória, sem a preocupação de ter casca com casca, casca miolo ou miolo com miolo, podendo ter ocorrido nos resultados a interferência de concentração de fibras também. A variação destes valores depende, principalmente, da inclinação das fibras que compõe o sistema, os valores obtidos pelo segundo método são mais precisos, sendo os quais foram adotados.

O módulo de elasticidade longitudinal às fibras foi determinado, a partir da inclinação da reta de Tensão X Deformação longitudinal (Fig 4.15), onde foi analisado um CP para cada direção. Comparando valores obtidos por Menta et al. (2004) entre 2,6 GPa e 20 GPa e os apresentados para o BLC e ao bambu *Phyllostachys pubencens*, na Tabela de 12 e 14,313 GPa, pode-se concluir que o medidor de deslocamento foi capaz de capturar a ordem de grandeza da deformação longitudinal no CP, obtendo–se valores similares aos encontrados na literatura. Essa variação pode ser atribuída à grande variação das propriedades do BLC.

Tabela 4.1 – Característica Mecânica

Característica Mecânica					
Direção do CP	**Módulos**	**Valores**	**Direção do CP**	**Módulos**	**Valores**
	E_L ν_{LT} ν_{LR} $G'_{TL} \rightarrow G_{TL}$ $G'_{LR} \rightarrow G_{LR}$	14,313 GPa 0,45 0,41 1,802 GPa 0,935 GPa		2º método G'_{LR}	1,304 GPa
	E_R ν_{RT} ν_{RL}	1,386 GPa 0,51 0,04		2º método G'_{TR}	0,785 GPa
	E_T ν_{TR} ν_{TL} 1º método $G'_{TR} \rightarrow G_{TR}$	1,209 GPa 0,44 0,038 0,721 GPa		2º método G'_{LR}	1,390 GPa

Já para o ν_{LT}, o menor valor encontrado foi de 0,45 GPa enquanto, para madeira, estes valores se situam entre 0,57 e 0,66. Comparando, Mascia (1993) determina o valor médio de 0,47 GPa, para madeiras tropicais e, de acordo com Bodig e Jayne (1993), o valor de 0,50 GPa para as denominadas folhosas de clima temperado. Embora Bodig e Jayne (1982) declarem que, para ter uma melhor precisão na determinação dos valores do coeficiente de Poisson, a alternativa seja aumentar as dimensões dos CPs, surge outro problema: a dificuldade de elaborar o CP pela dimensão do bambu.

Para efeito de comparação, podem-se contrapor dois trabalhos do mesmo autor, Mascia (1993) e Mascia e Lahr (2006). No primeiro trabalho, o autor afirma que os valores médios para folhosas são de 0,71, 0,47 e 0,47 para ν_{RT}, ν_{LR} e ν_{LT}, respectivamente. No entanto

Mascia e Lahr (2006) mostraram valores de 0,43, 0,51 e 0,78 para os mesmos Coeficientes de Poisson da madeira jatobá; valores estes mais próximos aos encontrados na presente tese de (0,51, 0,41, 0,45) para ν_{RT}, ν_{LR} e ν_{LT}.

Os valores de módulo de deformação transversal (G), também, foram determinados para o BLC. Os valores de G_{RT} variaram de (0,721 e 0,785) GPa, enquanto os valores encontrados por Alves (2017), para a madeira de média a alta densidade (roxinho e angelim vermelho), foram de (0,316) GPa e (0,433) GPa. Na qualidade G_{LR}, os valores variaram de (0,855) GPa, para a madeira roxinho e (0,867) GPa, para a madeira garapa (0,935) GPa. Já para G_{LT}, os valores variaram de (0,484) GPa, para a madeira roxinho e (0,549) GPa, para a madeira angelim vermelho (1,39) GPa. Mascia e Lahr (2006) encontraram, para a madeira de jatobá, os valores de (0,496) GPa, (1,024) GPa e (1,450) GPa para G_{RT}, G_{LR} e G_{LT}, respectivamente.

Na Fig. (4.26) são apresentados os valores da matriz de flexibilidade para o BLC.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}0698 & -0{,}0288 & -0{,}0314 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}0286 & 0{,}7215 & -0{,}3639 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}0314 & -0{,}3679 & 0{,}8271 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}2738 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}7\,194 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}7668 \end{bmatrix}$$

Figura 4.26 – Matriz de Flexibilidade para o BLC.

Na Tab. 4.2 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas do bambu dados pelos pesquisadores (Garcia e Ghavami, 2003; Beraldo e Rivero, 20012; Ghavami et al 2012) e os resultados experimentais para o BLC.

Tabela 4.2 – Valores de (E), (G) e (ν) do BLC encontrados nos ensaios de compressão.

Característica Mecânica			
Módulos Elásticos	**Direção**	**Valor para o bambu**	**Valor experimental p/ o BLC**
E GPa	L	12,000	14,313
	R	0,490	1,386
	T	0,490	1,209
G GPa	LR		1,340
	RT		0,785
	LT		1,390
ν	LR	0,295	0,410
	LT	0,438	0,450
	RL	0,046	0,040
	RT	0,537	0,510
	TL	0,046	0,038
	TR	0,351	0,440

Comparando os resultados experimentais do BLC com os valores médios obtidos para o bambu pelos pesquisadores acima citados, nota-se que o adesivo influencia pouco no $E_{L,}$ entretanto, no E_R e $E_{T,}$ a influência é elevada. A ordem de grandeza dos coeficientes de Poisson são similares. O BLC apresentou um módulo elástico superior ao bambu, pelo fato de que a linha adesiva proporcionou maior rigidez ao material, dificultando sua deformação, Carrasco (1989).

Eles têm ordem de grandeza similares. Para esse nível de carregamento não ocorreu delaminação, descolamento, então a cola não está fazendo nenhum efeito expressivo. A cola está funcionando bem transferindo tensões de uma lâmina para outra. A ordem de grandeza de 13 a 14 GPa como modulo elástico encontrado na literatura é uma informação qualitativa comprovando resultados razoáveis.

4.3.2.2 - Ensaios não destrutivo de ultrassom

A matriz de flexibilidade foi determinada, a partir das ondas harmônicas planas, propagando-se no CP, assim, tem-se:

Determinação da matriz de flexibilidade para o BLC

Para que ondas harmônicas planas estejam se propagando no corpo, tem-se:

$$(\rho\omega^2\delta_{im} - C_{iklm}\, K_K K_L)\, u_m = 0 \qquad (51)$$

Em que: ρ é a densidade aparente do BLC;

ω^2 é o quadrado da frequência angular;

δ_{im} tensor unitário ou delta de Kronecker;

$\mathcal{U}_{0i}$ é a amplitude das componentes do vetor deslocamento;

k é a componente do vetor de onda;

$\mathcal{U}_0$ representa a amplitude do deslocamento;

α_i são os cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula.

A equação (51) foi desenvolvida por Christoffel, em 1877 e é comumente conhecida como *equação de Christoffel,* de acordo com Carrasco e Azevedo Júnior (2003). Em geral, é mais conveniente escrever a equação (51) na forma da equação (52), em que (V) representa a velocidade de fase das ondas (e^{ni}); implícita em (λ_{im}) denota os cossenos diretores da normal às frentes de onda.

$$(\lambda_{ij} - \rho v^2 \delta_{im}) \upsilon_m = 0 \qquad (52)$$

Sendo: ρ é a densidade do material e v é a velocidade de propagação da onda.

Portanto o novo determinante, a ser calculado e considerando que o tensor (λ_{im}) depende da simetria estrutural do corpo e da orientação das ondas, neste corpo, será:

$$\begin{vmatrix} (\lambda_{11} - \rho\, V^2) & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{12} & (\lambda_{22} - \rho\, V^2) & \lambda_{23} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & (\lambda_{33} - \rho\, V^2) \end{vmatrix} = 0 \qquad (53)$$

Em uma investigação da equação (53), mostra-se que os vetores deslocamento (autovetores), associados a cada autovalor $\rho\, V^2$, são ambos perpendiculares. Para uma dada direção de propagação, definida pelo vetor de onda $\vec{k}$, três ondas se propagam com vetores deslocamento mutuamente perpendiculares entre si e com velocidades diferentes.

Em geral, estas ondas não são puramente longitudinais ou puramente transversais. Entretanto, para certas direções de propagação, em um dado material, em que $\vec{k}$ é um autovetor de λ_{im} , uma onda é puramente longitudinal e as outras duas são puramente transversais.

Para uma onda longitudinal pura, o vetor deslocamento da partícula $\vec{u}$ é paralelo ao vetor unitário normal às frentes de onda $\vec{n}$. Por conseguinte, o produto vetorial $\vec{u} \times \vec{n}$ é nulo. Por outro lado, para uma onda transversal pura, os mesmos vetores são perpendiculares entre

si e, consequentemente, o produto escalar $\vec{u} \cdot \vec{n}$ é igual a zero.

Christoffel demonstrou que os cossenos diretores α_1 do deslocamento das partículas das frentes de onda estão relacionados às correspondentes velocidades de onda por:

$$\alpha_3 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} = \alpha_1 \rho v^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} = \alpha_2 \rho v^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} = \alpha_3 \rho v^2 \qquad (54)$$

As constantes de rigidez da matriz de rigidez também foram obtidas a partir das velocidades das ondas ultrassônicas, nas diversas direções e aplicando as equações apresentadas (33), (34) e (35). Fazendo a inversa da matriz de rigidez, obtém-se a matriz de flexibilidade, equação (1).

Nas Tabelas (4.3) e (4.4), são apresentados valores médios das constantes de rigidez, da matriz de rigidez e as propriedades elásticas da matriz de flexibilidade, resultantes do ensaio de propagação de onda.

Tabela 4.3 – Constantes de rigidez.

Constantes de rigidez											
	CP1	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**CP5**	**CP6**	**Média**	**CP1 grande**	**CP2 grande**	**Média**	**CP 5x5x15**
C11	14543	12982	16156	19470	21030	15516	16616	14615	15694	15154	15569
C22	1633	1619	2059	2965	2574	1973	2137	1801	1980	1891	1987
C33	1531	1547	1764	2660	2255	1777	1923	1606	1704	1655	1680
C44	739	686	767	864	1056	793	818	656	840	748	782
C55	1307	1179	1479	1574	1904	1404	1474	1309	1449	1379	1410
C66	1262	1133	1419	1514	1831	1356	1419	1224	1376	1300	1251
C12	1278	969	1251	2847	1580	1253	1530	1147	1216	1181	1253
C13	1206	960	1183	2751	1515	1197	1469	1095	1144	1120	1155
C21	1072	973	1256	2850	1579	1249	1497	1146	1211	1179	1253
C23	858	775	984	1906	1194	957	1112	847	890	869	942
C31	1071	956	1178	2748	1516	1200	1445	1095	1148	1122	1155
C32	909	765	972	1902	1196	964	1118	848	899	874	941

Tabela 4.4 – Módulos elásticos dos Poliedros.

		Poliedros										Prisma
Experimental		**CP1**	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**CP5**	**CP6**	**Média**	**CP1 gde**	**CP2 gde**	**Média**	**CP 5x5x15**
Densidade	750	718	706.60	728	732	853	715	742	696	773	752	750
EL	14313	13463	12192	15130	16143	19701	14458	15181	13630	14675	15631	14523
ER	1386	1104	1216	1494	1556	1911	1428	1451	1331	1486	1527	1435
ET	1209	1035	1161	1278	1387	1670	1285	1303	1185	1276	1351	1213
GTR	785	739	686	767	864	1056	793	818	656	840	838	782
GTL	1390	1307	1179	1479	1574	1904	1404	1474	1309	1449	1519	1410
GLR	1340	1262	1133	1419	1514	1831	1356	1419	1224	1376	1453	1251
uRL	0.04	0.0410	0.040	0.039	0.053	0.039	0.041	0.042	0.041	0.041	0.043	0.041
uTL	0.038	0.0390	0.040	0.038	0.055	0.039	0.040	0.042	0.040	0.040	0.043	0.038
uLR	0.41	0.4200	0.400	0.395	0.550	0.400	0.415	0.430	0.420	0.405	0.437	0.415
uTR	0.44	0.5000	0.455	0.455	0.590	0.440	0.460	0.483	0.445	0.425	0.474	0.450
uLT	0.45	0.4500	0.420	0.450	0.640	0.460	0.450	0.478	0.460	0.460	0.491	0.455
uRT	0.51	0.5650	0.470	0.525	0.660	0.504	0.515	0.540	0.500	0.500	0.536	0.532

Vale ressaltar que os valores de Poisson obtiveram muitas diferenças entre eles. Esse fenômeno já poderia ser esperado, por se tratar de um material anisotrópico pelo que mostrou Bucur (2006), quando analisa a madeira.

Na Tabela 4.4, foram apresentados os valores médios das constantes de rigidez (elásticas), resultantes do ensaio com propagação de onda ultrassônica, para 12 CPs analisados. Bucur (1995), também, determinou todas essas constantes para madeiras americanas.

Nas Figuras (4.27), (4.28) e (4.29) é apresentada a matriz de rigidez e de flexibilidade média do BLC, para os ensaios, nos CPs poliédricos pequenos e grandes e CPs prismáticos, respectivamente.

$$|C| = \begin{bmatrix} 16{,}616 & 1{,}530 & 1{,}469 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}497 & 2{,}137 & 1{,}112 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}445 & 1{,}118 & 1{,}923 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}818 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}474 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}419 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0{,}060 & -0{,}028 & -0{,}032 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}028 & 0{,}467 & -0{,}370 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}031 & -0{,}035 & 0{,}520 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}222 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}678 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}704 \end{bmatrix}$$

Figura 4.27 – Matriz de Flexibilidade do BLC, CP poliédrico pequeno.

$$|C| = \begin{bmatrix} 15{,}154 & 1{,}181 & 1{,}120 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}179 & 1{,}891 & 0{,}869 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}122 & 0{,}874 & 1{,}655 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}748 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}379 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}300 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0{,}065 & -0{,}028 & -0{,}031 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}027 & 0{,}528 & -0{,}350 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}031 & -0{,}351 & 0{,}604 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}336 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}725 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}769 \end{bmatrix}$$

Figura 4.28 – Matriz de Flexibilidade do BLC, CP poliédrico grande.

$$|C| = \begin{bmatrix} 15{,}569 & 1{,}253 & 1{,}155 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}253 & 1{,}987 & 0{,}942 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}155 & 0{,}941 & 1{,}680 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}782 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}410 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}251 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0{,}503 & -0{,}028 & -0{,}031 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}028 & 0{,}503 & -0{,}313 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}031 & -0{,}370 & 0{,}595 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}278 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}709 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}799 \end{bmatrix}$$

Figura 4.29 – Matriz de Flexibilidade do BLC, CP prismático.

Observou-se que a velocidade da onda no BLC foi muito maior no sentido longitudinal do que nas outras direções. A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal pela orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial e, segundo MATOS (1997), discorrendo sobre a madeira, quando as ondas atravessam a direção transversal, cruzam camadas de lignina, mais amorfas e inelásticas e, assim, estão sujeitas a grandes atenuações.

Analisando a Tab. (4.5), observa-se que o tamanho e a forma do CP influenciam muito pouco na determinação das propriedades elásticas do BLC, por ondas ultrassônicas. Na mesma tabela, observa-se que os valores obtidos, por meio dos ensaios destrutivos, são muito próximos dos obtidos por ondas ultrassônicas, podendo-se concluir que é possível estimar as propriedades elásticas do BLC pelos ensaios não destrutivos via ultrassom.

Na Tab. (4.5), são apresentados os resultados das pesquisadoras Alves (2017) e Gonçalves (2014), com a finalidade de comparar os resultados obtidos nesta pesquisa. Mesmos os ensaios sendo em madeira, os resultados tiveram a ordem de grandeza similar ao do BLC, isto é explicado pelo fato de eles serem materiais celulósicos.

Como exemplo do US na Tab.(4.6), são apresentados os resultados de ensaio do CPs prismáticos e poliédricos nas 6 direções.

Tabela 4.5 – Valores das constantes elásticas do BLC em GPa, pelo ensaio de ultrassom com transdutor de 1 MHz.

Parâmetros elásticos	Gonçalves (2014)	Alves (2012)	Smits (2015)			Resultados experimentais
			Poliedro peq	Poliedro gde	Prisma	
E_L Gpa	15,705	15,404	15,181	15,631	14,523	14,313
E_R Gpa	2,483	2,438	1,451	1,527	1,435	1,386
E_T Gpa	1,626	1,619	1,303	1,351	11,213	1,209
G_{TR} Gpa	0,568	0,552	0,818	0,838	0,782	0,785
G_{TL} Gpa	1,425	1,117	1,474	1,519	1,410	1,390
G_{LR} Gpa	1,897	1,429	1,419	1,453	1,251	1,340
ν_{RL}	0,046	0,130	0,042	0,043	0,041	0,040
ν_{TL}	0,046	0,080	0,042	0,043	0,038	0,038
ν_{LR}	0,295	0,840	0,430	0,437	0,415	0,410
ν_{TR}	0,351	0,420	0,483	0,474	0,450	0,440
ν_{LT}	0,438	0,750	0,478	0,491	0,455	0,450
ν_R	0,537	0,280	0,540	0,536	0,532	0,510

Pode-se afirmar que a ordem de grandeza dos valores obtidos com os ensaios de ultrasson foram muito próximos aos obtidos por Gonçalves (2014) e Alves (2017), encontrados para madeira; a principal diferença está no coeficiente de Poisson.

O tamanho e a geometria dos CPs como poliedro (pequeno e grande) ou prisma influenciaram muito pouco nos resultados, visto que o tamanho menor se apresentou mais próximo, provavelmente, porque o percurso da onda é menor e, assim, capturará menos defeitos. Na confecção do CP, se houver alguma variação mínima da direção, isso poderá acarretar em uma variação no percurso da onda.

4.3.2.3 - Excitação de ondas em temperatura ambiente e em alta temperatura pelo END

Para o ensaio não destrutivo de excitação de ondas, foram feitos 3 procedimentos: os dois primeiros, em temperatura ambiente e o terceiro, em alta temperatura. O primeiro foi para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do bambu, em função da espessura da parede e o segundo, para determinar as propriedades elásticas do BLC.

Na Fig. (4.30) é mostrado um gráfico boxplot dos E_d, em função da espessura da parede do bambu (primeiro ensaio). Foi realizada uma regressão, e o gráfico da curva de tendência é mostrado na figura. A equação (55) representa a variação do módulo de elasticidade em função da espessura da parede do bambu. No gráfico são mostrados os valores médios do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_d), em função da posição da parede e o bambu. O método mostrou ser eficiente para estimar E_d. Observa-se uma variação de 279 % do E_d da parte interna em relação à casca do bambu. Este valor considerável é um alerta, para os calculistas, já que, para o cálculo estrutural, é utilizado o valor médio do módulo de elasticidade.

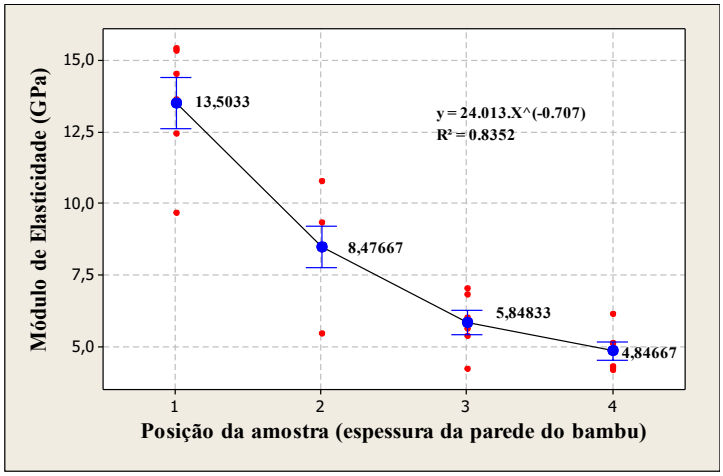


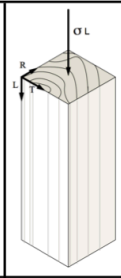
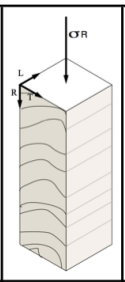
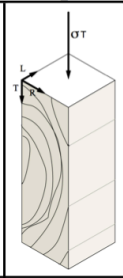
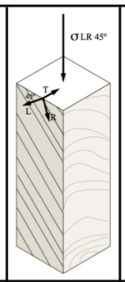
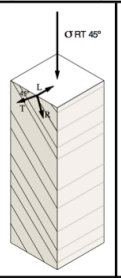
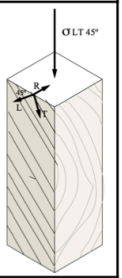
Figura 4.30 - (E_d) de acordo com a posição da amostra em relação à parede do bambu.

$$Y = 24{,}013 \cdot x^{(-0.707)}$$

$$(R^2 = 0{,}84) \qquad (55)$$

Na Tab. (4.6) são apresentados o E_d, para o ensaio de excitação de ondas e os G determinados pela equação (33), (segundo ensaio), por aparelho sonelastic em CPs com a forma de prismática.

Tabela 4.6 – Valores das Constantes Elásticas do BLC em (GPa), pelo ensaio de excitação de ondas.

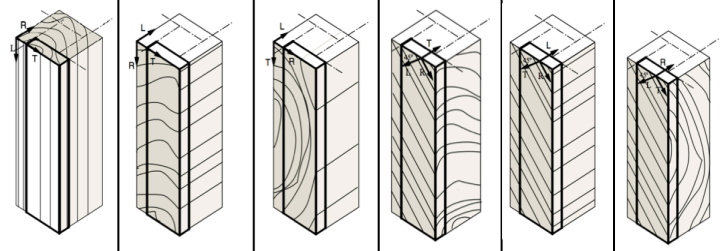
Excitação de ondas TemperatuAmbiente (28,4 ºC)						
CPs						
Direções	**L**	**R**	**T**	**LR**	**RT**	**LT**
E	18,321	1,954	1,846	9,323	5,312	9,412
G				2,005	0,983	2,015

Comparando com os valores experimentais destrutivos, nota-se que estas constantes são maiores. Vários autores indicam que as constantes elásticas dinâmicas nas madeiras são maiores que as constantes estáticas, o que também se aplica para o BLC.

Os valores das constantes elásticas dinâmicos de E_L, E_R e E_T foram de 18,321, 1,954 e 1,846 (GPa), para a o BLC, enquanto, a partir de ondas ultrassônicas, os valores foram em média 15,111 (GPa), 1,471 (GPa) e 1,289 (GPa), para E_L, E_R e E_T. Esta diferença é justificada, porque, nos resultados das ondas ultrassônicas, os valores das constantes elásticas não são mais dinâmicos, já que foram considerados, na sua determinação, os efeitos nas outras direções. É possível observar que as maiores variações de E_d ocorreram na direção longitudinal.

O ensaio não destrutivo de excitação de ondas, em alta temperatura (terceiro ensaio), foi feito em um aparelho SONELASTIC, submetido à temperatura de 235º C, possibilitando estimar os valores para o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_d) e o módulo de deformação transversal (G_d) do BLC para diversas temperaturas. Na Tabela (4.7) é mostrado o esquema de corte para os CPs prismas desdobrados para serem submetidos à alta temperatura.

Tabela 4.7 – Prismas desdobrados nas 6 direções.

Excitação de ondas	Alta Temperatura (235ºC)					
CPs						
Direções	L	R	T	LR	RT	LT

Nas Figuras 4.31 a 4.37, são apresentados os módulos elásticos, em função da temperatura. Desde o início do aquecimento ao fim, a cada da minuto foi capturado um resultado do (E_d). O experimento começa com a temperatura ambiente, por volta de 30 ºC até atingir a temperatura de 235 ºC e depois é resfriado naturalmente de volta para temperatura ambiente.

Pouco foi encontrado na literatura a respeito do comportamento do bambu e do BLC, submetido a alta temperatura. Assim, serão apresentados os resultados do BLC e comparados com alguns resultados encontrados para madeira, por ser um material mais próximo. Na norma para madeira é dito que as propriedades elásticas e mecânicas podem ser consideradas constantes até uma temperature de 60º C. Neste experimento, é mostrado que acima de 50º C o BLC apresentou variação. Nas figuras a seguir estão apresentados os valores para redução dos módulos de elasticidade, para todos os eixos, em função do aumento da temperatura. Nota-se que a variação é dada até 235°C. Os gráficos apresentados nas Figura 4.31 a 4.37 mostram a queda brusca do módulo de elasticidade na temperatura citada. Tal fato está relacionado com a degradação térmica do adesivo que, de acordo com analise termogravimétrica, inicia-se em temperaturas superiores a 150°C, (PIZZOL, 2018).

Para a madeira eucalipto, submetida até 120 ºC, existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8 %, afirmam Carrasco *et al.* (2016). Já de 120 ºC até 200 ºC, a diminuição também é linear, porém mais acentuada, chegando a 38 %, fato que não se verifica para o BLC.

A velocidade de propagação da onda é reduzida com o aumento da temperatura e, por consequência, há uma diminuição do seu módulo de elástico. Essa afirmativa encontra-se no livro Wood Handbook (2010) e foi verificada, em todas as figuras apresentadas, em todas as direções, para todas as constantes elásticas do BLC. O bambu é composto de celulose, hemicelulose e lignina, eles têm uma certa estabilidade térmica. A hemicelulose e a lignina,

começam a se decompor a partir de 100 ºC enquanto a celulose tem uma estabilidade térmica maior, aos 300 ºC ela começa a se degradar.

Paula *et al.* (2014) afirmam que, para as hemiceluloses, a transição vítrea é observada na faixa de 150 ºC a 220 ºC. Isso pode justificar os aumentos dos valores de (E_d) sob as temperaturas de 150 ºC para 235 ºC, nesta experiência. A partir de 150 ºC até 235 ºC, ocorreu um aumento da constante elástica, também, não linear.

A madeira como o bambu apresentam uma boa estabilidade térmica até 150 ºC aproximadamente, continuam com boas propriedades. A temperatura pode também mudar a estabilidade da cola e fazer que a adesão mude um pouco. O efeito da umidade na amostra será também muito significativo.

Quando o forno foi desligado aos 235 ºC, o resfriamento foi muito lento e, em consequência, as constantes elásticas diminuíram bruscamente e, logo que resfriaram, aumentaram, não linearmente até que a temperature fosse próxima da ambiente. Neste momento, o Valor E_L, E_{LT} aumentou em torno de 20 % do E_T e E_{TR} 30 %, do E_{RL} 40 % e do E_R 50 %. Sugere-se uma possível temperatura em que os CPs ficarão com maior rigidez e, consequentemente, mais resistentes.

Para o BLC, foi possível observar, que inicialmente sob temperatura ambiente, o módulo elástico começou com valor inferior ao módulo elástico apresentado no final do experimento. Em todos os ensaios ocorreu um ganho mínimo de 20 % a 50 %.

É mostrado nas Figuras (4.31 a 4.37), que houve uma diminuição não linear das constantes elásticas até a temperatura de 150 °C, provavelmente, a transição vítrea (TG) do BLC.

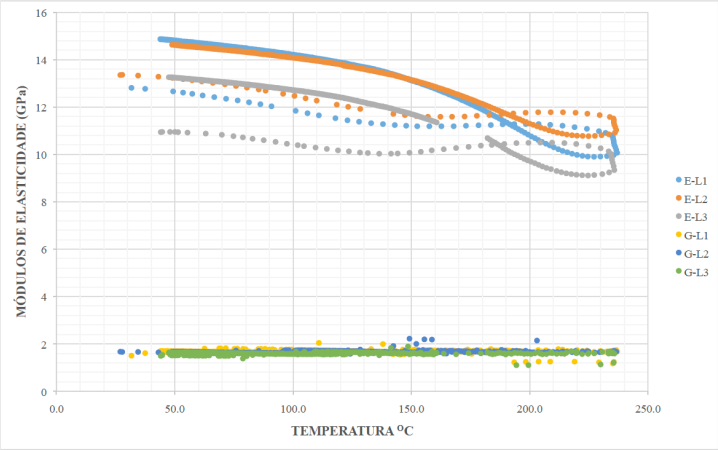


Figura 4.31 - Relação do módulo de elasticidade L com a temperatura.

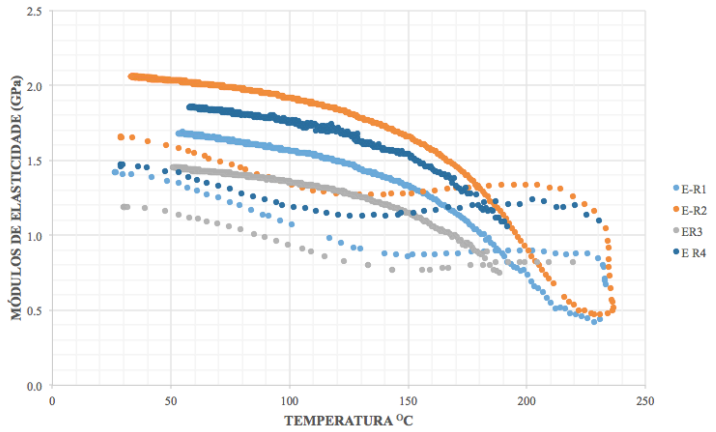


Figura 4.32 - Relação do módulo de elasticidade R com a temperatura.

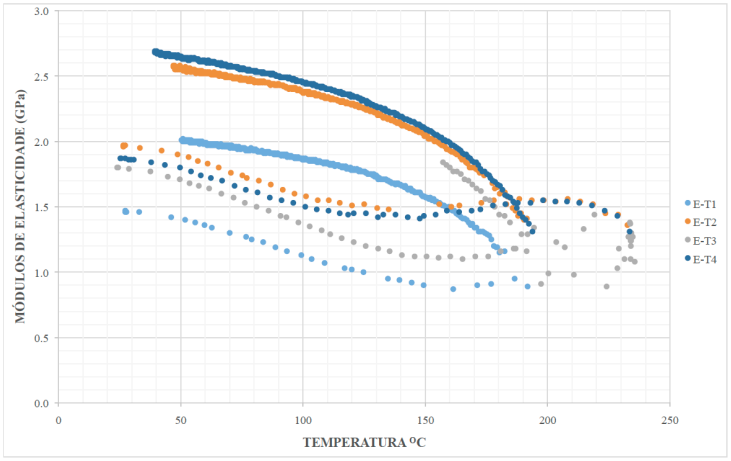


Figura 4.33 - Relação do módulo de elasticidade T com a temperatura.

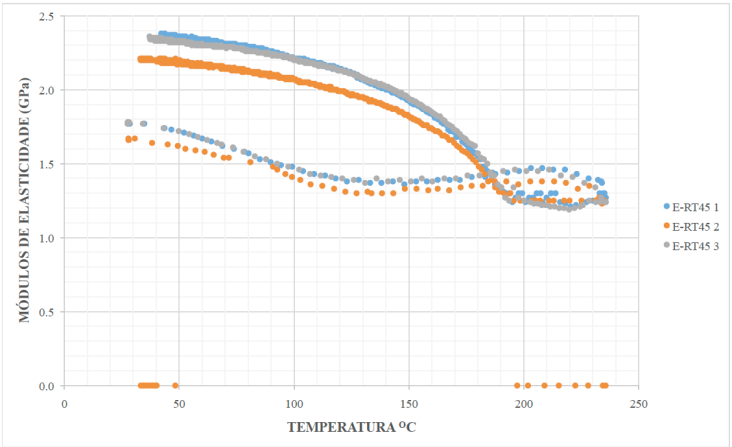


Figura 4.34 - Relação do módulo de elasticidade RL com a temperatura.

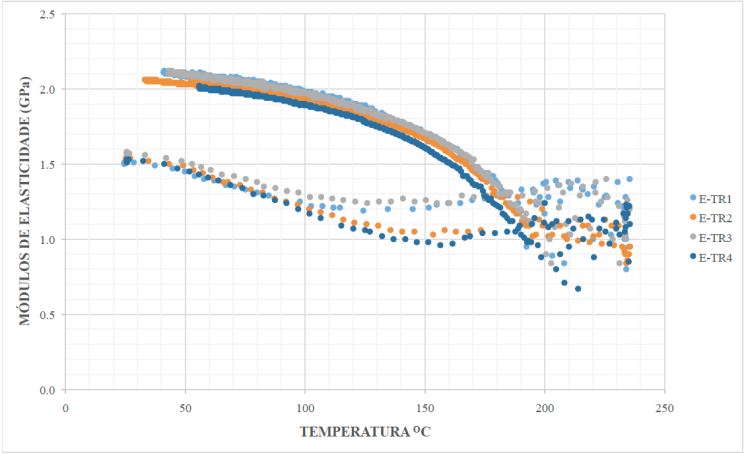


Figura 4.35 - Relação do módulo de elasticidade TR com a temperatura.

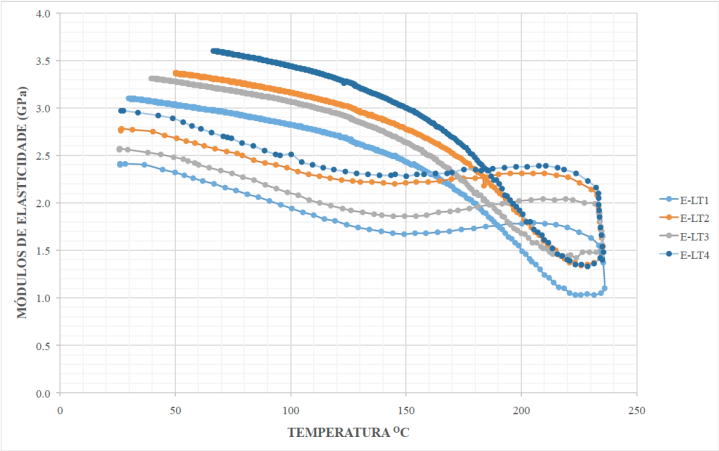


Figura 4.36 - Relação do módulo de elasticidade LT com a temperatura.

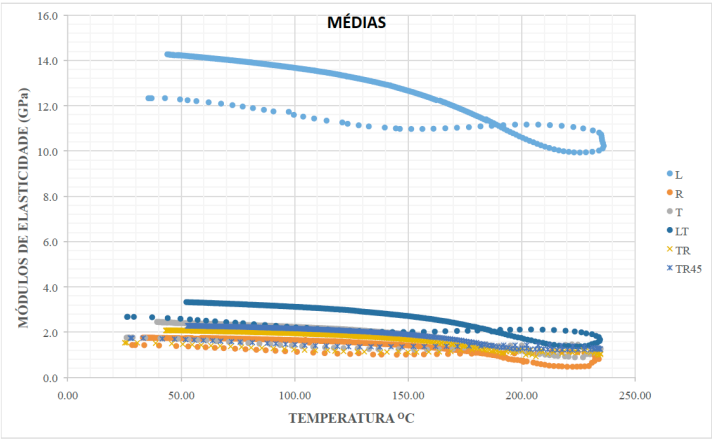


Figura 4.37 - Relação das médias dos módulos elásticos com a temperatura

O aspecto visual dos CPs mudou, tornando-os mais escuros, sugerindo uma possível temperature. Os CPs ficaram mais rígidos, consequentemente, mais resistentes. A resposta para a excitação está diretamente relacionada com a quantidade de umidade do material.

Os CPs, no sentido longitudinal (L), não apresentaram sinais de deformações e distorções, entretanto os CPs (R), (T), (LR), (RT) e (TL) curvaram, torceram e empenaram, mostrando um considerável fator anisotrópico.

O ensaio de excitação de ondas não deu tanto trabalho e trouxe informações realmente úteis. Os ensáios não destrutivos END se mostram muito mais simples e mais baratos que os ensáios destrutivos, torna o processo menos trabalhoso e isso foi comprovado através do ensaio de ultrassom e excitação de ondas, por terem atingido valores similares aos valores do ensáio de compressão.

5

CONCLUSÕES

Quanto à influência de pressão de colagem na resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu, foi provado que ela adquire maior resistência, quando a pressão é de 2,5 MPa. Acima deste valor, o ganho na ligação é muito pequeno, até 5 MPa; a pressão acima de 5 MPa reduz a resistência ao cisalhamento do bambu-bambu. A combinação de superfícies casca-casca, casca-miolo e miolo-miolo não influenciam na resistência. Assim, na confecção do BLC, pode ser utilizada qualquer superfície.

A rugosidade da superfície da lâmina de bambu após a usinagem é estatisticamente igual à rugosidade quando aplicada a lixa 80. A rugosidade, na superfície externa, mais perto da casca é menor que na interna, isto se repete para todas os tratamentos da superfície. O tratamento da superfície com a lixa 220 e 320 resulta numa rugosidade estatisticamente igual, assim o tratamento da superfície com lixa acima 220 não modifica o índice de rugosidade. Para todos os tratamentos da superfície quando feito paralelo e normal às fibras se apresentou estatisticamente igual.

Se na fabricação do BLC o objetivo for ganhar altíssima resistência e baixa deformação, o tratamento superficial das lâminas através de lixamento deverá ser utilizado criteriosamente levando em consideração o custo/benefício e necessidades de adaptação das industrias para aprimorar este processo. O maior desempenho do BLC foi obtido com tratamento superficial das lâminas utilizando lixa 220 ou índice de rugosidade em torno de 1,85.

As tensões de cisalhamento e o módulo de deslizamento, quando utilizados tratamentos superficiais nas laminas com lixa 80 ou apenas usinado durante a confecção das lâminas, são adequadas para se obter vigas de BLC de bom desempenho. Assim o BLC poderá ser fabricado a partir do corte do bambu em lâminas e colado diretamente sem tratamento superficial, apenas deve-se tomar cuidado com a aplicação de pressão de 2,5 MPa.

A matriz de flexibilidade pode de ser determinada, por meio de ensaios utilizando ondas ultrassônicas. Estes valores foram comparados e se mostraram muito similares.

Os ensáios não destrutivos END se mostram muito mais simples e mais baratos que os ensáios destrutivos, torna o processo menos trabalhoso e foi comprovado através do ensaio de ultrassom e excitação de ondas, por terem atingido valores similares aos valores do ensáio de compressão.

O bambu apresenta muitas variáveis, sendo muito sensível em relação a umidade inicial, ao tratamento inicial, posicionamento da retirada das lâminas do colmo. As respostas dos ensáios são em função desse arranjo de fibras. Neste trabalho, a colocação das lâminas na confecção do BLC foi aliatória, pois todas apresentaram uma boa aderência e resistência no ponto de ligação.

Para o nível de carregamento aplicado neste estudo, não ocorreu delaminação, descolamento, então a cola não está fazendo nenhum efeito expressivo. A cola está funcionando bem transferindo tensões de uma lâmina para outra. A ordem de grandeza de 13 a 14 GPa como módulo elástico encontrado na literatura é uma informação qualitativa comprovando resultados razoáveis.

O CP poliédrico menor apresentou melhores resultados que o poliedro maior. Já o CP prismático apresentou resultados mais próximos dos experimentais estáticos.

Foi possível observar que houve uma diminuição não linear das constantes elásticas até a temperatura de 150 °C. A partir de 150 ºC até 235 ºC, ocorreu um aumento das constantes elásticas, também não linear. Quando o forno foi desligado aos 235 ºC, o resfriamento foi muito lento e, em consequência, as constantes elásticas diminuíram bruscamente e, logo que resfriaram, aumentaram, não linearmente até chegar à temperatura próxima da ambiente. O valor dos módulos elásticos, em todas as direções, aumentou em torno de 20 % para E_L, E_{LT}, de 30 % para E_T e E_{TR}, de 40 % para E_{RL} e de 50 % para E_R.

O BLC é o resultado da aplicação do bambu em um novo Sistema de construção. Devida a complexidade do bambu como variedade de espécie, idade, condições de plantio, processos na confecção do BLC, ainda se fazem necessários vários estudos, que abranjam cada vez mais o comportamento do material.

Frente o alerta mundial para os problemas ambientais atuais, o bambu tem recebido atenção favorável como uma boa alternativa para materiais convencionais existentes, compatível com a madeira, material orgânico e anisotrópico, podendo ser processado na confecção do BLC para uso estrutural. Há pesquisas avaliando o AVC em busca de projetos sustentáveis e o BLC apresenta uma boa viabilidade técnica. Sendo assim, o que se espera

desta pesquisa é que ela contribua com inovação, incentivo e base para próximos trabalhos que busquem caracterizar cada vez mais o BLC, bambu laminado colado, para uso estrutural, comprovando seu elevado desempenho mecânico, trazendo mais dados, para que ocorra uma futura normatização no Brasil e, desta forma, ele possa se estabelecer no mercado.

Para futuros trabalhos, propõe-se a elaboração de mais corpos de prova, mais experimentos, em altas temperaturas, realizando análises químicas para determinar o (TG) transição vítrea do BLC.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M.*Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials***.** 210 f. Dissertation (Wood Sci. and Forest Products),Universiti Teknologi MARA, 2000.

ALVES, R. *Determinação Das Constantes Elásticas Da Madeira Considerando A Sua Ortotropia.* Tese (Programa de Pós Graduação da Engenharia de Estrutura) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ANWAR,U.M.K. et al. Effect of outdoor exposure on some properties of resin-treated plybamboo .*Industrial Crops and Products*,Elsevier Journal ,v.33, n.1, p.140-145, 2011.

ANWAR, U.M.K. et. al. Effect of curing time on physical and mechanical properties of phenolic-treated bamboo strips.*Industrial Crops and Products*,Elsevier Journal v. 29, n.1, p. 214–219, 2009.

ANWAR,U.M.K. et al. Adhesion and bonding properties of plybamboo manufactured from Gigantochoa scortechini.*American Journal oh applied Sciences*, (Special Issue), p.53-58, 2005.

ARANCIBIA F.; El tablero de bambú prensado, una nueva propuestatecnológica,Materiales para la construccion Civil.*Polymer Engineering & Science*, v.49, n.7, p.1253-1272, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT – NBR 7190***:** projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT – NBR 15521*: ensáios não destrutivos – Ultrassom: Classificação mecânica da madeira serrada de dicotiledônias (Projeto NBR 58000 10001). Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8p.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E1876:*Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.West Conshohocken (USA),2007. 15 p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de Eucalyptus citriodora. CERNE (UFL), Lavras, v. 09, n.n.1, p. 69-83, 2003.

BARTHOLOMEU, André. *Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som.* 105p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Área de Concentração Construções Rurais. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas (SP), 2001.

BAXTER, M. *Projeto de Produto*: Inovação.São Paulo: Edgar Blücher, 1995.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhol, 1982.

BODIG, J.; GODMANN, J. R.Prediction of elastic parametres for wood. *Wood Sci*. v.5, n.4, p.249-264, 1972.

BONSIEPE, G. *Design, Cultura e Sociedade*: inovação. São Paulo: Edgar Blücher 2011.

BOUKEHLI, H.; NGUYEN-TRI, P.Helium gas barrier and water absorption behavior of bamboo fiber reinforced recycled polypropylene. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.31, n. 23, p.1638-1651, 2012.

BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. 2. ed. Germany: Springer, 2006.

BUCUR, Voichita. *Ondes ultrasonores dans le bois. Carcterization mécanique et qualitéde certains essences de bois***.** 188p. Thèse (Doctorat em Génie Mécanique) – InstitutSupérieur des Materiaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France, 1984.

BUCUR, Voichita. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees**.** *Ultrasonics*, v.21, p. 116-126, 1983.

CARRASCO, E. V. M. Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada. 1989. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1989.

CARRASCO, E.V.M.; MOREIRA,L.E.; XAVIER, P. V. Bambu laminado e colado.XV Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. – EBRAMEM BeloHorizonte, MG. *Anais*, v. II,

CARRASCO, E.V.M..*Ligações Estruturais de Madeiras por Adesivos*. 448f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

CARVALHO M. S. *Caracterização Mecânica e Química do Bambu e sua Aplicação como Reforço em Compósito de Poliestireno, REDEMAT (UFOP, CETEC e UEMG)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CHRISTOPHER, F. Social science entrepreneur. *Research policy*. Fagerberg, jan. 2011. [0048-7333]

CHUNG, M. J.; LEE, C.H.; LIN, C.H.;YANG, T.H. Effects of layered structure on the physical and mechanical of laminated moso bamboo (Phyllosachys edulis) flooring**.***Construction and Building Materials,*Elsevier Journal , n.28, p.31-35, 2012.

COSSOLINO, L.C., PEREIRA, A.H.A. Módulos elásticos:visão geral e métodos de caracterização.*Informativo Técnico – ATCP Engenharia Física*, Ribeirão Preto, out. 2010. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/RT03-

ATCP.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2013.

COSSOLINO, L.C., PEREIRA, A.H.A, SEGUNDINHO, P.G.A., JUNIOR, C.C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1155-1161, 2012.

CULZONI, R. A. M. *Características dos bambus e sua utilização como material alternativo ao concreto.* 134p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

CRUZ, M.L.S.*Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie Phyllostachysaurea*: Comportamento à flambagem. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DE FLANDER, K; ROVERS, R. One laminated bamboo: frame house per hectare per year. *Construct Build Mater*, v.23, n.1, p. 210–8, 2009.

ENGLERTH, G.H. *Framework of qua1itative relationships in wood utilization*. Madison. U.S., Forest Service, Research Paper FPL 45, 1966. 17p.

ENV 843-2: Advanced technical ceramics. Monolithic ceramics. Mechanical properties at room temperature. Determination of elastic moduli, 15 maio 1996. 32p.

EUROCODE 5. CEN. *EN 1995-1-2: 2004*. Design of timber structures: part 1–2: structural fire design. Belgium:European committee for standarization,2004.

FRANÇOIS, M. *Identification des symetries materialles des materiaux anisotropes*. (Identification of materials symetries of anisotropic materials).PhD Thesis (Doctorat en génie) Université du Paris 6, LMT, Chan, 1995.

FURLANI, J.E.; *Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material*. 144f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Construção Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

FURUNO, T.; IMAMURA, Y.; KAJITA, H., The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Sci. Technol*, v. 37, p.349-361, 2004.

GARCIA, J.J.; RANGEL, C.; GHAVAMI, K.; Experiments with Rings to Determine the Anisotropic elastic constants of Bamboo. *Construction and Building Materiails,* v. 31, p. 52-57, 2012.

GIBSON, R. F. *Principles of composite material mechanics*. Ohio (USA): CRC Press, 1994. 425 p.

GHAVAMI, K.; SOLORZANO, I.G.; Comparison between microstructure of Bamboo Culm and Wood. In: Interamerican Conference On Electron Microscopy, 3;Meeting Of The Brasilian Society For Electron Microscopy, 5, 1995, Caxambu. *Anais...,* v.2, n.3, p.14, 1995.

GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C.S.; PACIORNIK, S. Bamboo: functionally graded composite material.*Asian Journal of Civil Engineering*,v.4,n.1,p.1-10, 2003.

GHAVAMI K. Bambu: um material alternativo na Engenharia. *Revista Engenharia,* São Paulo,n. 492, p. 23-27, 1992.

GINDL W.; ZARGAR-YAGHUBI, F.; WIMMER, R., Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. Bioresour. *Technol,* v. 87, p. 325–330, 2003.

GONÇALEZ, J.L.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativa das constantes Elásticas da madeira por meio de ondas sonaras (ultrassom). *Cerne,* Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Processamento de imagens digitais. 2000. GONZA´LEZ, R. V. B. *Rugosidade superficial*. Joinville. 1987.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A.T.; Elastic constantsof wooddetermined by ultrasound using tree geometries of specimens. *Wood Sci Thchnol*, v. 48, p.269-287. 2014, DOI 10.1007/s00226-013-0598-8.

GONÇALVES, Raquel; BARTHOLOMEU, André. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de Eucalyptus citriodora e Pinus elliottii.*Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* Campina Grande (PB), v.4, n.2, p.269-274, 2000.

HEARN, E.J. *Mechanics of Materials*.Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.450 p.v. 1: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials

HIBBELER, R. C., *Mechanics of matherials* - *Resistência dos materiais;* 7ª edição – São Paulo: Pearson Prentice Hall, pags 1-14, 2010.

HIZIROGLU, S. et al.Overlaying properties of fiberboard manufactured from bamboo and rice straw. *Industrial Crops & Products*, v.28, n.1, p.107-111, 2008.

IMAMURA, Y. et al. Properties enhancement of wood by treatment with neutralized phenolic-resin. In: *Proceedings of the Fourth Pacific Rim Bio-based Composites Symposium*, November 2–5, Indonesia: Bogor, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO).Brasília, 2016. Disponível em:<http://www.inmetro.gov.br/>. Acesso em: 06 jun. 2017.

LIESE, Walter. *The anatomy of the bamboo culms*. Beijing: International network for bamboo and rattan (INBAR), 1998.v.18: technical report.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO-14000* - Sistema de Gestão Ambiental (SGA). Genebra: ISO, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).*ISO 22157*-2004.: International Organization for Standardization, specifies test methods for evaluating the following characteristic physical and strength properties for bamboo: moisture content, mass per volume, shrinkage, compression, bending, shear and tension. Genebra: ISO, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).ISO-14020 - 2000. International Organization for Standardization, G, Subcomitê SC 3, Rotulagem Ambiental.boo: moisture content, mass per volume, shrinkage, compression, bending, shear and tension. Genebra: ISO, 2000.

JANSSEN, J.J.A., The relationship between mechanical properties and the biological and chemical composition of bamboo. Bamboo production and utilization. In: Higuchi, T.(Ed.), Proceedings of *XVIII IUFRO World Congress*, Kyoto, 1981. Kyoto University, Kyoto, Japan, pp. 27–32, 1981.

JANSSEN, J. J.A., *Bamboo in Building Structure*. Dissertation (Master in Technology) - Technical University of Eindhoven, Eindhoven, 1981.

JIN, CHUNDE et al. A durable, superhydrophobic, superoleophobic and corrosion-resistant coating with rose-like ZnO nanoflowers on a bamboo surface. *Applied Surface Science*, v. 320, p.322-327, 2014.

KALIA, SUSHEEL ; KAITH, B. S. ; KAUR, INDERJEET. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review. *PolymerEngineering & Science*, v.49, n. 7, p.1253-1272, 2009.

KANEKO, T. Relation Between Flexional Ressonant Frequency Equations for the For the Flexional Vibration of Cilindrical Rods. *J. Res. Natl. Bur. Stand*., v. 64b, 237p., 1960.

KOGA, R.C.; BITTENCOURT, R.M.; GONÇALVES, M.T.T. Resistência à abrasãodo bambu gigante e espécies de madeiras para utilização como elemento de piso.*Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeir*a,7. 2002. Uberlândia, 2002.

LATIF, M.A.Effects of age and height of three bamboo species on theirmachining properties. *Journal Tropical Forest Science*,v.5, n.4, p. 528-535, 1993.

LAPO, L.E.R.; BERALDO, A.L., Bambu Laminado Colado (BLC). *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, Maringá, v. 1, n. 2, p. 165-177, maio/ago, 2008.

LATIF, M. A. et al. Wear resistance of Two Commercial Bamboo Species in Peninsular Malaysia and their Suitability as a Flooring Material. *Proceedings of the Int`l Bamboo Workshop*, nov. 14-18,1988.

LAUNAY, J. et al. Rapid mensurement of trunk MOE on standing trees using Rigidimeter. *Forest Science*, v.59, n.5, p. 465-469, jul. 2002.

LEE, C.H. et al. Effects of layered structure on the physical and mechanical of laminated moso bamboo (*Phyllosachys edulis*) flooring. *Construction and Building Materials.* Elsevier Journal , v.28, p.31-35, 2012.

LEE, A.W.C.; XUESONG, B; PERRY, N.P.; Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grown in South Carolina. *Forest Prod.Journal*, v.44, n.9,p.40-46, 1994.

LEMASTER, R.; BEALL. 1996 usinagemBlasting and erosion wear of wood using sodium bicarbonate and plastic media. *Forest Products Journal*, v.55,n.5, p.59 -64, 2005.

LEKHNITSKII, S. G. *Teory of elasticity of an Anisotropic Body*. Moscow: Mairpleblishers, 1981.73p.

LIESE, W. Structures of a Bamboo Culm Affecting its Utilization. In *Proceedings of International Workshop on Bamboo Industrial Utilization (INBAR)*. Beijing, China: INBAR, 2003.p. 1-8.

LIESE, W. *The Anatomy of bamboo culms.*Beijing, China: INBAR, 2003.p. 1-8.

LIESE, W. The Anatomy of bamboo culms. Beijing, China:INBAR,1998. p. 204. Technical Report.

LIESE, W. DING,Y. Structure and functions of the Nodes in bamboo. *FORSPA*, Bangkok, n.6 , IDRC/FAO/UNDP, p. 213-217, 1994.

LIESE, W. *Bamboos:* Biology, silvics, properties, utilization (eng. text by B.Jackson). Deustche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (DTZ) GmbH, Eschborn,1985.

LIESE, W;GROVER, P.N. Untersuchung über den Wassergehalt von indischen Bambushalmen, Sonderdruck aus den Berichten der Deutschen Botanischen Gesellschaft, 1961.

LIMA JUNIOR, H.; DIAS, A.A.Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado e colado: análise teórica e experimental. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,v.5,n.3,p.519-524, 2001.

LI, X.Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and itsutilization potential for fiberboard manufacturing. DissertationThe School ofRenewable Natural Resources, Louisiana, 2004. 76p.Cap. 6.

MARINHO, A.B.; GHAVAMI, K. *Propriedades fisicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie guadua angustifolia*. Publicação – RMNC Bambu 01/2001 do Departamento de engenharia civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2001. 53 p.

MARTINS, L. M. F. P. *Instalação, condução e cirurgia de Árvores ornamentais*. Via Real: Universidade de Tras-os Montes e Alto Douro (UTAD), 2007.

MARTINS, L. M. F. P. *Wokshop Gestão e Cirurgia de Árvores*. Departamento de Ciências Florestais e Arquitetura Paisagísta.Vila Real Portugal, 2010. p. 20-22.

MASCIA, N. T., SORIANO J. Benefits of timber-concrete composite action in rural bridges.*Materials and Structures*, v. 37, n. 2, p. 122-128, mar. 2004.

MASCIA, N.T.; *Concerning wood anisotropy* (Anisotropia da madeira). Tese (Doutorado em Engenharia), São Carlos, 1991.

MATOS, J. L. M. *Estudos sobre a* produção *de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L.* Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 1997, 117 p.

MC CLURE, F.A. *The Bamboos, a fresh Perspective*. Cambridge: Harvard University Press, Massachusetts, 1966.

MENA, Josué et al.Assessment of fire reaction and fire resistance of Guadua angustifolia kunth bamboo; *Construction and Building Materials,* v. 27 , p. 60–65, 2012.

MENTA, A. C.; BERALDO, A. L. Potencialidades do Bambu para a Fabricação de Laminado Colado. *XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola* – CONBEA 2004, São Pedro – SP, 2004.

NETTO, L. G.; GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V.; BONILLA, S. H.. *Determinação dos fluxos de CO2 de uma plantação comercial de bambu no Brasil: Oportunidades para a diminuição da emissão de CO2* – Sinpósio da Engenharia da Produção, **XV** SIMPEP 2008.

OSTAPIV, F.Análise e melhoria do processo produtivo de tábuas de bambu (*Phyllostachys pubescens) com foco em pisos.* Dissertação (Mestrado emEngenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais,Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da Madeira de Eucalyptus saligna Sm. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Propagação de ondas acústicas na madeira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 6. São Carlos. *Anais*.... São Carlos, 2000.Cd rom, arquivo digital.

OLIVEIRA, A.L.C., CARRASCO,E.V.M. Comportamento de madeira estrutural de alta densidade em situação de incêndio.*Mostra PROPEEs UFMG*, Belo Horizonte, v.2,n.2.abr. 2014.

OLIVEIRA, F.G.R. et al. Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 30, p. 141-145, 2006.

OTANI, L.B.; PEREIRA, A.H.A.*Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilisando as soluções SONELASTIC*. GC 02-ATCP, Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, 2013.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. R. A. Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. *Informativo técnico-científico ITC-06 /ATCP, ATCP-Engenharia Física*, Ribeirão Preto, SP, dez. 2014. 38p.

PAES, J.B.; OLIVEIRA, A.K.F.; Oliveira, E.; LIMA, C.R., Caracterização físico-mecânica de laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*).*Ciência Florestal,* Santa Maria, v.19, n.1, p.41-51, jan-mar., 2009.

PEREIRA, A. F.; "Ecovisões sobre Ecodesign e Análise do Ciclo de Vida", p. 157 -162. In: OLIVEIRA, A. J. de; FRANZATO, C.; GAUDIO, C. D.. **Ecovisões projetuais: pesquisas em design e sustentabilidade no Brasil**. São Paulo: Blucher, 2017.

PEREIRA, M. A. R.; GONÇALVES, M. T. T.; GARBINO, L. V. Métodos de ensaio de bambu laminado. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURA DE MADEIRA, EBRAMEM. Uberlândia – MG, 2002, *Anais...* CDROM.

PEREIRA, Paulo. *Influência da anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio7050*. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2011.

PIZZOL, V. D.: *Comportamento Elástico Da Madeira Laminada Colada Cruzada De Dormentes Reaproveitados*, Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

RIVERO, L.A.; BERALDO, A.L.BambuLaminado Colado(BLC). *Floresta e Ambiente*, Campinas, v.10,p.36-46, 2003.

RODRÍGUEZ L.M. et al. El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica.*Revista Ingeniería de Construcción,*v. 23,n.3, dez. 2008.

RODRIGUEZ N.; TAKEUCHI, C. Evaluation of the influence of the slats placing of different density in the flexion behavior of glued laminated gradua . *Ecological Materials and Technologies for Sustainable Building*, Cairo, Egypt, p.21-23,sep.2010.

SALES, A. T. C.; GHAVAMI, K. *Shrinkage, Creep And Fracture Of Cementitious Composites Reinforced With Bamboo Pulp*.Tese (Doutorado) - Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, F. D; BITTENCOURT, R. M. Estudo do desgaste à abrasão do eucalipto, madeira lâminada e bambu gigante laminado utilizados como elemento de piso. *VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*. Uberlândia, jul. 2002.

SIQUEIRA K.P. et al. Produção De Chapas De Partículas “Strand” Com Inclusão Laminar – “Com-Ply”. *Floresta e Ambiente*, v. 10, n.2, p.30 – 35, ago./dez. 2003.

SMITH, R. E.Ultrasonic elastic constant of carbon fibers and their composites. *Journal of Applied Physics*, v. 43, n. 6, p. 2555-2561, 1972.

STANGERLIN, D. M. et al. Avaliação de tipos de Ondas Geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. *Floresta*, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 691-700, out.-dez, 2010.

STANGERLIN, D. M. et al. Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 53, p. 17-22, 2010.

STANGERLIN, D. M. et al.; Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por métodos destrutivo e não destrutivo. *Revista Brasileira de Ciência Agrárias*, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

TOMAK, Eylem et al. Effect of accelerated aging on some physical and mechanical properties of bamboo.*Wood Science and Technology*, v.46, n.5, p.905-918, 2012.

TRINCA, A. J. *Metodologia para Determinação das Constantes Elásticas da Madeira por Ultrassom*.Tese (Doutorado), Universidade de Campinas, Campinas, 2011.

VELEZ, S. Grow Your Own House: *Simon Velez and Bamboo Architecture*.Germany:Ed. Alexander von Vegesack;Mateo Kries, 2002.

VIDAURRE, G. et al. Propriedades da madeira de reação. *Revista Floresat e Ambiente*, p. 385-396, 2012.
VILLEGAS M. *Guadua Arquitectura e Diseño, Corporacion Autonoma Rgional Del Valle Del Cauca.*Bogotá: Villegas editors, jul 2003.

WAKCHAURE, M.R.; KUTE, S.Y. Effect of moisture content on phisicaland mechanical properties of bamboo.*Asian Journal of Civil Engineering*,v.13,n.6,p.753-763, 2012.

WANG , Y-Y.et al.Preparation of adhesive for bamboo plywood using concentrated papermaking black liquor directly.*J. Cent. South Univ.Technol.*,v.13,n.1, 2006.

WANG, Z.; REN, Y. A study on the physical properties of a bamboo moulding compared with wood and MDF mouldings.Beijing, China:INBAR Publications, 2003. Beijing Wang, Bamboo Culture.

WHITE, R., Dietenberg M. *Wood handbook*: wood as an engineering material -general technical report. FPL-GRT-113. Madison: United States department of agriculture. Forest service. Forest products laboratory, 1999.[chapter 17],

WU, T.J. et al. Influence of hot-press temperature and cooling rate on thermal and phisicomechanical properties of bamboo particle-polylactic acid composits.*Holzforschung*, v. 67, n. 3, p.325-327, apr. 2013.

XIAO, Yan;MAC, Jian. Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building.*Construction and Building Materials,* v.34, p.257–266, 2012.

XIAO, Y. et al. Two-by-four house construction using laminated bamboos. *Proceedings of world conference on timber engineering (*WCTE), 11.,2010. Riva del Garda, Italy, 20jun.2010.

XIAO, Y;ZHOU, Q., SHAN, B. Design and construction of modern bamboo bridges. ASCE *J Bridge Eng*, v.15, n.5, p.533–41, 2010.

XIAO, Y. et al. Development of a new type of glulam. *Mod Bamboo Struct*, p.41– 47, 2008.

XIAOBING, Yu.*Bamboo*: Structure and Culture, Utilizing bamboo in the industrial context with reference to its structural and cultural dimensions. Dissertation (Doktors der

Philosophie)DErlangung des Grades eines Doktors der Philosophie (Dr. Phil.) im Fachbereich Kunst und Design der Universitaant Duisburg-Essen, 2007.

XUHE, Chen et al.*Preliminary study on the manufacture of bamboo panel components for prefabricated house.* Beijing, China: Research Institute of Wood Industry, INBAR y Chinese Academy of Forestry,2005.

ZHANG, L. Y. *Mineral heat insulation materials and application (in Chinese).* Beijing, China: Chemistry Industry Press; 2007.392p.

ZHANG, Q.S. *Development and application of bamboo plywood in China*. Beijing, China: Nanjing Forest University, 2001.