UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

Bambu laminado colado (*Dendrocalamus giganteus*) aplicado à treliça plana tipo *Howe* e à viga retangular

Caruaru
2013

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

Bambu laminado colado (*Dendrocalamus giganteus*) aplicado à treliça plana tipo *Howe* e à viga retangular

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e materiais.

Linha de pesquisa: Análise estrutural.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior.

Caruaru
2013

.

Catalogação na fonte
Bibliotecária Simone Xavier CRB4 – 1242

L732b Lima, Douglas Mateus de.
Bambu laminado colado (Dendrocalamus giganteus) aplicado à treliça plana tipo Howe e à viga retangular. / Douglas Mateus de Lima. - Caruaru: O autor, 2013.
234f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Humberto Correia Lima Júnior
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2013.
Inclui bibliografia.

1. Bambu. 2. Adesivo. 3. Treliça Howe. 4. Vigas de Bambu laminado colado (BLC). I. Lima Júnior, Humberto Correia (orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2013-107)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

BAMBU LAMINADO COLADO (*DENDROCALAMUS GIGANTEUS*) APLICADO À TRELIÇA PLANA TIPO HOWE E À VIGA RETANGULAR

defendida por

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 17 de janeiro de 2013

_____

Humberto Correia Lima Júnior – PPGECAM/UFPE
(orientador)

_____

Normando Perazzo Barbosa – PPGECAM/UFPB
(examinador externo)

_____

Giuliana Furtado Franca Bono – PPGECAM/UFPE
(examinadora interna)

Dedico e agradeço o presente trabalho aos meus pais, a minha noiva Marianny e a DEUS, o nosso salvador.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser a razão de nossa existência, pois sem Ele coisa alguma faria sentido.

Aos meus familiares por constituírem a minha base, pois sem eles nada poderia realizar.

À minha noiva Marianny por sua ternura e amor, além de suas contribuições inestimáveis para realização deste trabalho.

Ao Professor orientador Humberto Correia Lima Júnior pela confiança depositada, pela amizade e por não medir esforços para a execução deste trabalho.

Ao Laboratório de Modelos Reduzidos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) pela doação do bambu utilizado neste trabalho, em especial ao professor Fábio Luiz Willrich.

A todos os brasileiros que através da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) trabalharam arduamente para financiar este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM).

Ao Administrador Samuel Kissemberg da Macena Ribeiro trabalhando como secretário do PPGECAM, por sua disponibilidade e empenho.

Vós sois o sal da terra, vós sois a luz do mundo.

RESUMO

O bambu constitui um material que tem atraído a atenção do meio científico há décadas e muitas aplicações do uso desta gramínea ao longo dos últimos séculos têm sido relatadas na literatura. Entre tais aplicações, destacam-se a fabricação de laminados colados de bambu que, dentro do contexto deste estudo, podem ser aplicados na construção civil. Deste modo, esse trabalho teve como objetivo o estudo de laminados colados de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* aplicados na fabricação de treliças planas tipo *Howe* e de vigas de seção transversal retangular. Realizou-se inicialmente uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema e foram avaliados dois tipos de adesivos: um à base de resorcinol-formaldeído (CASCOPHEN) e outro à base de poliacetato de vinila (CASCOREZ). Foram realizados ensaios de caracterização físico-mecânica do BLC (bambu laminado colado). Posteriormente, foram ensaiadas 4 (quatro) treliças de BLC com vão livre de 2,5 m e altura de 0,4 m. Para o projeto destas, fez-se a análise prévia de suas ligações utilizando-se três variáveis de estudo: o ângulo de montagem das ligações; o tipo de adesivo e o número de ripas de bambu utilizadas. As treliças foram ensaiadas por meio de aplicação de carga nos três nós superiores e instrumentadas utilizando-se medidores de deslocamentos (LVDT) e extensômetros elétricos (*strain gage*). Em seguida, foram ensaiadas 15 (quinze) vigas de BLC (bambu laminado colado) com 75,0 cm de vão, 2,88 cm de base e 4,99 cm de altura, por meio de ensaio de Stuttgart. Os resultados destas vigas foram confrontados com vigas de referências fabricadas com madeiras de reflorestamento (Pinho do Paraná e *Eucalyptus grandis*). As treliças confeccionadas à base de resorcinol-formaldeído apresentaram-se, em média, 42% mais resistentes do que as à base de PVA. Além disso, as vigas confeccionadas à base de resorcinol-formaldeído apresentaram-se, em média, 160% mais resistentes do que as à base de poliacetato de vinila. Por fim, verificou-se que esse novo material (BLC) apresenta características físico-mecânicas comparáveis as madeiras nobres dicotiledôneas e as estruturas estudadas (treliças e vigas) apresentaram desempenho estrutural excelente.

Palavras-chave: Bambu. Adesivo. BLC. Treliça *Howe*. Viga.

ABSTRACT

Bamboo is a material that has attracted the attention of the scientific community for decades, and many applications use this grass over the last centuries have been reported in the literature. Among such applications include the manufacture of glued laminated bamboo that within the context of this study can be applied in construction. Thus, this research aimed to study structures made of glued layer bamboo (GLB) with the specie *Dendrocalamus giganteus*. a large bibliography review was proceeded and two glues were analyzed: *gelatin-resorcinol-formol* (CASCOPHEN) and *polyvinyl acetate* (CASCOREZ). Firstly, physical-mechanic characterization test on GLB was done. Then, four GLB trusses 2.5 m length and 0.4 m high were tested. To design these trusses a node connection study was proceeded, where three variables were investigated: connection angle; glue type; and the number of the bamboo layers. The trusses were tested under three point loads, applied at the superior nodes and the displacements and strains were measured by LVDTs and strain gages, respectively. In addition, 15 beams made of GLB were tested. The beams were 75 cm length, 4.99 cm high and 2.88 thick. They were tested under bending with four point loads. The results of the GLB beams were compared with reference beams produced with replanting woods *Pinho do Paraná* and *Eucalyptus grandis*. The trusses made with *gelatin-resorcinol-formol* glue presented, in average, 42% higher strength than the others done with *polyvinyl acetate*. The same behavior were observed to the beams, where those made with *gelatin-resorcinol-formol* showed 160% more strengthened than those made with *polyvinyl acetate*. Finally, it was observed that GLB presented physic-mechanic properties similar to the prime woods. In addition, the GLB truss node connection presented excellent structural behavior.

Key-words: Bamboo. Glue. GLB. *Howe* Truss. Beam.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Área de maior incidência dos bambus. 33

Capítulo 2

Figura 2.1 – Classificação das plantas superiores. 37

Figura 2.2 – Concentração das fibras na parte externa da parede colmo. 38

Figura 2.3 – Macroestrutura da parede do colmo de bambu. 38

Figura 2.4 – Partes principais do bambu. 39

Figura 2.5 – Rizoma característico do grupo alastrante. 40

Figura 2.6 – Rizoma característico do grupo torcente. 41

Figura 2.7 – Tipos de rizomas dos bambus. 41

Figura 2.8 – Região interna do bambu. 43

Figura 2.9 – Sequência do colmo de bambu. 43

Figura 2.10 – Variação da espessura da parede do colmo ao longo da altura. 43

Figura 2.11 – Aumento do comprimento entrenodal da parte basal para parte intermediária do colmo. 44

Figura 2.12 – Partes do colmo de bambu. 44

Figura 2.13 – Eixos ortogonais do bambu. 48

Figura 2.14 – Características dos corpos de prova de tração. 49

Figura 2.15 – Montagem do ensaio à compressão. 51

Figura 2.16 – Detalhes do ataque biológico ao bambu. 54

Figura 2.17 – Brotos comestíveis de bambu. 56

Figura 2.18 – Móveis de bambu. 58

Figura 2.19 – Organograma da utilização do bambu. 59

Figura 2.20 – Construções em bambu. 61

Figura 2.21 – Pontes de bambu. 61

Figura 2.22 – Catedral construída em bambu na Colômbia (Simon Velez). 61

Figura 2.23 – Casa executada com bambu. 62

Figura 2.24 – Casa construída com bambu no sul da Bahia. 62-63

Figura 2.25 – Ensaio de vigas de concreto reforçadas com bambu. 63

Figura 2.26 – Amostras de material empregado nos painéis. 64

Figura 2.27 – Casa de BLC. 66

Figura 2.28 – Detalhe da extração das ripas. 66

Figura 2.29 – Etapas de processo dos laminados chineses de madeira e de bambu. 69-70

Figura 2.30 – Esquema de retirada das lâminas de bambu. 72

Figura 2.31 – Produtos fabricados em BLC. 73

Figura 2.32 – Treliça de banzos paralelos feitas de ripas de bambu. 74

Figura 2.33 – Treliças de telhado fabricadas com ripas de bambu. 74

Figura 2.34 – Sistema de carregamento. 75

Figura 2.35 – Modo de ruptura da treliça. 75

Capítulo 3

Figura 3.1 – Esquema dos elementos constituintes de telhado e da estrutura de uma casa. 77

Figura 3.2 – Esquema da trama para telhado sem ripas e caibros. 79

Figura 3.3 – Elementos de um telhado de duas águas. 80

Figura 3.4 – Detalhe das ligações em tesouras de cobertura. 81

Figura 3.5 – Detalhamento de uma treliça. 81

Figura 3.6 – Região de influência para obtenção da carga nos nós de uma treliça. 83

Figura 3.7 – Cargas aplicadas nos nós da treliça. 83

Figura 3.8 – Esquema da carga equivalente em projeção horizontal. 84

Figura 3.9 – Tipos de ligações estruturais. 86

Figura 3.10 – Detalhes do sistema de parafuso com porca e arruela. 86

Figura 3.11 – Detalhe de ligações com conectores de anel. 87

Figura 3.12 – Detalhes de ligações por entalhe. 87

Figura 3.13 – Treliça tipo *Howe*. 88

Figura 3.14 – Treliça tipo *Pratt*. 88

Figura 3.15 – Treliça tipo Belga. 89

Figura 3.16 – Ligação do banzo superior da treliça tipo Belga. 89

Figura 3.17 – Treliça tipo *Fink*. 90

Figura 3.18 – Combinação entre as treliças tipo *Howe* e *Fink*. 90

Figura 3.19 – Treliça combinada com diagonais invertidas. 91

Figura 3.20 – Treliça tipo *Bowstring*. 91

Figura 3.21 – Detalhe da ligação no banzo superior da treliça tipo *Bowstring*. 92

Figura 3.22 – Conformação da treliça tipo *Bowstring* para vãos maiores. 92

Figura 3.23 – Treliça tipo *Bowstring* com banzo superior em peça laminada colada. 92

Figura 3.24 – Apoios da meia tesoura em balanço. 93

Figura 3.25 – Apoios da meia tesoura em balanço com tirantes. 93

Figura 3.26 – Vigas treliçadas com disposições distintas de diagonais. 94

Figura 3.27 – Tipos de arcos treliçados. 95

Figura 3.28 – Detalhe da montagem de uma viga laminada colada. 96

Figura 3.29 – Detalhe de emendas em lâminas de vigas laminadas. 97

Figura 3.30 – Detalhe da distribuição das emendas longitudinalmente à viga. 97

Figura 3.31 – Viga sob flexão pura e flexão simples. 99

Figura 3.32 – Deformação em uma viga sob flexão pura. 99

Figura 3.33 – Distribuição da tensão normal em uma viga sob flexão. 101

Figura 3.34 – Detalhe das tensões de cisalhamento ao longo da base de uma viga retangular. 102

Figura 3.35 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura de uma viga de seção transversal retangular. 103

Figura 3.36 – Detalhe da linha elástica de uma viga biapoiada. 104

Figura 3.37 – Diagrama de Kollmann. 109

Figura 3.38 – Esquemas do comportamento à compressão. 110

Figura 3.39 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. 111

Figura 3.40 – Esquemas do comportamento à tração. 111

Figura 3.41 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à tração paralela às fibras. 112

Figura 3.42 – Esquemas do comportamento ao cisalhamento. 113

Figura 3.43 – Esquema do comportamento à flexão simples. 114

Figura 3.44 – Diagrama das tensões de tração e compressão em estágios progressivos de incremento de carga. 115

Figura 3.45 – Diagrama carga x flecha para determinação da rigidez à flexão. 115

Figura 3.46 – Esquema de uma peça submetida à flexão simples. 122

Figura 3.47 – Casos em que se aplica o acréscimo de resistência à compressão normal às fibras. 123

Figura 3.48 – Esquema de entalhes em vigas de madeira/bambu. 124

Figura 3.49 – Detalhes construtivos para limitar o fendilhamento de vigas com entalhe. 124

Figura 3.50 – Mísula em viga como alternativa para seção transversal variável. 125

Figura 3.51 – Esquema da contraflecha máxima permitida em vigas. 126

Figura 3.52 – Parâmetros de flambagem em função das vinculações do pilar. 128

Figura 3.53 – Seções transversais compostas por dois ou três elementos iguais. 130

Figura 3.54 – Tensões e esforços de uma peça composta continuamente ligada. 133

Figura 3.55 – Equilíbrio do trecho de um pilar solidarizado. 136

Figura 3.56 – Vista de pilar solidarizado com espaçadores interpostos. 136

Figura 3.57 – Ligação entre duas peças em corte simples utilizando parafuso. 137

Figura 3.58 – Ligação em corte duplo. 139

Figura 3.59 – Espaçamentos mínimos em peças tracionadas (n = 4). 139

Figura 3.60 – Modalidades de ruptura de uma ligação metálica com conectores. 140

Figura 3.61 – Detalhe de um furo padrão (d é o diâmetro nominal do parafuso). 141

Capítulo 4

Figura 4.1 – Localização do município de Cascavel - PR. 144

Figura 4.2 – Esquema da separação do colmo de bambu. 144

Figura 4.3 – Detalhes dos produtos de corte e laminação do bambu. 145

Figura 4.4 – Detalhes do processo de prensagem das ripas. 147

Figura 4.5 – Impermeabilização das amostras com silicone. 149

Figura 4.6 – Corpos de prova do ensaio de absorção. 149

Figura 4.7 – Detalhes do ensaio de absorção de água. 150

Figura 4.8 – Montagem do ensaio de tração paralela às fibras do bambu. 151

Figura 4.9 – Características dos corpos de prova para os ensaios de tração paralela às fibras. 151

Figura 4.10 – Características do corpo de prova de compressão "P". 152

Figura 4.11 – Montagem do ensaio de compressão paralela às fibras (corpo de prova "P"). 152

Figura 4.12 – Detalhe da disposição dos extensômetros no corpo de prova de compressão "P". 153

Figura 4.13 – Conformação da montagem da ponte de *Wheatstone*. 154

Figura 4.14 – Características do corpo de prova de compressão "G". 154

Figura 4.15 – Montagem do ensaio de compressão paralela às fibras (corpo de prova "G"). 155

Figura 4.16 – Características do corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras do bambu. 156

Figura 4.17 – Detalhe do plano de cisalhamento no corpo de prova. 156

Figura 4.18 – Detalhes dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras. 156

Figura 4.19 – Montagem do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras do bambu. 157

Figura 4.20 – Características do corpo de prova de cisalhamento paralelo ao plano de colagem do BLC. 157

Figura 4.21 – Montagem do ensaio de flexão. 158

Figura 4.22 – Características do corpo de prova de flexão do BLC. 158

Figura 4.23 – Detalhes dos corpos de prova das ligações das treliças. 159-160

Figura 4.24 – Características dos corpos de prova de ligação da treliça. 161

Figura 4.25 – Esquema reticulado experimental da treliça ensaiada. 161

Figura 4.26 – Esquema de prensagem das barras da treliça com espaçadores interpostos. 163

Figura 4.27 – Detalhes das planificações das chapas de aço utilizadas nas ligações. 164

Figura 4.28 – Detalhe das ligações das treliças. 165

Figura 4.29 – Arranjo experimental das treliças planas tipo *Howe* ensaiadas. 165

Figura 4.30 – Numeração das ripas de bambu ao longo da altura da viga. 166

Figura 4.31 – Disposição das ripas e nós nas vigas de BLC (A, B, C e D). 166

Figura 4.32 – Processo de prensagem para fabricação das vigas de BLC. 167

Figura 4.33 – Vigas de seção retangular em BLC. 167

Figura 4.34 – Detalhe do ensaio de Stuttgart. 168

Figura 4.35 – Esquema experimental do ensaio das vigas de BLC. 168

Capítulo 5

Figura 5.1 – Diagrama taxa de umidade versus tempo. 170

Figura 5.2 – Diagrama variação da taxa de umidade por unidade de área versus tempo. 171

Figura 5.3 – Penetração de água pela face da extremidade do bambu. 172

Figura 5.4 – Dados das massas específicas. 173

Figura 5.5 – Dados da resistência à tração paralela às fibras. 174

Figura 5.6 – Dados de resistência à compressão paralela às fibras. 175

Figura 5.7 – Curvas tensão vs. deformação do BLC à compressão paralela às fibras. 176-177

Figura 5.8 – Prosseguimento do modo de ruptura à compressão de um corpo de prova "G". 177

Figura 5.9 – Detalhe dos corpos de prova de compressão "P" após a ruptura. 177

Figura 5.10 – Modo de ruptura ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu. 178

Figura 5.11 – Modo de ruptura ao cisalhamento no plano de cola. 178

Figura 5.12 – Dados das resistências ao cisalhamento paralelo. 179

Figura 5.13 – Detalhe da ruptura dos corpos de prova de flexão. 180

Figura 5.14 – Detalhes do ensaio das ligações a 0º. 181-182

Figura 5.15 – Dados da tensão ao cisalhamento na região embutida para ligações a 0º. 182

Figura 5.16 – Detalhes do ensaio das ligações a 90º. 183

Figura 5.17 – Dados da tensão ao cisalhamento na região embutida para ligações a 90º. 184

Figura 5.18 – Esquema reticulado experimental da treliça ensaiada. 184

Figura 5.19 – Modelagem da treliça no *software Ftool* versão 3.00. 185-186

Figura 5.20 – Gráfico carga vs. deslocamento das treliças planas de BLC tipo *Howe*. 187-188

Figura 5.21 – Deformada da treliça para condições de serviço. 189

Figura 5.22 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOREZ_1. 191-192

Figura 5.23 – Detalhe da contenção lateral na treliça ensaiada. 193

Figura 5.24 – Vista superior da ruptura por flambagem da treliça CASCOREZ_1. 193

Figura 5.25 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOREZ_2. 193-194

Figura 5.26 – Vista superior da ruptura por flambagem da treliça CASCOREZ_2. 195

Figura 5.27 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOPHEN_1. 196-197

Figura 5.28 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOPHEN_2. 198-199

Figura 5.29 – Vista frontal da ruptura por flambagem da treliça CASCOPHEN_2. 199

Figura 5.30 – Curvas carga x deslocamento para vigas de BLC e das madeiras *Eucalyptus grandis* e Pinho do Paraná. 200-201

Figura 5.31 – Disposição das ripas e dos nós nas vigas de BLC, tipos: A, B, C e D. 202

Figura 5.32 – Modos de ruptura das vigas tipo "A". 203

Figura 5.33 – Ensaio de uma das vigas tipo "A". 203

Figura 5.34 – Modos de ruptura das vigas tipo "B". 204

Figura 5.35 – Ruptura do nó de bambu da viga D_CASCOREZ. 205

Figura 5.36 – Ruptura por tração nas vigas de madeira. 206

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Energia necessária na produção dos materiais. 32

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos constituintes do bambu. 39

Tabela 2.2 – Composição química do bambu. 45

Tabela 2.3 – Resistência à tração e módulo de elasticidade do bambu *Dendrocalamus giganteus*. 49

Tabela 2.4 – Resistência mecânica das amostras de BLC. 71

Tabela 2.5 – Características mecânicas do BLC. 71

Tabela 2.6 – Características mecânicas dos painéis em BLC. 72

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Classes de Umidade. 108

Tabela 3.2 – Classes de carregamento. 118

Tabela 3.3 – Coeficiente de ponderação de ações para combinação normal. 118

Tabela 3.4 – Valores de $k_{mod,1}$. 120

Tabela 3.5 – Valores de $k_{mod,2}$. 120

Tabela 3.6 – Valores de α_n. 122

Tabela 3.7 – Valores do coeficiente de fluência. 130

Tabela 3.8 – Fator de flexibilidade. 132

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Propriedade do adesivo CASCOPHEN. 145

Tabela 4.2 – Propriedade do adesivo CASCOREZ. 146

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do aço 1020 SAE. 147

Tabela 4.4 – Dimensões das amostras do ensaio de absorção. 148

Tabela 4.5 – Combinações dos ensaios de ligações das treliças. 160

Tabela 4.6 – Características das barras das treliças planas tipo *Howe*. 162

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados das propriedades físico-mecânicas. 169

Tabela 5.2 – Cargas de ruptura das treliças ensaiadas. 189

Tabela 5.3 – Valores de deslocamentos máximos nas treliças a 70% da carga de ruptura. 190

Tabela 5.4 – Comportamento das vigas: carga-deslocamento e forma de ruptura. 206

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
AL	Alagoas
BLC	Bambu Laminado Colado
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CASCOPHEN	Adesivo à base de resina fenólica resorcionol-formaldeído, comercialmente conhecido por CASCOPHEN RS-216-M
CASCOREZ	Adesivo à base de poliacetato de vinila, com a denominação comercial de CASCOREZ
CA – 50	Aço para Concreto Armado – tensão de escoamento de 500 MPa
CN	Amostra com a presença da região nodal do bambu (com nó)
CV	Coeficiente de Variação
DEC	Diagrama de Esforço Cortante
DIN	*Deutsches Institut für Normung*
DIS	*Draft International Standard*
DMF	Diagrama de Momento Fletor
ELU	Estado Limite Último
ELUt	Estado Limite de Utilização
EUA	Estados Unidos da América
EUROCODE	*Comité Européen de Normalisation*
GLB	*Glued Layer Bamboo*
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
ISO	*International Organization for Standardization*
LBL	*Laminated Bamboo Lumber*
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
MLC	Madeira Laminada Colada
MR 250	Aço estrutural de Média Resistência – tensão de escoamento de 250 MPa
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira
OSB	*Oriented Strand Board*
PR	Paraná
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
PTV	Princípio dos Trabalhos Virtuais
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

PVA	Poliacetato de Vinila
RJ	Rio de Janeiro
SE	Sergipe
SI	Sistema Internacional
SAE	*Society of Automotive Engineers*
SN	Amostra sem a presença da região nodal do bambu (sem nó)
TMFF	Temperatura Mínima de Formação de Filme
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

g	carga permanente total
g_c	carga permanente das telhas
g_0	carga permanente das terças
g_T	carga permanente da tesoura
g_F	carga permanente do forro e da estrutura de sustentação
g_m	carga permanente das peças metálicas de ligação
h	altura
L	vão
t	espessura
A_{red}	área reduzida da seção transversal da lâmina em análise
α_r	coeficiente de redução, função do tipo de emenda
A_{ef}	área efetiva da lâmina sem a consideração da emenda
M	momento fletor
V	esforço cortante
κ	curvatura do eixo longitudinal da viga
ρ	raio de curvatura
$d\theta$	ângulo em radianos entre as das seções da viga
dx	comprimento do elemento entre as duas seções
ds	comprimento infinitesimal de arco
ΔL	alongamento (ou encurtamento) da fibra da viga
ε_x	deformação específica longitudinal em x
E	módulo de elasticidade longitudinal
σ_x	tensão normal em x
dA	elemento infinitesimal de área
I	momento de inércia (momento de segunda ordem)
dM	incremento de momento fletor entre duas seções distantes entre si dx
τ	tensão de cisalhamento
Q	momento estático de área
b	base da viga
X_{wk}	valor característico de resistência
X_n	valor amostral n de resistência
δ	coeficiente de variação da amostra de resistências

X_m	média aritmética dos dados da amostra de resistências
U	umidade
m_i	massa inicial da amostra
m_s	massa seca da amostra
f_{12}	resistência a umidade de 12%
$f_{U\%}$	resistência a umidade de U%
E_{12}	módulo de elasticidade a umidade de 12%
$E_{U\%}$	módulo de elasticidade a umidade de U%
ρ_{bas}	densidade básica
V_{sat}	volume saturado da amostra
ρ_{ap}	densidade aparente
m_{12}	massa do corpo de prova a 12% de umidade
V_{12}	volume do corpo de prova a 12% de umidade
ρ_U	densidade aparente a U% de umidade
δ_V	coeficiente de retratibilidade volumétrico
ΔV	variação de volume
V_U	volume do corpo de prova a U% de umidade
V_s	volume do corpo de prova a 0% de umidade
f_{c0}	resistência à compressão paralela às fibras média
$F_{c0,máx}$	máxima força de compressão aplicada sobre o corpo de prova
A_{c0}	área inicial da seção transversal do corpo de prova comprimido
E_{c0}	módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras
$\sigma_{50\%}$	tensão de compressão a 50% da resistência
$\sigma_{10\%}$	tensão de compressão a 10% da resistência
$\varepsilon_{50\%}$	deformação específica a 50% da resistência
$\varepsilon_{10\%}$	deformação específica a 10% da resistência
f_{t0}	resistência à tração paralela às fibras média
$F_{t0,máx}$	máxima força de tração aplicada sobre o corpo de prova
A_{t0}	área inicial da seção transversal do trecho central do corpo de prova tracionado
E_{t0}	módulo de elasticidade à tração paralela às fibras
f_{v0}	resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$F_{v0,máx}$	máxima força de cisalhamento aplicada sobre o corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras
A_{v0}	área da seção transversal crítica, em um plano paralelo às fibras

f_{gv0}	resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras
$F_{gv0,máx}$	máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova de cisalhamento no plano de colagem
A_{gv0}	área inicial da lâmina de colagem do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras
f_M	resistência à flexão
$M_{máx}$	máximo momento fletor aplicado ao corpo de prova
W_e	módulo resistente elástico da seção transversal do corpo de prova
E_{M0}	módulo de elasticidade à flexão
$F_{M,50\%}$	carga referente à 50% da carga máxima do ensaio de flexão
$F_{M,10\%}$	carga referente à 10% da carga máxima do ensaio de flexão
$v_{10\%}$	deslocamento no ponto médio do vão referente à 10% da carga máxima do ensaio de flexão
$v_{50\%}$	deslocamento no ponto médio do vão referente à 50% da carga máxima do ensaio de flexão
S_d	tensão solicitante de projeto
R_d	resistência de projeto
$S_{d,\,uti}$	valor decorrente da aplicação das ações, calculado com a hipótese de comportamento elástico linear da estrutura
S_{lim}	valor pré-estabelecido para efeito estrutural que limita o aparecimento do estado limite considerado
F_d	valor de cálculo das ações
$F_{gi,k}$	i-ésimo valor característico das ações permanentes
$F_{q1,k}$	valor característico da ação variável principal
$F_{qj,k}$	j-ésimo valor característicos das ações variáveis secundárias
γ_{gi}	i-ésimo coeficiente de majoração de ações permanentes de grande variabilidade
γ_q	coeficiente de majoração de ações variáveis
Ψ_{0j}	j-ésimo coeficiente redutor de combinação
W_k	valor da ação do vento
$F_{d,uti}$	valor das ações de utilização
Ψ_{2j}	j-ésimo coeficiente redutor de ações variáveis em combinação de utilização
X_d	valor de cálculo da resistência
k_{mod}	coeficiente modificador ou corretor de resistência
γ_w	coeficiente de minoração das propriedades de resistência
$E_{c0,ef}$	módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras efetivo

σ_{td}	tensão axial de cálculo à tração atuante na seção crítica
N_{td}	esforço solicitante de cálculo à tração
$A_{útil}$	área útil da seção transversal da peça, descontando-se furos e/ou entalhes
f_{t0d}	resistência de cálculo à tração paralela às fibras
σ_{c1d}	tensão atuante de cálculo na borda mais comprimida
σ_{t2d}	tensão atuante de cálculo na borda mais tracionada
M_d	momento fletor máximo de cálculo atuante na peça
y_{c1}	distância da linha neutra até a fibra mais comprimida (borda 1)
y_{t2}	distância da linha neutra até a fibra mais tracionada (borda 2)
f_{c0d}	resistência de cálculo à compressão paralela às fibras
τ_d	máxima tensão cisalhante longitudinal de cálculo
V_d	esforço cortante máximo na peça fletida
f_{v0d}	resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de cálculo
σ_{c90d}	tensão máxima de compressão perpendicular às fibras
F_{90d}	carga normal às fibras de cálculo transmitida
f_{c90d}	resistência à compressão de cálculo perpendicular às fibras
α_n	coeficiente de acréscimo de resistência
V_{red}	esforço cortante calculado com redução da cargas próximas ao apoio
h_1	altura da viga no entalhe
β_M	coeficiente de flambagem lateral
β_E	coeficiente de correção de flambagem lateral
γ_f	coeficiente ponderador
u_{ef}	flecha efetiva imediata
u_G	flecha devida à carga permanente
u_Q	flecha devida à carga acidental
u_0	contraflecha
u_{lim}	flecha limite
σ_{c0d}	tensão axial de cálculo à compressão atuante na seção crítica
N_{cd}	valor de cálculo do esforço normal de compressão
λ	índice de esbeltez
σ_{Nd}	valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão
σ_{Md}	valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor de segunda ordem
N_d	força normal de compressão de cálculo

M_{1d}	valor de cálculo do momento fletor de primeira ordem
e_d	excentricidade de primeira ordem amplificada
e_1	excentricidade de primeira ordem
F_E	carga crítica de Euler
e_i	excentricidade inicial de primeira ordem decorrente momento fletor de cálculo
e_a	excentricidade acidental
L_0	comprimento de flambagem da peça
K	parâmetro de flambagem
$e_{1,ef}$	excentricidade efetiva de primeira ordem
M_{1gd}	valor de cálculo, na situação de projeto, do momento devido às cargas permanentes
M_{1qd}	valor de cálculo, na situação de projeto, do momento devido às cargas variáveis
e_c	excentricidade suplementar de primeira ordem que representa o efeito de fluência do material
e_{ig}	excentricidade de primeira ordem decorrente da carga permanente
N_{gd}	valor de cálculo da força normal devida apenas às ações permanentes
φ	coeficiente de fluência
N_{gk}	valor característico da força normal devido às cargas permanentes
N_{qk}	valor característico da força normal devido às cargas variáveis
Ψ_1	coeficiente redutor de combinação de ações
Ψ_2	coeficiente redutor de combinação de ações
d_0	diâmetro de perfuração
d	diâmetro do parafuso
A_1	área de um dos elementos da peça comprimida
b_1	lado de um dos elementos da peça comprimida paralelo ao eixo 1–1
h_1	lado de um dos elementos da peça comprimida paralelo ao eixo 2–2
I_1	momento de inércia em relação ao eixo 1 – 1
I_2	momento de inércia em relação ao eixo 2 – 2
A	área total da seção transversal composta
I_x	momento de inércia total da seção composta em relação ao eixo horizontal (x) que passa por centro de massa
I_y	momento de inércia total da seção composta em relação ao eixo vertical (y) que passa por centro de massa

a_1	distância entre o eixo vertical que passa pelo centro de massa de cada elemento, e o eixo vertical (y) que passa pelo centro de massa da seção composta
$I_{y,ef}$	momento de inércia total efetivo da seção composta
β_I	coeficiente redutor do momento de inércia
λ_{ef}	esbeltez efetiva
α_y	parâmetro que leva em consideração o material empregado na ligação das peças do pilar
i_{ef}	raio de giração efetivo
σ_{int}	tensão interna de cálculo referente à flexão de cada elemento da peça composta separadamente
σ_{lig}	tensão de cálculo devido ao momento fletor proveniente da interação parcial dos componentes da ligação
$M_{int,1}$	momento fletor devido ao elemento 1
$M_{int,2}$	momento fletor devido ao elemento 2
M_{lig}	momento fletor devido a interação parcial dos componentes da ligação
F_s	esforço cortante atuante na ligação a partir do equilíbrio em trecho característico do pilar
β	parâmetro que define o tipo de ruptura da ligação
β_{lim}	valor limite para o parâmetro β
f_{yd}	tensão de escoamento de cálculo do pino metálico
f_{yk}	tensão de escoamento característica do pino metálico
γ_s	coeficiente de minoração de tensão de escoamento
f_{ed}	resistência de embutimento de cálculo
f_{e0d}	resistência de cálculo ao embutimento paralela às fibras
f_{e90d}	resistência de cálculo ao embutimento perpendicular às fibras
A_e	área de embutimento
F_e	força que causa uma deformação especifica de 2‰ na ligação
f_α	resistência em uma direção α qualquer em relação ao fibras
$R_{vd,1}$	valor da resistência de uma seção transversal de um pino
t_1	espessura da peça lateral 1 em uma ligação de corte duplo
t_2	espessura da peça central em uma ligação de corte duplo
t_3	espessura da peça lateral 3 em uma ligação de corte duplo
$N_{t,Sd}$	esforço solicitante de cálculo na chapa metálica
$N_{t,Rd}$	esforço resistente de cálculo da chapa metálica

A_g	área bruta da seção transversal da barra
A_e	área líquida efetiva da seção transversal da barra
A_n	área líquida da seção transversal da barra
C_t	coeficiente de redução da área líquida
f_y	resistência ao escoamento do aço estrutural
f_u	resistência à ruptura do aço estrutural
γ_{a1}	coeficiente de ponderação de resistência referente ao escoamento da peça
γ_{a2}	coeficiente de ponderação de resistência referente à ruptura da peça
$F_{v,Rd}$	força de cisalhamento resistente de cálculo
A_b	área bruta do parafuso
f_{ub}	resistência à ruptura do aço do parafuso
$F_{c,Rd}$	força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo
l_f	distância, medida na direção da força solicitante, resistente ao rasgamento da chapa entre furos ou entre um furo e a sua borda
s	espaçamento entre os centros de furos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 32

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 32

1.2 JUSTIFICATIVA 34

1.3 OBJETIVO 35

1.4 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO 36

CAPÍTULO 2 – O MATERIAL BAMBU 37

2.1 MORFOLOGIA DO BAMBU 37

2.1.1 CRESCIMENTO DO BAMBU 42

2.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS COLMOS DE BAMBU 42

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA 45

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS 46

2.3.1 MASSA ESPECÍFICA 46

2.3.2 TEOR DE UMIDADE 46

2.3.3 ESTABILIDADE DIMENSIONAL 47

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS 47

2.4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS 48

2.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS 50

2.4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS 51

2.4.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO 52

2.5 CARACTERÍSTICAS DA ESPÉCIE DENDROCALAMUS GIGANTEUS 52

2.6 TRATAMENTO PRESERVATIVO DOS COLMOS 54

2.7 UTILIZAÇÃO E APLICAÇÕES 55

2.7.1 USOS DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL 60

2.8 BAMBU LAMINADO COLADO (BLC) 63

2.8.1 ADESIVOS 66

2.8.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO 69

2.8.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BLC 70

2.8.4 APLICAÇÕES DAS RIPAS DE BAMBU E DO BLC 72

CAPÍTULO 3 - CONCEITOS ESTRUTURAIS E PROJETO DE ESTRUTURA 77

3.1 ESTRUTURAS PARA COBERTAS: TRELIÇAS PLANAS 77

3.1.1 GENERALIDADES 78

3.1.2 TERMINOLOGIA ESTRUTURAL 78

3.1.3 GEOMETRIA DA ESTRUTURA 81

3.1.4 CÁLCULO DO CARREGAMENTO E DO DESLOCAMENTO 82

3.1.5 ESFORÇOS EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS 85

3.1.6 TIPOS DE LIGAÇÕES 86

3.1.7 TIPOS DE TRELIÇAS 87

3.1.7.1 Tipo Howe 87

3.1.7.2 Tipo Pratt 88

3.1.7.3 Tipo Belga 89

3.1.7.4 Tipo Fink (Polonceau) 90

3.1.7.5 Tipo Bowstring (treliça com banzo superior poligonal) 91

3.1.7.6 Treliça em balanço 93

3.1.7.7 Treliça com contorno retangular 94

3.1.7.8 Arcos treliçados 94

3.2 ASPECTOS NORMATIVOS 95

3.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR EM BLC 96

3.3.1 FLEXÃO 98

3.3.2 CISALHAMENTO 102

3.3.3 DEFLEXÃO 104

3.4 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS CONSIDERADAS NO PROJETO 106

3.4.1 UMIDADE 107

3.4.2 DENSIDADE 108

3.4.2.1 Densidade básica 108

3.4.2.2 Densidade aparente 109

3.4.3 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS 110

3.4.4 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS 111

3.4.5 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS 113

3.4.6 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM 113

3.4.7 FLEXÃO ESTÁTICA 114

3.5 ESTADOS LIMITES DAS ESTRUTURAS 116

3.5.1 ESTADOS LIMIITES ÚLTIMOS (ELU) 116

3.5.2 ESTADOS LIMIITES DE UTILIZAÇÃO (ELUt) 116

3.6 AÇÕES 117

3.6.1 TIPOS DE AÇÕES 117

3.6.2 CLASSES DE CARREGAMENTO 117

3.6.3 COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS 118

3.6.4 COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO 119

3.7 VALORES DE CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS 119

3.8 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO 121

3.8.1 TRAÇÃO 121

3.8.2 FLEXÃO SIMPLES RETA 121

3.8.3 COMPRESSÃO AXIAL 126

3.8.3.1 Peças Curtas 126

3.8.3.2 Peças Medianamente Esbeltas 127

3.8.3.3 Peças Esbeltas 129

3.8.3.4 Peças comprimidas solidarizadas descontinuamente 130

3.8.4 LIGAÇÕES 137

3.8.4.1 Verificação da Madeira 137

3.8.4.2 Verificação da parte metálica da ligação 139

CAPÍTULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL 143

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS 143

4.1.1 BAMBU 143

4.1.2 ADESIVOS 145

4.1.3 BAMBU LAMINADO COLADO (BLC) 146

4.1.4 CHAPAS DE AÇO (LIGAÇÕES DA TRELIÇA) 147

4.1.5 PARAFUSOS DE AÇO (LIGAÇÕES DA TRELIÇA) 147

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS 148

4.2.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BAMBU 148

4.2.2 ENSAIO DA MASSA ESPECÍFICA DO BLC 150

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS 150

4.3.1 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BAMBU 150

4.3.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BLC 152

4.3.3 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DO BAMBU 155

4.3.4 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM DO BLC 157

4.3.5 FLEXÃO DO BLC 158

4.4 ELEMENTOS ESTRUTURAIS 159

4.4.1 LIGAÇÕES DAS TRELIÇAS PLANAS 159

4.4.2 TRELIÇA PLANA TIPO HOWE 161

4.4.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR 166

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO 169

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS 170

5.1.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BAMBU 170

5.1.2 ENSAIO DA MASSA ESPECÍFICA DO BLC 172

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS 173

5.2.1 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BAMBU 173

5.2.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BLC 174

5.2.3 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DO BAMBU 178

5.2.4 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM DO BLC 178

5.2.5 FLEXÃO DO BLC 179

5.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS 181

5.3.1 LIGAÇÕES DAS TRELIÇAS PLANAS 181

5.3.2 TRELIÇAS PLANAS TIPO HOWE 184

5.3.2.1 Projeto (Dimensionamento) 184

5.3.2.2 Análise experimental-numérica 186

5.3.2.3 Análise experimental-teórica 190

5.3.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR 200

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS 207

REFERÊNCIAS 211

APÊNDICE A 218

APÊNDICE B 219

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pico de crescimento da população mundial ocasiona um aumento no consumo de madeira (corte de árvores para propósitos comerciais). Tal fato, aliado a ocorrência incêndios e a devastação de terras para utilização da agropecuária, gera redução do tamanho das florestas naturais. Apesar da redução da taxa de desflorestamento da Amazônia Legal nos últimos 10 anos, ainda no ano de 2012 o Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) estima uma taxa de desflorestamento de 4656 km^2 neste ano. Desta forma, a larga utilização do bambu é uma medida para redução do consumo excessivo dos recursos, tais como: ferro, alumínio e a escassa madeira.

Segundo Da Rosa (2002), as três grandes vantagens do bambu sobre os outros materiais são:

a) o colmo do bambu morre em torno dos sete anos de idade, já a colheita estimula o nascimento de novos colmos. Depois de retirado do bambuzal pode durar até 40 anos se for tratado com preservativos;
b) adquire resistência estrutural rapidamente, após três anos de idade;
c) o gasto energético na produção do bambu é bem inferior aos demais materiais, como é demonstrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Energia necessária na produção dos materiais.

MATERIAL	MJ/m³ MPa
Aço	1500
Concreto	240
Madeira	80
Bambu	30

Fonte: Jassen (1981).

Para Moreira[1] (1991 apud DA ROSA, 2002), as indústrias de aço não só poluem a atmosfera com CO_2 (dióxido de carbono), como também reduzem as reservas de minério de ferro e carvão, além de utilizarem petróleo para produção e transporte. Estas indústrias são, portanto, umas das principais responsáveis pela escassez dos materiais não renováveis.

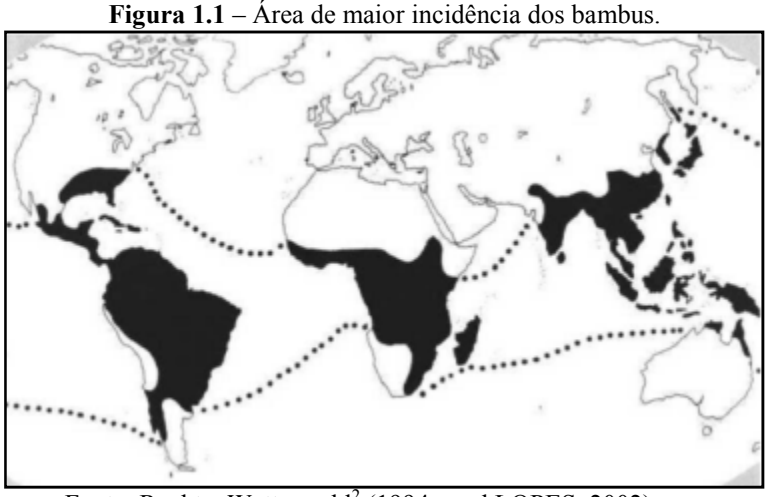
[1] MOREIRA, L. E. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. Rio de Janeiro, 1991. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desta forma, a utilização do bambu visa atingir níveis de desenvolvimento sustentável, os quais são conseguidos por poucos materiais, reduzindo a poluição através da diminuição do consumo de energia e da conservação dos recursos naturais, mantendo um ambiente salubre e sustentável.

Além disso, a utilização do bambu traz uma série de outras vantagens listadas a seguir:

- é econômico: sua produção é realizada por processos fotossintéticos, não precisa de reflorestamento;
- material leve (peso específico da ordem de 8,5 kN/m^3, conforme LIMA JR. et alii, 2000), fácil de ser transportado e armazenado;
- pode ser cortado com ferramentas simples e manuais;
- altamente produtivo e de fácil disponibilidade;
- é encontrado em quase todo o mundo de forma abundante (Figura 1.1). O bambu possui cerca de 50 gêneros e 1250 espécies que se distribuem naturalmente entre as latitudes 46º Norte e 47º Sul, sendo encontrados em altitudes entre 0 e 4.000 metros.

Figura 1.1 – Área de maior incidência dos bambus.



Fonte: Recht e Wetterwald[2] (1994 apud LOPES, 2002).

Com base nestas características, pode-se afirmar que o bambu constitui um material que tem atraído a atenção do meio científico há décadas e muitas aplicações do uso desta gramínea ao longo dos últimos séculos têm sido relatadas na literatura. Entre tais aplicações, muitas se encontram no campo da Engenharia Civil, onde o bambu é utilizado como material que compõe elementos estruturais em pontes, edificações, andaimes, treliças etc.

Os primeiros relatos com caráter técnico-científicos, que visavam à utilização do bambu como material de construção civil, ocorreram a partir do inicio do século XX, na

[2] RECHT, C.; WETTERWALD, M. F. **Bamboos**. London: B.T. Batsford Ltd, 1994.

China e nos Estados Unidos. Posteriormente, apareceram alguns trabalhos na Alemanha, Japão, Índia, Filipinas e em outros países. No Brasil, os primeiros estudos científicos relativos ao bambu tiveram início em 1979.

Dentro deste contexto, bambu pode vir a ser utilizado como material alternativo em diversas aplicações que vão desde utensílios decorativos até elementos estruturais. Mas apesar das suas formidáveis propriedades físicas e mecânicas, o bambu tem sido pouco utilizado como material constituinte das estruturas, basicamente, por dois fatores, a saber: à sua configuração geométrica, pois o colmo de bambu se assemelha a uma estrutura tronco cônica oca, impossibilitando a confecção de peças estruturais usuais, como vigas e pilares de seções transversais geralmente retangulares; e à sua baixa resistência ao cisalhamento, que não permite a cravação de pinos, tornando difícil o projeto de estruturas de maior porte, em que se necessite de emendas ou ligações. Além disso, o bambu apresenta ao longo da planta estruturas nodais que possuem geralmente propriedades mecânicas inferiores (resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras) quando comparadas à região do colmo sem presença dos nós.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, com a preocupação global de preservação ambiental, as indústrias orientais de móveis e de papel têm investido em tecnologia para o aproveitamento mais racional do bambu. Dentre tais indústrias, destacam-se as de piso laminado de bambu que atualmente produzem, em escala industrial, pisos laminados de alto padrão de acabamento. Analisando-se este processo industrial de laminação do bambu, juntamente com a metodologia aplicada à madeira laminada colada (BONO, 1996), observa-se que estes processos podem ser agrupados e aplicados na fabricação de peças estruturais de Bambu Laminado Colado (BLC) ou de laminados colados de bambu associado à madeira de reflorestamento. A tecnologia do bambu laminado colado, basicamente elimina os problemas de cisalhamento e geometria discutidos anteriormente, permitindo que este material tenha uma utilização mais racional na engenharia estrutural (LIMA JR.; DIAS, 2001).

Pode-se afirmar que a falta de qualidade e de moradias dignas nas áreas rurais dos países em desenvolvimento é um problema sempre presente. No Brasil, particularmente na região Nordeste, mais precisamente no Agreste pernambucano, a maioria das construções de baixa renda é feita com varas de vegetação local e com argila (barro), sem o mínimo de tecnologia. Tais construções apresentam péssima aparência estética, baixa resistência às

intempéries e grande número de fissuras; onde, usualmente, se alojam insetos transmissores de doenças.

A baixa qualidade das construções supracitadas se deve, entre outros fatores, ao fato de que os materiais industrializados mobilizam vastos recursos financeiros, o que torna proibitivo o seu uso para uma população com baixa renda. Adicionalmente, verifica-se uma grande resistência por parte dos profissionais da engenharia na utilização de materiais não-convencionais de baixo custo, aversão que é causada, principalmente, pela falta de um conhecimento sólido sobre as propriedades físicas e mecânicas destes materiais e códigos normativos que forneçam um embasamento para tomada de decisões e desenvolvimento de projetos.

Portanto, observa-se que o bambu, de modo particular, o bambu laminado colado, é um material de baixo custo, que pode vir a colaborar na melhoria das condições de habitação das moradias nordestinas. Todavia, a ideia de utilização do BLC para fins de elementos estruturais, base deste estudo, recai em alguns problemas que necessitam de mais investigações (BONO, 1996). Inicialmente, verifica-se a necessidade de desenvolvimento de equipamentos adequados para a laminação do bambu de modo artesanal e industrial. O tipo de adesivo, também é outro ponto que precisa ser investigado, uma vez que, é fundamental que este apresente baixo custo, alta resistência e interaja quimicamente de modo adequado com o bambu. O processo de colagem das tiras de bambu deve ser otimizado, com relação a custo e geração de interfaces diminutas. Finalmente, verifica-se a necessidade de desenvolvimento de um tratamento adequado contra o ataque de fungos e insetos, de modo a garantir durabilidade do material, possibiltando a construção de estruturas, como treliças de telhado e vigas , mais eficientes e duráveis.

1.3 OBJETIVO

Esta dissertação tem como proposta principal estudar experimentalmente elementos estruturais, quais sejam: treliças planas tipo *Howe* e vigas de seção transversal retangular; fabricados com Bambu Laminado Colado (BLC), utilizando-se bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Foram estudados dois tipos de adesivos adequados para a colagem das ripas, a saber: resorcionol-formaldeído e poliacetato de vinila. Avaliou-se e estudou-se um meio ótimo de colagem das lâminas, aplicando a pressão necessária para o espalhamento uniforme do

adesivo entre as lâminas. Com isso, foram desenvolvidos equipamentos para realização do processo de colagem.

Na fase intermediária desse trabalho, que servirá de subsídio as análises das estruturas, fizeram-se a caracterização física (teor de umidade, taxa de absorção de água, massa específica) e mecânica (compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, resistência ao cisalhamento na linha de colagem, flexão estática) das peças em bambu laminado colado. Ainda nesta fase, estudaram-se experimentalmente as ligações metálicas de treliças planas.

1.4 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos e dois apêndices. No primeiro capítulo (INTRODUÇÃO), são apresentados os comentários iniciais, justificativas (relevância do estudo) e os objetivos do estudo aqui desenvolvido.

No segundo capítulo (O MATERIAL BAMBU), apresenta-se o referencial teórico correspondente ao principal material utilizado neste estudo, o bambu. Serão relatadas as suas principais características e aplicações; além do tratamento a respeito do Bambu Laminado Colado (BLC) relatando-se suas características, processo de fabricação e aplicações.

No capítulo três (CONCEITOS ESTRUTURAIS E PROJETO DE ESTRUTURA), têm-se os conceitos estruturais e os conteúdos normativos ao projeto das treliças tipo *Howe* e vigas estudadas nesta dissertação.

No capítulo quatro (PROGRAMA EXPERIMENTAL), descrevem-se os principais materiais e procedimentos experimentais utilizados para elaboração deste trabalho.

No capítulo cinco (RESULTADOS E DISCUSSÃO), são apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos nos ensaios desta dissertação.

Por fim, no sexto capítulo (CONSIDERAÇÕES FINAIS), são apontadas e discutidas as principais conclusões do trabalho e alguns aspectos correlatos ao tema, que demandam futuros estudos.

Posteriormente aos seis capítulos, apresentam-se as REFERÊNCIAS citadas e os APÊNDICES A e B com as informações complementares dos ensaios experimentais.

Capítulo 2

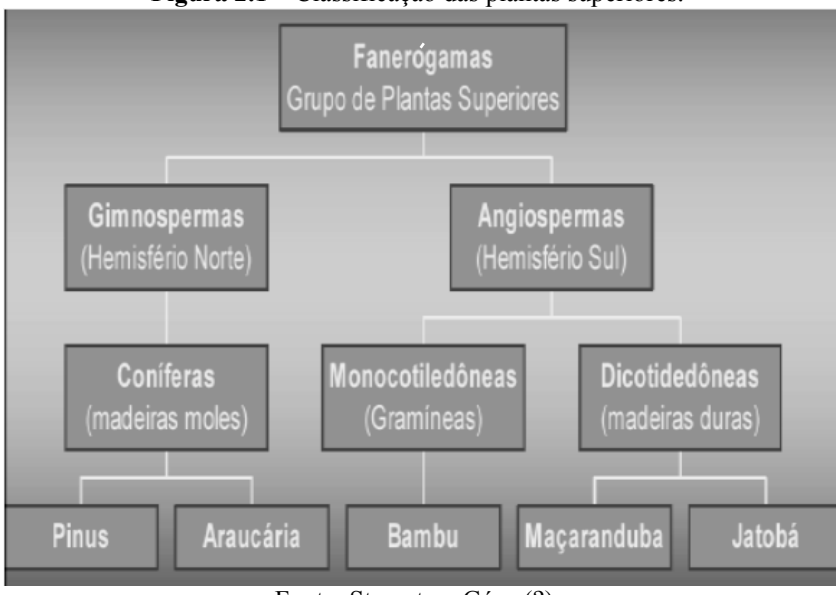
O MATERIAL BAMBU

Neste capítulo serão apresentadas as características (morfológicas, químicas, físicas e mecânicas) e aplicações dos bambus; além de uma abordagem a respeito do BLC (Bambu Laminado Colado) considerando-se histórico, processo de fabricação e usos do mesmo.

2.1 MORFOLOGIA DO BAMBU

A palavra "bambu" é a nomenclatura dada às plantas da subfamília *Bambusoideae* pertencente à família das gramíneas (*Poaceae* ou *Gramineae*). É classificado como planta lenhosa ou herbácea (dependendo da espécie), monocotiledônea, pertencente às angiospermas. Na Figura 2.1 mostra-se a classificação das plantas superiores com destaque para enquadramento do bambu.

Figura 2.1 – Classificação das plantas superiores.

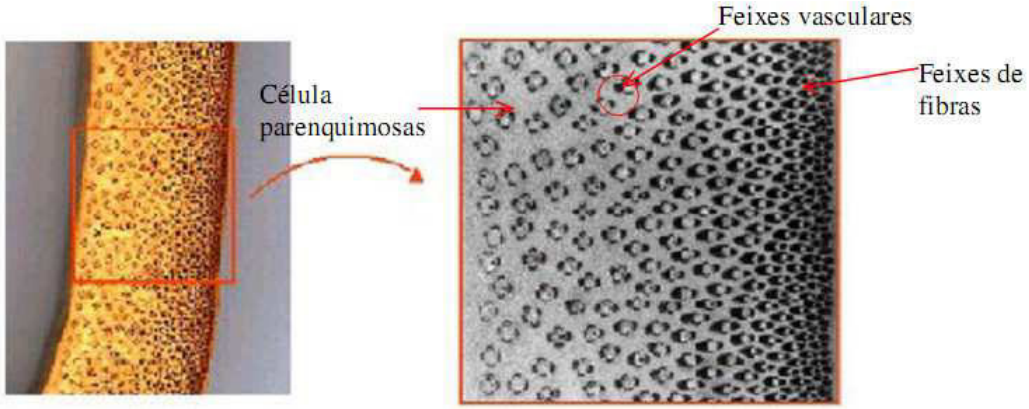


Fonte: Stamato e Góes (?).

Segundo Lima Jr. et alii (2000), o bambu é por natureza um material compósito, seu colmo é formado por fibras, vasos e condutores de seiva, que estão distribuídos não uniformemente na seção transversal e embebidos em um tecido de preenchimento, uma espécie de matriz, denominado *Parenchyma*. Em estudos a respeito da microscopia do bambu (GHAVAMI; MARINHO, 2003), observou-se que os feixes de fibras são mais concentrados à medida que se localizam mais próximos da parte externa do colmo. As fibras do bambu constituem a parte desta planta que confere resistência para combater às cargas de vento

(solicitação predominante durante o tempo que bambu está na touceira). Na Figura 2.2, é mostrado como se comporta a variação da fração volumétrica das fibras ao longo da espessura do colmo do bambu *Phyllostachys heterocycla pubescens* (*Mosó*).

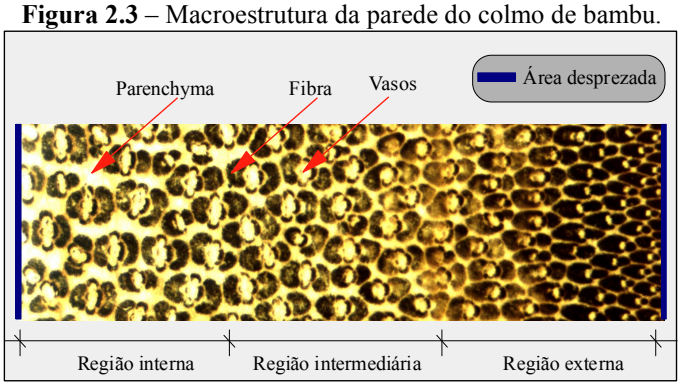
Figura 2.2 –Concentração das fibras na parte externa da parede colmo.



Fonte: Ghavami e Marinho (2003).

Cerca de 40% do colmo do bambu é formado por *Parenchyma*, 10% por vasos e condutores de seiva e 50% por fibras conforme apresentado na Figura 2.3. Estas porcentagens variam de espécie para espécie de bambu, influenciando as propriedades físicas e mecânicas, como por exemplo: densidade, retração, resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, entre outras.

Figura 2.3 – Macroestrutura da parede do colmo de bambu.



Fonte: Lima Jr. et alii (2000).

O *Parenchyma* é formado por células pouco rígidas, de paredes muito finas constituídas basicamente de celulose e preenchidas por Lignina; além de suas células serem conectadas umas as outras através de cavidades. O *Parenchyma* confere certa plasticidade à planta e é o tecido mais fraco do bambu. Sua função é armazenar reservas nutritivas que o vegetal necessita.

O sistema vascular do bambu é composto de duas partes: o *Pholem*, formado por longas células de paredes finas, constituídas principalmente por Lignina e responsável pelo transporte de material nutritivo para as partes superiores do bambu; e o *Xylen*, formado por

células de paredes espessas, de composição complexa, que está localizado dentro do *Pholen* e é responsável pelo transporte de água e minerais.

As fibras são formadas por células mortas (*Sclerenchyma*) de grande comprimento e de paredes constituídas principalmente por celulose. Elas são responsáveis pelas propriedades mecânicas da planta. A Tabela 2.1 apresenta algumas propriedades mecânicas dos elementos descritos acima.

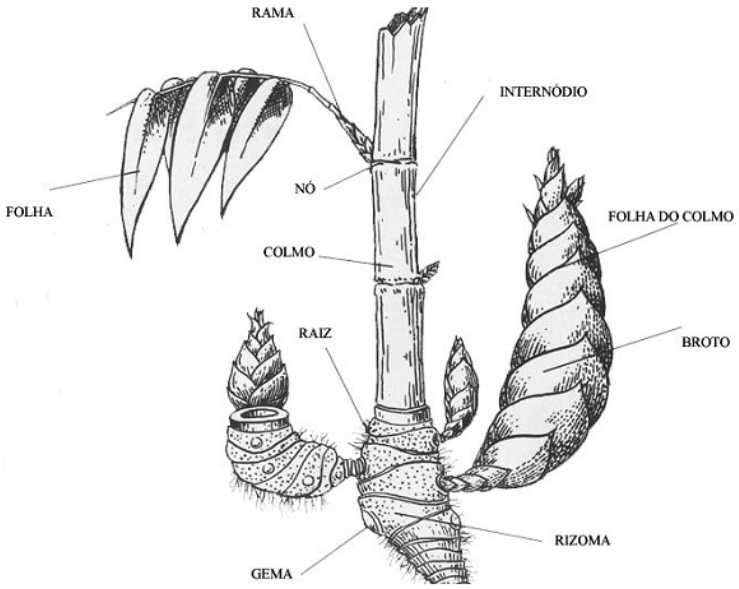
Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos constituintes do bambu.

Material	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)	Resistência à tração longitudinal (MPa)	Coeficiente de Poisson
Fibra	37,0	442,0	0,24
Vasos	≈ 0,0	≈ 0,0	-
Parenchyma	2,0	20,0	0,35

Fonte: Janssen (1981) e Pakotiprapha, Pama e Lee (1983).

Segundo Castro e Silva (2005), Nogueira (2008) e Sánchez Cruz (2002), embora seja uma gramínea, o bambu possui hábito arborescente, e assim como a maioria das árvores, apresenta um sistema subterrâneo de rizomas e raízes (parte subterrânea) e uma parte área composta por colmos e galhos. Todos esses constituintes são formados pela mesma lógica: uma série alternada de nós e entrenós. Com o crescimento do bambu, cada novo entrenó é envolto por uma folha caulinar protetora, fixa ao nó anterior no anel caulinar. Os nós são pedaços íntegros de tecido, compreendendo o anel nodular, o anel da bainha e uma gema dormente, que são os locais de aparecimento do novo crescimento segmentado (rizoma, colmo ou galho), conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 – Partes principais do bambu.

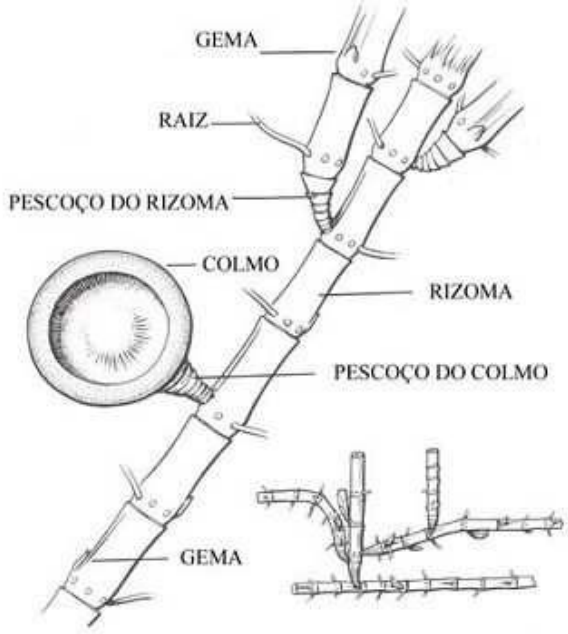


Fonte: NMBA (2004).

Os rizomas são caules subterrâneos, dotados de nós e entrenós com folhas reduzidas a escamas, que crescem, reproduzem-se e distanciam-se do bambu permitindo a propagação de novo território. Anualmente novos colmos crescem dos rizomas para formar os constituintes aéreos das plantas. De acordo com a configuração e hábito de ramificação do rizoma, os bambus podem ser classificados em três grupos principais:

a) *Leptomorfos* ou Alastrantes (monopodiais): são resistentes ao frio e originários da China. Apresentam rizomas alongados e finos, com os entrenós longos e espaçados. Os colmos são mais espessos que o rizoma. Algumas vezes a ponta do rizoma pode se tornar um novo colmo. Crescem lateral e radialmente, alastrando-se linearmente uns dos outros. Por isso, os rizomas desse tipo são demasiadamente invasores, o que gera cuidados especiais em seu cultivo. São localizados geralmente nas espécies de climas temperados, como no gênero *Phyllostachys* (Figura 2.5);

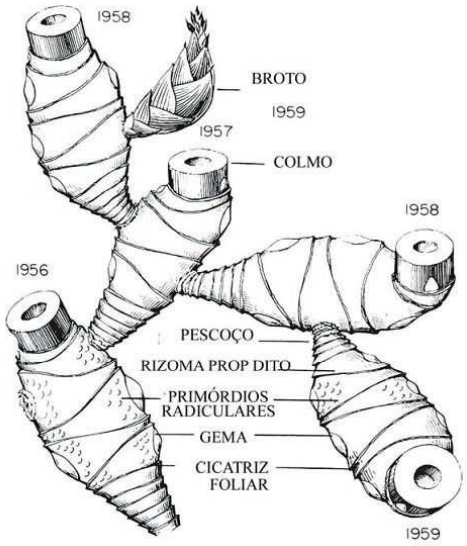
Figura 2.5 – Rizoma característico do grupo alastrante.



Fonte: Castro e Silva (2005).

b) *Paquimorfos* ou Torcentes (simpodiais): com forma de bulbos, possuem entrenós compactos e muito curtos. Os rizomas são compostos de gemas laterais que resultam em novos rizomas. Muitas destas gemas se mantêm inativas permanentemente ou temporariamente. Apenas a gema apical do rizoma pode dar origem ao um novo colmo; tal processo é contínuo, de forma que os rizomas se desenvolvem formando uma touceira densa e concêntrica. Crescem lateral e radialmente. Podem ter gargantas curtas, médias ou longas. Este tipo de rizoma é encontrado em espécies tropicais, como as do gênero *Bambusa*, Guadua e *Dendrocalamus* (Figura 2.6);

Figura 2.6 – Rizoma característico do grupo torcente.

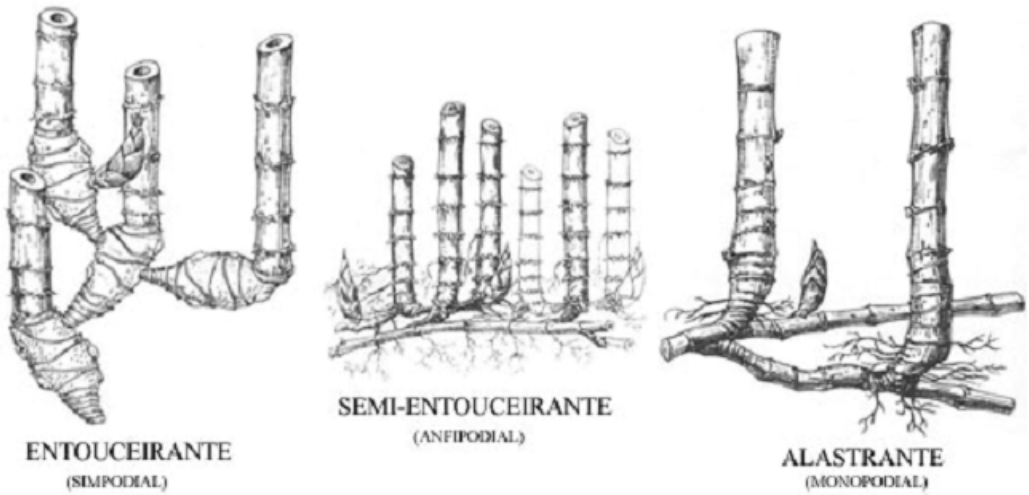


Fonte: Hidalgo López (2003).

c) *Anfipoidal* ou Intermediário (semientouceirantes): Caracterizam-se por rizomas que apresentam ramificação conjugadas dos dois grupos principais em uma mesma planta. A este grupo pertencem gêneros como o *Chusquea*, ao qual corresponde elevado número de espécies desenvolvidas nas zonas montanhosas da Colômbia (CASTRO E SILVA, 2005; HIDALGO LÓPEZ[1], 1978 apud SÁNCHEZ CRUZ, 2002).

A Figura 2.7 expõe os três grupos de rizomas descritos anteriormente.

Figura 2.7 – Tipos de rizomas dos bambus.



Fonte: NMBA (2004).

> As raízes dos bambus partem dos rizomas, se lançam na projeção da copa numa profundidade diretamente proporcional as dimensões de cada espécie. Por ser uma monocotiledônea a **raiz é fasciculada**, sendo, portanto destituído de raiz principal. Além de ancorar a planta, juntamente com os rizomas, as raízes têm a importante função de extrair nutrientes e água do solo. (CASTRO E SILVA, 2005, p. 5, grifo nosso).

[1]HIDALGO LOPEZ, O. **Nuevas Técnicas de construcción con Bambú**. Colombia: Estudios Tecnicos Colombianos. Ltda Bogotá, 1978. 95 p.

2.1.1 CRESCIMENTO DO BAMBU

Ao contrário de outras árvores, cujo tronco cresce simultaneamente radial e verticalmente até alcançar seu completo desenvolvimento entre os 12 e 15 anos ou mesmo depois de seus 100 anos, o bambu surge do solo com o diâmetro máximo que terá em sua vida, e este não aumenta com a idade, ao invés disto, diminui proporcionalmente ao longo de seu comprimento. O colmo alcança sua máxima altura entre os 30 e 80 dias no grupo *leptomorfo* e entre os 80 e 180 dias no grupo *paquimorfo*. Ao término de seu crescimento começa a formação de seus ramos e folhas, que se conclui no primeiro ano.

Dos quatro aos doze primeiros meses o bambu é muito flexível, e por isso é empregado na confecção de cestos e outros acessórios artesanais. À medida que atinge sua maturidade, as fibras tornam-se cada vez mais duras e resistentes até alcançar sua máxima resistência entre os três e os seis anos, idade adequada para seu uso na construção civil. Após este período, os colmos começam paulatinamente a mudar sua cor até secar completamente.

O crescimento do bambu é tão rápido que não há na natureza planta que consiga igualar-se. Em condições normais e no período de maior desenvolvimento, o crescimento em 24 horas pode atingir de 8 a 10 cm, alcançando 40 cm em espécies como o *Dendrocalamus giganteus* (SÁNCHEZ CRUZ, 2002).

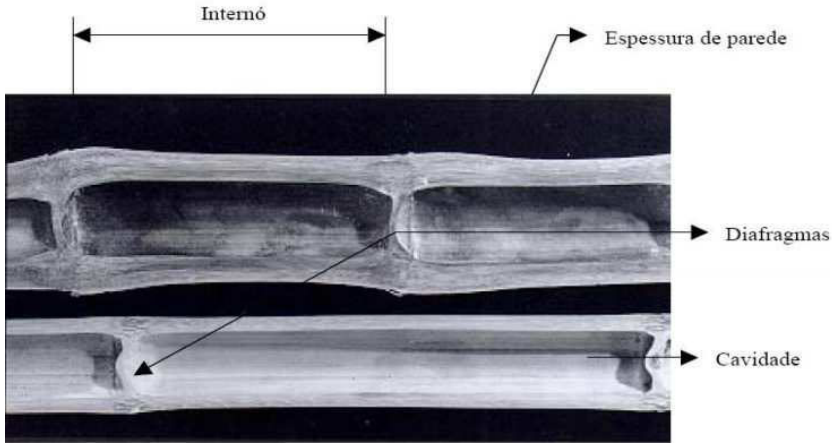
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS COLMOS DE BAMBU

Segundo Castro e Silva (2005), o colmo resulta de uma gema ativa do rizoma compondo a parte aérea dos bambus, além de dar suporte para os ramos e folhas. Os colmos normalmente ocos surgem com seu diâmetro máximo (não há ocorrência de crescimento radial), o qual diminui gradativamente ao longo da altura da planta. Assim, os colmos são formados por cascas em formato de tronco de cone e esbeltas.

O espaço vazio no interior do colmo é denominado cavidade, a qual é separada uma da outra por diafragmas que aparecem externamente como nós, onde surgem os galhos e as folhas (Figura 2.8 e Figura 2.9). Os entrenós possuem comprimento e espessura da parede variáveis (Figura 2.10), pois os colmos diferem segundo a espécie, em comprimento, diâmetro e distância internodal. Para Ghavami e Marinho (2003), há um comportamento bem definido do comprimento do entrenó, ou seja, na parte basal, os comprimentos entrenodais são baixos, na parte central do colmo atingem o maior desenvolvimento (Figura 2.11) e, na parte superior, decrescem. Esse tipo de comportamento é verificado nas espécies de bambu estudadas por

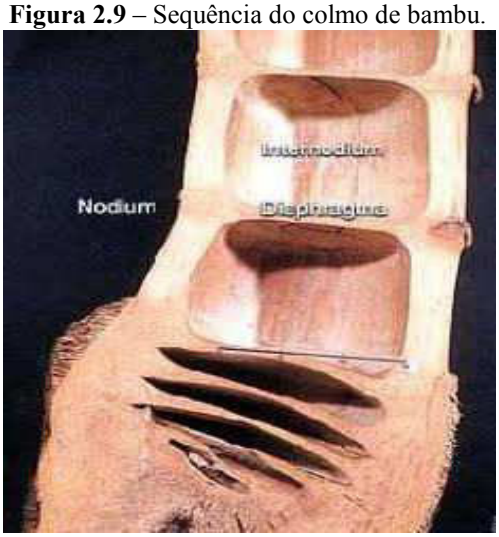
Ghavami e Marinho (2003), a saber: *Dendrocalamus giganteus*, *Phyllostachys heterocycla pubescens* (*Mosó*), *Phyllostachys bambusoides* (*Matake*), *Guadua angustifolia* e *Guadua tagoara*.

Figura 2.8 – Região interna do bambu.



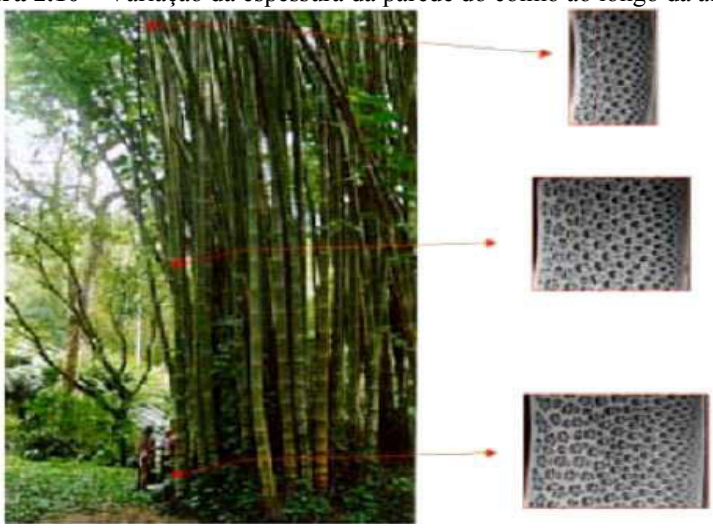
Fonte: Sánchez Cruz (2002).

Figura 2.9 – Sequência do colmo de bambu.



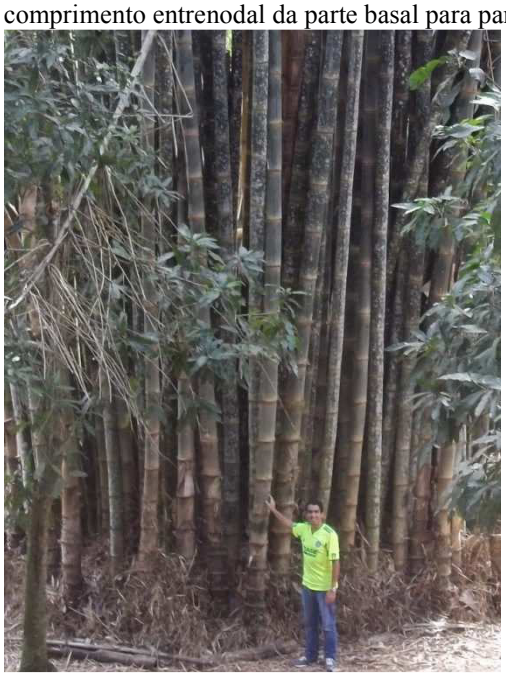
Fonte: Dunkelberg (1985).

Figura 2.10 – Variação da espessura da parede do colmo ao longo da altura.



Fonte: Ghavami, Rodrigues e Paciornik (2003).

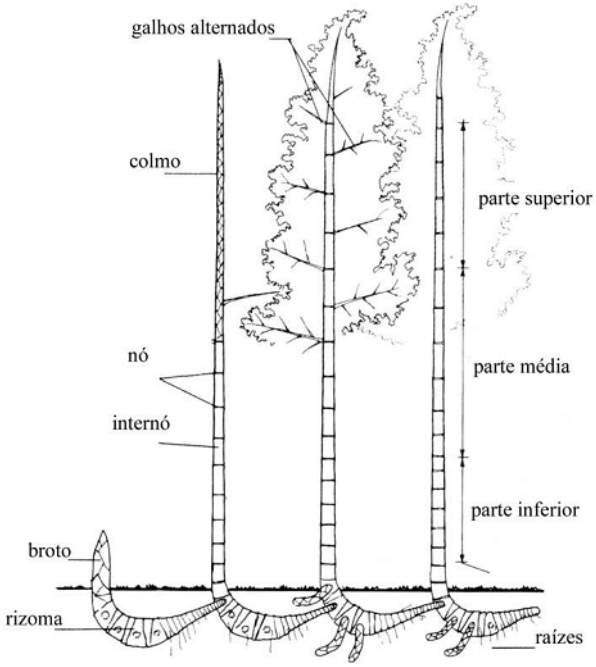
Figura 2.11 – Aumento do comprimento entrenodal da parte basal para parte intermediária do colmo.



Fonte: Autor (2012).

Na Figura 2.12 expõem-se as principais partes do colmo de bambu com o seu crescimento.

Figura 2.12 – Partes do colmo de bambu.



Fonte: Hidalgo López (2003).

Alguns colmos possuem poucos centímetros de altura e poucos milímetros de diâmetro; outros, porém, podem alcançar até 40 m de altura e 30 cm de diâmetro (GHAVAMI; MARINHO, 2003). Tais características dos colmos, variáveis de acordo com a espécie de bambu, fornecem subsídios para o processo de laminação do colmo de bambu.

Da mesma forma que as folhas, os colmos têm a capacidade de realizar a fotossíntese, contudo esta não é sua função principal (que é a de conferir sustentação a planta por meio das fibras componentes da seção transversal do colmo).

Segundo Castro e Silva (2005), sob o aspecto agronômico, o colmo é a parte mais importante do bambu em relação à demanda: na construção civil, na fabricação de diversos utensílios (papel, tecido, móveis) e em outras aplicações. Portanto, a partir das características requeridas do colmo, se escolhe a espécie a ser cultivada para fins comerciais. Por exemplo, bambus utilizados na construção civil devem ser retilíneos, possuir maior diâmetro e baixo teor de amido, mas se a finalidade for à produção de álcool, dever-se-ia escolher bambus com maior concentração de amido em seus colmos. Assim, o conhecimento adequado do colmo fornece subsídio para seleção e utilização adequada dos bambus.

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

> O bambu é um compósito polimérico, anisotrópico, com diferentes propriedades mecânicas em diferentes direções e não homogêneo, não tendo a mesma composição, estrutura ou características em todo seu volume. A principal fonte de propriedades mecânicas do bambu é a celulose. Na molécula de celulose são definidos três planos mutuamente ortogonais. Estas moléculas são mantidas juntas no primeiro plano por fortes ligações de hidrogênio, no segundo plano por fracas ligações de Van Der Waals e no terceiro por fortes ligações covalentes. (SÁNCHEZ CRUZ, 2002, p.35-36).

Segundo Liese (1987), os principais componentes dos colmos de bambu são a celulose, a hemicelulose e a lignina e, em minoria, constituintes como resinas, tanino e sais inorgânicos. A composição química varia em função da espécie, das condições de crescimento, da idade do bambu e da parte do colmo analisada.

Segundo Berndsen (2008), a composição química do bambu é semelhante às das madeiras de alta densidade, com exceção para as que contêm alto extrato alcalino, cinzas e sílica. Na Tabela 2.2 são apresentadas as porcentagens dos elementos químicos constituintes do bambu.

Tabela 2.2 – Composição química do bambu.

Componentes	% em massa
Carbono	50
Oxigênio	43
Hidrogênio	6,1
Nitrogênio	0,04 – 0,26
Cinzas	0,2 – 0,6

Fonte: Berndsen (2008).

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

2.3.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica é uma propriedade física que influencia nas propriedades mecânicas do bambu sendo essa afetada pela idade, posição da amostra no colmo, condições de crescimento (fatores climáticos, tipo de solo, posição geográfica), teor de umidade e espécie de bambu.

Segundo Lee, Xuesong e Perry (1994), a massa específica do bambu varia de 0,50 a 0,79 g/cm³. De acordo com Oliveira (2006), a densidade aparente (a 12% de umidade) do bambu laminado colado da espécie *Dendrocalamus giganteus* varia entre 0,68 e 0,76 g/cm³. Estes valores corroboram aos encontrados por Rivero (2003), que se situou na faixa de 0,58 a 0,79 g/cm³ e aos de Garbino, Gonçalves e Pereira (2002), com valores da ordem de 0,57 a 0,75 g/cm³. No entanto, tais valores foram inferiores obtidos por Ghavami (1992) e Rivero (2003) para taliscas de bambu usinadas, que foram da ordem de 0,80 g/cm³ e 0,88 g/cm³, respectivamente.

2.3.2 TEOR DE UMIDADE

Segundo Rivero (2003), assim como a madeira, o bambu contém quantidades variáveis de água ao longo do seu processo de preparação para aplicação; logo após o corte, a porcentagem de água é bastante elevada. A umidade tende sempre a diminuir até certo limite até atingir o equilíbrio entre a umidade do bambu e o grau higrométrico do meio ambiente. Desta forma, segundo Berndsen (2008), o teor de umidade do bambu varia de acordo com a idade, posição e época do corte. Em geral, os colmos mais velhos possuem um teor de umidade menor que os mais novos. Além disso, o teor de umidade diminui gradativamente da base para o topo e da parte externa para a interna do colmo.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), o teor de umidade é definido como a porcentagem entre a massa de água contida no bambu pela massa do bambu seco. O teor de umidade é um fator importante que influencia nas propriedades mecânicas do bambu, pois quando o teor de umidade aumenta, o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, tração, cisalhamento e flexão paralela às fibras, diminuem (BERNDSEN, 2008).

> A água contida no bambu pode ser dividida em água livre e água de cristalização. A água livre ou água de capilaridade é localizada nos vasos, meatos, canais e lúmen das células. Teoricamente, este tipo de água pode ser facilmente retirado. A água

> passa de uma célula para outra até atingir a superfície externa da madeira. Já a água de adesão ou higroscópica é localizada no interior das paredes celulares. Este tipo de água mantém-se unida às microfibrilas das paredes das células em estado de vapor. A retirada deste tipo de água é mais difícil e o processo geralmente é mais lento sendo necessária a utilização de energia neste processo. Quando o bambu perde umidade primeiramente é evaporada toda a água livre e depois a água de cristalização. Esta transição é chamada de ponto de saturação das fibras (PSF). (BERNDSEN, 2008, p.27).

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

2.3.3 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

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

> Normalmente, a taxa de retração do bambu é menor que a da madeira, porém existe uma variação considerável entre as direções do bambu (radial, tangencial e longitudinal). A taxa de retração é mais alta na direção tangencial da parte externa dos colmos e depois na direção radial e tangencial da parte interna, e por último para o sentido transversal. O bambu seco em câmara de secagem possui uma taxa de retração menor em relação ao mesmo seco ao ar. (BERNDSEN, 2008, p.30).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

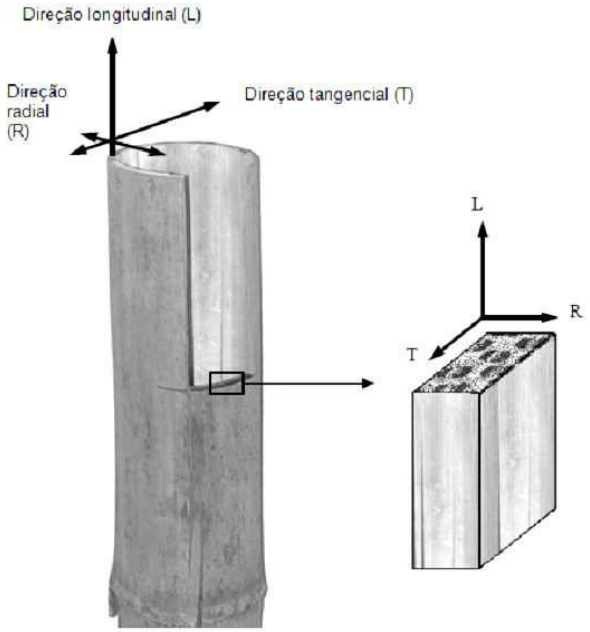
O bambu é um material natural e como tal existem diversos fatores que influenciam suas características mecânicas. De forma semelhante à madeira, tais características variam com a espécie, idade da planta e tempo de corte. Mesmo para uma dada espécie de bambu, a variação nas propriedades mecânica é considerável, devido à influência de fatores que fogem ao controle do homem (solo do bambuzal, condições climáticas, teor de umidade das amostras), mas isto pode ser controlado e assim produzir bambu com um mínimo de variação na sua resistência. Mesmo desta forma, a idade e a espécie devem ser consideradas como variáveis na determinação das suas propriedades, sendo, segundo Nogueira (2008), uma

suposição geral dizer que o bambu maduro, com idade entre três e cinco anos apresente sua máxima resistência mecânica.

> Para uso estrutural, ou quando se necessitam de colmos com maior resistência mecânica, deve-se cortá-los com, mínimo, três anos, devido ao amadurecimento de seus tecidos constituintes. A maior resistência mecânica dos colmos de bambu ocorre entre os três e os sete anos, que é o seu período de vida útil antes que comece a secar na touceira. (PEREIRA; BERALDO, 2008, p.86).

Além disso, sendo o bambu um material anisotrópico (especificamente ortotrópico), possui propriedades mecânicas particulares nas três direções: longitudinal, tangencial e radial (Figura 2.13).

Figura 2.13 – Eixos ortogonais do bambu.



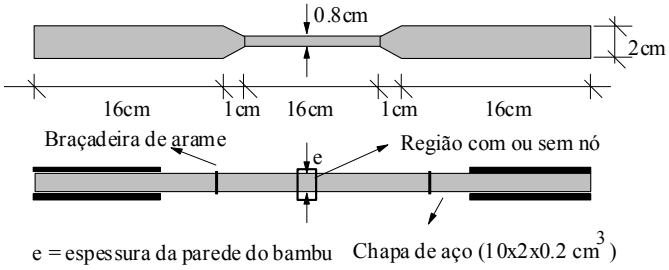
Fonte: Ahmad (2000).

2.4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Segundo Lima Jr. et alii (2000), a grande dificuldade na realização do ensaio à tração do bambu consiste na idealização do corpo de prova. Isto se deve devido às baixas resistências à compressão transversal e ao cisalhamento paralelo as fibras deste material. Assim, quando solicitado em uma máquina de ensaio, o corpo de prova não rompe à tração pura e sim por esmagamento ou cisalhamento do trecho fixo à garra. Após alguns testes de corpos de prova concluiu-se que era necessária a colocação de um reforço no trecho de fixação à garra da máquina, como sugerido em Ghavami (1989). Lima Jr. et alii (2000) ensaiaram 100 corpos de prova dos colmos, sendo 50% da região internodal e 50% com a presença do nó na seção central de bambu da espécie *Dendrocalamusgiganteus* proveniente de Cascavel - PR. Na Figura 2.14 apresentam-se as características do corpo de prova

utilizado. A tensão média de ruptura à tração foi de 277,19 e 97,51 MPa, para região sem nó e com nó, respectivamente. E o módulo de elasticidade à tração foi de 23,75 e 13,14 GPa, sem e com nó, respectivamente.

Figura 2.14 – Características dos corpos de prova de tração.



Fonte: Lima Jr. (2000).

Além de Lima Jr. et alii (2000), Culzoni (1986) avaliou as propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* provenientes do Rio de Janeiro e obteve os resultados para resistência a tração de corpos de prova com e sem nó de 106,2 e 214,1 MPa, respectivamente. Ghavami e Toledo Filho (1992) estudaram a mesma espécie de bambu proveniente da Paraíba e obtiveram a resistência à tração de 110,4 e 135,0 MPa para corpos de prova com nó e sem nó, respectivamente. Deste modo, com base nestes estudos, percebe-se que a resistência à tração, assim como outras propriedades mecânicas, varia em função do clima e solo, entre outros fatores.

Ghavami e Marinho (2001) determinaram o módulo de elasticidade longitudinal à tração para diferentes partes do colmo (topo, parte intermediária e base), utilizando corpos de prova sem nó, com nó e com nó lixado (nivelado). Na Tabela 2.3 estão expostos os resultados obtidos, onde o valor médio do módulo de elasticidade foi de 17,49 GPa. Já Culzoni (1986) obteve módulo de elasticidade de 11,75 GPa e 14,5 GPa para o bambu *Dendrocalamus giganteus* com e sem nó, respectivamente.

Tabela 2.3 – Resistência à tração e módulo de elasticidade do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Região do colmo de bambu	**Resistência à tração (MPa)**			**Módulo de elasticidade (GPa)**
	Mínimo	**Máximo**	**Médio**	
Topo sem nó	129,45	160,49	147,16	-
Topo com nó lixado	76,31	119,25	119,00	18,31
Topo com nó não lixado	102,05	129,95	116,32	-
Intermediário sem nó	142,59	245,36	224,08	-
Intermediário com nó lixado	156,25	184,31	170,28	20,76
Intermediário com nó não lixado	96,11	134,61	118,83	-
Base sem nó	140,12	178,57	159,35	23,12
Base com nó lixado	101,37	117,49	109,43	13,61
Base com nó não lixado	62,55	74,35	73,14	11,66
Média	111,87	149,37	137,51	17,49

Fonte: Ghavami e Marinho (2001).

Ghavami e Marinho (2005) determinaram as resistências à tração, compressão e cisalhamento interlaminar das partes basais, centrais e superiores (topo) do bambu *Guadua angustifolia*. Para cada parte acima citada, foram ensaiados três corpos de prova sem nó e três com nó. Observou-se que o bambu atinge uma resistência média à tração de 86,96 MPa. No geral, a parte central apresenta maior resistência: 95,80 MPa no corpo de prova sem nó e 82,62 MPa no corpo de prova com nó. A região do topo, sem nó, apresentou maior valor da resistência à tração, 115,84 MPa; porém no corpo de prova com nó se obteve menor resistência, 64,26 MPa. O módulo de elasticidade longitudinal às fibras variou de 11,10 GPa a 18,36 GPa, com valor médio de 15,11 GPa. O coeficiente de Poisson médio na região sem nó foi de 0,26, aumentando da base para o topo.

Culzoni (1986) avaliou as propriedades mecânicas do bambu da espécie *Guadua superba* e conseguiu valores de resistência à tração de 112,3 MPa e módulo de elasticidade de 8,9 GPa, no corpo de prova com nó; e, no corpo de prova sem nó, obteve uma resistência à tração de 137,8 MPa e módulo de elasticidade de 11,2 GPa.

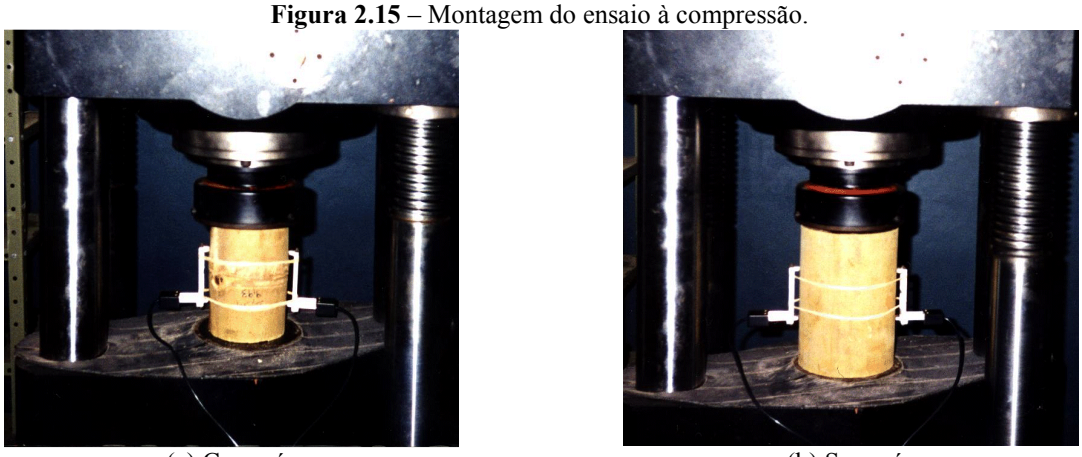
Navarro (2002) obteve os seguintes valores de resistência à tração para região internodal e nodal, 245,56 e 135,11 MPa, respectivamente, sendo os corpos de prova, preparados com tiras de bambu, de 20,0 cm de comprimento, 1,0 cm de largura, e espessura equivalente a parede do colmo onde se retirou a amostra.

Berndsen (2008), utilizando bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, obteve para a tensão de ruptura à tração um valor máximo de 198,15 MPa no meio dos colmos de três anos e um valor mínimo de 146,86 MPa na base dos colmos de 1 ano de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos, iguais a 181,53; 181,20 e 180,70 MPa, respectivamente.

2.4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Para o ensaio à compressão paralela às fibras, Lima Jr. et alii (2000) confeccionaram 20 corpos de prova da região internodal e 20 da região nodal, do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Na Figura 2.15 apresenta-se a montagem do ensaio de compressão. Os autores referenciados obtiveram resistências à compressão e módulos de elasticidade de 56,65 MPa e 20,50 GPa, além de 57,99 MPa e 21,88 GPa, para os corpos de prova sem e com nó, respectivamente.

Figura 2.15 – Montagem do ensaio à compressão.



(a) Com nó. (b) Sem nó.

Fonte: Lima Jr. (2000).

Ghavami e Marinho (2005) obtiveram a resistência média à compressão de 29,48 MPa para espécie *Guadua angustifolia*, aumentando da base para o topo. O valor máximo de resistência à compressão ocorreu na parte do topo, sendo igual a 34,52 MPa para o corpo de prova sem nó, e de 29,62 MPa para o espécime com nó. A média do módulo de elasticidade longitudinal às fibras foi de 12,58 GPa, variando de 9,00 GPa na base a 15,80 GPa na região do topo, ambos em corpos de prova com nó. O coeficiente de Poisson médio obtido no ensaio de resistência à compressão foi de 0,34.

Culzoni (1986) determinou a resistência à compressão do bambu *Guadua superba* em corpos de prova com altura igual a duas vezes o diâmetro e obteve valores de 35,7 MPa e módulo de elasticidade de 2,60 GPa, em corpos de prova com nó; e resistência de 47,8 MPa e módulo de elasticidade de 3,33 GPa, em corpos-de-prova sem nó.

Berndsen (2008), utilizando bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, obteve o valor máximo do módulo de elasticidade à compressão igual a 4.922 MPa no topo dos colmos de 5 anos e o valor mínimo de 3.493 MPa na base dos colmos de um ano de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos iguais a 3.634,37; 4.272,30 e 4.132,99 MPa, respectivamente. Para a tensão de ruptura à compressão obtiveram-se um valor máximo de 48,36 MPa no topo dos colmos de cinco anos e um valor mínimo de 30,17 MPa na base dos colmos de 1 ano de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos iguais a 35,34; 41,70 e 40,94 MPa, respectivamente.

2.4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

Ghavami e Marinho (2005) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento do bambu da espécie *Guadua angustifolia*, sendo os valores obtidos a partir da média de três

ensaios. Observou-se que os valores aumentaram da base para o topo, sendo que no topo a resistência ao cisalhamento foi de 2,42 MPa para o corpo de prova sem nó e 2,11 MPa para o corpo de prova com nó. Na base, esses valores foram 2,20 MPa na região sem nó e 1,67 MPa quando da presença de nó.

Ghavami e Marinho (2001) obtiveram valores médios de 3,56 MPa e 3,37 MPa para corpos de prova com e sem nó, respectivamente. Moreira (1991) obteve uma tensão de cisalhamento média de 7,0 MPa para o bambu *Dendrocalamus giganteus*. Já Ghavami e Souza (2000) obtiveram valores de tensão de cisalhamento de 3,08 e 3,12 MPa para corpos de prova com dois e três cortes, respectivamente, para espécie *Guadua angustifolia*.

Lima Jr. e Dias (2001) realizaram ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, em 10 espécimes. Os corpos-de-prova foram constituídos por 5 (cinco) lâminas de bambu com 1 cm de espessura cada, coladas uma às outras, por adesivo à base de resorcinol-formol; esses corpos apresentavam dimensões de 6,4 x 5,0 x 3,0 cm. A resistência média de cisalhamento com o respectivo desvio-padrão foi de 7,81 e 1,06 MPa, respectivamente.

2.4.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Berndsen (2008) realizou ensaios para determinação das propriedades mecânicas, utilizando bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*. Obteve o valor máximo do módulo de elasticidade à flexão igual 15.090 MPa no topo dos colmos de 5 anos e o valor mínimo de 11.208 MPa na base dos colmos de um ano de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos, iguais a 12.990,63; 13.618,44 e 14.554,73 MPa, respectivamente. Para a tensão de ruptura à flexão, obtiveram-se um valor máximo de 182,87 MPa no topo dos colmos de cinco anos e um valor mínimo de 145,28 MPa na base dos colmos de 3 anos de idade. Sendo os valores médios para as idades de 1, 3 e 5 anos iguais a 159,59; 166,11 e 176,41 MPa, respectivamente.

2.5 CARACTERÍSTICAS DA ESPÉCIE DENDROCALAMUS GIGANTEUS

Segundo Nogueira (2008), existem vários tipos de bambu que compreendem desde espécies de tamanho reduzido de 10 cm a 3 m de altura com diâmetros de 0,5 a 5,0 cm até espécies gigantes que podem atingir cerca de 40 metros de altura com diâmetros que variam de 10 a 30 cm. As espécies mais conhecidas de bambu no Brasil são de origem asiática, trazidas pelos primeiros colonizadores, as quais se adaptaram bem ao clima tropical brasileiro

e se expandiram rapidamente. Os gêneros mais comuns são: *Bambusa*, *Dendrocalamus* e *Phyllostachys*.

Para uso em edificações geralmente utilizam-se bambus resistentes de médio à grande porte podendo-se citar o *Phyllostachys sp.*, *Guadua sp.*, *B. tuldoides* e *D. giganteus*. Existem inúmeras espécies de bambu que apresentam variações em relação: à altura, ao diâmetro, à espessura das paredes dos colmos e ao espaçamento internodal. Tais características influenciam o comportamento mecânico do bambu, devendo ser observadas ao empregá-lo como material de construção.

Segundo Nascimento (1990), o *Dendrocalamus giganteus* pode atingir até 36 m de altura e 25 cm de diâmetro a 1 metro do solo. Notam-se três fases de crescimento distintas: a primeira é de crescimento até 5 metros de altura, quando o colmo pode chegar a crescer 10 cm em 24 h; a segunda fase de 5 até 15 metros de altura, com crescimento médio de 30 cm em 24 h; e a última fase vai de 15 a 25 metros de altura e seu crescimento é de 15 cm em 24 h. A partir desse ponto o crescimento é lento. Além disso, as condições atmosféricas, principalmente as chuvas, influenciam substancialmente na espécie.

Desta forma, para realização deste trabalho, foi escolhida a espécie *Dendrocalamus giganteus* (bambu gigante) em função de suas propriedades físico-mecânicas e facilidade de obtenção, além das seguintes características que indicam o seu potencial para ser utilizado como material de construção a ser explorado pela engenharia:

- colmos com grandes dimensões, com valores médios de 20 a 30 m;
- diâmetro entre 20 e 30 cm;
- grande espessura da parede dos colmos em relação as demais espécies, variando de 1 cm a 3 cm;
- grande comprimento da região internodal, variando entre 30 cm a 50 cm;
- aproveitamento quase total do colmo, pois pode ser empregado na produção de papel, brotos, móveis, laminados, construção civil, artesanato e outros usos.

A espessura da parede de colmo é importante para o processo de manufatura das ripas, especialmente para esse trabalho, pois constitui característica essencial para fabricação do bambu laminado colado.

Adicionalmente, a espécie *Dendrocalamus giganteus* é muito utilizada em construções; na produção de laminado colado e na fabricação de polpa, papel, utensílios domésticos e alimento.

2.6 TRATAMENTO PRESERVATIVO DOS COLMOS

Assim como a madeira, o bambu sofre ataque de elementos físicos, químicos e biológicos, que o deterioram. Devido ao seu elevado teor de açúcares, hidratos de carbono, resinas e amido, o bambu é deteriorado por insetos, bactérias e fungos. A parte das células denominadas parênquimas possui como fonte de reserva, polímeros de amido que indicam a intensidade do ataque sob planta pelo inseto popularmente conhecido como caruncho, a broca do bambu (Figura 2.16). Assim, o nível de ataque do colmo de bambu está diretamente relacionado ao seu teor de amido, o qual dependente da anatomia do bambu.

Figura 2.16 – Detalhes do ataque biológico ao bambu.

(a) Broca do bambu. (b) Carunho dentro do bambu. (c) Grãos de amido nas células dos parênquimas dos colmos de bambu.

Fonte: Liese (1998).

Outro fator determina ao ataque sob os bambus é a idade do colmo. Bambus muito jovens, por ainda não apresentarem amido nas células do parênquima, não sofrem o ataque do caruncho. Nos colmos maduros, com idade superior a três anos ocorre um espessamento das paredes das células e a deposição de amido acentua-se.

Deve-se ter atenção especial a durabilidade das construções de bambu, para tal necessita-se realizar tratamento adequado dos colmos de bambu, de forma a preservar os elementos constituintes da edificação fabricados com esse material. Primeiramente, evitando-se que o material tenha contato com a umidade proveniente da chuva ou do solo.

Conforme Pereira e Beraldo (2008), existem métodos tradicionais e químicos para o tratamento do bambu. Nos métodos tradicionais não se utilizam meios de proteção química e apresentam custo relativamente baixo, no entanto, têm baixa eficiência em relação aos tratamentos químicos. Estes, em geral, protegem o colmo do ataque do caruncho e elevam a durabilidade dos colmos em contato com o solo.

Os tratamentos tradicionais subdividem-se em: maturação ou cura no local da colheita, cura pó imersão, cura pela ação do fogo, cura pela ação da fumaça.

Os produtos químicos preservativos devem combater os organismos xilófagos sem apresentar toxidade ao homem e aos animais. No tratamento químico, os produtos utilizados devem penetrar profundamente no material a ser tratado, não devendo evaporar e nem serem eliminados pelas águas pluviais ou pela umidade do solo (lixiviação). Os tratamentos químicos são subdivididos em: oleosos, oleossolúveis, hidrossolúveis, imersão em solução de sais hidrossolúveis e substituição de seiva por sais hidrossolúveis (PEREIRA; BERALDO, 2008).

2.7 UTILIZAÇÃO E APLICAÇÕES

A cultura de aplicação do bambu sempre esteve presente na vida diária do homem primitivo de todos os continentes excetuando-se a Europa que não apresentava o bambu na forma nativa.

> O uso do bambu no oriente remonta há quase cinco mil anos e há mais de quinhentos anos na América do Sul. Na cultura chinesa, o bambu é símbolo de amabilidade, modéstia e serenidade, no Vietnã é tido como um irmão, e na Índia como ouro verde. Nos tempos mais remotos o bambu era empregado na fabricação de arcos e flechas, habitações, utensílios domésticos, embarcações e outros. Mais tarde o bambu foi matéria prima na construção da primeira lâmpada, avião e bicicleta. Nos dias atuais os colmos e folhas do bambu são largamente empregados na produção de papel, desinfetantes, baterias, tecidos, cervejas e outra centena de usos. (CASTRO E SILVA, 2005, p.13-14).

Farrelly (1996) relata "as mil aplicações do bambu". De forma semelhante, Cardoso Júnior (2008), Pimentel (1997) e Castro e Silva (2005) destacam as principais aplicações do bambu e as comenta, conforme se seguem.

Álcool, amido e papel

Produzidos de forma extensiva com aproveitamento do corte de talos de todas as idades, a espécie *Bambusa vulgaris* é a mais utilizada no Brasil, principalmente no Nordeste brasileiro.

As espécies de madeira dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* constituem como a matéria prima de maior quantidade para fornecimento de fibras para a produção de celulose no Brasil. Os *Pinus sp* constituem importante fonte de fibra longa para produção de celulose, entretanto tais espécies apresentam crescimento lento quando comparadas ao bambu. Adicionalmente, considerando-se os aspectos agronômicos, o bambu apresenta maior facilidade de cultivo e adaptação a solos marginais e maior amplitude climática quando comparado com as duas espécies de madeira acima citadas.

Alimento

Muitas são as espécies de bambus que podem ser utilizadas como alimento para o ser humano. No entanto, no Brasil, as espécies mais utilizadas para este fim pertencem aos gêneros *Phyllostachys* e *Dendrocalamus*, cuja brotação no Estado de São Paulo ocorre entre setembro-novembro e janeiro-março, respectivamente. O processo de produção de brotos de bambu para alimentação (Figura 2.17) é bastante simples e se assemelha com processo produtivo do palmito.

Figura 2.17 – Brotos comestíveis de bambu.

(a) Broto de bambu in natura. (b) Broto de bambu industrializado.

Fonte: Pereira e Beraldo (2008).

Aumento de água de nascentes

Esta aplicação é devida a capacidade de retenção das raízes ou rizomas das espécies de bambu.

Cerca viva

Formada por touceiras, que delimitam formal e visualmente a propriedade rural.

Cercas

São de grande valia em propriedades rurais, sendo fabricadas a partir de hastes, das espécies nativas, tendo a função de delimitar o território do agricultor.

Cestos e esteiras

Confeccionados pelo trabalho artesanal, sendo o beneficiamento do material realizado através do manuseio de espécies disponíveis, como por exemplo: *Bambusa tuldoides*, *Phyllostachys* e *Bambusa vulgaris*.

Combate à erosão

Com o plantio em encostas íngremes que apresentam solos suscetíveis a erosão, sendo cultivadas espécies de grande crescimento.

Drenagem de terrenos

Com a construção de sistemas de redes de drenagem de água duráveis e de fácil manutenção.

Embarcações

Fabricadas em feixes de hastes, utilizando a capacidade de flutuação e sustentação na água, conferida pelos vazios presentes em todas as espécies, principalmente as de grandes dimensões.

Encanamentos

Para os mais diversos fins. Almeida Neto (1992) estudou alguns parâmetros hidráulicos, necessários ao projeto de uma rede hidráulica.

Instrumentos musicais

> O Bambu é muito utilizado na fabricação de instrumentos musicais, principalmente nos continentes africano e asiático, onde muitos instrumentos tradicionais milenares são feitos com esse material. […] Dentre os mais conhecidos instrumentos de bambu temos as flautas, entre elas as da Região da Cordilheira dos Andes conhecidas como soponhas ou flautas de Pan. No Brasil existem as flautas de pífanos, muito populares principalmente no Sertão nordestino, feitas com um bambu cujos entrenós são mais longos, facilitando a construção da flauta. (MELO, 2004, p.4).

Irrigação

Apresentando características similares às apresentadas para a drenagem de terrenos, sendo utilizado na construção de redes de irrigação, suportando grandes níveis de pressão nas tubulações.

Medicina natural

Aplicado como febrífugo, anti-hemorrágico, calmante e em problemas digestivos. Por meio do uso do broto em sucos e em cozidos de *Bambusa vulgaris*.

Móveis

O bambu roliço ou laminado se constitui numa excelente alternativa à madeira na fabricação de móveis. Utilizam-se hastes de vários diâmetros e com inúmeras operações de beneficiamento para fabricação de sofás, cadeiras, mesas, estantes, usando espécies como as *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris* e *Dendrocalamus giganteus*. O bambu adequa-se facilmente a colagem, ao acabamento com lixa e verniz, podendo ser utilizado na forma natural (cilíndrica) ou plana, quando desdobrado. Na Figura 2.18 são apresentados exemplos de mobília com bambu roliço. Na Ásia há uma intensa produção de móveis de bambu destinado ao mercado interno e externo. Para tanto, os artesãos deste continente dominam técnicas de fabricação que qualifica tais produtos, sendo estes móveis de primeira categoria,

quando comparados a móveis fabricados a partir das mais nobres madeiras, as quais sentem os impactos do desmatamento.

Figura 2.18 – Móveis de bambu.

(a) Mesa de cabeceira (*Phyllostachysnigra*).

(b) Mesa e cadeiras (*Phyllostachys aurea*).

Fonte: Pereira e Beraldo (2008).

Objetos de adornos

Em uso na fabricação de bijuterias e adereços por meio de trabalho manual. Estes objetos que são feitos no Brasil ainda não apresentam o nível de qualidade das joias de bambu feitas no Oriente, de grande beleza, utilizando principalmente a espécie *Cephalostachys pergracile*, não encontrada na América.

Ornamentação e paisagismo

São utilizadas espécies cuja touceira apresenta qualidades estéticas apreciadas, como *Thyrsostachys siamensis*, *Phyllostachys nigra* e *Bambusa gracilis,* dentre outras.

Quebra ventos

Utilizando as touceiras ao natural, as quais formam uma barreira natural ao vento.

Varas de pesca

Cuja produção talvez seja a mais habitual das atividades industriais que tem o bambu como matéria prima no Brasil, utilizando *Phyllostachys* e *Bambusa tuldoides*.

Estradas

O uso do bambu às margens de estradas e/ou rodovias associa-se: à substituição das barreiras de concreto ou metal visando à retenção e absorção dos impactos dos veículos em situações de acidentes; visualização e sinalização de curvas; e paisagismo. As vantagens do bambu nesta circunstância estão relacionadas com o menor custo de implantação e a recuperação de forma natural da barreira quando danificada, além da maior absorção dos impactos em ocorrência de acidentes; proteção de taludes contra a erosão ou deslizamentos,

pois o bambu possui raízes fasciculadas e robustos rizomas que conferem estruturação ao solo evitando a sua desagregação.

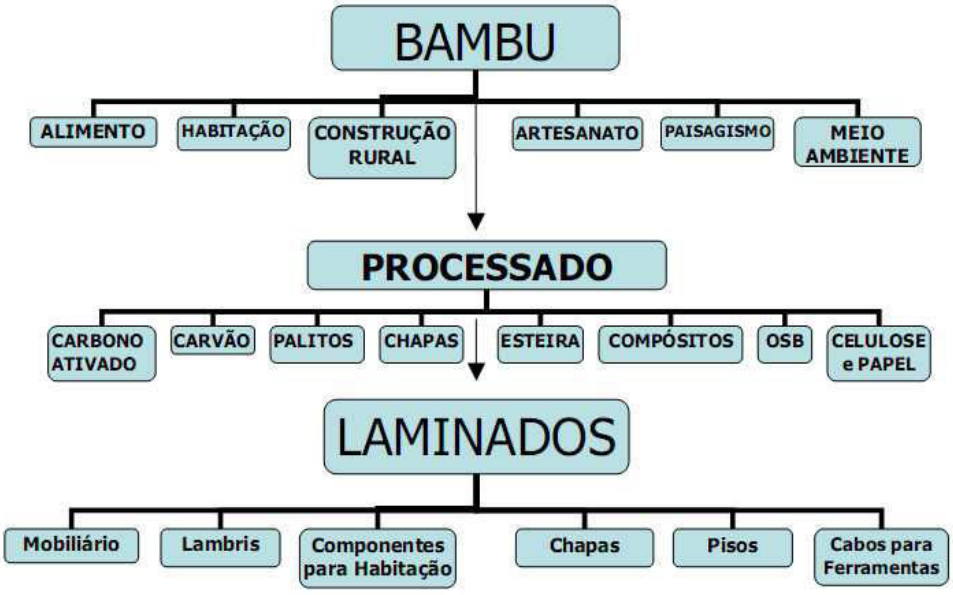
As barreiras de bambu requerem manutenção periódica que deverá ser realizada cortando colmos velhos e podando as ramificações baixeiras com a finalidade de evitar incêndios. Vale salientar, que não é recomendada a utilização de bambus com rizomas alastrantes nas laterais das rodovias devido a sua capacidade de se reproduzir, resultando em um potencial invasor a estrada.

Carvão

> O bambu como biomassa para a geração de energia tem um grande potencial tanto na forma de lenha como para a produção de carvão. O poder calorífico do carvão de bambu não difere muito do eucalipto que é a matéria prima de referência para este fim. O carvão de bambu apresenta uma grande vantagem em relação ao de qualquer outra lenhosa quando destinado à produção de carvão ativado. Tal vantagem diz respeito ao fato do carvão do bambu apresentar aproximadamente o dobro da área de superfície do carvão proveniente das outras matérias primas. (CASTRO E SILVA, 2005, p.18-19).

Desta forma, o bambu constitui um excelente recurso natural para a produção de diversos produtos (papel, alimento, tecidos, objetos domésticos, instrumentos musicais, ferramentas, carvão, combustível, avião, pisos, forros, chapas, embarcações, instrumentos agrícolas, plantação para controle de erosão, barreira de vento, mata ciliar, decoração, sequestrador de carbono, casas, andaimes, roda d'água, cordas, bicicleta, pontes, artesanato). Na Figura 2.19 visualizam-se as diversas possibilidades da utilização do bambu, tanto em natura como após processado e industrializado.

Figura 2.19 – Organograma da utilização do bambu.



Fonte: Pereira e Beraldo (2008).

A seguir destaca-se a aplicação das estruturas de bambu na construção civil.

2.7.1 USOS DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como aspecto principal deste estudo tem-se a aplicação do bambu como material de construção, pois ainda hoje no Brasil (diferentemente de outros países como: Colômbia, China, Índia, Indonésia dentre outros) há uma resistência em relação à utilização do bambu na construção civil derivada talvez da falta de conhecimento das excelentes propriedades deste material ou da ausência de códigos normativos brasileiros. Assim, as informações que serão relatadas a seguir têm por objetivo expor que o bambu constitui um material de construção amplamente utilizado nas mais diversas obras de engenharia.

> […] como componentes construtivos, as lajes, vigas, pilares, treliças e tesouras de bambu oferecem uma boa possibilidade para estrutura de edificações como: casas, escolas, galpões, comércios, entre outros. Devido à sua elevada razão resistência/peso, componentes construtivos de bambu oferecem importantes vantagens para tais estruturas, que podem ser pré-fabricadas e aplicadas posteriormente à obra. (PEIXOTO, 2008, p. 67).

Segundo Sánchez Cruz (2002), pesquisas científicas isoladas visando à aplicação do bambu na engenharia datam de 1914 na China e Estados Unidos e, posteriormente desenvolveram-se na Alemanha, Japão, Índia, Filipinas e outros países. No Brasil, os primeiros estudos científicos relativos ao bambu tiveram início em 1979, no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. A partir de então foram desenvolvidos vários programas de investigação do uso do bambu e fibras naturais (coco, sisal, piaçava e polpa celulósica de bambu) como matérias de custo reduzido, empregadas na construção, principalmente em substituição ao aço em estruturas de concreto e em estruturas espaciais (GHAVAMI, 1995). As espécies mais indicadas para a construção civil são as seguintes: *Dendrocalamus giganteus*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa tulda* e *Phyllostachys* (PIMENTEL, 1997).

Uma das grandes utilizações do bambu é nas construções de casas populares. Segundo Pimentel (1997), esta aplicação apresenta grande importância na solução de problemas de déficit habitacional, pois o bambu pode ser aplicado na execução de elementos construtivos, tais como painéis de fechamento, tetos, forros, esquadrias; até mesmo elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, dentre outros). Além desta aplicação, relatam-se a utilização do bambu em estruturas mais complexas como em pontes, onde as técnicas aplicadas podem ser realizadas com relativa simplicidade usando a *Guadua* e *Dendrocalamus giganteus* (PIMENTEL, 1997), conforme pode ser visto na Figura 2.21.

Sánchez Cruz (2002) cita algumas obras executadas utilizando bambu, a saber: o Memorial da Cultura Indígena em Campo Grande-MS, inaugurado em Setembro de 1999

(Figura 2.20a); casa construída inteiramente de bambu, apresentada no Casa Show de Itanhangá-RJ (Figura 2.20b); pontes de bambu, construídas na Alemanha e na Colômbia (Figura 2.21); Catedral construída em bambu na Colômbia (Figura 2.22).

Figura 2.20 – Construções em bambu.

(a)Interior do Memorial Indígena em Campo Grande-MS.

(b) Casa de bambu em Itanhangá-RJ.

Fonte: Sánchez Cruz (2002).

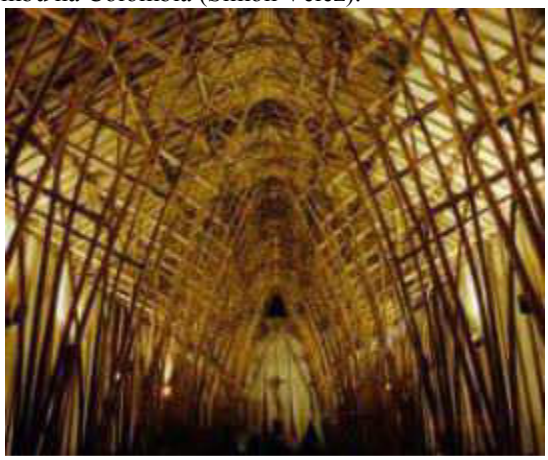
Figura 2.21 – Pontes de bambu.

(a) Ponte de bambu em Stuttgart na Alemanha. Fonte: Sánchez Cruz (2002).

(b) Ponte Simon Velez.Fonte: Pereira e Beraldo (2008), foto de J. Stamm.

Figura 2.22 – Catedral construída em bambu na Colômbia (Simon Velez).

(a) Vista frontal.



(b) Vista interna.

Fonte: Sánchez Cruz (2002).

Segundo Manhães (2008), em Aracajú-SE existe uma iniciativa através do Instituto Comunitário de Desenvolvimento Sustentável (Incomum) em parceria com a Petrobrás, através do Programa Habitação Social com bambu, conforme ilustrado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Casa executada com bambu.

(a) Vista externa.

(b) Vista interna.

Fonte: Manhães (2008), fotos de Ricardo Nunes.

Na região do Baixo Sul baiano há diversos empreendimentos que utilizam o bambu como matéria prima na construção das estruturas das casas. O piso, esquadrias e móveis são fabricados com as sobras da obra (Figura 2.24). Comentam-se a respeito das vantagens dessa planta quando comparada a madeira:

> "Para construir uma casa grande, seria necessário derrubar uma pequena floresta com 130 árvores que demoraram mais de 30 anos para se desenvolver. Com o bambu a história é diferente: como a planta brota novamente após o corte, a medida de que a casa vai sendo construída uma nova planta está nascendo. O bambu cresce em média 23 cm por dia. Ao final da construção se tem uma nova árvore com 20 m cada." (PORTAL G1, 2012).

Estas casas são desenvolvidas a partir da técnica estabelecida pelo arquiteto colombiano Simon Velez, que consiste na combinação do colmo de bambu com argamassa de cimento o bambu.

Figura 2.24 – Casa construída com bambu no sul da Bahia.

(a) Vista externa.

(b) Vista da estrutura de sustentação na parte inferior da casa.

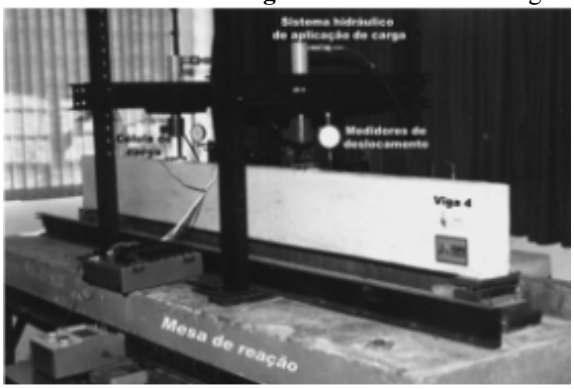
(c) Porta fabricada com sobras da obra.

(d) Móvel fabricado a partir do resíduo de construção.

Fonte: Portal G1 (2012).

Lima Jr. et alii (2005) apresenta e discute um estudo experimental sobre o comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com bambu. Foram ensaiadas dez vigas de concreto armado, sendo oito vigas armadas longitudinalmente com varas de bambu *Dendrocalamus giganteus* e duas vigas de referência armadas com barras de aço CA - 50 (Figura 2.25).

Figura 2.25 – Ensaio de vigas de concreto reforçadas com bambu.



(a) Detalhe do ensaio das vigas.

(b) Modo de colapso das vigas armadas com bambu.

Fonte: Lima Jr. et alii (2005).

2.8 BAMBU LAMINADO COLADO (BLC)

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

cravação de pinos e a execução de entalhes, tornando difícil o projeto de estruturas de maior porte que necessitem de emendas ou ligações.

Os laminados são produtos gerados a partir da composição de lâminas coladas, que após a cura da cola produzem produtos com diversas funções na engenharia estrutural. O objetivo de produzir o material compósito BLC é combinar materiais distintos para formar um novo material com propriedades superiores aos componentes primários.

As chapas de bambu são formadas pelo bambu processado em lâminas, lascas, ripas ou partículas de bambu (Figura 2.26). A união para formação das chapas é realizada por adesivos que, em geral, são à base de ureia formaldeído, ureia melamina formaldeído, fenol formaldeído, isocianato, cimentos e outros materiais. A seguir serão relatadas informações a respeito dos tipos de adesivos.

Figura 2.26 – Amostras de material empregado nos painéis.

(a) Lâminas. (b) Lascas. (c) Ripas. (d) Partículas.

Fonte: Moizés (2007).

De acordo com Qisheng e Shenxue[2] (2001 apud MOIZÉS 2007), os painéis de bambu são divididos conforme o material em:

- Tiras ou ripas de bambu (*Strips*);
- Lascas ou fatias finas de bambu (*Sliver*);
- Partículas (*Particles*).

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

- Painéis de tiras: compensado de bambu, bambu laminado colado e piso de madeira e bambu;
- Painéis de lascas: compensados de bambu rasgado, placas de cortinas de bambu, placas de laminados, esteiras e cortinas de bambu;
- Painéis de partículas: painéis de partículas;
- Painéis ou Chapas compostas de bambu: piso composto de madeira e bambu, chapa de lâminas de bambu e ripas de madeira, assoalho de bambu composto

[2]QISHENG, Z.; SHENXUE, J. **Bamboo Based Panels in China**. Forestry University, China: Bamboo Engineering Research Center Nanjing. 2001. p. 1-14.

de madeira, chapas de partículas de bambu reforçado, bambu sobre chapas de partículas, compensado de bambu folheado com lâmina de madeira.

Desta forma, os painéis de bambu estão classificados e divididos conforme o tamanho e o formato do material manufaturado a partir do bambu. Na literatura mundial são encontrados painéis com diferentes definições para cada aplicação; assim, as denominações têm um aspecto mutável a depender do país de origem. Essas derivações do bambu, geralmente são produzidas e comercializadas principalmente na China, Índia, Vietnã, Malásia, Indonésia, Taiwan e Filipinas.

Os painéis ou peças comumente encontrados nesses países são os seguintes: chapa de cortina de bambu (*bamboo curtain board*); chapa de esteira de bambu (b*amboo mat board*); esteira de Bambu (*bamboo mat*); bambu laminado colado (*bamboo laminated glued*); bambu laminado colado contraplacado (*bamboo laminated plybamboo*); pisos de bambu (*bamboo floor laminated board*); chapa de aglomerado de bambu (*bamboo fiber board*); chapa de partículas de bambu (*bamboo particle board*). Além desses, existe uma vasta variedade de painéis comercializados ou pesquisados nos países destacados previamente.

Conforme Rivero (2003), há pouco mais de vinte anos iniciou-se um processo de abertura política da China que resultou numa grande demanda por madeiras para utilização em obras civis. Como nos países orientais, há espécies de bambu de forma abundante, pois estes se desenvolvem em grandes áreas, iniciou-se um processo de incentivo à pesquisa com objetivo de desenvolver painéis utilizando o bambu.

> Os painéis mais utilizados e fabricados são: lâminas de bambu trançadas e sobrepostas que, neste trabalho, são denominadas contraplacado, painéis de partículas de bambu e painéis com lâminas de bambu serradas, aplainadas e coladas o laminado colado de bambu, mais conhecido na China como LBL (Laminated Bamboo Lumber). Esse material pode ser utilizado na fabricação de painéis divisórios, forros, pisos, molduras, esquadrias, móveis e revestimento. (RIVERO, 2003, p.14).

Desta forma, pode-se citar uma Indústria Oriental, cuja sede está situada na vila *Shitatamura* no Japão, que construiu uma casa em BLC (desde estruturas, paredes, pisos e o mobiliário), na cidade de *Tsubame* localizada na província de *Niigata*. Através da construção desta casa, observaram-se in loco os ataques de fungos, insetos e o efeito do conforto térmico do material. Verificaram-se melhorias no conforto térmico, pois durante o verão, o interior da casa apresenta temperatura mais baixa e, no inverno, a temperatura era mais alta (RIVERO, 2003). Na Figura 2.27 mostram-se fotos da casa construída em BLC.

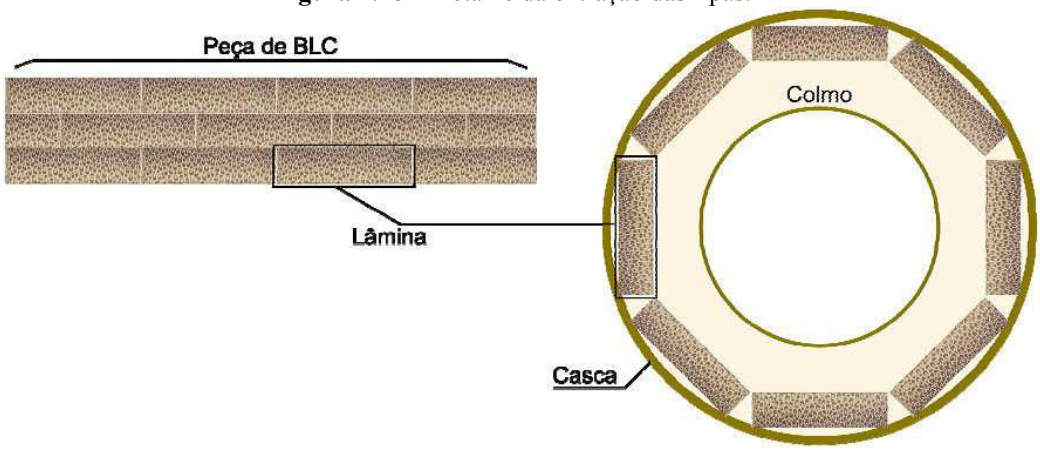
Figura 2.27 – Casa de BLC.

(a) (b)

Fonte: MATÉRIA BAMBU NO JAPÃO [3] (2002 apud RIVERO, 2003).

Segundo Moizés (2007), apesar de seu diâmetro reduzido, em relação às madeiras, o bambu pode alcançar padrões de chapas consideráveis em algumas aplicações. Assim, as ripas ou tiras para peças laminadas são extraídas (conforme a Figura 2.28), sendo conveniente a retirada de lâminas mais externas a parede do colmo, pois estas apresentam maior resistência mecânica, devido à maior concentração de fibras nesta região.

Figura 2.28 – Detalhe da extração das ripas.



Fonte: Barelli, Pereira e Landim (2008).

2.8.1 ADESIVOS

Os adesivos são substâncias que permitem unir diferentes partes ou materiais, introduzindo novas funções e propriedades que dão ao conjunto final um maior valor agregado em relação aos seus componentes separados.

Os adesivos são substâncias que permitem aderir (unir) seguramente diferentes partes ou materiais, mantendo vários substratos de um mesmo material ou materiais diferentes

[3]MATÉRIA BAMBU NO JAPÃO. **Revista cotents**, Tókio, Japão, n. 128, p. 4-16, jul. 2002.

ligados segundo uma ligação superficial, introduzindo novas funções e propriedades ao conjunto final, que apresenta um maior valor agregado. Estas propriedades, não intrínsecas à substância, desenvolvem-se durante o período de cura do adesivo, que ocorre em determinadas condições, enquanto o mesmo interage com a superfície do aderente.

> A adesão é um dos fenômenos mais importantes para a compreensão da formação da ligação adesiva, podendo ser por atração e química. A adesão por atração pode ser entendida como sendo a interação entre duas superfícies causada por um forte campo de forças atrativas provenientes dos constituintes de cada superfície. A adesão química se processa através de ligações chamadas primárias (iônicas, covalentes, coordenadas e metálicas) e através de forças secundárias intermoleculares. Os aderentes são os materiais sólidos ligados ao adesivo. Podem ser chamados também de substratos. (RIVERO, 2003, p.19, grifo do autor).

Segundo Rivero (2003), até parte do século XX, os adesivos utilizados para colagem de lâminas de madeira eram de origem animal ou ainda à base de vegetais. Mas, a partir de 1930, com o desenvolvimento de resinas líquidas à base de ureia (formaldeído) e fenol (formaldeído), possibilitou-se a fabricação de chapas de madeira com melhor qualidade. Em 1973, com a crise do petróleo, ocorreram sucessivos aumentos no preço das resinas ureia (formaldeído) e fenol (formaldeído), ambas de origem petroquímica, estimulando com isso a pesquisa por novos adesivos para substituir aqueles.

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

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

Portanto, o aproveitamento dos resíduos de processamento, a minimização dos defeitos técnicos e a valorização das propriedades como resistência e aparência estética da superfície são importantes qualidades conferidas às madeiras e aos bambus nos laminados colados.

Adesivos poliuretanos

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

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

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

Adesivos à base de resina resorcinol-formaldeído e ureia-formaldeído

Segundo Rivero (2003), o adesivo à base de resina resorcinol-formaldeído, em solução de água e álcool, é recomendado para colagens resistentes à água, solventes orgânicos, fungos, intemperismo, etc. Este adesivo apresenta dois componentes: a resina (CASCOPHEN RS, líquido de cor marrom avermelhada) e o endurecedor (Preparado Endurecedor FM, pó bege). Os dois componentes, depois de misturados, resultam numa "cola" de alto desempenho. É pouco viscoso e apresenta uma resistência razoável na ausência de pressão devido à sua maior fluidez entre os poros do aderente.

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

Adesivos à base de Poliacetato de Vinila (PVA)

Consiste em um adesivo de emulsão aquosa vinílico (CASCOREZ), indicado para colagens de artefatos de madeira, laminados plásticos (fórmica, por exemplo), papel, papelão, cartuchos (não envernizados), sacos de papel e materiais porosos em geral, devendo ser utilizado pelos processos convencionais de colagem (prensagem a frio e a quente). Apresenta vantagem em relação a outros adesivos, no que se refere a não apresentar características

tóxicas (com relação à manipulação ou inalação), além do seu baixo custo. As superfícies a serem coladas devem apresentar teor de umidade entre 8 e 15%.

2.8.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Segundo Cardoso Júnior (2008), a fabricação de BLC pode ser realizada tanto em escala industrial quanto em escala manual (processo mecânico-manual), a depender do porte dos equipamentos e maquinários utilizados para o processamento dos laminados de bambu. Segundo o SENAI (SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS, 2005), os laminados chineses são produzidos seguindo as etapas expostas na Figura 2.29.

Figura 2.29 – Etapas de processo dos laminados chineses de madeira e de bambu.

(a) Extração das tiras de bambu, de forma que estas resultem o mais uniforme quanto possível.

(b) Tratamento térmico por meio de aspersão de vapor d'água.

(c) Secagem do bambu em estufa, para redução do tempo de secagem.

(d) Aplicação do adesivo e prensagem das tiras.

(e) Aparelhamento lateral das lâminas processadas.

(f) Aparelhamento longitudinal (formação e aplainamento das lâminas) visando espessura final.

(g) Corte das lâminas no padrão final.

(h) Colocação dos encaixes das lâminas.

(i) Lixamento.

(j) Acabamento da superfície com aplicação de 3 (três) demãos de verniz.

(k) Inspeção das lâminas prontas (controle de qualidade).

(l) Empacotamento e armazenamento das lâminas para fornecimento ao mercado consumidor.

Fonte: SENAI (2005).

2.8.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BLC

Gonçalves, Pereira e Gonçalves (2000) realizaram ensaios de caracterização mecânica para peças em BLC da espécie *Dendrocalamus giganteus* com no mínimo 3 anos de idade, seguindo as indicações da ABNT NBR 7190 (1997) para a confecção de corpos de prova. Estão apresentados na Tabela 2.4 os resultados obtidos. No entanto, os autores não relatam qual tipo de adesivo foi utilizado para fabricar os corpos de prova de laminado de bambu, nem a forma de colagem e a quantidade de lâminas utilizadas.

Tabela 2.4 –Resistência mecânica das amostras de BLC.

Ensaio	Resistência (MPa)
Dureza	352
Compressão Paralela às fibras	55
Compressão Normal às fibras	18
Tração Paralela às fibras	195
Tração Normal às fibras	2,5
Cisalhamento	10
Flexão	166

Fonte: Gonçalves, Pereira e Gonçalves (2000).

Beraldo e Rivero (2003) avaliaram as características físico-mecânicas do BLC confeccionado com duas espécies de bambu (*Dendrocalamus giganteus* e *Bambusa vulgaris*), submetidas a dois tipos de tratamento (aquoso e químico). Foram testados dois adesivos comerciais: ureia-formol e resorcinol-formol. Na Tabela 2.5 estão apresentados os resultados referentes à espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Tabela 2.5 –Características mecânicas do BLC.

Ensaio	Dimensões (cm)	Adesivo	Tratamento	Resistência (MPa)
Compressão	2,0 x 3,0 x 5,0	Resorcinol	Água	37,14
			Químico	34,29
		Ureia	Água	33,87
			Químico	35,08
	4,0 x 4,0 x 16,0	Resorcinol	Químico	73,65
Módulo de elasticidade à compressão	4,0 x 4,0 x 16,0	Resorcinol	Químico	11415
Flexão	2,5 x 3,0 x 30,0	Resorcinol	Água	≈ 57,90
			Químico	≈ 50,20
		Ureia	Água	≈ 68,50
			Químico	72,57
Cisalhamento paralelo às fibras	4,0 x 4,0 x 4,0	Resorcinol	Químico	20,00
Cisalhamento na linha de colagem	5,0 x 2,5 x 3,0	Resorcinol	Água	25,76
			Químico	24,25
		Ureia	Água	≈ 23,00
			Químico	≈ 21,00

Fonte: Extraído de Rivero (2003).

Nogueira (2008) avaliou as características físico-mecânicas do BLC confeccionado com a espécie *Dendrocalamus giganteus*. As lâminas de bambu foram retiradas de duas posições da parede do colmo, sendo designadas lâminas externas e internas. As externas foram provenientes da região mais externa a parede do colmo, buscando-se dessa maneira a posição de maior abundância de fibras e, consequentemente, maior resistência mecânica das lâminas. As lâminas internas foram retiradas da região interna da parede do colmo, onde predomina tecido parenquimático, buscando-se, dessa forma, lâminas mais leves e com

resistência menor se comparada às lâminas externas (Figura 2.30). Os adesivos utilizados foram o adespec e o PVA. Na Tabela 2.6 estão apresentados os resultados médios obtidos.

Figura 2.30 – Esquema de retirada das lâminas de bambu.

Fonte: Nogueira (2008).

Tabela 2.6 –Características mecânicas dos painéis em BLC.

Ensaio	Dimensões (cm)	Adesivo	Posição da lâmina	Resistência (MPa)
Compressão	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	58,77
			Interna	54,22
		adespec	Externa	64,42
			Interna	62,00
Flexão	8,0 x 1,5 x 40,0	PVA	Externa	78,95
			Interna	91,20
		adespec	Externa	75,60
			Interna	67,85
Módulo de elasticidade na flexão estática	8,0 x 1,5 x 40,0	PVA	Externa	11913,88
			Interna	10555,70
		adespec	Externa	7965,22
			Interna	7790,25
Cisalhamento radial (área cisalhada: 1,5 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	11,18
			Interna	9,42
		adespec	Externa	9,84
			Interna	11,87
Cisalhamento longitudinal tangencial na fibra (área cisalhada: 8,0 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	6,45
			Interna	7,34
		adespec	Externa	7,69
			Interna	7,79
Cisalhamento longitudinal tangencial na lâmina de cola radial (área cisalhada: 8,0 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	2,35
			Interna	3,29
		adespec	Externa	2,07
			Interna	1,40

Fonte: Nogueira (2008).

Um inconveniente dos resultados referentes às propriedades mecânicas do BLC obtidas pelos vários autores acima citados consiste no fato de não haver uma padronização dos ensaios, pois cada pesquisador adota uma metodologia diferente, o que dificulta a comparação entre os resultados.

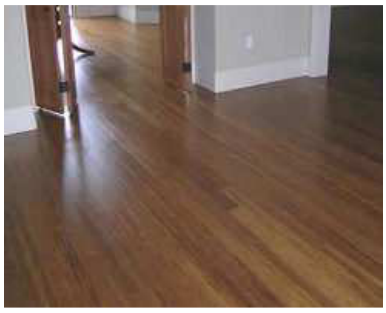
2.8.4 APLICAÇÕES DAS RIPAS DE BAMBU E DO BLC

Segundo Cardoso Júnior (2008), com a recente produção em larga escala dos laminados de bambu surgiu um novo mercado para sua utilização na construção além de uma

série de máquinas próprias para o seu processamento. Na Figura 2.31 são apresentados exemplos de produtos utilizados com BLC.

Figura 2.31 – Produtos fabricados em BLC.

(a) Caixa em BLC.



(b)Piso de BLC.

(c) Cadeira em BLC.

(d) Divã de BLC.

Fonte: Pereira e Beraldo (2008).

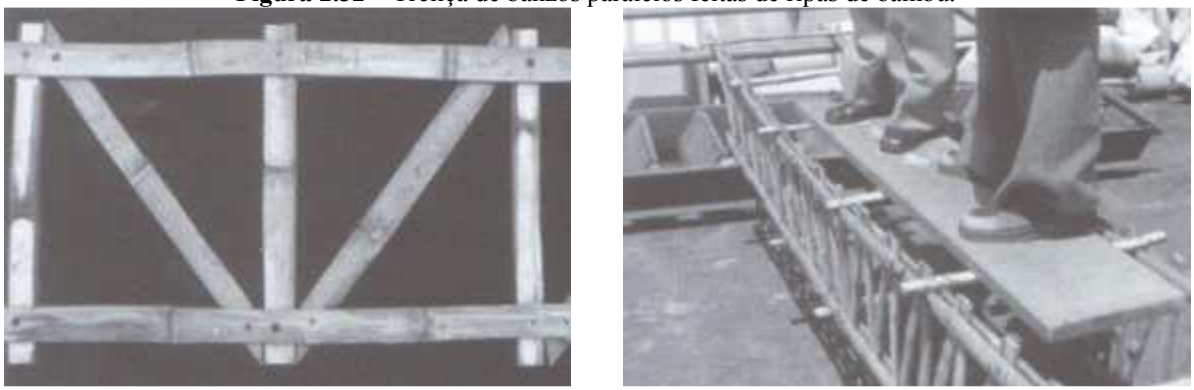
Para Castro e Silva (2005), o uso do bambu laminado colado, por ser um material totalmente padronizado em relação ao bambu in natura (roliço), proporciona maior flexibilidade na produção de móveis diversos. Estes móveis podem sem restrições, devido à resistência e aos seus aspectos estéticos, atuar no mercado dos móveis juntamente e em substituição a madeira serrada, proveniente de árvores coníferas e frondosas. Atualmente, existem diversos *sites* da rede mundial de computadores, onde se pode encontrar uma grande quantidade de ofertas destes móveis a partir dos termos "*bamboo furniture*" ou "*bamboo flooring*". Portanto, o laminado de bambu é produzido e exportado em grande escala por vários países na Ásia.

Koga, Bittencour e Gonçalves (2002) realizaram um estudo para comparar a resistência à abrasão (desgaste) de laminados de ipê, peroba rosa, maçaranduba e bambu *Dendrocalamus giganteus*. No trabalho supracitado foi concluído que o laminado de bambu teve uma resistência à abrasão semelhante ou superior aos demais laminados das outras espécies de madeira.

Hidalgo López (2003) estudou o uso das ripas para fabricação de treliças de banzos paralelos do tipo *Warren*, com bambus da espécie *Guadua angustifolia*. Os elementos estruturais foram fixados com parafusos, formando uma treliça com 3 metros de vão, própria

para coberturas leves, como as telhas onduladas. Esse sistema construtivo oferece muitas possibilidades de uso, pois é leve, barato e de fácil montagem. As treliças foram verificadas, experimentalmente, utilizando duas treliças colocadas lado a lado. Estas suportaram o peso de dois homens adultos (150 kgf), apresentando uma deformação muito pequena, constatando-se sua resistência (Figura 2.32).

Figura 2.32 – Treliça de banzos paralelos feitas de ripas de bambu.



(a) (b)

Fonte: Hidalgo López (2003).

No Brasil, o Instituto do Bambu construiu em Juvenópolis-AL uma casa popular, projetada por Sartori e Cardoso Jr., por meio da composição de paredes de bahareque oco e treliças de bambu ripado (Figura 2.33).

Figura 2.33 – Treliças de telhado fabricadas com ripas de bambu.

Fonte: Peixoto (2008).

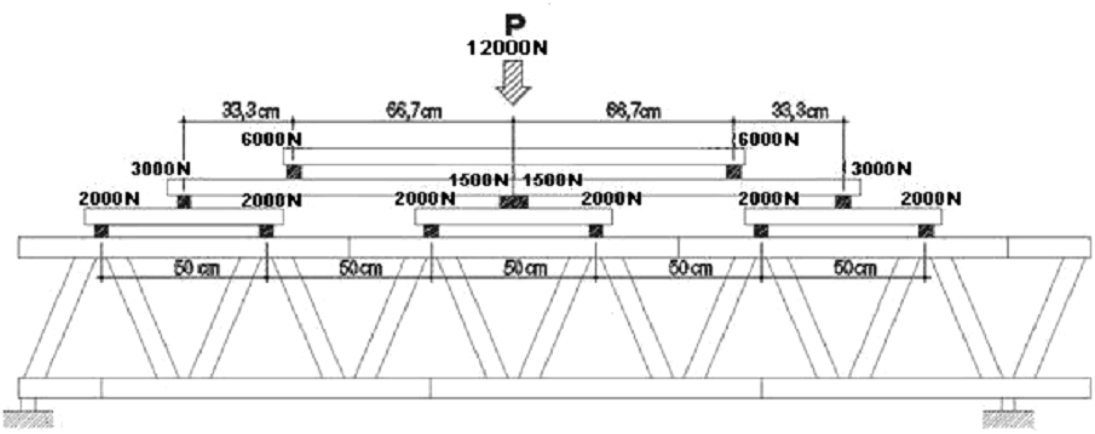
Peixoto (2008) realizou uma pesquisa onde buscava fazer uma abordagem das possibilidades estruturais dos laminados colados de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Propôs um sistema construtivo, que através da pré-fabricação de componentes modulares, pretendia impulsionar o uso do bambu, enfocando a simplificação dos processos construtivos e a redução do impacto ambiental causado pelos convencionais métodos de construção.

Segundo a autora acima referida, pode-se atribuir a pouca utilização do bambu como material na indústria da construção civil à impossibilidade da confecção de peças estruturais com perfis comerciais, como vigas e pilares de seções transversais retangulares. Por não apresentar uma linearidade em seus colmos, ou seja, com seções irregulares em toda estrutura, o seu uso em soluções retilíneas torna-se difícil. Outro problema com o formato dos colmos do bambu reside na dificuldade em ajustar os encaixes das conexões entre as peças. Em bambus com diâmetros diferentes, as ligações não se ajustam, dificultando as uniões e tornando-as pouco eficientes.

> Em comparação ao bambu em estado natural, os laminados colados apresentam as vantagens do aproveitamento de peças de pequena dimensão, além de constituírem um material mais homogêneo onde os defeitos podem ser removidos juntos com as protuberâncias provocadas pela presença de nós. (PEIXOTO, 2008, p. 92).

Na Figura 2.34 é mostrado o esquema de carregamento da treliça tipo *Warren* confeccionada em BLC, que fora ensaiada por Peixoto (2008).

Figura 2.34 – Sistema de carregamento.



Fonte: Peixoto (2008).

Na Figura 2.35 percebe-se o modo de ruptura da treliça proposta por Peixoto (2008).

Figura 2.35 – Modo de ruptura da treliça.

(a) Local de ruptura da peça. (b) Afastamento nas fibras do bambu.

Fonte: Peixoto (2008).

As treliças de forma geral apresentam menor resistência em suas conexões (nós). Portanto, não seriam necessários que as barras da treliça apresentassem seção transversal tão

elevada, levando em consideração que os máximos esforços de tração e compressão foram em módulo da ordem de 1100 kgf, assim admitindo que a resistência à compressão é de 500 kgf/cm^2 (a resistência à compressão do bambu é sensivelmente menor que à resistência à tração), seriam necessários 2,2 cm^2 de área resistente. Portanto, a análise do nó deve ser mais criteriosa, especialmente, no que diz respeito à distância mínima estabelecida entre conectores de peças de madeira (tracionadas ou comprimidas). Vale salientar, que para peças comprimidas esbeltas torna-se necessária especial atenção a flambagem das barras comprimidas da treliça.

Capítulo 3

CONCEITOS ESTRUTURAIS E PROJETO DE ESTRUTURA

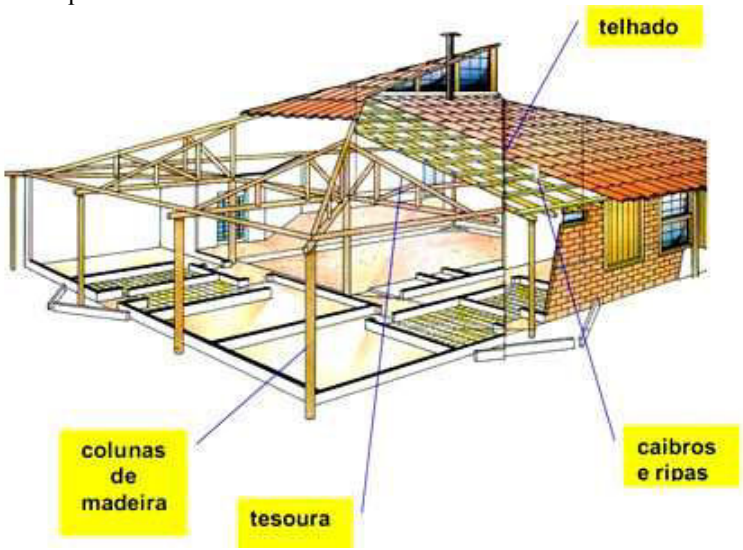
Este capítulo tem por objetivo expor os conceitos referentes ao projeto de estruturas, como treliças planas tipo *Howe* e vigas de seção transversal retangular, fabricadas a partir de Bambu Laminado Colado (BLC). Para tal, trata-se dos aspectos concernentes a: treliças planas aplicadas em coberturas; vigas laminadas coladas de seção transversal retangular; além de conteúdos normativos, ao projeto de estruturas de madeira e de bambu para determinação das propriedades físico-mecânicas, estados limites, cálculo de ações e resistências e critérios de dimensionamento.

3.1 ESTRUTURAS PARA COBERTAS: TRELIÇAS PLANAS

O conceito de treliça de madeira é idêntico ao de treliças de qualquer material. As diferenças básicas referem-se à concepção estrutural, devido às propriedades específicas do material. Por exemplo, cita-se a diferenciada resistência mecânica à tração e compressão, pois a primeira é sensivelmente maior. Apesar desta vantagem, as barras comprimidas são inevitáveis numa treliça; todavia, as barras comprimidas são favoráveis para se executar ligações através de encaixes ou sambladuras (GESUALDO, 2003).

Em telhados é comum a denominação tesoura ao invés de treliça. Na Figura 3.1 mostra-se um exemplo de telhado com alguns elementos típicos que compõem a estrutura e a cobertura de uma casa.

Figura 3.1 – Esquema dos elementos constituintes de telhado e da estrutura de uma casa.



Fonte: Ballarin (2008).

Podem-se classificar as treliças conforme a disposição das barras e das cargas nodais no espaço, de forma a serem treliças espaciais e treliças planas. Desta forma, as treliças planas, caso particular das treliças espaciais, apresentam suas barras e cargas nodais contidas em um mesmo plano, ou seja, a análise das forças atuantes nos membros destas será bidimensional.

As treliças planas geralmente servem de sustentação para telhados e pontes; assim, as treliças utilizadas em coberta de edificações têm a função estrutural de receber (nos nós, usualmente pelas terças) e transmitir a carga do telhado para os pontos de apoio de maneira eficiente e econômica. Tal eficiência é função da escolha de um perfil adequado e coerente com as necessidades arquitetônicas, além de compatível com as condições de carga.

3.1.1 GENERALIDADES

A elaboração de um projeto estrutural de cobertas demanda um tempo inicial para concepção do sistema estrutural. O raciocínio referente às estruturas planas considera que as ações atuam numa faixa de influência correspondente a cada plano específico que contêm as treliças (tesouras). Esta consideração, apesar de mais comum, é uma simplificação, pois as estruturas sempre trabalham de forma espacial. Essa concepção exige a caracterização de estruturas secundárias que conferem travamento dos pórticos principais em um plano perpendicular, garantindo a estabilidade do conjunto. Em uma estrutura espacial tem-se melhor aproveitamento dos seus elementos, pois todos os componentes desta têm função estrutural e de travamento, e funcionam como elementos principais (não existem elementos secundários). Além disto, haverá uma distribuição mais uniforme dos elementos componentes da área coberta, sem haver concentração de forças nos planos das estruturas.

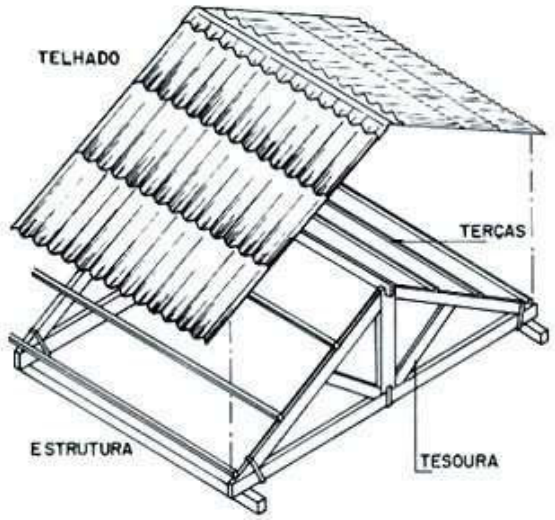
3.1.2 TERMINOLOGIA ESTRUTURAL

De um modo geral, os telhados ou cobertas de uma edificação são compostos por diversos elementos, alguns destes com funções estruturais. Dentre os elementos sem funções estruturais destacam-se as telhas e os forros. Já os elementos estruturais podem ser divididos em dois grandes grupos, quais sejam: os secundários e os principais.

Para Moliterno (2010), são considerados componentes secundários aqueles que podem ser dispensados quando da utilização de telhas de grandes dimensões (Figura 3.2). Dentre os elementos secundários, citam-se as ripas e os caibros. As ripas são elementos cuja função é

sustentar as telhas e se apoiam sobre os caibros; estes, por sua vez, têm por função sustentar as ripas e se apoiam sobre as terças.

Figura 3.2 – Esquema da trama[1] para telhado sem ripas e caibros.



Fonte: Autor desconhecido.

Moliterno (2010) define os elementos principais como aqueles que são indispensáveis ao funcionamento estrutural do telhado, quais sejam (Figura 3.3):

1) terças: são vigas que se apoiam sobre as tesouras e tem como função transmitir o carregamento da trama para às tesouras;

2) mãos-francesas: são escoras utilizadas para aliviar a flexão das terças e podem funcionar também como elemento de travamento;

3) Tesoura: treliça que tem a função de transmitir o carregamento do telhado aos elementos de sustentação como pilares ou paredes. Os elementos que compõem uma tesoura são denominados como segue: S – banzo superior; I – banzo inferior; V – barras verticais; D – barras diagonais; N – nó ou junta (ponto de interseção das barras); P – Painel (distância entre nós); h – altura da tesoura; L – vão da tesoura (distância entre apoios externos); α – inclinação da tesoura.

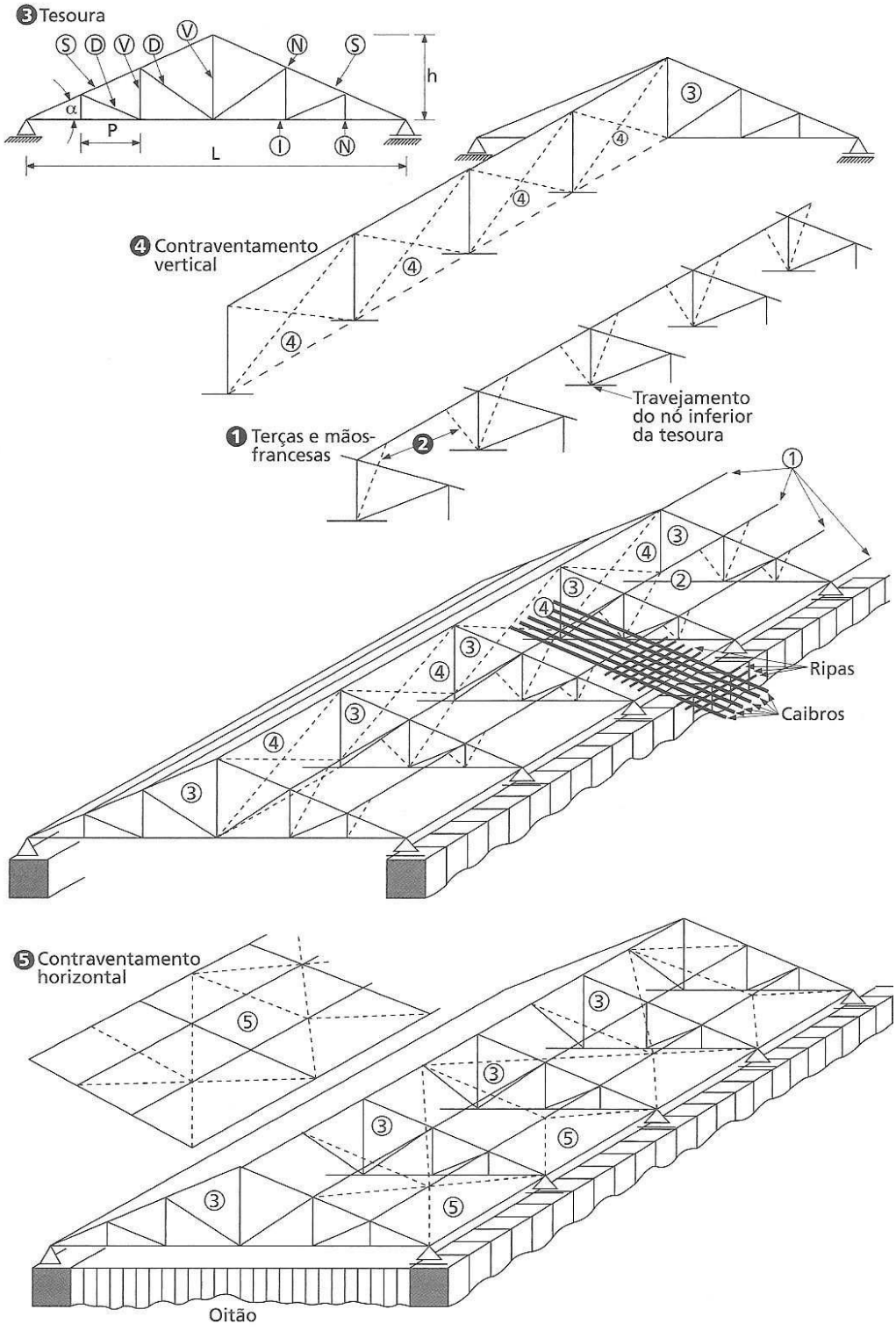
4) Contraventamento vertical: estrutura plana vertical composta por barras cruzadas, dispostas perpendicularmente ao plano das tesouras. As barras do contraventamento vertical servem para combater forças que atuam nesse plano vertical, conferindo o travamento às tesouras de forma a impedir a rotação e o deslocamento dessas, principalmente contra a ação do vento. Além disso, tem a função de vincular o banzo inferior I contra flambagem lateral;

5) Contraventamento horizontal: estrutura plana composta por barras cruzadas, dispostas em plano inclinado, paralelo e abaixo do plano da cobertura. Tem como função amarrar o

[1] Armação de madeira, constituídas por diferentes níveis de peças diferenciadas, posicionadas em direções perpendiculares, para assentamento de telhas.

conjunto formado por terças e tesouras, transferindo a ação vento, o qual atua de forma esconsa a edificação, para as tesouras e ao contraventamento vertical.

Figura 3.3 – Elementos de um telhado de duas águas.

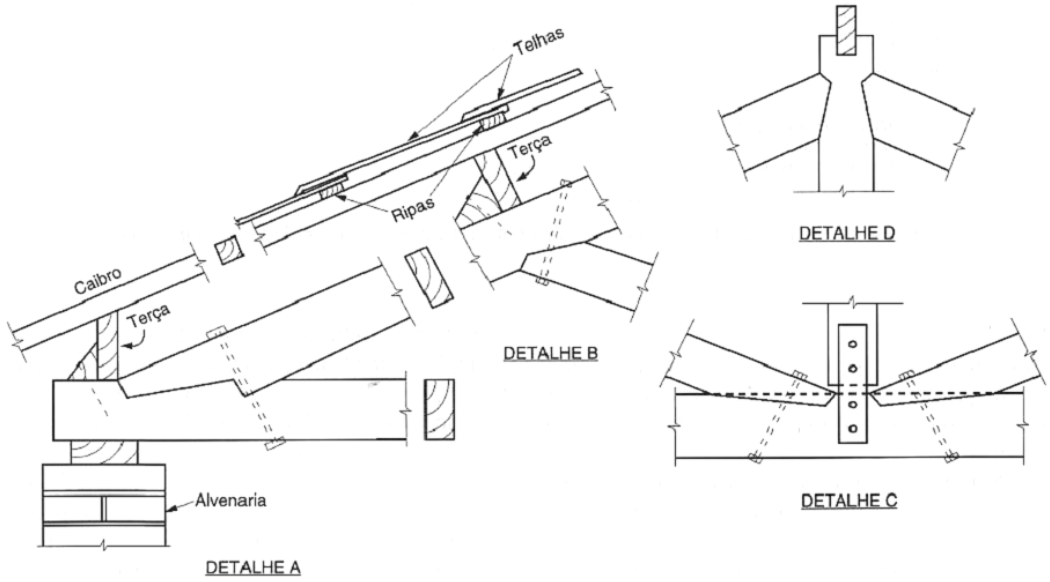


Fonte: Moliterno (2010).

Tratando-se especificamente das tesouras, demonstra-se na Figura 3.4 os detalhes das ligações, em uma tesoura, que são por entalhe em peças comprimidas (banzo superior e

diagonal) utilizando parafusos com funções construtivos; e a ligação do montante tracionada com o banzo inferior utilizando talas metálicas parafusadas.

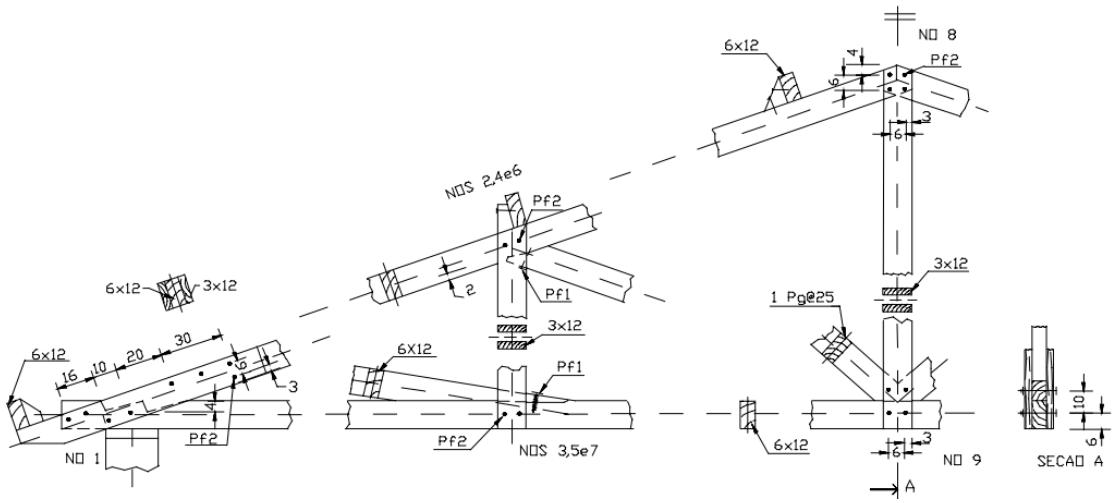
Figura 3.4 – Detalhe das ligações em tesouras de cobertura.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Adicionalmente, na Figura 3.5 mostra-se o arranjo de uma treliça com detalhes das ligações segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.5 – Detalhamento de uma treliça.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.1.3 GEOMETRIA DA ESTRUTURA

Inicialmente em um projeto de uma estrutura de cobertura definem-se os eixos das barras que compõem os elementos estruturais. Um arranjo de barras eficientemente elaborado influenciará de forma significativa no comportamento global da estrutura. Além disso, é necessário conhecer as características gerais da edificação, especificamente suas dimensões

em planta e condições de utilização, pois, geralmente por questões arquitetônicas, a estrutura de uma cobertura terá conformação diferençada. No entanto, especialmente no caso de coberturas industriais ou de armazenamento, tem-se liberdade de escolha, sendo a cargo do engenheiro projetista a definição do contorno e da distribuição de barras. Desta forma, o engenheiro deverá desenvolver um projeto que busque uma concepção estrutural mais econômica, segura e eficiente. Assim, a definição das formas dependerá da experiência do projetista. Em função de tais características define-se o tipo de estrutura a ser utilizada: tesoura com duas águas, tipo *shed*, arco.

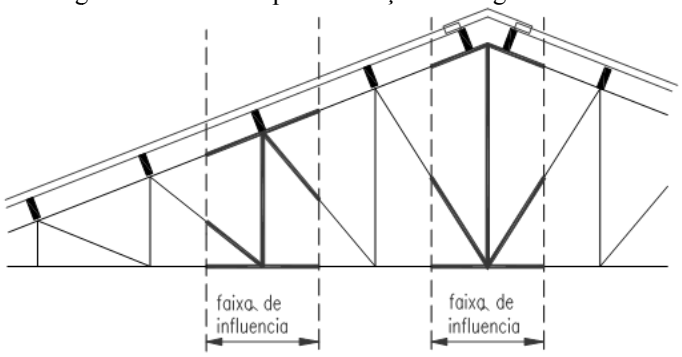
A partir da escolha do tipo de estrutura inicia-se a definição das posições das barras e define-se o contorno da estrutura, adotando-se uma relação entre altura/vão. O desenvolvimento do projeto deve ser algo iterativo, ou seja, mutável em função das novas dimensões calculadas no projeto.

Outra questão consiste na exatidão da posição das barras que compõem a estrutura. Todo o cálculo é realizado considerando os eixos da estrutura, negligenciando-se as dimensões reais das peças (altura e largura), uma vez que o cálculo leva em consideração estruturas reticuladas (treliças). Então, é indispensável ter conhecimento exato da posição real de todos os elementos componentes da estrutura, pois ao considerarem-se as dimensões das peças encontra-se o ponto exato de aplicação das cargas. Os desvios dos pontos reais de aplicação das cargas devem ser levados em consideração nos cálculos.

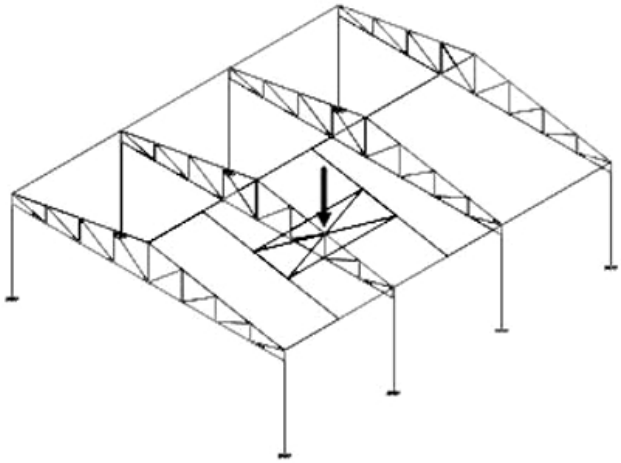
3.1.4 CÁLCULO DO CARREGAMENTO E DO DESLOCAMENTO

Considera-se que as cargas atuam sobre nós superiores da estrutura. Assim, utiliza-se o critério da faixa de influência (Figura 3.6) para se obter a carga atuante sobre cada nó. A faixa de influência é adotada tomando-se a soma das duas metades das distâncias entre os dois nós adjacentes. Desta forma, atuam em cada um destes nós as cargas que agem na região de influência: madeira, telhas, vento, contraventamentos, ferragens, peças especiais e sobrecargas. Basta conhecer todos os elementos envolvidos em cada faixa considerada. Portanto, as cargas são consideradas concentradas sobre os nós do banzo superior (Figura 3.7).

Figura 3.6 – Região de influência para obtenção da carga nos nós de uma treliça.

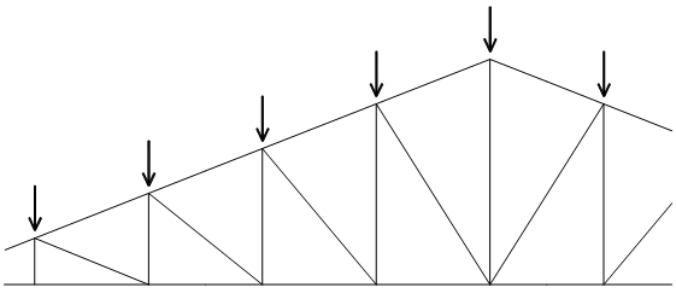


(a) Vista em elevação.



(b) Perspectiva isométrica.
Fonte: Adaptado de Gesulado (2003).

Figura 3.7 – Cargas aplicadas nos nós da treliça.



Fonte: Gesualdo (2003).

Para Gesualdo (2003), as forças devidas aos contraventamentos juntamente com as ferragens podem ser consideradas iguais a 0,07 kN/m^2, distribuídas sobre a cobertura. Em referência, nas estruturas pregadas ou parafusadas, o peso próprio das peças metálicas (g_m) de união pode ser estimado em 3% do peso próprio da madeira, conforme sugerido pela ABNT NBR 7190 (1997). Em contrapartida, a mesma norma não trata a respeito do valor de outras cargas permanentes ou variáveis. Tendo o projetista ter que adotar os critérios a serem adotados.

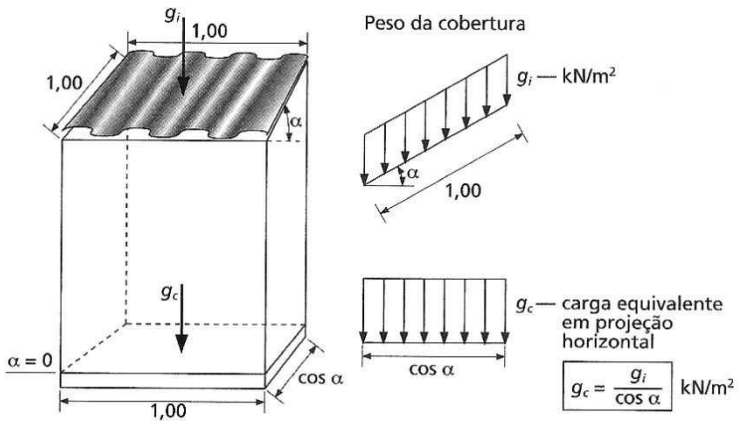
Adicionalmente, Moliterno (2010) estabelece os pesos distribuídos dos elementos constituintes de uma cobertura: forro tipo Eucatex com valor igual a 0,035 kN/m^2 mais

estrutura de sustentação com madeira do tipo conífera com valor máximo igual a 120 N/m^2, que compõem a carga proveniente do forro (g_F); telhas de PVC rígido com perfil cimento-amianto (g_i) de valor 0,02 kN/m^2, a qual deve ser posta em projeção horizontal (g_c) para poder-se somar as demais cargas e multiplicar-se a área de influência medida também em projeção horizontal (Figura 3.8); terças para chapas onduladas de cimento amianto (g_0) com o valor de 45 N/m^2, para um vão máximo de 4,00 m; peso próprio da tesoura e do contraventamento (g_T) pela fórmula empírica de *Howe*, conforme Eq.(3.1):

$$g_T = 0{,}0245\ (1 + 0{,}33L) \tag{3.1}$$

na qual, g_T é o peso próprio da tesoura, inclusive contraventamento, em kN/m^2; L é o vão teórico da tesoura.

Figura 3.8 – Esquema da carga equivalente em projeção horizontal.



Fonte: Moliterno (2010).

Portanto, a carga permanente é dada pela Eq.(3.2):

$$g = g_c + g_0 + g_T + g_F + g_m \tag{3.2}$$

na qual, g é a carga permanente total; g_c é a carga permanente das telhas; g_0 é a carga permanente das terças; g_T é a carga permanente da tesoura; g_F é a carga permanente do forro e da estrutura de sustentação; g_m é a carga permanente das peças metálicas de ligação, estimada como 3% do peso próprio da madeira da estrutura. Todas estas cargas permanentes são distribuídas por metro quadrado em projeção horizontal.

A ABNT NBR 6120 (1980) estabelece que todo elemento isolado de coberturas (ripas, terças e barras de banzo superior de treliças) deve ser projetado para receber, na posição mais desfavorável, uma carga vertical de 1 kN (carga equivalente a um homem trabalhando mais ferramentas), além da carga permanente.

As forças devidas ao vento são calculadas de acordo com a norma específica, ABNT NBR 6123 (1988).

Para todas as estruturas deve ser calculado o deslocamento máximo (flecha), que pode ser realizado através do Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). Para o caso de treliças, há apenas energia de deformação devido aos esforços normais em cada uma das barras componentes.

3.1.5 ESFORÇOS EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS

A escolha do sistema treliçado em coberturas para a construção em madeira é bastante comum, possivelmente, por causa da relativa facilidade com que formas usuais treliçadas podem ser fabricadas e montadas com esse material. As treliças são estruturas de membros esbeltos conectados entre si em suas extremidades. Adicionalmente, as treliças são estruturas típicas em que todos os elementos (barras) são rotulados em suas extremidades (nós), além de terem as cargas concentradas aplicadas em seus nós; de forma que, cada barra desenvolva unicamente força axial (constante), que podem ser de tração ou compressão. Teoricamente, os momentos fletores nos elementos devem ser nulos, tal condição poderia ser alcançada pela introdução de articulações sem atrito em todos os nós. Na prática, a maioria dos elementos possui ligações que não se comportam como rótulas e sim como ligações semirrígidas. No entanto, o valor dos momentos fletores nos elementos normalmente é baixo, sendo controlados pela geometria da treliça e pelas técnicas de fabricação da mesma.

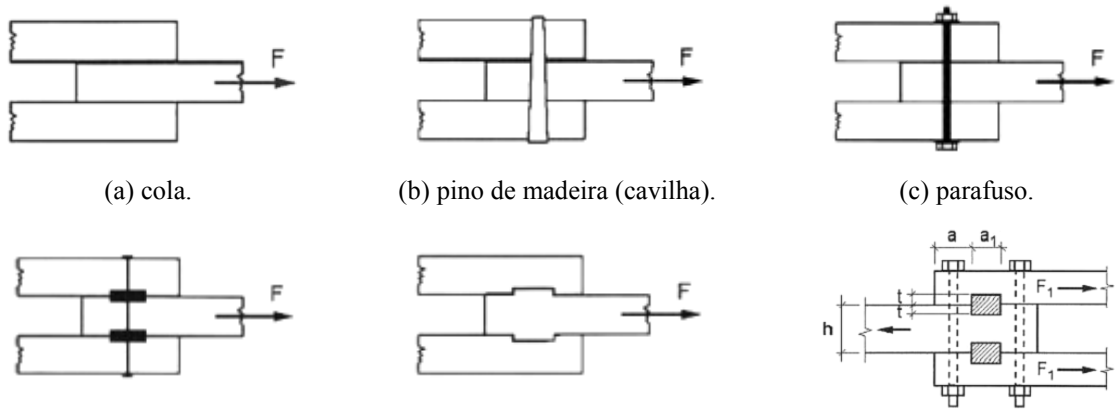
As treliças são interessantes por sua flexibilidade quanto à forma e à disposição de barras, ou seja, consegue-se conceber estruturas com distribuição de barras e contorno externo apropriados para minorar os esforços nas barras. A distribuição das barras e a conformação externa são adequadas às solicitações provenientes do carregamento.

Apesar de se ter elevado número de ligações, as treliças apresentam uma melhor distribuição de tensões ao longo das barras. Como prevalecem forças normais nas barras, as tensões são constantes ao longo de cada seção transversal e ao longo da barra. Portanto, aproveita-se melhor o material utilizado, pois se elimina elementos com tensões nulas ou baixas, a exceção de barras com forças nulas que são utilizadas para enrijecimento e para o caso de ações variáveis. Em outros tipos de esforços, como momento fletor e esforço cortante, ocorre variação da intensidade destes ao longo da seção transversal dos elementos, desta forma, apenas parte da seção transversal, ou em diversos casos apenas um ponto, trabalha na condição limite.

3.1.6 TIPOS DE LIGAÇÕES

As peças estruturais executadas com madeira apresentam comprimento limitado, principalmente, pelo seu tamanho e forma. Assim, para construção das estruturas, as peças são ligadas entre si utilizando-se vários dispositivos (Figura 3.9): colagem, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes.

Figura 3.9 – Tipos de ligações estruturais.



(a) cola. (b) pino de madeira (cavilha). (c) parafuso.

(d) conector de anel. (e) entalhe. (f) tarugos.

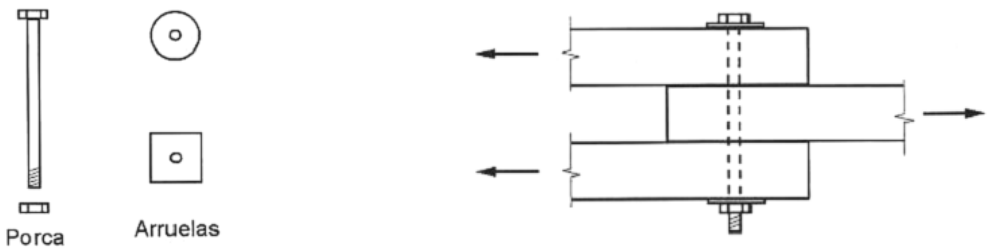
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

A ligação por colagem é amplamente empregada na indústria de laminados colados, como será visto na seção 3.2.

Os pinos são cilíndricos ou tronco-cônicos, fabricados em aço ou em madeira dura. São instalados em furos previamente feitos nas peças a serem ligadas; tais furos apresentam diâmetro ligeiramente menor aos dos pinos, de forma a ter-se uma ligação justa (sem folga).

A ABNT NBR 7190 (1997), preconiza a utilização de parafusos com porca e arruela. Nos parafusos tem-se numa extremidade uma "cabeça" e na outra uma rosca e porca (Figura 3.10). Com o objetivo de reduzir a pressão de apoio, devido ao aperto da porca, utilizam-se arruelas.

Figura 3.10 – Detalhes do sistema de parafuso com porca e arruela.

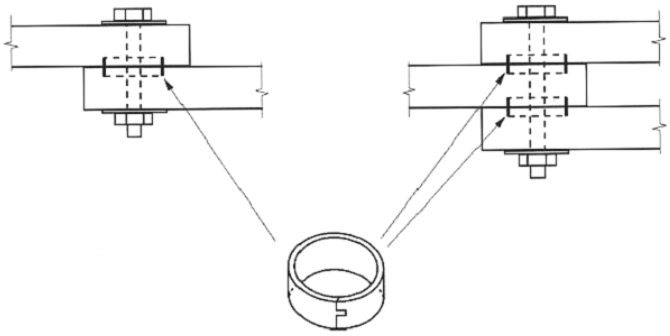


(a) Parafuso de porca e arruela. (b) Parafuso submetido à corte.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Os conectores de anel metálico são encaixados em ranhuras executadas nas peças a serem ligadas (Figura 3.11). Apresentam elevada eficiência na transmissão de esforços. Além disso, em conjunto utiliza-se parafuso de cunho construtivo, para impedir a separação entre as peças ligadas.

Figura 3.11 – Detalhe de ligações com conectores de anel.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Os entalhes, também chamados sambladuras, são ligações que trabalham segundo esforços de compressão e de cisalhamento. Também se utilizam parafusos para impedir a separação entre as peças (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Detalhes de ligações por entalhe.

(a) Nó de treliça de cobertura. (b) Encora inclinada.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

A ligação por tarugos (ou chavetas) são executadas por meio da introdução de peças de madeira dura ou metálicas no interior dos entalhes, com a função de transmitir esforços. Mais uma vez, utilizam-se parafusos auxiliares para manutenção da posição das peças.

3.1.7 TIPOS DE TRELIÇAS

3.1.7.1 Tipo Howe

Este é o tipo de treliça mais comum e é empregado para vencer vãos até 18 m. As barras recebem a numeração indicada na Figura 3.13 de acordo com a sua posição das mesmas na treliça. Segundo as indicações da Figura 3.13 tem-se:

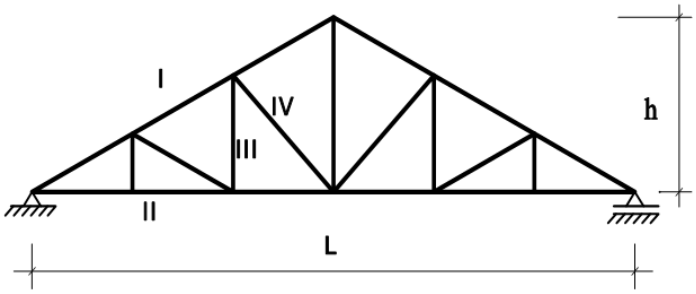
I - banzo superior, perna, empena ou membrana;

II - banzo inferior, linha tirante ou "arrochante";

III - montante ou pendural (tração);

IV - diagonal ou escora (compressão).

Figura 3.13 – Treliça tipo *Howe*.



Fonte: Gesualdo (2003).

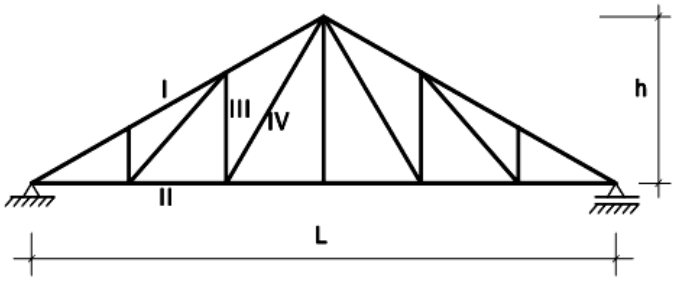
Este tipo de treliça apresenta para o carregamento principal (de cima para baixo), compressão nas diagonais e tração nos montantes.

Para Gesualdo (2003), o intervalo da relação conveniente para a distância entre banzos (h) no ponto central e vão livre (L) é dado por: $1/7 \leq h/L \leq 1/4$.

3.1.7.2 Tipo Pratt

Este tipo de tesoura é recomendável para vãos compreendido entre 18 e 30 m. As barras recebem a numeração indicada na Figura 3.14 de acordo com a sua posição das mesmas na treliça.

Figura 3.14 – Treliça tipo *Pratt*.



Fonte: Gesualdo (2003).

O arranjo de peças para esse tipo de treliça é estabelecido como:

I e II - banzos superior e inferior submetidos à compressão e à tração, respectivamente;

III - montante (compressão);

IV - diagonais (tração).

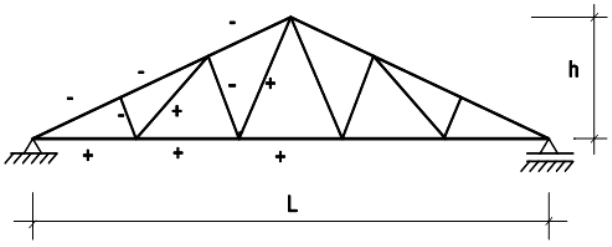
Para Gesualdo (2003), o intervalo da relação conveniente para a distância entre banzos (h) no ponto central e vão livre (L) é dado por: $1/7 \leq h/L \leq 1/4$.

Os esforços nos montantes e nas diagonais da treliça *Pratt* são invertidos em relação à treliça *Howe*. Em geral, as tesouras tipo *Pratt* são adequadas para quaisquer vãos, pois apresentam a vantagem das peças comprimidas apresentarem menores comprimentos que as tracionadas (reduzindo a possibilidade de flambagem). No entanto, para pequenos vãos, as seções transversais das barras são menores (mais leves), pois se têm esforços menores, satisfazendo as peças simples, com arranjo do tipo empregado nas tesouras de Tipo *Howe*. Portanto, quando as peças simples atendem aos esforços, as tesouras do tipo *Howe* apresentam vantagem do ponto de vista construtivo.

3.1.7.3 Tipo Belga

Esse tipo treliça é uma variante da treliça *Pratt*. Na treliça tipo Belga os montantes são posicionados perpendicularmente ao banzo superior (Figura 3.15). Desta forma, tem-se melhor distribuição de esforços entre montantes e diagonais pelas posições mais adequadas das mesmas, tendendo a uma direção a 45° em relação ao banzo inferior.

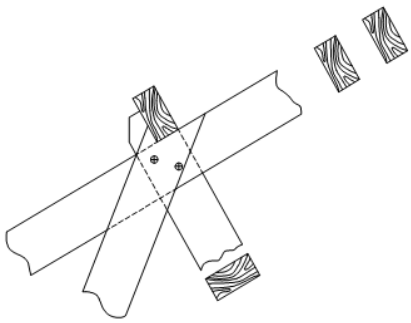
Figura 3.15 – Treliça tipo Belga.



Fonte: Gesualdo (2003).

A disposição dos montantes perpendicularmente ao banzo superior facilita a construção do apoio das terças, conforme Figura 3.16.

Figura 3.16 – Ligação do banzo superior da treliça tipo Belga.



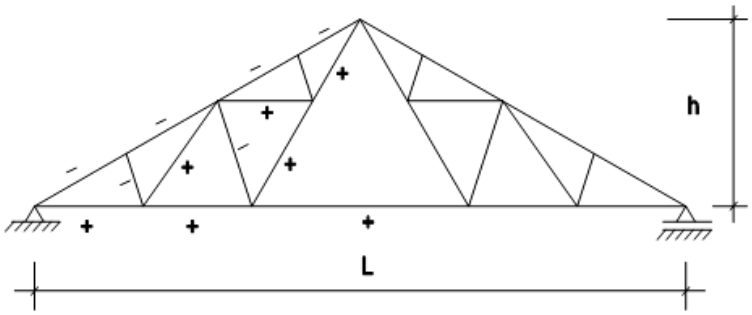
Fonte: Gesualdo (2003).

Para Gesualdo (2003), o intervalo da relação conveniente para a distância entre banzos (h) no ponto central e vão livre (L) é dado por: $1/8 \leq h/L \leq 1/6$. Além disso, o vão varia entre 18 e 25 m.

3.1.7.4 Tipo Fink (Polonceau)

A treliça tipo *Fink* é uma variante da treliça Belga (Figura 3.17). Para vãos de maiores extensão possui a vantagem de reduzir o comprimento das barras das diagonais e montantes mais centrais. Para Gesualdo (2003), tais tipos de treliça são recomendadas para vãos entre 20 e 30 m ea relação h/L varia entre 1/5 a 1/4. As dimensões das seções transversais são similares às da treliça Belga.

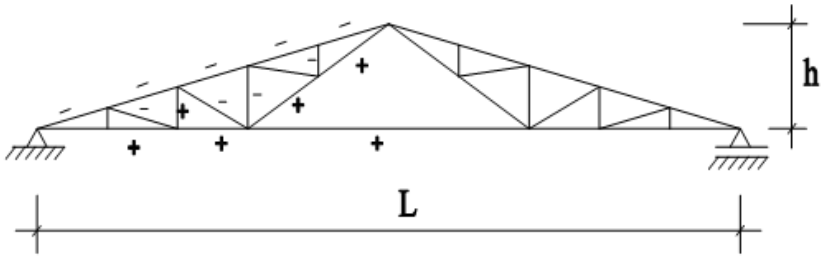
Figura 3.17 – Treliça tipo *Fink*.



Fonte: Gesualdo (2003).

Pode-se ter ainda uma treliça composta pela combinação entre uma treliça *Howe* e a *Fink*, conforme Figura 3.18.

Figura 3.18 – Combinação entre as treliças tipo *Howe* e *Fink*.



Fonte: Gesualdo (2003).

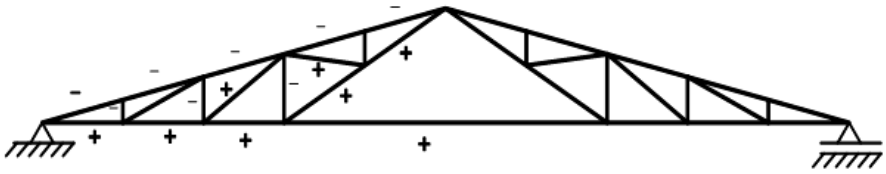
Este tipo de estrutura mostra-se eficiente para vãos em torno de 20 m. Eventualmente há necessidade de reforços nas barras do banzo superior, formando seções do tipo T.

Nesse tipo de treliça os pequenos comprimentos das barras comprimidas evitam problemas referentes à flambagem, o que a torna mais leve. No entanto, ocorre o inconveniente da barra central do banzo inferior apresentar elevado comprimento, capaz de tornar significativo o efeito do peso próprio da barra. Assim, uma alternativa é dispor um

montante central, de forma a reduzir o vão total da barra. Desta forma, como o montante mais central estar comprimido, assim como a diagonal, possibilita-se a ligação por entalhe.

Outra forma de treliça é mostrada na Figura 3.19, na qual as diagonais são dispostas em posição invertida.

Figura 3.19 – Treliça combinada com diagonais invertidas.

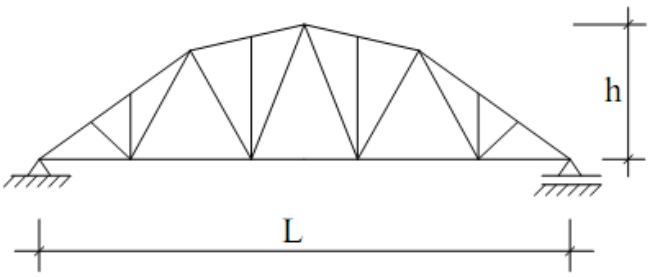


Fonte: Gesualdo (2003).

3.1.7.5 Tipo Bowstring (treliça com banzo superior poligonal)

Segundo Fernández (2010), sob carregamento uniformemente distribuído, esse tipo de treliça funciona como arco, pois o banzo superior apresenta-se comprimido, enquanto o banzo inferior horizontal é tracionado, já as barras internas da treliça ficam muito pouco solicitadas (Figura 3.20). Sob carregamento assimétrico, no entanto, as barras internas da treliça ficam consideravelmente solicitadas e o sistema tem um comportamento mais similar a uma treliça do que a um arco.

Figura 3.20 – Treliça tipo *Bowstring*.



Fonte: Gesualdo (2003).

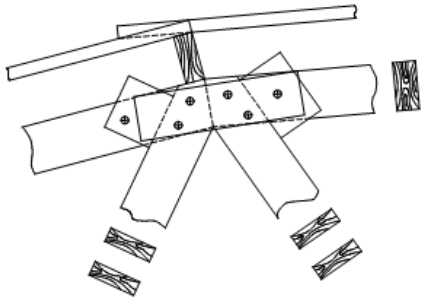
A variação da inclinação do banzo superior em trecho retos é ajustada de tal forma que os nós coincidam com um eixo curvo denominado linha de pressão, cuja geometria acompanha o diagrama de momento fletor do carregamento aplicado a uma viga simplesmente apoiada de mesmo vão da treliça; no caso do carregamento uniformemente distribuído este eixo curvo é uma parábola. Segundo Gesualdo (2003), estas treliças são usadas para vãos entre 15 m e 25 m, com a razão h/L igual a um valor por volta de 1/6.

A variação de inclinação das barras do banzo superior beneficia a distribuição dos esforços internos. Na região de apoios tem-se maior inclinação, a qual é adequada para

absorver esforços cortantes. Na parte central do vão tem-se uma menor inclinação, e aumento da distância entre banzos adequada para combater momento das forças externas.

Para esse tipo de estrutura tem-se a desvantagem da fixação das telhas nos pontos onde ocorre a mudança de inclinação (Figura 3.21). Além disso, o número de ligações das peças do banzo superior aumenta, gerando maior mão-de-obra e maior consumo de material.

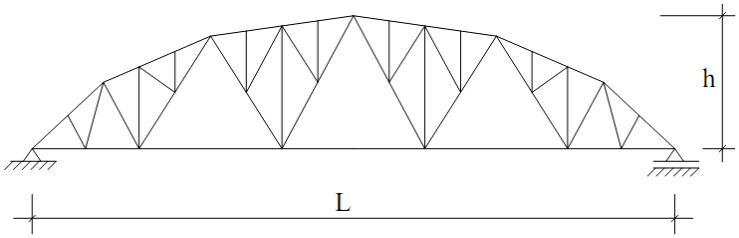
Figura 3.21 – Detalhe da ligação no banzo superior da treliça tipo *Bowstring*.



Fonte: Gesualdo (2003).

Para vencer vãos de maiores comprimentos (25m ≤ L ≤ 40m) faz-se a distribuição das barras com o objetivo de diminuir os comprimentos das barras dos montantes e diagonais, conforme Figura 3.22.

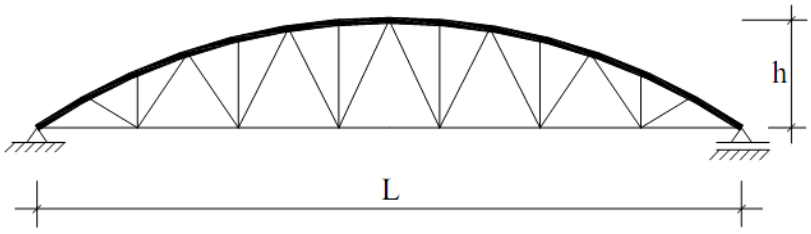
Figura 3.22 – Conformação da treliça tipo *Bowstring* para vãos maiores.



Fonte: Gesualdo (2003).

Como alternativa ao problema da descontinuidade das barras do banzo superior, adota-se uma seção maciça e contínua com a curvatura adequada por meio de peças laminadas coladas, pregadas, cavilhadas, etc. Assim, forma-se uma estrutura mista composta por peças contínuas curvas e por barras retas, conforme Figura 3.23. Neste caso, devido ao banzo superior ser contínuo com curva e o carregamento distribuir-se ao longo deste arco (comprimento curvo) a forma do arco aproxima-se de uma catenária.

Figura 3.23 – Treliça tipo *Bowstring* com banzo superior em peça laminada colada.



Fonte: Gesualdo (2003).

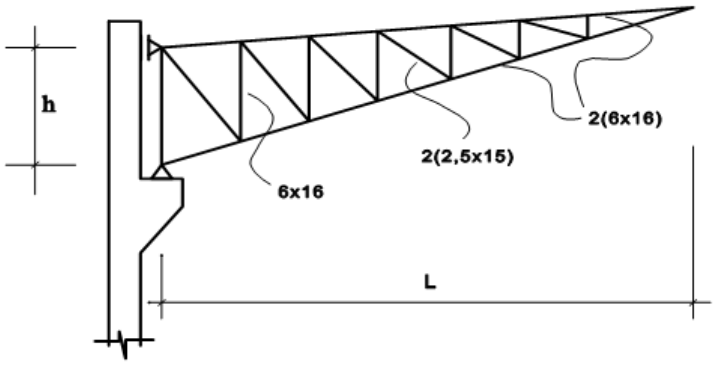
Essas estruturas são recomendáveis para vãos superiores a 20 m.

As barras curvas devem ser dimensionadas levando-se em consideração solicitação por flexocompressão, sendo a compressão proveniente do cálculo da estrutura como treliça, pois o trecho curvo entre nós constitui um membro submetido a duas forças. E a flexão surge devido à curvatura, devido à carga axial ser aplicada excentricamente nas seções ao longo da barra.

3.1.7.6 Treliça em balanço

São denominadas meias tesouras em balanço ou, usualmente, são chamadas de meias tesouras para arquibancadas. As vinculações para a treliça em balanço constituem em um apoio de 2º gênero e outro de 1º gênero sobre um mesmo pilar, conforme a Figura 3.24.

Figura 3.24 – Apoios da meia tesoura em balanço.

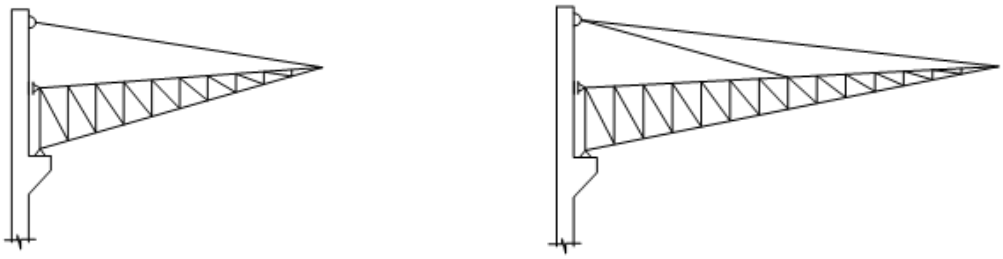


Fonte: Gesualdo (2003).

Segundo Gesualdo (2003), este tipo de treliça é aplicável para vãos menores que 20 m. E a relação h/L deve estar entre 1/5 e 1/4.

Em caso de vãos superiores a 20 m adotam-se soluções para minimizar os esforços nas barras. Entre as soluções mais adequadas visualiza-se a utilização de tirantes de aço na parte superior da estrutura, conforme Figura 3.25. Consequentemente, a solicitação no pilar é elevada, o que resulta em pilares mais robustos. Nas ligações entre os pilares e as treliças usam-se, geralmente, anéis metálicos, devido à existência de esforços elevados.

Figura 3.25 – Apoios da meia tesoura em balanço com tirantes.



(a) Meia tesoura com um tirante contribuinte. (b) Meia tesoura com dois tirantes contribuintes.

Fonte: Gesualdo (2003).

3.1.7.7 Treliça com contorno retangular

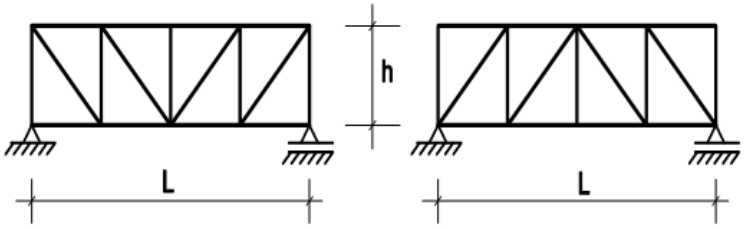
São intituladas vigas treliçadas ou vigas mestras, as quais são utilizadas em telhados tipo *Shed*. Assim, este tipo de treliça é aplicado em coberturas com características que exigem o formato retangular, além de ser utilizado em sistemas estruturais de pontes.

Em geral, por apresentarem grandes vãos, essas treliças diferem grandes flechas. Assim, as seções transversais devem ser mais robustas que os outros tipo de treliças e o efeito de flexão nas barras é mais evidente. Portanto, no cálculo dos esforços recomenda-se à avaliação dos efeitos de flexão, considerando a estrutura como pórtico.

Segundo Gesualdo (2003), esses tipos de treliças não são adequados para vãos superiores a 20 m. Além da relação h/L ser aproximadamente 1/6.

Na Figura 3.26 apresentam-se tipos básicos desse tipo de treliças.

Figura 3.26 – Vigas treliçadas com disposições distintas de diagonais.



Fonte: Gesualdo (2003).

3.1.7.8 Arcos treliçados

Segundo Gesualdo (2003), constituem estruturas mais leves. Além disso, devido a apresentar variação da curvatura ao longo de toda extensão, são construtivamente mais complexas. Sua viabilidade econômica é para grandes vãos, superiores a 20 m.

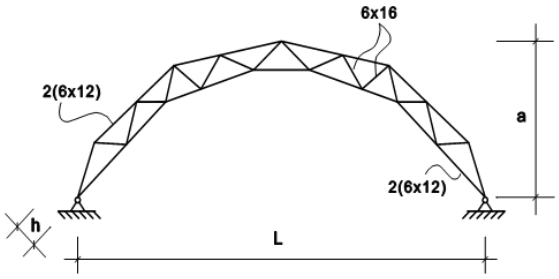
Em estruturas desse tipo: os esforços de compressão são predominantes; as flechas são reduzidas; as distâncias entre arcos (vãos das terças) estão entre 4,0 a 6,0 m, a depender do vão livre do arco, de forma a melhor aproveitá-lo.

As condições de vinculação desse tipo de estrutura são realizadas por dois apoios fixos tornando a estrutura hiperestática (com um grau de hiperestaticidade) e produzindo o efeito estrutural de arco. De forma geral, esses apoios são sobre pilares. Tais pilares ficam submetidos à flexocompressão, no entanto, o emprego de tirante metálico horizontal, ligando os dois apoios, reduz consideravelmente a solicitação horizontal no pilar, resulta em uma efetiva redução da flexocompressão do pilar. No entanto, o uso do tirante metálico, apesar de

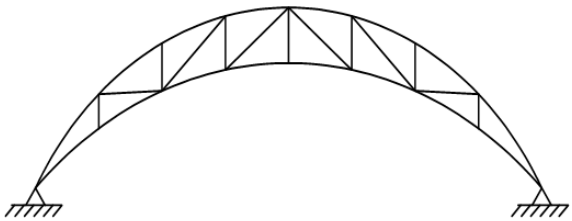
aliviar as solicitações sobre o pilar, gera limitação da altura útil sob o arco; além de, sob efeito de ação de vento, que causando inversão de esforços, o tirante passar a estar sob compressão, ficando sem função estrutural. Na maioria dos casos, o alívio ocasionado pela sucção da carga de vento é bastante pequeno, e as seções transversais dimensionados para absorver as cargas de peso próprio, em geral, atendem as condições de segurança.

Na Figura 3.27 são expostos alguns tipos de arcos com conformações distintas. A curvatura desses arcos é executada por meio de trechos retos, mudando-se a inclinação destes nas ligações. As ligações são do tipo emenda (banzos ligados de topo), exigindo talas externas (Figura 3.27d).

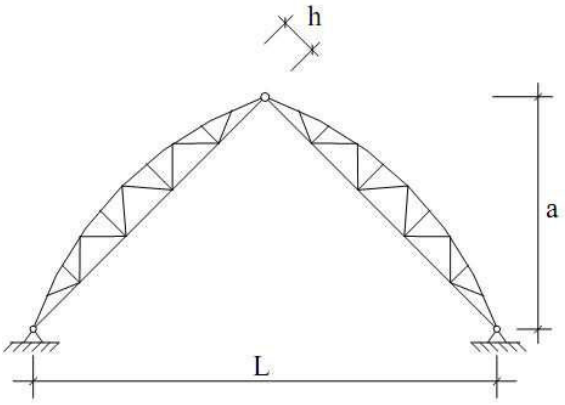
Figura 3.27 – Tipos de arcos treliçados.



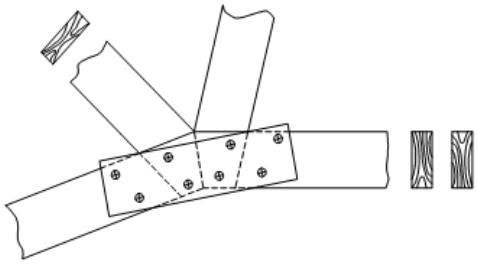
(a) Arco treliçado com banzos formados por trechos retos.



(b) Arco treliçado com distância variável entre os banzos.



(c) Arco treliçado triarticulado



(d) Detalhe da ligação na mudança de inclinação.

Fonte: Gesualdo (2003).

3.2 ASPECTOS NORMATIVOS

A ausência de norma específica para execução de ensaios de peças de BLC gera dificuldade de padronização dos procedimentos de ensaio e dificuldade de comparação de resultados entre pesquisadores.

O Projeto de norma intitulado Estruturas de Bambu - Procedimento (adaptada da norma ISO/DIS 22156) não se aplica as estruturas de bambu laminado colado. Assim, as

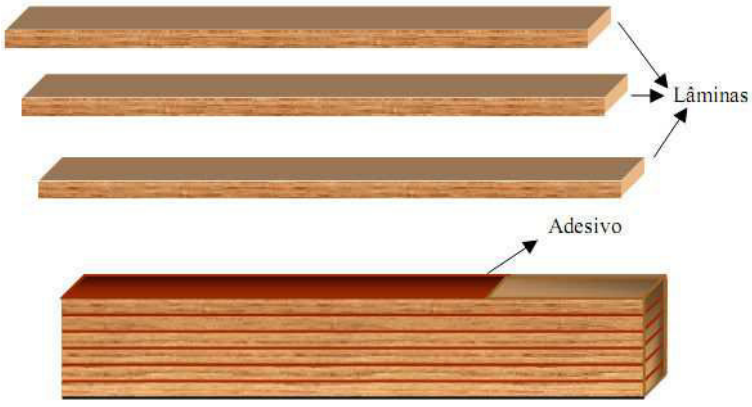
estruturas de BLC devem estar de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997). Apesar de nem sempre os procedimentos prescritos pela norma ABNT NBR 7190 (1997), específica para madeira, poderem ser diretamente aplicados (PEREIRA; BERALDO, 2008).

Desta forma, resolveu-se por utilizar a ABNT NBR 7190 (1997) como base dos procedimentos de análise desta dissertação, realizando-se algumas adaptações necessárias as especificidades do BLC. Para composição dos procedimentos estabelecidos, pode-se consultar: a normativa NRS-10 (*Estructuras de madera y estructuras de Guadua*) da Colômbia; e o projeto "*Validación de la Guadua angustifolia como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles"* da Universidade Nacional da Colômbia que data de julho de 2010, coordenado por Jorge Enrique Lozano Peña.

3.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR EM BLC

Nas vigas de BLC têm-se os mesmos princípios de dimensionamento que são aplicados a vigas fabricadas com outros materiais. A análise de vigas submetidas à flexão simples reta (ver classificação adiante) deve levar em consideração os efeitos da flexão (tensão normal), do cisalhamento (tensões cisalhantes transversais e longitudinais) e da deflexão (deslocamento transversal ao eixo da peça). As vigas de BLC constituem um produto estrutural formado por sobreposição de lâminas (com fibras paralelas) selecionadas, que são coladas com adesivos, sob pressão; de forma que se comportem como uma viga única (solidarizada), conforme Figura 3.28.

Figura 3.28 – Detalhe da montagem de uma viga laminada colada.



Fonte: Zangiácomo (2003).

A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que as peças de madeira laminadas coladas devam ser constituídas por lâminas de madeira de primeira categoria com espessuras não superiores a 30 mm (ver item 3.8), coladas com adesivo à prova d'água, à base de fenol

formaldeído sob pressão, em processo industrial adequado que solidariza permanentemente o sistema. Adicionalmente, a direção do carregamento (plano de atuação das cargas) pode ser paralela ou perpendicular ao plano médio das lâminas.

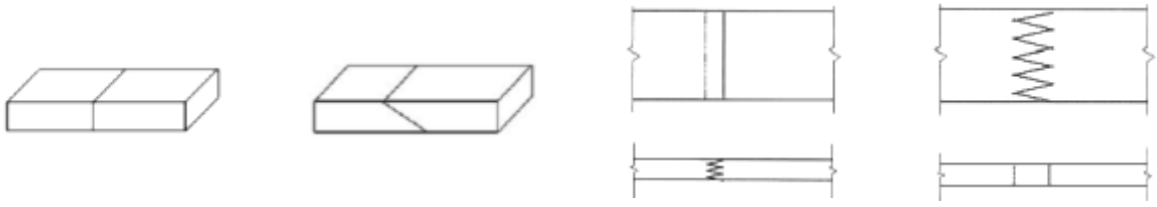
As etapas de fabricação das peças laminadas coladas seguem, basicamente, as seguintes fases:

- secagem das lâminas;
- preparo das lâminas;
- execução das emendas (junções);
- colagem;
- acabamento e tratamento preservativo.

A secagem é realizada em estufa, pois as lâminas não podem apresentar uma variação significativa do grau de umidade, de forma a evitar um gradiente interno de deformação entre as lâminas que pode ocasionar, posteriormente, empenamento da peça ou o descolamento entre lâminas. O preparo das lâminas consiste em serrá-las e plainá-las nas dimensões adequadas.

As emendas podem ser executadas segundo os modos expostos na Figura 3.29. Tais emendas são dispostas espaçadamente ao longo da peça (Figura 3.30). A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que em lâminas adjacentes, de espessura t, suas emendas devem estar afastadas entre si de uma distância maior ou igual a 25 t ou à altura h da viga. Além disso, as emendas contidas em um comprimento igual à altura da viga devem ser consideradas como pertencentes à mesma seção resistente.

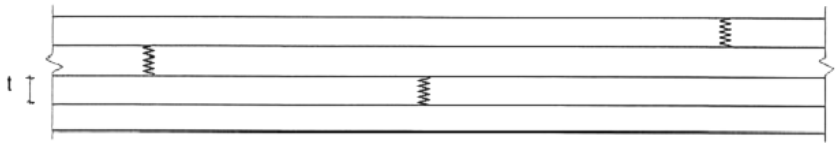
Figura 3.29 – Detalhe de emendas em lâminas de vigas laminadas.



(a) Emenda de topo. (b) Emenda biselada. (c) Emenda dentada vertical. (d) Emenda dentada horizontal.

Fonte: Teles (2009). Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Figura 3.30 – Detalhe da distribuição das emendas longitudinalmente à viga.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

As lâminas emendas apresentam sua seção resistente reduzida, em função do tipo de junção utilizada, conforme Eq.(3.3):

$$A_{red} = \alpha_r \cdot A_{ef} \tag{3.3}$$

na qual, A_{red} é a área reduzida da seção transversal da lâmina em análise; A_{ef} é a área efetiva da lâmina sem a consideração da emenda; α_r é o coeficiente de redução, função do tipo de emenda, com os seguintes valores:

- emendas dentadas (*fingerjoints*): $\alpha_r = 0{,}9$;
- emendas em cunha (biseladas) com inclinação de 1:10: $\alpha_r = 0{,}85$;
- emendas de topo: $\alpha_r = 0{,}0$.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), o tipo de adesivo e a técnica de colagem são fundamentais a durabilidade da peça laminada colada. A colagem é realizada sob pressão variável de 0,7 a 1,5 MPa, sendo o nível de pressão compatível com a rigidez do material prensado. A quantidade de cola utilizada no processo é aproximadamente 250 g por metro quadrado.

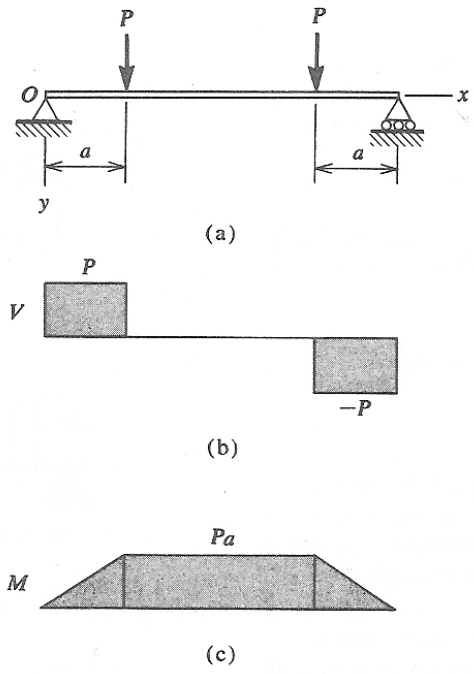
Os produtos estruturais industrializados de laminados colados devem ser fabricados sob rigoroso controle de qualidade, para garantir as características mecânicas e de durabilidade. Devido à distribuição das lâminas na peça laminada colada, elementos estruturais fabricados sob este método resultam mais homogêneos que os feitos com madeira serrada, pois os nós e defeitos são distribuídos aleatoriamente ao longo da peça fabricada. Os laminados colados permitem: a execução de peças de grandes dimensões; o melhor controle de umidade, a prevenção de defeitos resultantes de secagem irregular; a seleção de lâminas em posições referentes ao nível tensão; a construção de peças com eixo curvo, permitindo satisfazer necessidades arquitetônicas. No entanto, a desvantagem desse sistema é o elevado preço, devido ao elaborado nível tecnológico.

3.3.1 FLEXÃO

Considerando-se, a princípio, uma viga biapoiada solicitada por duas cargas igualmente espaçadas em relação aos seus apoios (Figura 3.31); observa-se que nas regiões extremas ocorre flexão simples reta (momento fletor e esforço cortante) e na região central há flexão pura reta (momento fletor). Diz-se que a flexão é reta, pois o plano de cargas é paralelo e perpendicular aos eixos centrais de inércia da seção transversal da viga. Portanto, o plano de

cargas refere-se ao plano *xy* (Figura 3.31) e sendo este um plano de simetria; as deflexões decorrentes da flexão se encontram nesse plano.

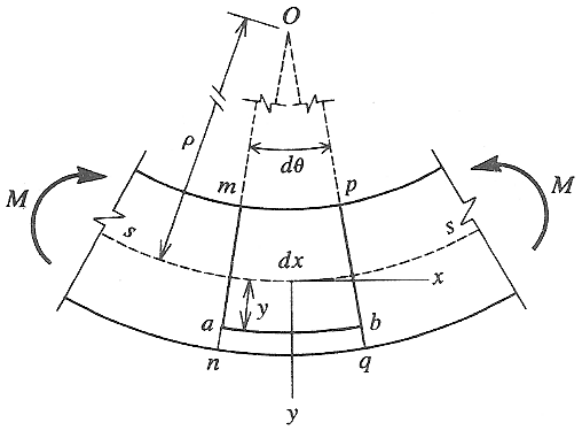
Figura 3.31 – Viga sob flexão pura e flexão simples.



Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

Com a aplicação de um momento fletor *M*, o eixo da viga se curva segundo um arco circular (Figura 3.32), desta forma, as seções transversais permanecem planas e perpendiculares às fibras longitudinais da viga, as quais constituem as hipóteses das vigas de *Bernoulli-Euler*, válidas para material elástico linear ou não.

Figura 3.32 – Deformação em uma viga sob flexão pura.



Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

As deformações por flexão giram as seções transversais *mn* e *pq* uma em relação a outra, em torno de eixos normais ao plano *xy*. Assim, as fibras longitudinais do lado convexo da viga são alongadas (tracionadas) e as fibras longitudinais do lado côncavo são encurtadas

(comprimidas). Como uma parte da seção está sob compressão e a outra sob tração, há uma superfície em que as fibras longitudinais não sofrem variação no comprimento, a qual está indicada pela linha tracejada *ss* na Figura 3.32 e é denominada superfície neutra. Sua interseção com o plano de qualquer seção transversal é denominado (a) eixo/linha neutro (a).

Pela análise da Figura 3.32 percebe-se que os planos das seções transversais *mn* e *pq* encontram-se no ponto *O*, o qual é o centro de curvatura do eixo longitudinal da viga, desta forma, escreve-se a Eq.(3.4):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \tag{3.4}$$

na qual, κ é a curvatura do eixo longitudinal da viga; ρ é o raio de curvatura; $d\theta$ é o ângulo em radianos entre as das seções da viga; dx é o comprimento do elemento entre as duas seções, o qual, na realidade, deveria ser um comprimento de arco (ds), mas pode ser aproximado pelo comprimento reto (dx), para o campo dos pequenos deslocamentos.

Da Figura 3.32 e utilizando a Eq.(3.4), o comprimento total da fibra *ab* é dado pela Eq.(3.5):

$$L' = (\rho + y)d\theta = \left(1 + \frac{y}{\rho}\right)dx \tag{3.5}$$

na qual, L' é o comprimento total da fibra *ab*.

O comprimento original da fibra *ab*, antes da deformação, é dx. Assim, o alongamento (ou encurtamento) da fibra é dado pela Eq.(3.6):

$$\Delta L = \left(1 + \frac{y}{\rho}\right)dx - dx = \frac{y}{\rho}dx \tag{3.6}$$

Assim, a deformação corresponde a Eq.(3.7):

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{y}{\rho}dx}{dx} = \frac{y}{\rho} = \kappa y \tag{3.7}$$

na qual, ε_x é a deformação específica longitudinal em *x*.

Diz-se então que a deformação específica ao longo de toda barra varia linearmente com a distância *y* à superfície neutra e à curvatura.

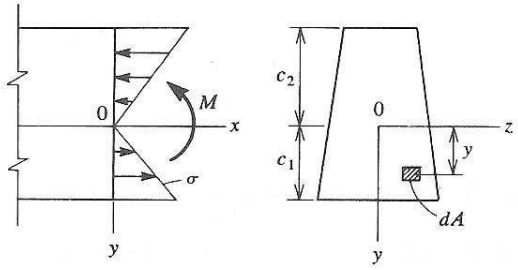
Sendo a viga de material elástico linear (material que obedece a lei de Hooke), as tensões normais na viga são dadas pela Eq.(3.8):

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x = \kappa E y \tag{3.8}$$

na qual, σ_x é a tensão normal em *x* devida à flexão; E é o módulo de elasticidade longitudinal do material da viga.

As tensões normais variam linearmente com a distância *y* a linha neutra (Figura 3.33).

Figura 3.33 – Distribuição da tensão normal em uma viga sob flexão.



Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

Como não há força axial normal aplicada na seção, a resultante devida à flexão deve ser nula conforme Eq.(3.9):

$$\int \sigma_x dA = \int \kappa E y \, dA = 0 \tag{3.9}$$

na qual, dA é um elemento infinitesimal de área da seção transversal da viga distante y da linha neutra.

Da Eq.(3.9), como a curvatura (κ) e o módulo de elasticidade (E) são constantes, resulta a Eq.(3.10):

$$\int y \, dA = 0 \tag{3.10}$$

A partir da Eq.(3.10) vê-se que o momento estático de área (momento de primeira ordem) em relação à linha neutra (eixo z) é nulo. Desta forma, a linha neutra passa pelo centroide da seção transversal da viga. Como o eixo y é um eixo de simetria, este também passa pelo centroide da seção transversal, assim, a interseção entre os eixos y e z é o centro geométrico da seção transversal e tais eixos são centrais de inércia.

O momento M aplicado é igual ao momento resultante em relação à linha neutra das forças infinitesimais $\sigma_x dA$, logo, tem-se a Eq.(3.11):

$$M = \int \sigma_x y \, dA = \int \kappa E y^2 \, dA = \kappa E \int y^2 dA = \kappa E I \tag{3.11}$$

na qual, I é o momento de inércia (momento de segunda ordem) em relação ao eixo neutro, dado pela Eq.(3.12):

$$I = \int y^2 dA \tag{3.12}$$

Pode-se reescrever a Eq.(3.11) conforme a Eq.(3.13):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \tag{3.13}$$

na qual, a curvatura do eixo longitudinal da viga κ é diretamente proporcional ao momento fletor M e inversamente proporcional à parcela EI, a qual é dita rigidez à flexão ou rigidez flexional.

Introduzindo a Eq.(3.13) na Eq.(3.8), obtém-se a Eq.(3.14):

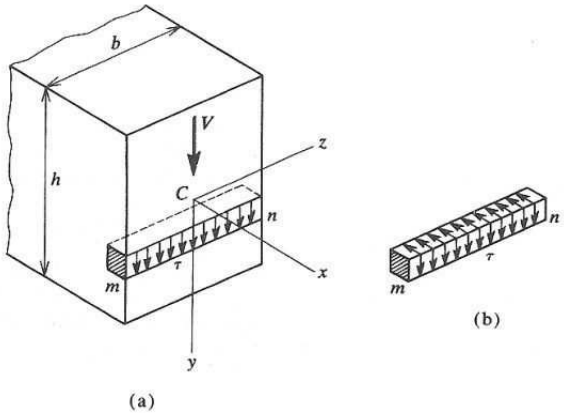
$$\sigma_x = \frac{M}{I} y \tag{3.14}$$

A partir da Eq.(3.14) têm-se que as máximas tensões de tração e de compressão ocorrem nas fibras mais afastadas da linha neutra.

3.3.2 CISALHAMENTO

Para uma viga de seção transversal retangular admite-se que as tensões de cisalhamento (τ) sejam paralelas à força cortante (V), ou seja, paralelas aos lados verticais da seção transversal. Além disso, admite-se ainda que a distribuição das tensões de cisalhamento seja uniforme ao longo da largura da viga (Figura 3.34).

Figura 3.34 – Detalhe das tensões de cisalhamento ao longo da base de uma viga retangular.

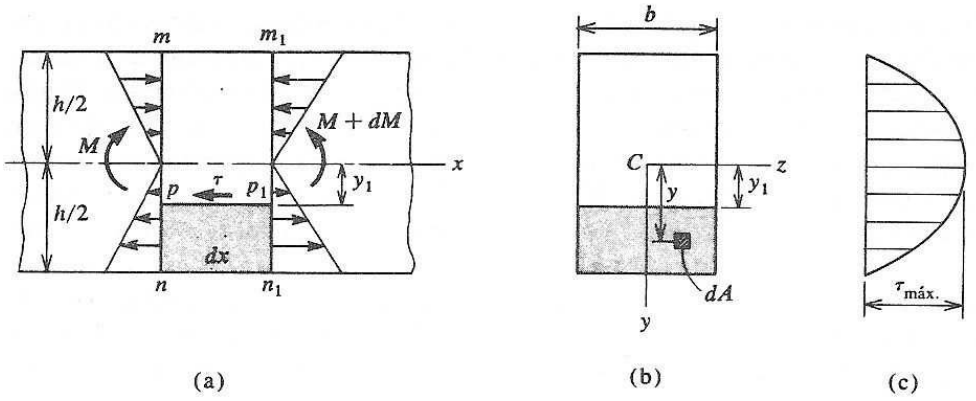


Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

Analisando-se o elemento de viga *mn*, obtido por meio de duas seções transversais adjacentes e de dois planos paralelos ao plano neutro, percebe-se que há uma distribuição uniforme tensões de cisalhamento verticais e por equilíbrio há também tensões de cisalhamento horizontais entre as fibras horizontais da viga. Em qualquer ponto da viga, estas tensões complementares (cisalhamentos vertical e horizontal) são iguais.

Para o cálculo da tensão de cisalhamento horizontal aplica-se a condição de equilíbrio a um elemento pnn_1p_1 (Figura 3.35), isolado da viga por duas seções transversais adjacentes, *mn* e m_1n_1, à distância *dx* entre elas. A face inferior deste elemento é a borda inferior da viga, na qual não há tensão. A face superior dista da linha neutra y_1, distância de valor arbitrário. Nesta face, atua a tensão de cisalhamento horizontal atuante nesse trecho da viga. Nas faces *mn* e m_1n_1 atuam as tensões normais referentes à flexão. Além dessas, atuam tensões de cisalhamento vertical, no entanto, não são utilizadas no equilíbrio do trecho de viga ao longo do eixo *x*.

Figura 3.35 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura de uma viga de seção transversal retangular.



Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

O equilíbrio de forças na direção *x* no elemento pnn_1p_1 é dado pela Eq.(3.15):

$$\int_{y_1}^{h/2} \frac{(M+dM)y}{I} dA - \int_{y_1}^{h/2} \frac{My}{I} dA - \tau b dx = 0 \tag{3.15}$$

na qual, dM é o incremento de momento fletor entre duas seções distantes entre si dx; τ é a tensão de cisalhamento na face pp_1; b é a base da viga.

Trabalhando-se com a Eq.(3.15) obtém-se a Eq.(3.16):

$$\tau = \frac{dM}{dx}\left(\frac{1}{bI}\right)\int_{y_1}^{h/2} y dA \tag{3.16}$$

Sabe-se que das relações diferenciais entre os esforços de vigas tem-se a Eq.(3.17):

$$\frac{dM}{dx} = V \tag{3.17}$$

Além disso, o termo integral da Eq.(3.16) representa o momento estático de área (momento de primeira ordem) da parte sombreada da seção transversal da viga (Figura 3.35b) em relação à linha neutra.

Assim a Eq.(3.16) resulta na Eq.(3.18):

$$\tau = \frac{VQ}{bI} \tag{3.18}$$

na qual, V é o esforço cortante atuante na seção em análise da viga; Q é o momento estático de área em relação à linha neutra da região da seção transversal onde se estar calculando a tensão de cisalhamento vertical ou horizontal.

Para calcular como varia a distribuição de tensões cisalhantes ao longo da altura (h) da viga examina-se a variação de Q com y_1, pois V, I, b são constantes.

Sendo o momento estático de área dado pelo produto de uma área pela distância do centroide desta área ao eixo de referência, tem-se o seguinte valor do momento estático de área da região sombreada da Figura 3.35b em relação à linha neutra, segundo Eq.(3.19):

$$Q = b\left(\frac{h}{2} - y_1\right)\left(y_1 + \frac{\frac{h}{2} - y_1}{2}\right) = \frac{b}{2}\left(\frac{h^2}{4} - y_1^2\right) \tag{3.19}$$

na qual, é a altura da seção transversal da viga.

A partir da Eq.(3.19) observa-se que a tensão de cisalhamento varia parabolicamente com y_1 (Figura 3.35c). A tensão é nula quando $y_1 = \pm h/2$; e a tensão é máxima na linha neutra ($y_1 = 0$), além disso, o momento de inércia da seção retangular é $\frac{bh^3}{12}$. Então, utilizando-se a Eq.(3.18) e a Eq.(3.19) obtém-se a Eq.(3.20):

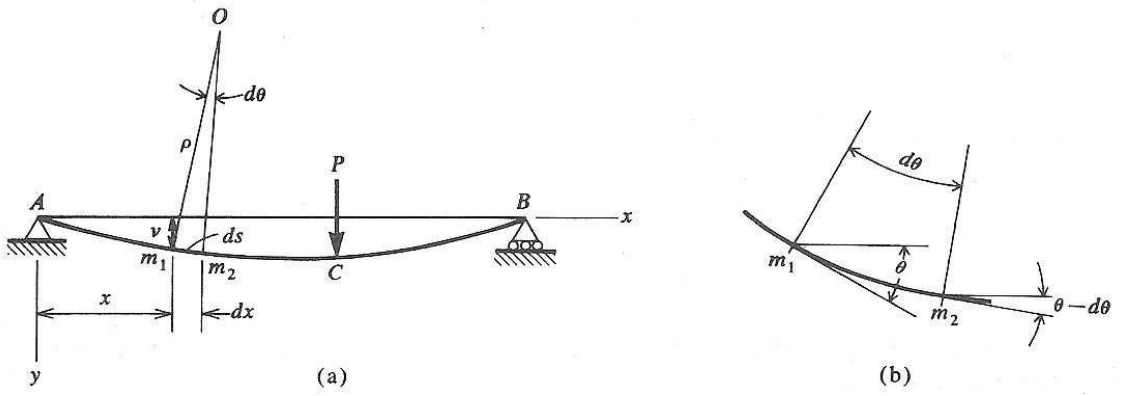
$$\tau_{máx} = \frac{V}{b \cdot \frac{bh^3}{12}} \cdot \frac{b}{2}\left(\frac{h^2}{4} - 0^2\right) = \frac{3V}{2bh} \tag{3.20}$$

3.3.3 DEFLEXÃO

As cargas transversais em uma viga causam deformações e deslocamentos. E, de forma geral, há um limite máximo para tais deslocamentos no projeto de estruturas.

Considerando-se a viga simplesmente apoiada da Figura 3.36, na qual antes da aplicação da carga *P* o eixo longitudinal da viga é reto. Após a flexão, o eixo torna-se curvo segundo a linha *ACB*, a qual é chamada de linha elástica da viga. Suponham-se, mais uma vez, que o plano *xy* seja um plano de simetria e que todas as cargas estejam nesse plano.

Figura 3.36 –Detalhe da linha elástica de uma viga biapoiada.



Fonte: Timoshenko e Gere (1983).

Para deduzir-se a equação diferencial da linha elástica utiliza-se a relação entre a curvatura (κ) e o momento fletor (*M*), dada na Eq.(3.13). No entanto, deve-se adequar a convenção de sinais entre a curvatura da viga com o sentido dos eixos coordenados. Como o eixo *x* é positivo para direita e o eixo *y* é positivo para baixo; admite-se que a curvatura seja positiva se a viga fletida for côncava para baixo, e negativa se a viga fletida for côncava para

cima (conforme o caso da Figura 3.36). Além disso, o momento fletor é dito positivo quando traciona as fibras inferiores da viga e gera uma curvatura negativa, e é negativo quando traciona as fibras superiores com curvatura positiva. Portanto, a Eq.(3.13) torna-se a Eq.(3.21):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = -\frac{M}{EI} \tag{3.21}$$

A partir da Figura 3.36b considera-se dois pontos com tangentes m_1 e m_2, distantes entre si ds. Em cada um dos pontos das tangentes com a linha elástica traçam-se normais que se interceptam no ponto O. Se a primeira tangente (m_1) faz um ângulo θ com o eixo x, a segunda tangente (m_2) corresponde a um ângulo $\theta - d\theta$, sendo $d\theta$ o ângulo entre as duas normais Om_1 e Om_2, ou seja, o ângulo entre as duas seções da viga. Então, define-se a Eq.(3.22):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \tag{3.22}$$

na qual, ds é o comprimento infinitesimal da linha elástica entre os pontos definidos entre as tangentes m_1 e m_2.

Admitindo-se o campo dos pequenos deslocamentos, que se enquadra na maioria das aplicações práticas, as linhas elásticas são muito achatadas e o ângulo θ tem valores diminutos. Então, escrevem-se as Eqs.(3.23):

$$ds \approx dx \qquad\qquad \theta \approx tg\,\theta = \frac{dy}{dx} \tag{3.23}$$

Substituindo-se os resultados das Eqs.(3.23) nas Eqs.(3.22) e (3.21), obtém-se a Eq.(3.24):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \tag{3.24}$$

Assim, a Eq.(3.24) define a equação diferencial básica para a linha elástica de uma viga, no caso das pequenas deformações e desprezando-se a parcela de deformações referente ao esforço cortante. Tem-se, por exemplo, que a parcela de deslocamento devido à força cortante na região central da viga da Figura 3.31, onde ocorre flexão pura (esforço cortante nulo), será nula. Além disso, para vigas com alta relação $L/h \geq 10$, o efeito das deformações angulares (proveniente da energia de deformação devido ao esforço cortante) torna-se desprezível.

3.4 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS CONSIDERADAS NO PROJETO

As madeiras, comumente utilizadas na construção civil, assim como o bambu, constituem um material natural não homogêneo nem tão pouco isotrópico, que apresentam propriedades variáveis desde as condições de crescimento (temperatura, umidade do solo, incidência de chuvas) até a utilização de partes distintas em uma mesma planta (posição da amostra em relação à altura da planta, o seu diâmetro, maior ou menor incidência de nós). O Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997) trata dos métodos de ensaio padronizados em amostras sem defeitos para determinação das propriedades físico-mecânicas das madeiras para projeto de estruturas, a saber:

- umidade;
- densidade;
- estabilidade dimensional;
- compressão paralela às fibras;
- tração paralela às fibras;
- compressão normal às fibras;
- tração normal às fibras;
- cisalhamento;
- fendilhamento;
- flexão;
- dureza;
- resistência ao impacto na flexão;
- embutimento;
- cisalhamento na lâmina de cola;
- tração normal à lâmina de cola;
- resistência das emendas dentadas e biseladas.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), para o cálculo da resistência característica dessas propriedades utiliza-se a Eq.(3.25):

$$X_{wk} = \left[2 \cdot \left(\frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{\frac{n}{2} - 1}\right) - X_{\frac{n}{2}}\right] \cdot 1{,}1 \tag{3.25}$$

na qual, X_{wk} representa o valor característico de resistência e o valores de resistência ensaiados devem ser colocados em ordem crescente $X_1 \leq X_2 \leq \cdots \leq X_n$, desprezando-se o

valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar. O valor característico (X_{wk}) deve ser igual ao maior valor entre: o mínimo amostral (X_1); o característico (X_{wk}) calculado pela Eq.(3.25); ou o valor calculado da Eq.(3.26), conforme Pfeil e Pfeil (2003):

$$X_{wk} = (1 - 1{,}645 \cdot \delta) \cdot X_m \tag{3.26}$$

na qual, δ é o coeficiente de variação da amostra de resistências, considerando que os dados tenham uma variação estatística com distribuição normal (*gaussiana*), de forma que o valor característico tenha apenas 5% de probabilidade de não ser atingido em um dado do lote de material; X_m é dado pela média aritmética dos dados da amostra de resistências.

3.4.1 UMIDADE

As plantas utilizam água para cumprir suas funções biológicas, assim, na fase de extração, estas se apresentam com teor de umidade elevado, impróprio para utilização na construção civil. Após o corte, entram em equilíbrio higroscópico com o meio ambiente, perdendo água até a condição na qual se mantêm apenas as moléculas de água localizadas no interior das paredes celulares.

A evaporação resulta na diminuição da densidade da madeira, o que reduz o custo de transporte. Além disso, a prévia secagem deve ser realizada por diversos motivos:

- redução da variação dimensional;
- melhores alternativas de acabamentos como tintas, vernizes e produtos ignífugos;
- menor incidência do ataque de fungos;
- incremento das resistências e da elasticidade.

O teor de umidade, em porcentagem, corresponde à relação entre a massa de água contida na amostra e a sua massa seca, conforme Eq.(3.27):

$$U\ (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \tag{3.27}$$

na qual, m_i é a massa inicial da amostra e m_s é a sua massa seca, ambas em gramas (g), dada pela massa final do corpo de prova seco em estufa desde que a variação, entre duas medidas consecutivas, seja menor que 0,5% da última medida.

A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece como umidade de equilíbrio, a ser utilizada em projeto, o valor de 12%. Além disso, estabelece as classes de umidade (Tabela 3.1) que irão ajustar as propriedades de resistência e rigidez, para umidade entre 10 e 20%, em função das

condições ambientais onde se estabelecerão as estruturas, conforme as Eqs.(3.28) e (3.29). Para valores de umidade acima de 20% e temperaturas entre 10 e 60 ºC considera-se insignificante a variação das propriedades mecânicas.

Tabela 3.1–Classes de Umidade.

Classes de Umidade	Umidade relativa do ar U_{ar} (%)	Umidade de equilíbrio do bambu U_{eq} (%)
1	≤ 65	12
2	65 < U_{ar} ≤ 75	15
3	75 < U_{ar} ≤ 85	18
4	U_{ar} > 85 (durante longos períodos)	≥ 25

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$f_{12} = f_{U\%}\left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100}\right] \tag{3.28}$$

$$E_{12} = E_{U\%}\left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100}\right] \tag{3.29}$$

nas quais, f_{12}e E_{12} são a resistência e o módulo de elasticidade, respectivamente, a umidade de 12%; $f_{U\%}$e $E_{U\%}$ são a resistência e o módulo de elasticidade, respectivamente, a umidade de U%.

3.4.2 DENSIDADE

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

3.4.2.1 Densidade básica

É definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, dada pela Eq.(3.30):

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \tag{3.30}$$

na qual, ρ_{bas} é a densidade básica; e, V_{sat} é o volume saturado da amostra determinado pelas dimensões finais do corpo de prova submerso em água até que atinja massa constante ou com um variação máxima de 0,5% em relação à medida anterior.

3.4.2.2 Densidade aparente

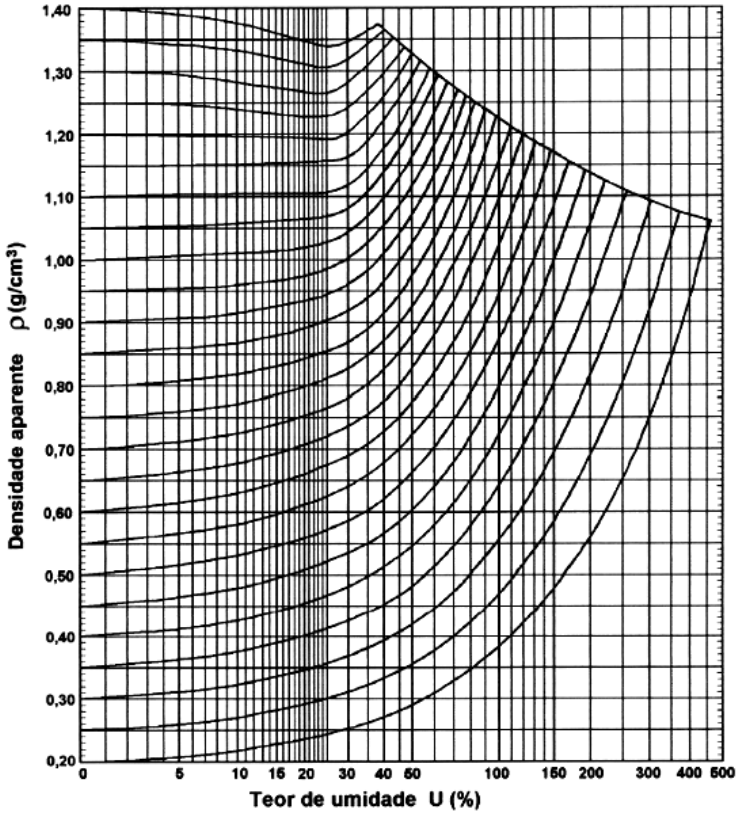
É definida pela razão entre a massa e o volume, para a amostra a 12% de umidade, Eq.(3.31):

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \tag{3.31}$$

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

É praticamente impossível impor a umidade de 12% a uma amostra para obter sua densidade, devido a isso, Kollmann realizou estudos com espécies de madeira de clima temperado e frio, elaborou um gráfico de correção da densidade devido à variação de umidade (Figura 3.37).

Figura 3.37 – Diagrama de Kollmann.



Fonte: Kollmann e Côté (1985).

Posteriormente, Logsdon (1998) propôs uma expressão para representar a influência da umidade na densidade aparente para espécies de madeira crescidas no Brasil, dada pela Eq.(3.32):

$$\rho_{ap} = \rho_U + \rho_U \left[(1 - \delta_V) \cdot \frac{(12 - U)}{100}\right] \tag{3.32}$$

na qual, ρ_U é a densidade aparente a U% de umidade; U é a umidade, em porcentagem, no instante do ensaio; e, δ_V é o coeficiente de retratibilidade volumétrico dado pela Eq.(3.33):

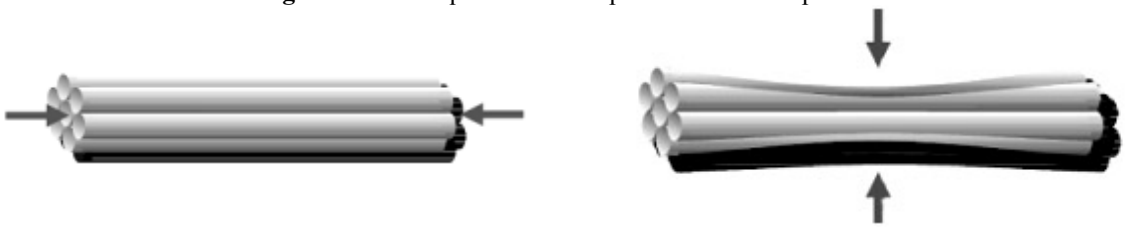
$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V_s} = \frac{V_U - V_s}{V_s} \tag{3.33}$$

na qual, V_U e V_s são os volumes dos corpos de prova a U% e 0% de umidade, respectivamente.

3.4.3 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

A direção longitudinal das peças é coincidente com a orientação das fibras. Nesta direção, têm-se os maiores valores de resistência de compressão. Em contrapartida, na direção perpendicular às fibras resultam os menores valores de resistência (Figura 3.38). A ruptura de corpo de prova à compressão paralela às fibras ocorre por ruptura do material ligante e flambagem (perda de estabilidade) das fibras, tendo uma ruptura dúctil (deformação plástica).

Figura 3.38 – Esquemas do comportamento à compressão.



(a) paralela às fibras. (b) perpendicular às fibras.

Fonte: Adaptado de Stamato e Góes (?).

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão em um corpo de prova de seção transversal quadrada (5,0 x 5,0 cm) e comprimento de 15,0 cm, conforme Eq.(3.34):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A_{c0}} \tag{3.34}$$

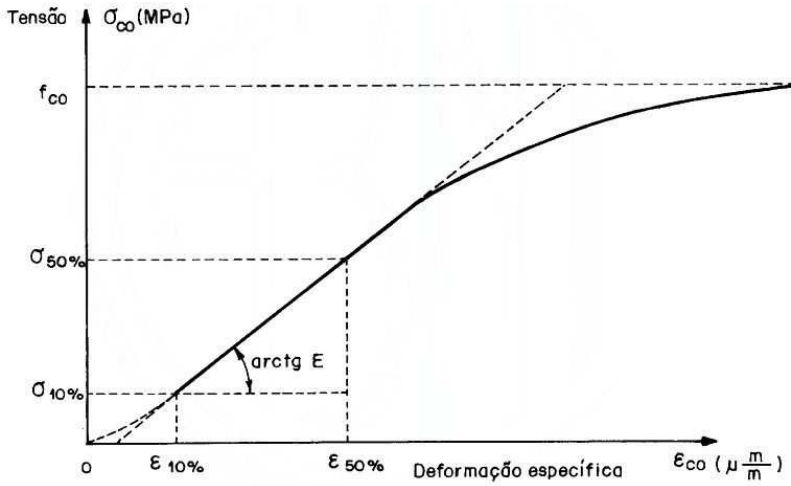
na qual, f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras; $F_{c0,máx}$ é a máxima força de compressão aplicada sobre o corpo de prova; e, A_{c0} é a área inicial da seção transversal comprimida. A partir dos valores de resistência à compressão paralela às fibras determina-se a resistência característica pela Eq.(3.25).

Por meio do ensaio de compressão paralela às fibras obtém-se a rigidez através do módulo de elasticidade à compressão, o qual é extraído do trecho linear do diagrama tensão x deformação. Assim, o módulo de elasticidade é determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação nos pontos de 50% e 10% da resistência à compressão paralela às fibras (Figura 3.39), conforme Eq.(3.35):

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \tag{3.35}$$

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

Figura 3.39 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras.

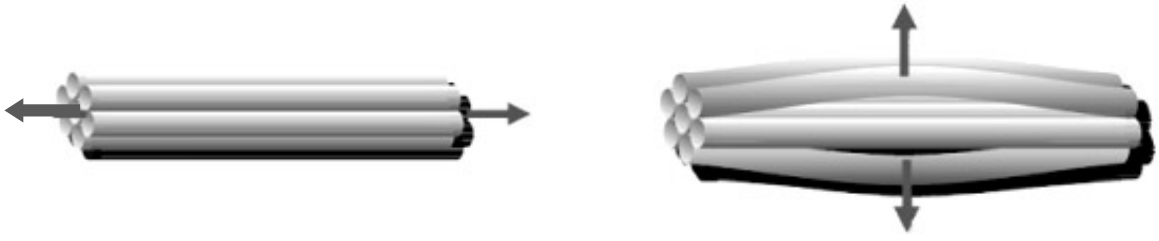


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.4.4 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Similarmente à compressão, a resistência à tração apresenta sua maior magnitude na direção paralela às fibras, já que na direção perpendicular às fibras se têm baixíssimos valores de resistência, de tal forma que, para condições de projeto, não deve considerar qualquer contribuição de resistência devido à tração paralela às fibras (Figura 3.40). A ruptura por tração paralela às fibras se dá por meio do deslizamento entre as fibras ou pela ruptura de suas paredes. Para ambos os modos de ruptura, os corpos de prova de bambu apresentam baixos valores de deformação específica e altos valores de resistência caracterizando uma ruptura frágil.

Figura 3.40 – Esquemas do comportamento à tração.



(a) paralela às fibras. (b) perpendicular às fibras.

Fonte: Adaptado de Stamato e Góes (?).

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência à tração paralela às fibras é dada pela máxima tensão de tração sobre um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme e comprimento não menor que $8\sqrt{A_{t0}}$, que apresenta extremidades mais resistentes que o trecho central, de forma a garantir a ruptura no trecho central, conforme Eq.(3.36):

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,máx}}{A_{t0}} \tag{3.36}$$

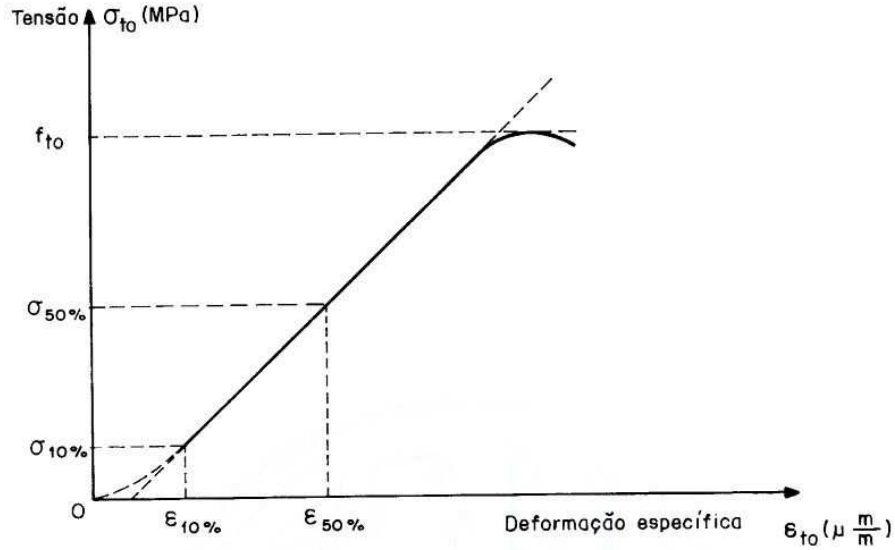
na qual, f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras; $F_{t0,máx}$ é a máxima força de tração aplicada sobre o corpo de prova; e, A_{t0} é a área inicial da seção transversal do trecho central do corpo de prova. A partir dos valores de resistência à tração paralela às fibras determina-se a resistência característica pela Eq.(3.25).

Por meio do ensaio de tração paralela às fibras obtém-se a rigidez do bambu através do módulo de elasticidade à tração, o qual é extraído do trecho linear do diagrama tensão x deformação. Assim, o módulo de elasticidade é determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação nos pontos de 50% e 10% da resistência à tração paralela às fibras (Figura 3.41), conforme Eq.(3.37):

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \tag{3.37}$$

na qual, E_{t0} é o módulo de elasticidade à tração paralela às fibras; $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ são as tensões de tração a 10 e 50% da resistência f_{t0}; e, $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo de prova.

Figura 3.41 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à tração paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.4.5 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

O cisalhamento pode se dá paralelo ou perpendicular às fibras. O cisalhamento perpendicular às fibras apresenta elevada resistência devido ao fato de cisalhar em um plano resistido pela seção transversal das fibras. Já o cisalhamento paralelo ocorre em um plano entre fibras resultando em uma resistência consideravelmente menor (Figura 3.42).

Figura 3.42 – Esquemas do comportamento ao cisalhamento.

(a) paralela às fibras. (b) perpendicular às fibras.

Fonte: Ritter (1990)

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção de corte de um corpo de prova, conforme Eq.(3.38):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}} \tag{3.38}$$

na qual, f_{v0} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; $F_{v0,máx}$ é a máxima força de cisalhamento aplicada sobre o corpo de prova; e, A_{v0} é a área inicial da seção transversal crítica do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras. A partir dos valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras determina-se a resistência característica pela Eq.(3.25).

3.4.6 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM

Para Lapo e Beraldo (2008), a transmissão de carga em grande parte das ligações adesivas ocorre por cisalhamento, pois a resistência ao cisalhamento na direção das fibras é uma característica mecânica de importante influência nas ligações.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na lâmina de cola é dada pela máxima tensão de cisalhamento atuando no plano de colagem de um corpo prismático, conforme Eq.(3.39):

$$f_{gv0} = \frac{F_{gv0,máx}}{A_{gv0}} \tag{3.39}$$

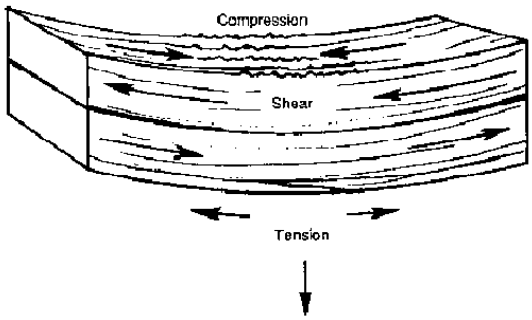
na qual, f_{gv0} é a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras; $F_{gv0,máx}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova; e, A_{gv0} é a área inicial da lâmina de

colagem do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras. A partir dos valores de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras determina-se a resistência característica pela Eq.(3.25).

3.4.7 FLEXÃO ESTÁTICA

Conforme Ritter (1990), nas peças submetidas à flexão simples (Figura 3.43) existem esforços que geram tensões dos seguintes modos: compressão paralela às fibras; tração paralela às fibras; cisalhamento longitudinal (paralelo às fibras); cisalhamento transversal (perpendicular às fibras); e compressão normal às fibras na região de apoio.

Figura 3.43 – Esquema do comportamento à flexão simples.



Fonte: Ritter (1990).

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

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência à flexão é um valor convencional, dado pela máxima tensão que atua em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, calculado conforme a hipótese de o material ser elástico, Eq.(3.40):

$$f_M = \frac{M_{máx}}{W_e} \tag{3.40}$$

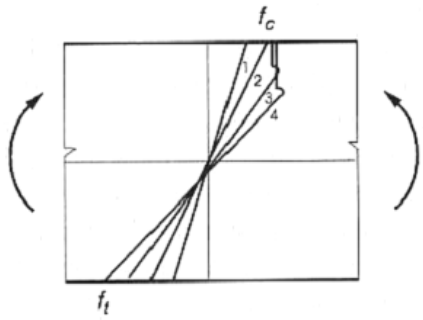
na qual, f_M é a resistência à flexão; $M_{máx}$ é o máximo momento fletor aplicado ao corpo de prova; e, W_e é o módulo resistente elástico da seção transversal do corpo de prova estabelecido pela Eq.(3.41):

$$W_e = \frac{I}{h/2} \tag{3.41}$$

na qual, I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de cargas; e h é a altura da seção transversal da peça fletida.A partir dos valores de resistência à flexão determina-se a resistência característica pela Eq.(3.25).

Na realidade, conforme se mostra na Figura 3.44, para tensões menores que a tensão limite de proporcionalidade o diagrama de tensões é linear. No entanto, com o acréscimo de carga ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$) as tensões de compressão passam ao regime plástico na região comprimida, resultando, posteriormente, em ruptura por tração como descrito anteriormente.

Figura 3.44 – Diagrama das tensões de tração e compressão em estágios progressivos de incremento de carga.



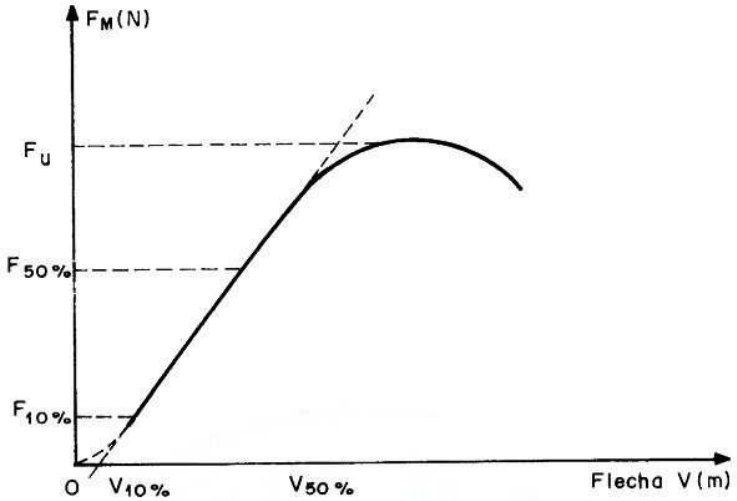
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Por meio do ensaio de flexão de três pontos (um ativo e dois reativos) é obtido o módulo de elasticidade à flexão, o qual é extraído do trecho linear do diagrama carga x deslocamento no meio do vão. A partir da inclinação da reta secante à curva nos pontos de 50% e 10% da carga máxima de ensaio (Figura 3.45) tem o módulo à flexão, conforme Eq.(3.42):

$$E_{M0} = \left(\frac{F_{M,50\%} - F_{M,10\%}}{v_{50\%} - v_{10\%}}\right) \cdot \frac{L^3}{4bh^3} \tag{3.42}$$

na qual, E_{M0} é o módulo de elasticidade à flexão; $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as cargas referentes à 10% e 50% da carga máxima de ensaio, respectivamente; $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no ponto médio do vão referentes à 10% e 50% da carga máxima; L é o vão livre entre apoios; e b é a base da seção transversal do corpo de prova.

Figura 3.45 – Diagrama carga x flecha para determinação da rigidez à flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.5 ESTADOS LIMITES DAS ESTRUTURAS

São estados a partir dos quais a estrutura apresenta condições inadequadas às finalidades de construção.

3.5.1 ESTADOS LIMIITES ÚLTIMOS (ELU)

São estados que, ao ocorrerem, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção. Podem-se ter os seguintes casos: perda de equilíbrio, global ou parcial, para estrutura como corpo rígido; ruptura ou elevadas deformações plásticas dos materiais; transformação da estrutura em um sistema hipostático; instabilidade por deformação.

A segurança de uma estrutura em relação aos estados limites últimos é obtida, além de condições construtivas a serem atendidas, basicamente pela obediência da Eq.(3.43):

$$S_d \leq R_d \tag{3.43}$$

na qual, S_d representa a tensão de solicitação em projeto e R_d é a resistência de cálculo do material.

3.5.2 ESTADOS LIMIITES DE UTILIZAÇÃO (ELUt)

São estados que, devido a sua ocorrência, repetição ou duração levam a más condições do uso normal da construção, ou que indiquem o comprometimento da durabilidade da construção. Usualmente são considerados na análise, para situação de projeto: deformações excessivas e vibrações de amplitude excessiva.

A verificação da segurança, no que diz respeito aos estados limites de utilização, é atendida pela obediência da Eq.(3.44):

$$S_{d,\,uti} \leq S_{lim} \tag{3.44}$$

na qual, $S_{d,\,uti}$ são valores decorrentes da aplicação das ações, calculados com a hipótese de comportamento elástico linear da estrutura e S_{lim} é o valor pré-estabelecido para efeito estrutural que limita o aparecimento do estado limite considerado.

3.6 AÇÕES

3.6.1 TIPOS DE AÇÕES

Segundo a ABNT NBR 8681 (2004), as ações são as causas que provocam o surgimento de esforços e deformações nas estruturas. São classificadas em:

- **ações permanentes**: que ocorrem com pequena ou nenhuma variação, durante praticamente toda a vida da construção. Exemplo: peso próprio dos elementos constituintes das estruturas. Na avaliação do peso próprio, devem-se considerar os elementos com teor de umidade de 12%. Além disso, o peso dos elementos pré-dimensionados não deve diferir em mais de 10% em relação ao peso dos elementos após o dimensionamento final;
- **ações variáveis**: que ocorrem com variação significativa ao longo da vida da construção. Exemplo: carga de vento. A ação do vento deve ser determinada conforma a norma ABNT NBR 6123 (1988), a qual não depende do tipo de material, mas, principalmente, do tipo de contorno da estrutura. Em referência, a levar em consideração a maior resistência da madeira/bambu sob ações de cargas de curta duração, a ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que na verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, apenas na combinação de ações de longa duração em que o vento representa a ação variável principal, as solicitações nas peças de madeira/bambu referentes à ação do vento serão multiplicadas por 0,75;
- **ações excepcionais**: apresentam duração extremamente curta e baixíssima probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, no entanto, devem ser consideradas no projeto de algumas estruturas.

3.6.2 CLASSES DE CARREGAMENTO

A classe de carregamento é obtida mediante a duração acumulada prevista da ação variável principal (por exemplo, vento), definindo-se a combinação de ações a ser considerada no projeto da estrutura (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Classes de carregamento.

Classes de carregamento	**Ação variável principal da combinação**	
	Duração acumulada	*Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica*
Permanente	Permanente	Vida útil da construção
Longa duração	Longa duração	Mais de seis meses
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Instantânea	Muito curta

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.6.3 COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a formulação para as combinações últimas normais é dada pela Eq.(3.45):

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} F_{gi,k} + \gamma_q \left[F_{q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \Psi_{0j} F_{qj,k} \right] \tag{3.45}$$

na qual, F_d é o valor de cálculo das ações; $F_{gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes; $F_{q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal; $F_{qj,k}$ é o valor característicos das ações variáveis secundárias; γ_{gi} é o coeficiente de majoração de ações permanentes de grande variabilidade (Tabela 3.3), para as ações constituídas pelo peso próprio das estruturas e dos elementos construtivos permanentes não estruturais e dos equipamentos fixos, todos considerados globalmente, quando o peso próprio da estrutura não supera 75% da totalidade dos pesos permanentes; γ_q é o coeficiente de majoração de ações variáveis (Tabela 3.3); e Ψ_{0j} é o coeficiente redutor de combinação, o qual leva em consideração a baixíssima probabilidade de ocorrência simultânea de ações variáveis de naturezas distintas.

Tabela 3.3 – Coeficiente de ponderação de ações para combinação normal.

Ação	**Para efeitos**	
	Desfavoráveis	*Favoráveis*
Permanente	1,4	1,0
Variável	1,4	0,0

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Reformulando a Eq.(3.45), considerando apenas uma ação de peso próprio e uma ação variável proveniente de pressão de vento, obtém-se a combinação de ações para peças de madeira conforme Eq.(3.46):

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q [0{,}75 \cdot W_k] \tag{3.46}$$

na qual, $0{,}75 \cdot W_k$ é o valor da ação do vento, reduzido de 25% devido a maior resistência da madeira sob ações de cargas de curta duração.

Para peças metálicas, até mesmo para os elementos de ligações, a combinação de ações é dada pela Eq.(3.47):

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q W_k \tag{3.47}$$

na qual, W_k é o valor total da ação do vento.

3.6.4 COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a formulação para as combinações de longa duração que são consideradas no controle de deformações usuais das estruturas é dada pela Eq.(3.48):

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^{m} F_{gi,k} + \sum_{j=1}^{n} \Psi_{2j} F_{qj,k} \tag{3.48}$$

na qual, $F_{d,uti}$ é o valor das ações de utilização; e Ψ_{2j} é o coeficiente redutor de ações variáveis em combinação de utilização, o qual leva em consideração às condições de serviço, empregando-se os valores quase permanentes, ou de longa duração. Sendo $\Psi_2 = 0$ para o caso da ação variável ser a pressão dinâmica do vento.

3.7 VALORES DE CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997) a partir dos valores característicos de resistência, calculados conforme a Eq.(3.25), obtêm-se os valores das resistências de cálculo, os quais serão utilizados nas condições de segurança de projeto, conforme Eq.(3.49):

$$X_d = k_{mod} \frac{X_{wk}}{\gamma_w} \tag{3.49}$$

na qual, X_d é o valor de cálculo da resistência; X_{wk} é o valor característico da resistência; k_{mod} é o coeficiente modificador ou corretor de resistência, pois corrige as condições distintas entre os ensaios dos materiais e as condições a que estão submetidas as estruturas; e, γ_w é o coeficiente de minoração das propriedades de resistência.

Além do mais, o coeficiente de modificação (k_{mod}) resulta do produto de três coeficientes parciais, conforme Eq.(3.50):

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \tag{3.50}$$

na qual, $k_{mod,1}$ considera a duração do carregamento ou os efeitos das cargas repetidas (Tabela 3.4); $k_{mod,2}$ considera possíveis variações de resistência sob influência da umidade (Tabela 3.5); e, $k_{mod,3}$ trata das diferenças entre a qualidade do material empregado nos corpos de prova e o material utilizado nas estruturas.

Tabela 3.4 – Valores de $k_{mod,1}$.

Classes de carregamento	**Tipos de madeira**	
	Madeira serrada *Laminado(a) colado(a)* *Madeira compensada*	*Madeira recomposta*
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 3.5 – Valores de $k_{mod,2}$.

Classes de umidade	*Madeira serrada* *Laminado(a) colado(a)* *Madeira compensada*	*Madeira recomposta*
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O coeficiente parcial de modificação de resistência ($k_{mod,3}$) leva em consideração se a madeira é de primeira ou de segunda categoria. Para madeira de primeira categoria tem-se $k_{mod,3} = 1{,}0$; para madeira de segunda categoria resulta em $k_{mod,3} = 0{,}8$. Admitindo com madeira de primeira categoria aquele isenta de defeitos em todos os elementos estruturais que compõem a estrutura.

Para a madeira laminada colada, levando em consideração o controle tecnológico para fabricação desses elementos (condições de controle industrial), $k_{mod,3} = 1{,}0$ em peças retas.

O coeficiente de ponderação de resistência para estados limites últimos (γ_w) é definido em consonância com tipo de solicitação atuante na estrutura, ou seja: para compressão paralela às fibras $\gamma_{wc} = 1{,}4$; para tração paralela às fibras $\gamma_{wt} = 1{,}8$; e para cisalhamento paralelo às fibras $\gamma_{wv} = 1{,}8$. O coeficiente de ponderação para estados limites de utilização é igual a 1,0.

Nas verificações de segurança que necessitem da rigidez, o módulo de elasticidade é dado pela Eq.(3.51):

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0} \tag{3.51}$$

na qual, $E_{c0,ef}$ é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras efetivo.

3.8 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

3.8.1 TRAÇÃO

Peças submetidas à tração axial, o ELU é verificado ao atender a Eq.(3.52):

$$\sigma_{td} = \frac{N_{td}}{A_{útil}} \leq f_{t0d} \tag{3.52}$$

na qual, σ_{td} é a tensão axial de cálculo à tração atuante na seção crítica; N_{td} é o esforço solicitante de cálculo à tração; $A_{útil}$ é a área útil da seção transversal da peça, descontando-se furos e/ou entalhes; e f_{t0d} é a resistência de cálculo à tração paralelas às fibras.

3.8.2 FLEXÃO SIMPLES RETA

Conforme a ABNT NBR 7190 (1997), em peças fletidas utiliza-se o vão teórico para análise, o qual é tomado como o menor dos seguintes valores:

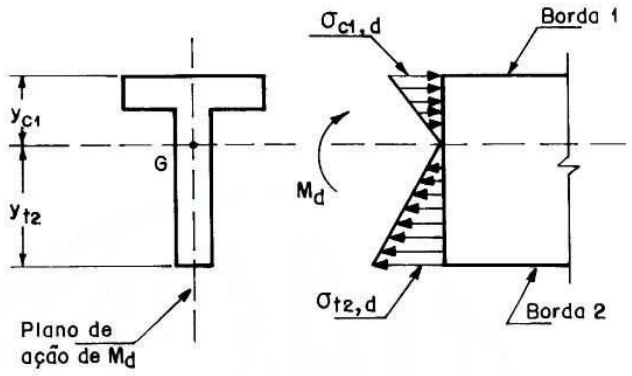
a) distância entre eixos dos apoios;
b) o vão livre acrescido da altura da seção transversal da peça no meio do vão, não se considerando acréscimo superior a 10 cm.

Em barras submetidas a momento fletor cujo plano de ações contém um eixo central de inércia da seção transversal resistente, garante-se a segurança atendendo as Eqs.(3.53):

$$\sigma_{c1d} = \frac{M_d \cdot I}{y_{c1}} \leq f_{c0d}$$
$$\sigma_{t2d} = \frac{M_d \cdot I}{y_{t2}} \leq f_{t0d} \tag{3.53}$$

na qual, σ_{c1d} e σ_{t2d} são as tensões atuantes de cálculo nas bordas mais comprimida e mais tracionada, respectivamente; M_d é o momento fletor máximo de cálculo atuante na peça; I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de atuação do momento fletor; y_{c1} e y_{t2} são as distâncias da linha neutra (que, no caso da flexão simples, passa pelo centro de gravidade da seção transversal) da peça até as fibras mais comprimida (borda 1) e mais tracionada (borda 2), respectivamente (Figura 3.46); e, f_{c0d} e f_{t0d} são as resistências de projeto à compressão e à tração, respectivamente, ambas paralelas às fibras.

Figura 3.46 – Esquema de uma peça submetida à flexão simples.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Com relação à força cortante, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais de uma peça de seção transversal retangular é estabelecida pela Eq.(3.54):

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b \cdot h} \leq f_{v0d} \tag{3.54}$$

na qual, τ_d é a máxima tensão cisalhante longitudinal de cálculo, a qual atua no plano que contém o eixo ao qual se tem o máximo momento estático de área; V_d é o esforço cortante máximo na peça fletida; b e h são a base e a altura da seção transversal do membro; f_{v0d} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de cálculo.

No apoio de vigas de madeira, deve-se verificar a condição de segurança de compressão perpendicular às fibras na região de atuação da reação de apoio ou de outras cargas concentradas, conforme Eq.(3.55):

$$\sigma_{c90d} = \frac{F_{90d}}{b \cdot c} \leq f_{c90d} = 0{,}25 \cdot f_{c0d} \cdot \alpha_n \tag{3.55}$$

na qual, σ_{c90d} é a tensão máxima de compressão perpendicular às fibras; F_{90d} é a carga normal às fibras de cálculo transmitida; c é a dimensão da superfície de apoio na direção da base da viga; b é a dimensão da superfície de apoio na direção do vão da viga (paralela às fibras); f_{c90d} é a resistência à compressão de cálculo perpendicular às fibras; α_n é o coeficiente de acréscimo de resistência, o qual é função da extensão, na superfície de transmissão da carga normal às fibras, medida paralelamente a estas (Tabela 3.6).

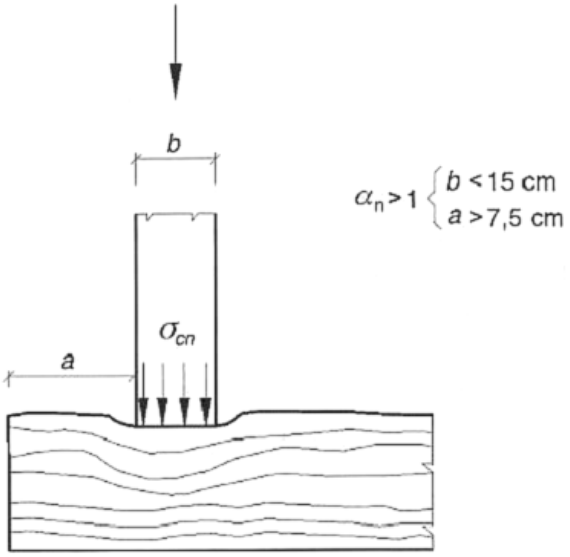
Tabela 3.6 – Valores de α_n.

b (cm)	α_n
1	2,00
2	1,70
3	1,55
4	1,40
5	1,30
7,5	1,15
10	1,10
≥ 15	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O acréscimo de resistência devido ao α_n não se aplica às áreas de apoios situadas nas extremidades da viga (distância entre a face externa do apoio e a extremidade da viga inferior a 7,5 cm), nem para extensão de apoio na direção das fibras menores que 15 cm (Figura 3.47). Nem, tão pouco, quando a carga atuar de modo distribuído na totalidade da superfície de peças de apoio. Na verdade, tal coeficiente leva em consideração a maior rigidez da madeira em relação aos esforços aplicados em áreas menores, sendo o incremento de resistência resultante à deformação local que solicita as fibras à tração paralela às fibras.

Figura 3.47 – Casos em que se aplica o acréscimo de resistência à compressão normal às fibras.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

As cargas transversais que atuam sobre as vigas, nas proximidades dos apoios, são transferidas aos vínculos por cisalhamento e por compressão inclinada. Por este motivo, a ABNT NBR 7190 (1997) admite uma redução no esforço cortante referente às cargas distantes a do ponto de atuação da reação, sendo a distância a no máximo duas vezes a altura da viga ($2h$); considera-se, portanto, a contribuição de parte da carga que é transmitida diretamente ao apoio por compressão inclinada. Assim, o cálculo do esforço cortante referentes às cargas próximas aos apoios ($a \leq 2h$) deve ser feito de acordo com a Eq.(3.56):

$$V_{red} = V \frac{a}{2h} \tag{3.56}$$

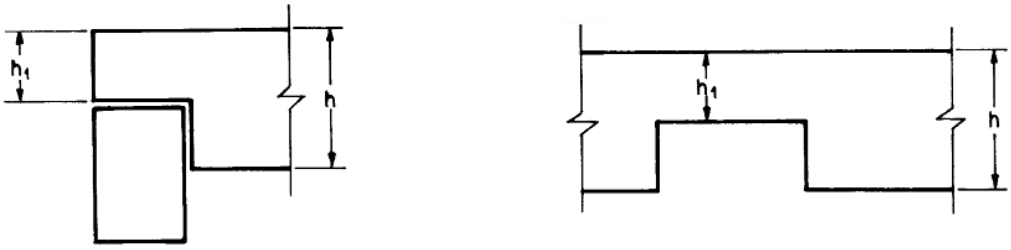
na qual, V é o esforço cortante na viga sem redução; V_{red} é o esforço cortante calculado com redução da cargas próximas ao apoio; a é a distância entre o ponto de atuação da reação até a carga transversal atuante próximo do apoio da viga; e h é altura da viga.

Para vigas onde há variação brusca de seção transversal (vigas entalhadas, Figura 3.48) amplifica-se a tensão de cisalhamento de cálculo na seção mais fraca, com altura h_1, pela relação h/h_1 respeitando-se a restrição de $h_1 > 0{,}75h$, conforme Eq.(3.57):

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b \cdot h_1}\left(\frac{h}{h_1}\right) \tag{3.57}$$

na qual, h é a altura inicial da viga; e h_1 é a altura da viga no entalhe.

Figura 3.48 – Esquema de entalhes em vigas de madeira/bambu.

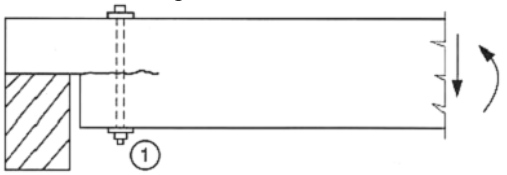


(a) entalhe no apoio, destinado a rebaixar a viga (b) entalhe fora do apoio

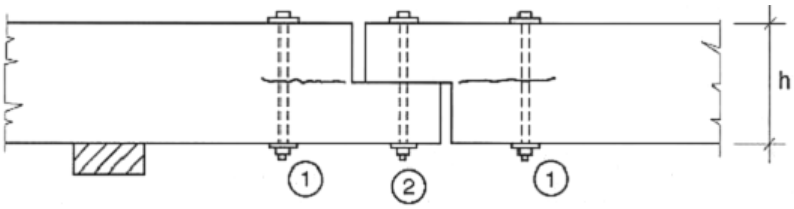
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O acréscimo da tensão de cisalhamento tem por objetivo reduzir a tendência de fendilhamento da viga na direção das fibras, o qual é produzido por tensões de tração perpendicular às fibras. Para o caso de $h_1 \leq 0{,}75h$, além do acréscimo da tensão cisalhante adotam-se detalhes construtivos como: parafusos verticais dimensionados à tração axial para a totalidade da força cortante a ser transferida (Figura 3.49); ou o emprego de mísulas (Figura 3.50) de comprimento maior que três vezes a altura do entalhe ($h - h_1$), atendendo-se em qualquer caso, o limite absoluto $h_1 \geq 0{,}5h$.

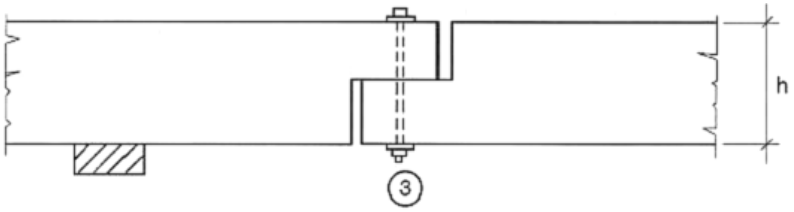
Figura 3.49 – Detalhes construtivos para limitar o fendilhamento de vigas com entalhe.



(a) apoio de viga com entalhe inferior.



(b) rótula intermediária de uma viga.

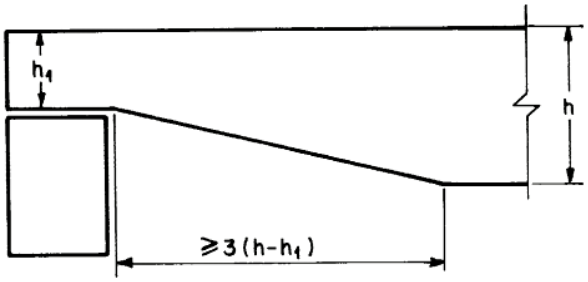


(c) rótula intermediária de uma viga com inversão de dentes.

1 – parafuso limitador do fendilhamneto da viga;
2 – parafuso fixador da rótula;
3 – parafuso como tirante de apoio.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Figura 3.50 – Mísula em viga como alternativa para seção transversal variável.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Em vigas esbeltas pode ocorrer um fenômeno de instabilidade intitulado flambagem lateral, que se dá por meio de flexão e torção. Pode-se compreender o fenômeno de flambagem lateral a partir da flambagem por flexão de uma peça comprimida. Em uma viga retangular submetida à flexão simples reta há uma região comprimida que tende a flambar em torno do eixo central de menor inércia, assim como no caso da flambagem por flexão de um elemento comprimido. Estando a outra região da viga tracionada, haverá um deslocamento lateral pronunciado na área comprimida quando comparado com o deslocamento da área tracionada; por meio desse gradiente de deslocamento se dá o fenômeno de torção da seção transversal da viga. Desta forma, a estabilidade lateral deve ser verificada por teoria validada experimentalmente.

A ABNT NBR 7190 (1997) permite dispensar a verificação de segurança em relação ao ELU de instabilidade lateral, se satisfeitas às condições abaixo:

- os apoios de extremidade da viga impedem a rotação em relação ao eixo longitudinal da viga;
- existam elementos que impeçam a rotação da seção transversal e garantam o travamento ao longo do comprimento L da viga, distanciados entre si de comprimento não maior que L_1 estabelecido pela Eq.(3.58), para vigas de seção retangular:

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0d}} \tag{3.58}$$

na qual, L_1 é o máximo comprimento da viga se que haja flambagem lateral; b é a base de uma viga retangular; β_M é um coeficiente dado pela Eq.(3.59):

$$\beta_M = \frac{1}{0{,}26\pi}\frac{\beta_E}{\gamma_f}\frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{h}{b} - 0{,}63\right)^{\frac{1}{2}}} \tag{3.59}$$

na qual, β_E é um coeficiente de correção igual a 4; γ_f é um coeficiente ponderador igual a 1,4; h é a altura da viga retangular.

Para peças em que não seja atendida a Eq.(3.58) pode se dispensar a verificação de segurança em relação ao ELU de instabilidade lateral, desde se satisfaça a Eq.(3.60):

$$\sigma_{c1d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \left(\frac{L_1}{b}\right)} \tag{3.60}$$

na qual, σ_{c1d} é a tensão atuante de cálculo na bordas mais comprimida da viga.

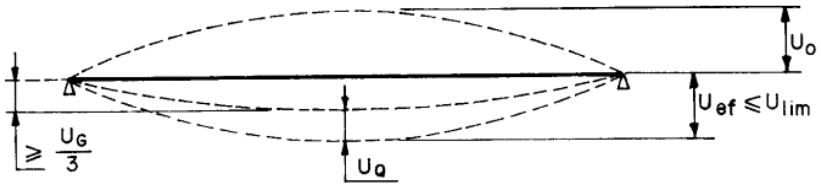
A respeito do ELUt de deformação excessiva que possa afetar a utilização normal da construção ou seu aspecto estético, a ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que deve considerar apenas as combinações de ações de longa duração e a rigidez efetiva da peça ($E_{c0,ef}$). Assim, a flecha efetiva (u_{ef}), devida as parcela de carga permanente (u_G) e acidental (u_Q), é limitada para os vãos conforme Eq.(3.61):

$$u_{ef} = u_G + u_Q \leq \frac{L}{200} \tag{3.61}$$

na qual, u_{ef} é a flecha efetiva imediata; u_G é a flecha devida à carga permanente; u_Q é a flecha devida à carga acidental; L é o vão onde se estar calculando a deflexão máxima.

As flechas referentes às ações permanentes podem ser parcialmente compensadas por contraflechas dadas na construção. Portanto, na verificação da segurança, as flechas devidas às ações permanentes podem ser reduzidas (de um valor u_0), mas não se admite uma redução superior a $\frac{2}{3}u_G$ (Figura 3.51).

Figura 3.51 – Esquema da contraflecha máxima permitida em vigas.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.8.3 COMPRESSÃO AXIAL

Este tipo de solicitação de compressão paralela às fibras se dá em barras de treliça, em pilares e em elementos componentes de contraventamentos, sendo esses solicitados apenas a compressão centrada.

3.8.3.1 Peças Curtas

A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que para situação de projeto apenas sejam admitidas como submetidas apenas à compressão centrada as peças classificadas como curtas,

ou seja, peças com índice de esbeltez menor ou igual a 40 ($\lambda \leq 40$). Sendo a verificação de segurança de peças curtas submetidas à compressão centrada dada pela Eq.(3.62):

$$\sigma_{c0d} = \frac{N_{cd}}{A_{liq}} \leq f_{c0d} \tag{3.62}$$

na qual, σ_{c0d} é o valor de cálculo da tensão de compressão atuante; N_{cd} é o valor de cálculo do esforço normal de compressão; A_{liq} é a área líquida da seção transversal, descontando-se furos e/ou entalhes.

3.8.3.2 Peças Medianamente Esbeltas

As peças comprimidas com índice de esbeltez maior do que 40 e menor ou igual a 80 ($40 < \lambda \leq 80$) classificadas como medianamente esbeltas, mesmo submetida à compressão centrada, devem ser verificadas a uma condição de segurança de estabilidade que admite uma excentricidade acidental do esforço de compressão, em virtude das imperfeições geométricas das peças e das excentricidades inevitáveis dos carregamentos. Portanto, na prática, serão verificadas como se fossem flexocomprimidas.

Considera-se atendida a condição segurança relativa ao ELU de instabilidade, se para o ponto mais comprimido da seção transversal é respeitada pela Eq.(3.63), a qual é aplicada isoladamente aos planos de rigidezes máxima e mínima a flambagem:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0d}} \leq 1 \tag{3.63}$$

na qual, σ_{Nd} é o valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão dada pela Eq.(3.62); σ_{Md} é o valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor de segunda ordem. Tal momento fletor de segunda ordem é cálculo a partir da excentricidade de primeira ordem amplificada, conforme Eq.(3.64):

$$M_d = N_d \cdot e_d \tag{3.64}$$

na qual, M_d é o momento fletor de segunda ordem de cálculo; N_d é a força normal de compressão de cálculo; e e_d é a excentricidade de primeira ordem amplificada que é obtida pela Eq.(3.65):

$$e_d = e_1 \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \tag{3.65}$$

na qual, e_1 é a excentricidade de primeira ordem dada pela Eq.(3.66):

$$e_1 = e_i + e_a \tag{3.66}$$

na qual, e_i é a excentricidade inicial de primeira ordem decorrente momento fletor de cálculo e dada pela Eq.(3.67), deve-se tomar um valor não inferior a $h/30$ para tal excentricidade, sendo h a altura da seção transversal referente ao plano de verificação da estabilidade;

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \tag{3.67}$$

na qual, M_{1d} é o valor de cálculo do momento fletor de primeira ordem, que é igual a zero para a condição de compressão centrada, assim, a excentricidade inicial (e_i) também será nula pela Eq.(3.67), tomando o valor mínimo estabelecido; e_a é a excentricidade acidental que deve ser adotado pelo menos o valor dado pela Eq.(3.68):

$$e_a = \frac{L_0}{300} \tag{3.68}$$

na qual, L_0 é o comprimento de flambagem da peça. E, F_E é a carga crítica de Euler dada pela Eq.(3.69):

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I}{(L_0)^2} \tag{3.69}$$

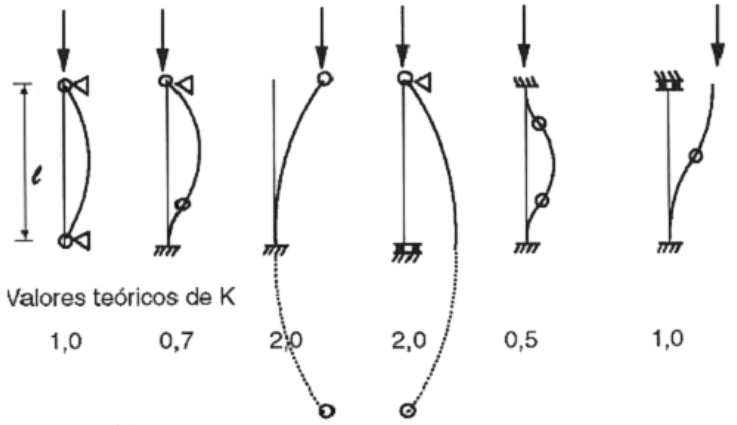
na qual, I é o momento de inércia da seção transversal da peça em relação ao plano de flexão ao qual se está verificando a estabilidade.

Na Figura 3.52 estão estabelecidos os parâmetros de flambagem para uma barra comprimida em função das condições de vinculação e do comprimento total da peça (L), pois o comprimento de flambagem é definido como a distância entre dois pontos de inflexão (momento fletor nulo) da curva descrita pela equação da linha elástica do pilar. Então, o comprimento de flambagem (L_0) é dado pela Eq.(3.70):

$$L_0 = K \cdot L \tag{3.70}$$

na qual, K é o parâmetro de flambagem; e, L é o comprimento total da peça comprimida.

Figura 3.52 – Parâmetros de flambagem em função das vinculações do pilar.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

3.8.3.3 Peças Esbeltas

As peças comprimidas com índice de esbeltez maior do que 80 e limitado superiormente por 140 ($80 < \lambda \leq 140$) classificadas como esbeltas, assim como no caso anterior, mesmo sob compressão centrada, devem ser verificadas a uma condição de segurança de estabilidade, neste caso, considerando-se adicionalmente o efeito de fluência.

Desta forma, também se utiliza a Eq.(3.63) para verificação da segurança relativa ao ELU de instabilidade.

Neste caso, aumenta-se a excentricidade de primeira ordem (e_1) de um valor referente à excentricidade de fluência (e_c) obtendo-se a excentricidade efetiva de primeira ordem pela Eq.(3.71):

$$e_{1,ef} = e_1 + e_c = e_i + e_a + e_c \tag{3.71}$$

na qual, $e_{1,ef}$ é a excentricidade efetiva de primeira ordem; e_i é a excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto, conforme Eq.(3.72):

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} = \frac{M_{1gd} + M_{1qd}}{N_d} \tag{3.72}$$

na qual, M_{1gd} e M_{1qd} são os valores de cálculo, na situação de projeto, dos momentos devidos às cargas permanentes e as cargas variáveis, respectivamente. E, e_a é a excentricidade acidental mínima dada pela Eq.(3.68), não se tomando valor menor que $h/30$ para tal excentricidade, sendo h a altura da seção transversal referente ao plano de verificação da estabilidade; e_c é a excentricidade suplementar de primeira ordem que representa o efeito de fluência do material, Eq.(3.73):

$$e_c = (e_{ig} + e_a)\left\{exp\left[\frac{\varphi\left[N_{gk} + (\Psi_1 + \Psi_2)N_{qk}\right]}{F_E - \left[N_{gk} + (\Psi_1 + \Psi_2)N_{qk}\right]}\right] - 1\right\} \tag{3.73}$$

na qual, e_{ig} é a excentricidade de primeira ordem decorrente da carga permanente (Eq.(3.74)):

$$e_{ig} = \frac{M_{1gd}}{N_{gd}} \tag{3.74}$$

na qual, N_{gd} é o valor de cálculo da força normal devida apenas às ações permanentes. E, φ é o coeficiente de fluência (Tabela 3.7); N_{gk} e N_{qk} são os valores característicos da força normal devidos às cargas permanentes e variáveis, respectivamente; Ψ_1 e Ψ_2 são coeficientes redutores de combinação de ações, sendo $(\Psi_1 + \Psi_2) \leq 1$. Para pressão dinâmica do vento como ação variável principal têm-se: $\Psi_1 = 0{,}2$ e $\Psi_2 = 0{,}0$.

Tabela 3.7 – Valores do coeficiente de fluência.

Classes de carregamento	Classes de umidade	
	1e 2	*3 e 4*
Permanente ou de longa duração	0,8	2,0
Média duração	0,3	1,0
Curta duração	0,1	0,3

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

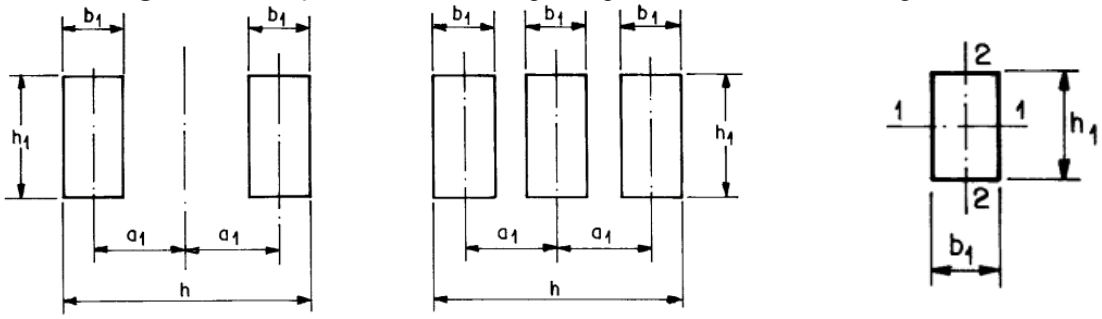
3.8.3.4 Peças comprimidas solidarizadas descontinuamente

Para Alvim (2009), pilares compostos (solidarizados descontinuamente) são formados por duas ou mais peças de madeira justapostas; e ligados através de parafusos, pregos ou colas (adesivos). Desta forma, a resistência de um pilar composto decorre da sua rigidez efetiva, que por sua vez depende das características geométricas do pilar e do tipo de ligação utilizada entre suas peças e os espaçadores interpostos.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), para peças compostas solidarizadas descontinuamente por espaçadores interpostos devem-se se verificar sua segurança em relação ao ELU de instabilidade global.

Em peças compostas por dois ou três elementos de seção transversal retangular (Figura 3.53), verifica-se tal peça conforme os itens anteriores (3.8.3.1; 3.8.3.2 e 3.8.3.3), como se as peças compostas fossem maciças, guardando as condições estabelecidas a seguir.

Figura 3.53 – Seções transversais compostas por dois ou três elementos iguais.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Os espaçadores devem estar igualmente espaçados entre si ao longo do comprimento *L* da peça. A fixação entre as peças comprimidas e os espaçadores deve ser realizada por ligações rígidas com pregos ou parafusos. No mínimo, permite-se que estas ligações sejam realizadas com apenas dois parafusos dispostos ao longo do eixo longitudinal da peça, os quais devem ser afastados entre si de no mínimo quatro diâmetros ($4d$) e das bordas dos espaçadores de no mínimo sete diâmetro ($7d$), desde que o diâmetro de perfuração (d_0) seja igual ao diâmetro do parafuso (d).

Os parâmetros geométricos da seção de cada elemento componente da peça solidarizada descontinuamente estão definidos no conjunto de Eqs.(3.75):

$$A_1 = b_1 h_1$$

$$I_1 = \frac{b_1 {h_1}^3}{12} \tag{3.75}$$

$$I_2 = \frac{h_1 {b_1}^3}{12}$$

na qual, A_1 é a área de um dos elementos da peça comprimida; b_1 é o lado de um dos elementos da peça comprimida paralelo ao eixo 1 – 1; h_1 é o lado de um dos elementos da peça comprimida paralelo ao eixo 2 – 2; I_1 é o momento de inércia em relação ao eixo 1 – 1; I_2 é o momento de inércia em relação ao eixo 2 – 2.

Os parâmetros geométricos da seção composta da peça solidarizada descontinuamente estão definidos no conjunto de Eqs.(3.76):

$$A = nA_1$$

$$I_x = nI_1 \tag{3.76}$$

$$I_y = nI_2 + 2A_1 {a_1}^2$$

$$I_{y,ef} = \beta_I I_y$$

na qual, A é a área total da seção transversal composta da peça; n é o número de elemento que formam a seção transversal composta solidarizada; I_x é o momento de inércia total da seção composta em relação ao eixo horizontal (x) que passa por centro de massa (Figura 3.53); I_y é o momento de inércia total da seção composta em relação ao eixo vertical (y) que passa por centro de massa (Figura 3.53); a_1 é a distância entre o eixo vertical que passa pelo centro de massa de cada elemento, e o eixo vertical (y) que passa pelo centro de massa da seção composta; $I_{y,ef}$ é o momento de inércia total efetivo da seção composta, pois devido às deformações provocadas pelo esforço de cisalhamento atuando nas peças transversais (espaçadores), o momento de inércia da seção múltipla reduz, gerando uma redução das cargas crítica de flambagem e última; β_I é o coeficiente redutor do momento de inércia.

Segundo Alvim (2009), a expressão exposta pela ABNT NBR 7190 (1997), para determinação do momento de inércia efetivo como função do coeficiente β_I, é derivada da expressão da esbeltez efetiva na norma alemã DIN 1052 (1972), a qual também é referência para o EUROCODE 5.

Para o EUROCODE 5, a esbeltez efetiva é dada pela Eq.(3.77):

$$\lambda_{ef} = \sqrt{\lambda^2 + \frac{n}{2} \cdot c \cdot {\lambda_1}^2} \tag{3.77}$$

na qual, λ_{ef} é a esbeltez efetiva; λ é a esbeltez da peça como um todo; n é o número de peças que compõem a seção transversal e que se deslocam devido à flexão; c é um parâmetro que leva em consideração o material empregado na ligação das peças do pilar (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Fator de flexibilidade.

Elementos de ligação	Tipo de ligação	Fator de flexibilidade (c)
Espaçadores interpostos	Cola	1,0
	Parafuso	2,5
	Prego	3,0

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Na ABNT NBR 7190 (1997), o valor c foi considerado igual a $2\alpha_y$, que para o caso da ligação com parafuso $\alpha_y = 1{,}25$.

As esbeltezas presentes na Eq.(3.77), são escritas conforme Eqs.(3.78):

$$\lambda_{ef} = \frac{L}{i_{ef}} = \frac{L}{\sqrt{\frac{I_{y,ef}}{A}}} \Rightarrow {\lambda_{ef}}^2 = \frac{L^2 \cdot A}{I_{y,ef}}$$

$$\lambda^2 = \frac{L^2 \cdot A}{I_y} \tag{3.78}$$

$${\lambda_1}^2 = \frac{{L_1}^2 \cdot A_1}{I_2}$$

na qual, L é o comprimento total da peça; L_1 é o comprimento entre espaçadores interpostos.

Substituindo as Eqs.(3.78) na Eq.(3.77) e considerando-se a notação estabelecida pela ABNT NBR 7190 (1997) obtém-se a Eq.(3.79):

$$\frac{L^2 \cdot A}{I_{y,ef}} = \frac{L^2 \cdot A}{I_y} + n \cdot \alpha_y \cdot \frac{{L_1}^2 \cdot A_1}{I_2} \tag{3.79}$$

Sendo o comprimento total da peça (L) dividido em m comprimentos iguais (L_1), tem-se a Eq.(3.80):

$$L = m \cdot L_1 \tag{3.80}$$

Substituindo a primeira das Eqs.(3.76) e a Eq.(3.80) na Eq.(3.79), obtém-se a Eq.(3.82) para o momento de inércia total efetivo da seção composta:

$$I_{y,ef} = I_y \cdot \left(\frac{I_2 m^2}{I_2 m^2 + \alpha_y I_y} \right) \tag{3.81}$$

Portanto, o coeficiente de redução do momento de inércia (β_I) é dado pela Eq.(3.82):

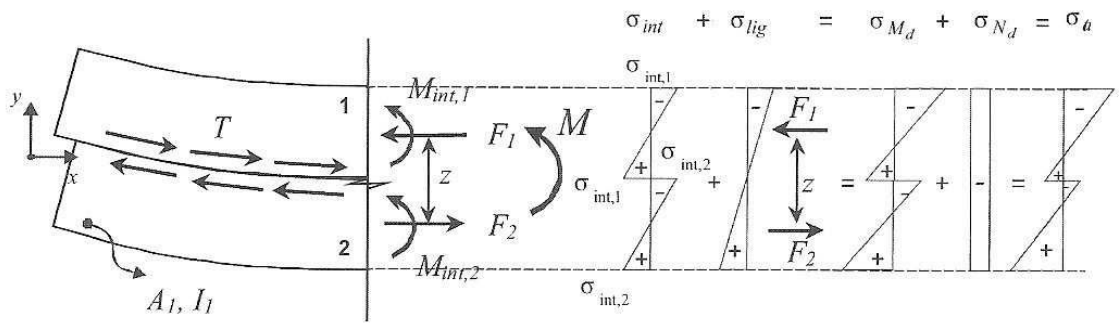
$$\beta_I = \frac{I_2 m^2}{I_2 m^2 + \alpha_y I_y} \tag{3.82}$$

Assim, a verificação deve ser realizada como se a peça fosse maciça com seção transversal de área A e momentos centrais de inércia I_x e $I_{y,ef}$. As condições de verificação são obedecidas desde que verificada a Eq.(3.63). Sendo a tensão de compressão de cálculo ainda estabelecida pela Eq.(3.62). Em contrapartida, segundo Alvim (2009), a interação parcial dos elementos do pilar resulta em um desdobramento da tensão devido ao momento fletor (σ_{Md}), dada pela Eq.(3.83):

$$\sigma_{Md} = \sigma_{int} + \sigma_{lig} \tag{3.83}$$

na qual, σ_{int} é a tensão interna de cálculo referente à flexão de cada elemento da peça composta separadamente (curvatura individual das peças); e, σ_{lig} é a tensão de cálculo devido ao momento fletor proveniente da interação parcial dos componentes da ligação, conforme Figura 3.54.

Figura 3.54 – Tensões e esforços de uma peça composta continuamente ligada.



Fonte: Alvim (2009).

Da Figura 3.54 tem-se o momento resultante (M) em relação à linha neutra da peça, conforme Eq.(3.84):

$$M = M_{int,1} + M_{int,2} + M_{lig} \tag{3.84}$$

na qual, $M_{int,1}$ é o momento fletor devido ao elemento 1; $M_{int,2}$ é o momento fletor devido ao elemento 2; M_{lig} é o momento fletor devido a interação parcial dos componentes da ligação, o qual é estabelecido pelo binário da Eq.(3.85):

$$M_{lig} = F \cdot z \tag{3.85}$$

na qual, F é a força nas partes 1 e 2, pois $F_1 = F_2$; z é a distância do binário.

Se as camadas têm a mesma curvatura, pode-se escrever a Eq.(3.86) a partir da teoria elementar da flexão em vigas compostas com interação parcial:

$$\frac{1}{r} = \frac{M_{int,1}}{EI_1} = \frac{M_{int,2}}{EI_2} = \cdots = \frac{M_{int,i}}{EI_i} = \frac{M}{EI_{ef}} \tag{3.86}$$

na qual, r é o raio de curvatura da peça; I_{ef} é o momento de inércia efetivo da seção composta total levando em consideração o efeito da interação parcial do elementos; $I_1, I_2, \cdots, I_n$ são os momentos de inércia das peças $1,2, \cdots, n$, individualmente, em relação ao seu centro de massa.

Trabalhando com a Eq.(3.86) obtém a Eq.(3.87):

$$M_{int,i} = M \cdot \frac{I_i}{I_{ef}} \tag{3.87}$$

A tensão máxima devido a $M_{int,2}$ é dada pela Eq.(3.88):

$$\sigma_{int,2} = \frac{M_{int,2}}{I_2}\frac{b}{2} \tag{3.88}$$

na qual, b é a espessura da peça 2, assim como também da peça 1, pois $b = b_1 = b_2$.

Substituindo o $M_{int,2}$, baseado na Eq.(3.87), na Eq.(3.88) obtém-se a Eq.(3.89), a qual apresenta o mesmo valor tanto no bordo mais comprimido quanto no bordo mais tracionado:

$$\sigma_{int} = \frac{M}{I_{ef}}\frac{b}{2} \tag{3.89}$$

Para o cálculo da força F, trabalha-se com a Eq.(3.84) obtendo-se a Eq.(3.90):

$$F = \frac{1}{z}\left[M - \left(M_{int,1} + M_{int,2}\right)\right] \tag{3.90}$$

e, generalizando para n partes formando a seção transversal do pilar, tem-se a Eq.(3.91):

$$F = \frac{1}{z}\left[M - \sum_{i=1}^{n} M_{int,i}\right] \tag{3.91}$$

A partir da Eq.(3.87), obtém-se a soma dos momentos internos em função de M, conforme Eq.(3.92):

$$\sum_{i=1}^{n} M_{int,i} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \sum_{i=1}^{n} I_i \tag{3.92}$$

Substituindo a Eq.(3.92) na Eq.(3.91) e para peças com n elementos iguais, obtém-se a Eq.(3.93):

$$F = \frac{1}{z}\left[M - \frac{M}{I_{ef}} \cdot n \cdot I_2\right] \tag{3.93}$$

na qual, I_2 é o momento de inércia de cada peça individualmente.

Desta forma, a tensão acessória referente à interação parcial dos elementos em peça com n elementos iguais é obtida pela Eq.(3.94):

$$\sigma_{lig} = \frac{1}{A_1 \cdot z}\left[M - \frac{M}{I_{ef}} \cdot n \cdot I_2\right] \tag{3.94}$$

na qual, A_1 é a área da seção transversal de um dos elementos da peça comprimida.

Assim, as tensões devidas aos momentos fletores é dada pela soma das parcelas referentes à flexão interna de cada elemento individualmente e a flexão devida à interação parcial entre os elementos, conforme Eq.(3.95):

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d}{I_{ef}}\frac{b}{2} + \frac{1}{A_1 \cdot z}\left[M_d - \frac{M_d}{I_{ef}} \cdot n \cdot I_2\right] \tag{3.95}$$

A tensão de compressão devida à força normal é dada pela Eq.(3.96):

$$\sigma_{Nd} = \frac{N_d}{n \cdot A_1} \tag{3.96}$$

Adicionando-se as Eqs.(3.95) e (3.96), obtém-se a máxima tensão de compressão atuante que deve ser menor que a resistência à compressão de cálculo, conforme Eq.(3.97):

$$\sigma_{ad} = \frac{N_d}{n \cdot A_1} + \frac{M_d}{I_{ef}}\frac{b}{2} + \frac{1}{A_1 \cdot z}\left[M_d - \frac{M_d}{I_{ef}} \cdot n \cdot I_2\right] \leq f_{c0d} \tag{3.97}$$

Por meio da Eq.(3.97), escreve-se a mesma aplicando a notação utilizada pela ABNT NBR 7190 (1997), obtendo-se a Eq.(3.98):

$$\sigma_{ad} = \frac{N_d}{A} + \frac{M_d}{I_{y,ef}}\frac{I_2}{W_2} + \frac{M_d}{A_1 \cdot 2 \cdot a_1}\left[1 - n \cdot \frac{I_2}{I_{y,ef}}\right] \leq f_{c0d} \tag{3.98}$$

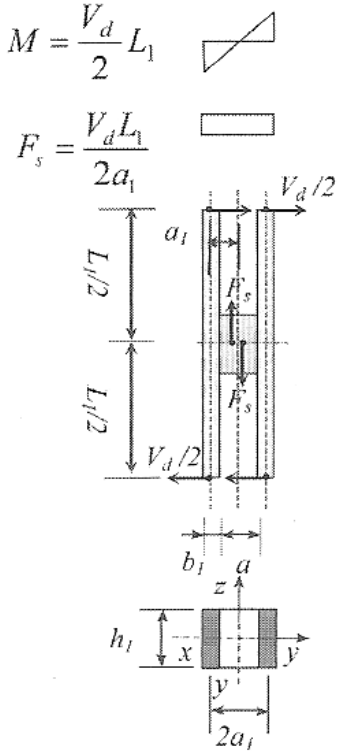
na qual, $A = n \cdot A_1$; o módulo resistente $W_2 = \frac{I_2}{b_1/2}$, sendo $b_1 = b$ (Figura 3.53 Figura 3.54); $z = 2 \cdot a_1$, conforme comparação das Figura 3.53 Figura 3.54; M_d é o momento fletor de segunda ordem de cálculo, conforme Eq.(3.64).

As ligações em peças compostas devem ser dimensionadas de forma a suportar um esforço cortante atuante na seção transversal do pilar, obtido pela Eq.(3.99):

$$\begin{aligned}
V_d &= N_d \cdot e_1 \cdot \frac{F_E}{F_E - N_d} \cdot \frac{\pi}{L} && \text{para} && \lambda_{ef} \leq 40 \\
V_d &= \frac{N_d \cdot \lambda_{ef}}{40} \cdot e_1 \cdot \frac{F_E}{F_E - N_d} \cdot \frac{\pi}{L} && \text{para} && 40 < \lambda_{ef} \leq 80 \\
V_d &= \frac{N_d \cdot \lambda_{ef}}{40} \cdot e_{1,ef} \cdot \frac{F_E}{F_E - N_d} \cdot \frac{\pi}{L} && \text{para} && \lambda_{ef} > 80
\end{aligned} \tag{3.99}$$

Com o valor V_d, determina-se o valor do esforço cortante atuante na ligação (F_s) a partir do equilíbrio em trecho característico do pilar, conforme Figura 3.55.

Figura 3.55 – Equilíbrio do trecho de um pilar solidarizado.



Fonte: Alvim (2009).

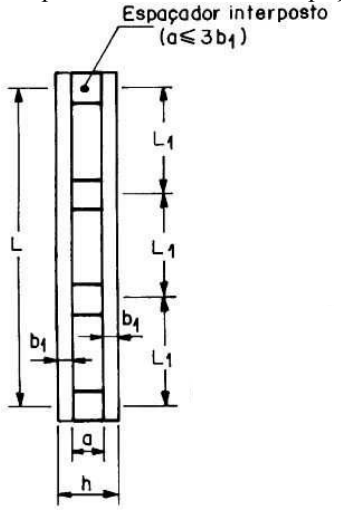
Assim, a força cortante na ligação é estabelecida pela Eq.(3.100):

$$F_s = \frac{V_d \cdot L_1}{2 \cdot a_1} \tag{3.100}$$

Além disso, dispensa-se a verificação da estabilidade local dos elementos componentes com trechos de comprimento L_1 (Figura 3.56), desde que atendidas as limitações expostas nas Eqs.(3.101):

$$\begin{gathered} 9b_1 \leq L_1 \leq 18b_1 \\ a \leq 3b_1 \end{gathered} \tag{3.101}$$

Figura 3.56 – Vista de pilar solidarizado com espaçadores interpostos.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.8.4 LIGAÇÕES

A resistência de uma ligação com um pino metálico (neste caso, parafuso), correspondente a uma dada seção de corte entre uma peça de madeira e uma peça de aço, é obtida pela menor das duas resistências: uma referente à ligação do pino com a madeira e a outra à ligação do pino com a parede da peça metálica.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), as ligações com dois ou três pinos são consideradas deformáveis, devendo ser empregadas apenas em estruturas isostáticas.

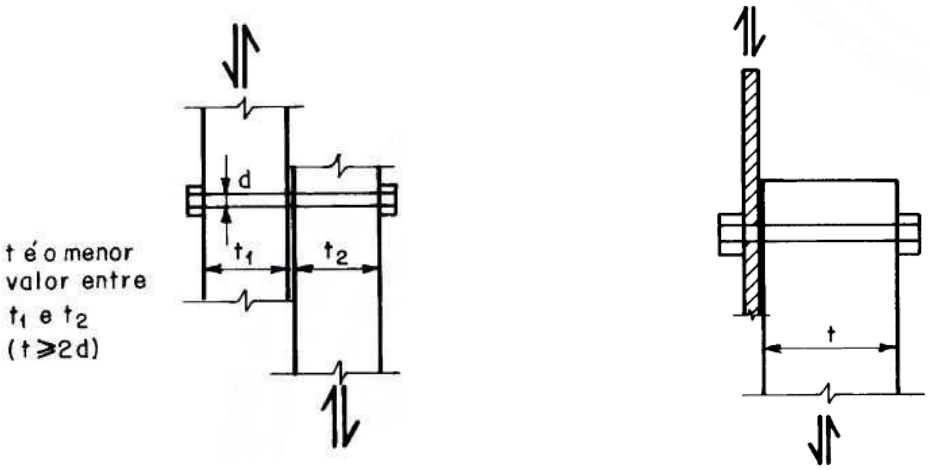
3.8.4.1 Verificação da Madeira

Conforme a ABNT NBR 7190 (1997), o valor de cálculo da resistência da ligação com um pino metálico, que corresponde a uma única seção de corte, é obtido a partir do parâmetro definido na Eq.(3.102):

$$\beta = \frac{t}{d} \tag{3.102}$$

na qual, β é o parâmetro que define o tipo de ruptura da ligação; t é a menor espessura convencional das peças ligadas se ambas forem de madeira (Figura 3.57a), ou t é a espessura da peça para ligação entre esta e a chapa metálica (Figura 3.57b); d é o diâmetro do pino, que para o caso específico, é o diâmetro do parafuso.

Figura 3.57 – Ligação entre duas peças em corte simples utilizando parafuso.



(a) Ligação entre peças de madeira. (b) Ligação entre peça de madeira e chapa metálica.

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Estabelece-se, então, o valor limite para o parâmetro β, dado pela Eq.(3.103):

$$\beta_{lim} = 1{,}25\sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \tag{3.103}$$

na qual, β_{lim} é o valor limite para o parâmetro β; f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do pino metálico, definida pela Eq.(3.104):

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \tag{3.104}$$

na qual, f_{yk} é a tensão de escoamento característica do pino metálico; γ_s é o coeficiente de minoração de tensão de escoamento igual a 1,1. E, f_{ed} é a resistência de embutimento de cálculo a depender da direção do esforço, conforme Eq.(3.105):

$$\begin{aligned} f_{e0d} &= f_{c0d} \\ f_{e90d} &= f_{c90d} \end{aligned} \tag{3.105}$$

na qual, f_{e0d} é a resistência de cálculo ao embutimento paralela às fibras; f_{c0d} é a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras; f_{e90d} é a resistência de cálculo ao embutimento perpendicular às fibras.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência ao embutimento é estabelecida por meio de um critério de deformação, ou seja, é definida pela relação entre uma força (F_e) que causa uma deformação especifica de 2‰ na ligação e a área de embutimento do pino. A área de embutimento é definida pela Eq.(3.106):

$$A_e = t \cdot d \tag{3.106}$$

na qual, A_e é a área de embutimento; t é a espessura do corpo de prova; d é o diâmetro do pino.

Em caso de o embutimento ocorrer em uma direção diferente da paralela ou perpendicular, assim como para outras naturezas de resistência (compressão, tração, cisalhamento), utiliza-se a fórmula de Hankison para o cálculo da resistência em uma direção qualquer, conforme Eq.(3.107):

$$f_\alpha = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 sen^2(\alpha) + f_{90} cos^2(\alpha)} \tag{3.107}$$

na qual, f_α é a resistência em uma direção α em relação ao fibras; f_0 é a resistência na direção paralela às fibras; f_{90} é a resistência na direção perpendicular às fibras; α é o ângulo entre a direção de aplicação do esforço e a direção das fibras.

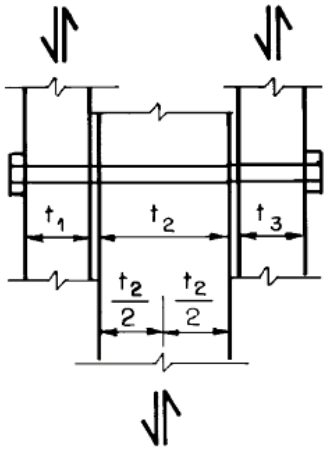
O valor de cálculo da resistência de um pino, em relação a uma única seção de corte, é dado pelas Eqs.(3.108):

$$\begin{aligned} R_{vd,1} &= 0{,}40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} && para\ \beta \le \beta_{lim} && \text{Embutimento da madeira} \\ R_{vd,1} &= 0{,}625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} && para\ \beta > \beta_{lim} && \text{Flexão do pino} \end{aligned} \tag{3.108}$$

na qual, $R_{vd,1}$ é o valor da resistência de uma seção transversal de um pino.

Em caso de pinos em corte duplo, conforme a Figura 3.58, aplicam-se os critérios descritos para a determinação da resistência correspondente a cada uma das seções de corte, no entanto, considera-se t com o menor dos valores entre t_1 e $\frac{t_2}{2}$ em uma das seções, e entre $\frac{t_2}{2}$ e t_3 na outra. Se as chapas laterais forem metálicas, considera-se t como metade da espessura da peça central $\left(\frac{t_2}{2}\right)$. Desta forma, em corte duplo, cada conector contribui para segurança da ligação com duas seções resistentes de corte.

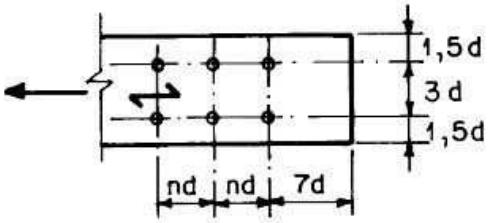
Figura 3.58 – Ligação em corte duplo.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Como critério construtivo, com o objetivo evitar fendilhamento nas peças de madeira, estabelece-se distâncias mínimas entre furos consecutivos e entre furo e borda. Assim, o espaçamento mínimo: entre os centros de dois parafusos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras é igual a $4d$;entre o centro do último pino à extremidade de peças tracionadas é igual a $7d$ (Figura 3.59).

Figura 3.59 – Espaçamentos mínimos em peças tracionadas (n = 4).



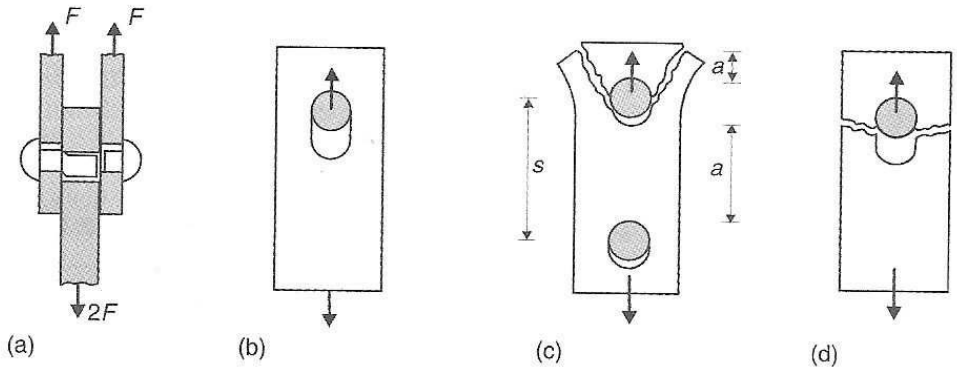
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

3.8.4.2 Verificação da parte metálica da ligação

Para Pfeil e Pfeil (2010), a ruptura em uma ligação metálica pode ocorrer, basicamente, segundo um dos critérios abaixo (Figura 3.60):

- Colapso do conector;
- Colapso por rasgamento da chapa ou ovalização do furo;
- Colapso por tração da chapa.

Figura 3.60 – Modalidades de ruptura de uma ligação metálica com conectores.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2010).

Segundo a ABNT NBR 8800 (2008), a segurança de barras prismáticas metálicas submetidas à força axial de tração é estabelecida pela Eq.(3.109):

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \tag{3.109}$$

na qual, $N_{t,Sd}$ é o esforço solicitante de cálculo na chapa metálica; $N_{t,Rd}$ é o esforço resistente de cálculo da chapa metálica.

A força de tração resistente de cálculo a ser utilizada no dimensionamento é o menor dos valores obtidos, considerando-se os estados limites de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, conforme Eqs.(3.110):

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \qquad \text{Escoamento da seção bruta.}$$
$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \qquad \text{Ruptura da seção líquida.} \tag{3.110}$$

na qual, A_g é a área bruta da seção transversal da barra; A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, dada pela Eq.(3.111):

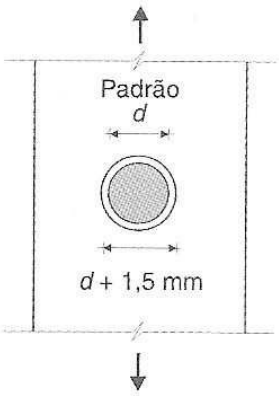
$$A_e = C_t \cdot A_n \tag{3.111}$$

na qual, A_n é a área líquida da seção transversal da barra; C_t é um coeficiente de redução da área líquida. E, f_y é a resistência ao escoamento do aço; f_u é a resistência à ruptura do aço; γ_{a1} é o coeficiente de ponderação de resistência referente ao escoamento da peça; γ_{a2} é o coeficiente de ponderação de resistência referente à ruptura da peça.

Em regiões com furos, a área líquida (A_n) é obtida subtraindo-se as áreas dos furos da área bruta (A_g). Para o caso de furos padronizados executados com broca, dentre os quais, define-se o furo padrão para parafusos. Nestes tipos de furos define-se uma folga de 1,5 mm

em relação ao diâmetro nominal do parafuso; essa tolerância é necessária para permitir a montagem das peças (Figura 3.61).

Figura 3.61 – Detalhe de um furo padrão (d é o diâmetro nominal do parafuso).



Fonte: Pfeil e Pfeil (2010).

Quando a força de tração for transmitida diretamente para cada um dos elementos da seção transversal da barra, o coeficiente de redução da área líquida (C_t) é dito igual a 1,00.

Segundo a ABNT NBR 8800 (2008), a força de cisalhamento resistente de cálculo de um parafuso é, por plano de corte, dada pela Eq.(3.112), considerando-se que o plano de corte passa pela rosca:

$$F_{v,Rd} = \frac{(0{,}7A_b) \cdot (0{,}6f_{ub})}{\gamma_{a2}} \tag{3.112}$$

na qual, $F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo; A_b é a área bruta, baseada no diâmetro do parafuso, de forma que a área efetiva na raiz da rosca é igual a 70% da área da seção do fuste (sem rosca); f_{ub} é a resistência à ruptura do aço do parafuso, sendo a tensão de ruptura do aço sob cisalhamento igual a 60% da tensão de ruptura do aço do conector.

Além disso, deve-se verificar a pressão de contato nas chapas metálicas devida aos furos. Assim, a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, levando-se em consideração o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo externo e a borda, é dada pela Eq.(3.113), levando-se em consideração o caso de furos-padrão quando a deformação no furo por forças de serviço for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1{,}2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2{,}4 \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \tag{3.113}$$

na qual, $F_{c,Rd}$ é a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo; l_f é a distância, medida na direção da força solicitante, entre a borda do furo e a extremidade da chapa para resistência ao rasgamento entre um furo externo e a borda da chapa; ou é a menor distância, também medida na direção da força solicitante, entre as bordas de furos consecutivos para determinação da resistência ao rasgamento da chapa entre furos, ou seja,

igual a $(s - d')$, sendo s o espaçamento entre os centros de furos e d' o diâmetro do furo; t é a espessura submetida a pressão de contato; f_u é a resistência à ruptura do aço da parede do furo; d é o diâmetro do parafuso.

Como condição construtiva determina-se o espaçamento mínimo entre furos, assim segundo a ABNT NBR 8800 (2008), a distância mínima entre furos padrão não pode ser inferior a $2{,}7d$, preferencialmente $3d$. Além disso, a distância livre entre as bordas de dois furos adjacentes não pode ser inferior a d. Em relação à distância mínima do centro de um furo padrão à borda, deve-se ser atendida Eq.(3.113).

Capítulo 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritos os materiais e procedimentos utilizados para elaboração deste trabalho.

Os principais materiais utilizados foram os seguintes: o bambu propriamente dito (ripas de bambu) e o BLC (bambu laminado colado). Assim, fez-se a caracterização físico-mecânica de tais materiais para gerar subsídios ao projeto das estruturas ensaiadas. Posteriormente, elaborou-se o ensaio de ligações metálicas de treliças de forma a melhor avaliar o comportamento e dimensionar as ligações das treliças planas tipo *Howe* experimentadas. Por último, ensaiaram-se, em uma mesa de reação por meio da aplicação de carga de um sistema hidráulico, as vigas de seção retangular e as treliças planas tipo *Howe*. Tais estruturas foram fabricadas de BLC utilizando-se dois tipos de adesivos, a saber: um a base de uma resina fenólica resorcionol-formaldeído e outro a base PVA (poliacetado de vinila).

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir estão descritos os principais materiais utilizados na elaboração do programa experimental desta dissertação, de forma a justificar o uso dos mesmos.

4.1.1 BAMBU

O bambu utilizado neste estudo foi da espécie *Dendrocalamus giganteus*, obtido no Zoológico de Cascavel - PR (município localizado no oeste do estado do Paraná, conforme Figura 4.1).

As fases de extração dos colmos de bambu até o preparo das ripas, que estão descritas a seguir, foram realizadas na UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná); fruto de uma parceria entre a referida Universidade e a UFPE (Universidade Federal de Pernambuco).

Os colmos de bambu foram cortados com idade entre quatro e cinco anos e deixados secar a sombra, em temperatura ambiente, durante três meses; e, posteriormente, foram secos em estufa a 105ºC, até atingir uma umidade entre 6 e 8%. Ao final desse processo,

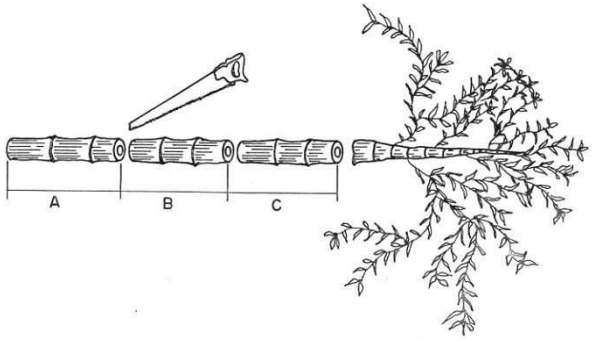
apresentavam comprimento médio de 20 m e comprimento internodal de 40 a 50 cm. Na sequência, foram extraídos dos colmos trechos das regiões basal e intermediária (Figura 4.2). Salienta-se, que em todos os ensaios realizados, o bambu foi selecionado aleatoriamente das regiões basal ou intermediária.

Figura 4.1 – Localização do município de Cascavel - PR.

Fonte: Wikipédia (2012).

Após a secagem e divisão, os colmos foram serrados em comprimento longitudinal de 150 cm e, em seguida, foram extraídas ripas de bambu com dimensões nominais de 150 cm de comprimento; 0,73 cm de espessura e 3,00 cm de largura (Figura 4.3a e b).

Figura 4.2 – Esquema da separação do colmo de bambu.



A – basal; B – intermediário; C – topo.

Fonte: Pereira (1992).

Os colmos foram cortados em ripas com uma serra circular, que foram aplainadas em uma para a regularização das superfícies e padronização da espessura das ripas, em 0,73 cm, em desengrossadeira. Posteriormente, foram lixadas através de lixadeira elétrica de três estágios função da espessura das paredes do colmo de bambu (Figura 4.3c).

No tratamento do colmo, para fabricação das ripas, eliminavam-se os diafragmas (camada interna), e, também, uma fina camada externa da parede do colmo, pois tais regiões dos colmos apresentavam superfícies muito lisas que comprometeriam a penetração e aderência com os adesivos.

Devido às ondulações longitudinais e imperfeições das paredes do bambu, pela presença dos nós e a falta de equipamentos específicos, houve uma grande dificuldade na preparação das ripas de bambu.

Figura 4.3 – Detalhes dos produtos de corte e laminação do bambu.

(a) Face externa da parede do colmo.

(b) Face interna da parede do colmo.

(c) Ripas de bambu após o preparo (utilizadas nesse trabalho).

Fonte: Autor.

Escolheu-se esta espécie de bambu para realização do presente trabalho devido, principalmente, as suas excelentes propriedades mecânicas, além de ser uma espécie que não é tão susceptível ao *Dinoderus minutus*. Adicionalmente, tem características geométricas que permitem a fabricação do laminado colado; sendo um requisito importante para isso, a espessura das paredes do colmo, que variavam de 1 a 2 cm.

4.1.2 ADESIVOS

Os laminados colados de bambu foram fabricados com dois adesivos: um à base de resina fenólica resorcionol-formaldeído, comercialmente conhecido por CASCOPHEN RS-216-M, composto com um misturador endurecedor FM-60-M; e outro à base de poliacetato de vinila (PVA), com a denominação comercial de CASCOREZ. Os adesivos são indicados para prensagem a frio, sendo fabricados pela Henkel Alba adesivos.

O adesivo CASCOPHEN foi escolhido devido a sua eficaz resistência ao cisalhamento e à tração, a partir do ensaio de peças ligadas por colagem. Além disso, este adesivo é impermeável. Na Tabela 4.1 estão apresentadas as propriedades do adesivo CASCOPHEN.

Tabela 4.1 – Propriedade do adesivo CASCOPHEN.

CARACTERÍSTICAS	
Aspecto do produto	Líquido de cor avermelhada escura
Viscosidade Brookfield (2/20/25 ºC) em cP[1]	530 – 650
Teor de sólidos (1 g/3 h/105 ºC) em %	53,0 - 58,0
Gel Time (21 ºC), em horas (Adesivo + Preparador)	3,5 - 6,0
pH (25 ºC)	6,9 - 7,5

Fonte: Henkel Alba Adesivos (2007).

[1] Unidade de viscosidade intitulada centipoise, conforme equivalência de unidades no SI (sistema internacional): 1 poise = 100 centipoise (cP) = 1 g/(cm·s) = 0,1 Pa·s.

O adesivo CASCOREZ, assim como o CASCOPHEN, é bastante utilizado para colagem de peças de madeira, estruturais e não estruturais. Adicionalmente, o adesivo CASCOREZ, em relação ao CASCOPHEN, apresenta: menor custo, de 15 (quinze) a 20 (vinte) vezes mais barato; menor toxidade, pois é isento do composto químico formaldeído; menor resistência mecânica. Na Tabela 4.2 têm-se as propriedades do adesivo CASCOREZ.

Tabela 4.2 – Propriedade do adesivo CASCOREZ.

CARACTERÍSTICAS	
Aspecto do produto	Líquido leitoso branco, viscoso, livre de grumos e/ ou materiais estranhos e odor característico de acetato de vinila.
Aspecto do Filme Seco	Levemente esbranquiçado, rígido, isento de pontos com média resistência térmica e baixa resistência à umidade.
Viscosidade Brookfield (LVF – 25 °C) em cP	3000 – 7000
Teor de sólidos em %	40,0 – 43,0
T.M.F.F.[2] em ° C	12
pH (25 ºC)	4,0 – 5,0
Tipo de polímero	Homopolímero
Formaldeído	Isento

Fonte: Henkel Alba Adesivos (2007).

Para o preparo dos adesivos seguiu-se as orientações do fabricante. O adesivo CASCOPHEN foi preparado a partir da mistura de 100 (cem) partes de CASCOPHEN (resina líquida) para cada 20 (vinte) partes de preparador endurecedor (pó), até se obter uma mistura homogênea. Adicionalmente, segundo recomendação do fabricante, a mistura devia ser utilizada em, no máximo, uma hora e meia. Para o adesivo CASCOREZ não foi necessário o preparo do adesivo, pois este constitui um adesivo monocomponente.

4.1.3 BAMBU LAMINADO COLADO (BLC)

O Bambu Laminado Colado (BLC) foi elaborado a partir de ripas de bambu (Figura 4.3c) coladas entre si. As ripas de bambu foram escolhidas aleatoriamente das regiões basal ou intermediária sendo com ou sem a presença de nós, a depender do tipo de ensaio realizado. Após a limpeza das ripas de bambu com escova de cerdas de *nylon*, o adesivo foi distribuído entre as ripas com o auxílio de hastes finas e pincel; tais hastes foram provenientes dos resíduos de bambu a partir do processo de fabricação dos corpos de prova do ensaio mecânico de tração paralela às fibras.

[2] T.M.F.F. = Temperatura Mínima de Formação de Filme.

Para colagem, as ripas foram dispostas todas em uma mesma direção paralela às fibras de bambu. Adicionalmente, foi montado um dispositivo para prensagem, conforme mostrado na Figura 4.4, para colagem das ripas. O tempo de secagem seguiu as recomendações de cada adesivo utilizado.

Após a secagem, as peças em BLC foram preparadas para os ensaios mecânicos. Para tal, aplainavam-se as superfícies dos corpos de prova e serravam-se as peças de BLC, de forma a atingirem os tamanhos padrões dos espécimes dos ensaios mecânicos.

Figura 4.4 – Detalhes do processo de prensagem das ripas.

(a) (b)

Fonte: Autor.

4.1.4 CHAPAS DE AÇO (LIGAÇÕES DA TRELIÇA)

Para a execução das ligações (conexões) das treliças foi utilizado chapa de aço 1020 SAE (*Society of Automotive Engineers* - EUA) com 1,25 mm de espessura, pois esta se apresentava maior disponibilidade comercial, além de ter resistência compatível com as considerações do tipo de ligação utilizado nas treliças. As especificações das chapas são dadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do aço 1020 SAE.

Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza Brinell (HB)	Impacto (J)
450	330	36,0	59	143	87

Fonte: Manual de aços Gerdau (2003).

4.1.5 PARAFUSOS DE AÇO (LIGAÇÕES DA TRELIÇA)

Para união e transmissão dos esforços nas barras da treliça foram utilizados parafusos de alta resistência ISO 4016 Classe 8.8, com diâmetro nominal de 5,0 mm, com tensão de escoamento igual a 640 MPa e tensão de ruptura igual a 800 MPa. Optou-se pela escolha de um parafuso de alta resistência, pois era necessária uma investigação mais criteriosa do componente BLC nas ligações das treliças ao invés do conector metálico.

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

4.2.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BAMBU

Para o ensaio de absorção de água, foram extraídas, por serragem, 30 (trinta) amostras das ripas de bambu, das quais 15 (quinze) eram da região nodal e as outras 15 (quinze) da região internodal. As amostras eram mensuradas às três dimensões por três vezes (utilizando um paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade), obtendo-se as seguintes dimensões médias: 0,78 cm de espessura; 3,09 cm de largura; e 5,59 cm de comprimento; com os respectivos desvios-padrão: 0,05 cm (espessura); 0,04 cm (largura); e 1,12 cm (comprimento). Na Tabela 4.4 estão apresentadas as características geométricas das amostras de bambu utilizadas no ensaio de absorção.

Tabela 4.4 – Dimensões das amostras do ensaio de absorção.

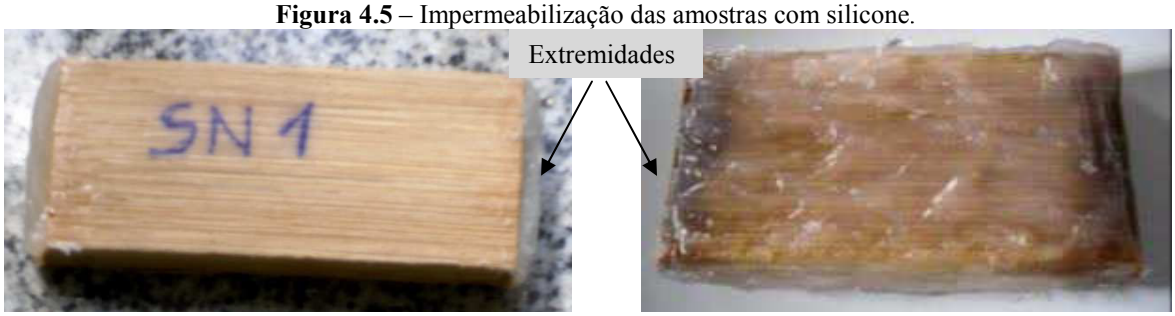
Características Geométricas	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
Espessura (mm)	8,23	8,14	6,96	8,18	8,18	7,71	7,85	7,91	6,69	7,85
Largura (mm)	30,76	31,03	30,13	31,18	31,11	30,63	31,40	31,26	30,37	31,23
Comprimento (mm)	66,52	46,83	42,48	54,54	78,34	48,69	68,26	55,99	44,84	52,60
Área Lateral (mm²)	5186	3668	3151	4293	6156	3734	5359	4387	3323	4111
Área das extremidades (mm²)	506	505	419	510	509	472	493	495	407	490
Área Total (mm²)	5692	4173	3570	4803	6665	4206	5852	4882	3730	4601

Fonte: Autor.

O ensaio de absorção foi dividido em três fases, sendo utilizadas 5 (cinco) amostras de cada região (nodal e internodal) para cada fase. Na 1ª fase, foram utilizadas 10 amostras sem qualquer tratamento de impermeabilização; na 2ª fase, as extremidades (faces perpendiculares à direção das fibras) foram impermeabilizadas com silicone, conforme Figura 4.5a; e por fim, na 3ª fase, as 10 (dez) amostras tiveram suas laterais (faces paralelas à direção das fibras) impermeabilizadas com silicone, conforme Figura 4.5b.

A partir do estabelecimento destas 3 (três) fases do ensaio, pôde-se verificar o nível de absorção de água pela amostra de bambu nas faces laterais (paralelas às fibras), nas extremidades (perpendicular às fibras) e em ambas (laterais e extremidades), simultaneamente.

Figura 4.5 – Impermeabilização das amostras com silicone.



(a) Impermeabilização das extremidades (b) Imermeabilização das laterais das amostras

Fonte: Autor.

Na Figura 4.6 são apresentados os corpos de prova utilizados neste ensaio; sendo as amostras da região nodal denominadas por CN (amostra com nó) e as amostras da região internodal designadas por SN (amostra sem nó).

Figura 4.6 – Corpos de prova do ensaio de absorção.

Fonte: Autor.

O ensaio foi realizado em sala climatizada, com temperatura e umidade médias de 23,3ºC e 61%, respectivamente. Para realização do mesmo, as amostras eram secas em estufa a uma temperatura média de 70ºC por um período de 48 horas. Em seguida, aplicavam-se o tratamento de impermeabilização (nas fases correspondentes: 2ª e 3ª fases do ensaio) e as massas secas das amostras eram avaliadas em uma balança analítica com precisão de 1 mg e sensibilidade de 0,1 mg.

Após a medição da massa seca, as amostras eram imersas em água (Figura 4.7a) e realizavam-se as leituras das massas (Figura 4.7b): em intervalos de 1 minuto durante os primeiros 5 minutos; em intervalos de 5 minutos entre o quinto e o trigésimo minuto; e em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 e 24 horas durante o transcorrer do ensaio.

Figura 4.7 – Detalhes do ensaio de absorção de água.

(a) Imersão das amostras em água.

(b) Avaliação da massa da amostra em balança analítica.

Fonte: Autor.

4.2.2 ENSAIO DA MASSA ESPECÍFICA DO BLC

Para o ensaio de massa específica foram extraídas, por serragem, 8 (oito) amostras de BLC fabricadas a partir da colagem de duas ripas de bambu utilizando-se adesivo CASCOPHEN, por este ser impermeável. Os espécimes foram mensurados nas três dimensões por três vezes em cada direção (utilizando um paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade), obtendo-se as seguintes dimensões médias: 13,44 mm de espessura; 27,56 mm de largura e 49,46 mm de comprimento; com os respectivos desvios-padrão: 0,74 mm (espessura); 0,51 mm (largura); e 0,71 mm (comprimento). Essas dimensões iniciais correspondem aos corpos de prova com uma umidade inicial média de 7,0%.

Para realização do ensaio, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura média de 100ºC. Além disso, avaliaram-se as massas das amostras em uma balança analítica nos seguintes instantes: ao iniciar o ensaio; após 4, 9, 24, 27 e 32 horas, neste último tempo obtiveram-se as massas secas de todas as amostras.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.3.1 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BAMBU

Foram ensaiados 10 (dez) corpos de prova, sendo 5 (cinco) da região nodal (seção transversal constante na região do nó) e outros 5 (cinco) da região internodal. Os ensaios

foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sob controle de deslocamento, com capacidade de carga de 2000 kN (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Montagem do ensaio de tração paralela às fibras do bambu.

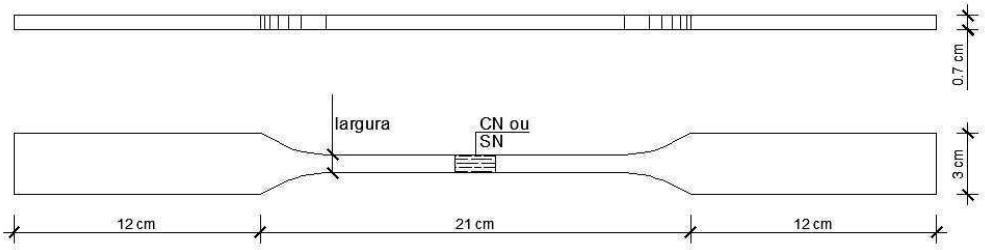
Fonte: Autor.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram fabricados com as seguintes dimensões: 45 cm de comprimento dividido em duas regiões extremas alargadas (com 12 cm cada) e uma região central estreitada (com 21 cm); e uma seção transversal média na região estreitada de 0,70 cm (espessura da ripa de bambu) x largura da região estreitada do corpo de prova, de acordo com Figura 4.9a. Os corpos de prova apresentavam largura média da região igual a 0,50 e 0,84 cm para os espécimes sem e com nó, respectivamente.

Devido à menor resistência à tração paralela às fibras na região nodal em relação à região internodal, foi necessário aplicar áreas distintas das seções transversais dos corpos de prova com e sem nó, fazendo com que o espécime rompe-se por tração pura, objetivo deste ensaio, e não por esmagamento (compressão perpendicular às fibras) ou cisalhamento paralelo às fibras do trecho fixo à garra da máquina universal de ensaios.

Portanto, os corpos de prova (Figura 4.9b) foram feitos com dimensões semelhantes ao estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 4.9 – Características dos corpos de prova para os ensaios de tração paralela às fibras.



(a) Dimensões médias do corpo de prova de tração.

(b) Corpo de prova de tração.

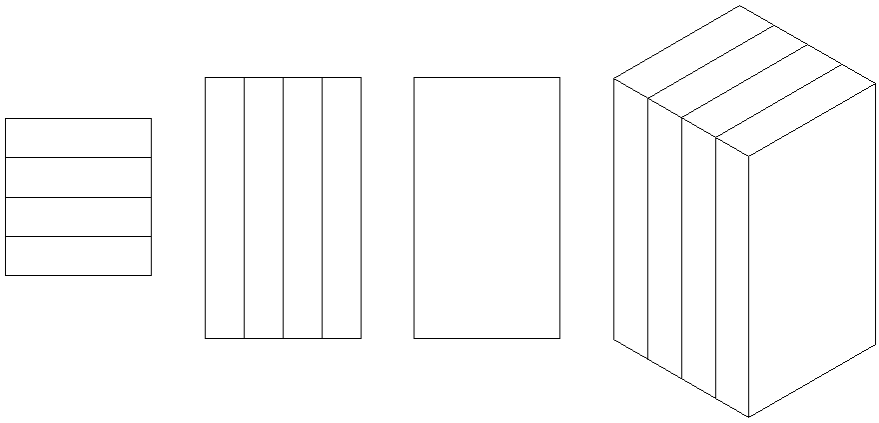
Fonte: Autor.

4.3.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BLC

O ensaio de compressão paralelo às fibras foi realizado em duas fases. Para ambas as etapas utilizaram-se corpos de prova com nós do bambu distribuídos aleatoriamente no interior dos espécimes.

Na primeira das fases buscou-se avaliar o comportamento de corpos de prova de BLC, com dimensões nominais de 2,75 x 3,00 (base) x 5,00 cm (altura) compostos por 4 (quatro) ripas de bambu colados entre si, quando submetidos a essa solicitação. Estes espécimes foram designados pela letra "P" - pequeno. Na Figura 4.10 mostram-se às vistas ortogonais e a perspectiva isométrica do corpo de prova de compressão "P", que detalham a distribuição das ripas de bambu compondo o espécime.

Figura 4.10 – Características do corpo de prova de compressão "P".



Fonte: Autor.

O ensaio para os corpos de prova pequenos foi realizado por meio de um sistema hidráulico de aplicação de carga, ao qual se tinha acoplado uma célula de carga com capacidade de 100 kN (Figura 4.11).

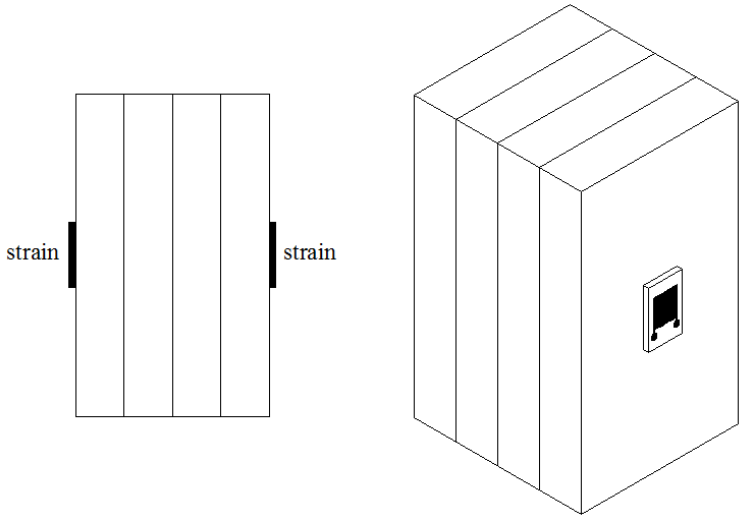
Figura 4.11 – Montagem do ensaio de compressão paralela às fibras (corpo de prova "P").

Fonte: Autor.

Foram utilizados 22 (vinte e dois) corpos de prova, que eram mensurados nas três dimensões por três vezes (utilizando um paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade), sendo 11 (onze) destes, fabricados com adesivo à base de resorcinol-formaldeído (que será denominado "CASCOPHEN") e os outros 11 (onze), com adesivo à base de poliacetato de vinila (denominado "CASCOREZ").

Em 6 (seis) dos 22 (vinte e dois) corpos de prova utilizados instalaram-se 12 (doze) extensômetros elétricos (*gage factor* = 2,12 e $R = 350\ \Omega$) na direção paralela às fibras, posicionados em faces opostas dos espécimes (2 extensômetros em cada espécime), com o objetivo de mensurar o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC (Figura 4.12). Os extensômetros foram ligados a um sistema de aquisição de dados digital que se encontrava interligado a uma caixa seletora de canais, de modo a medir a leitura de um extensômetro por vez, e ambos, sistema de aquisição de dados e caixa seletora, conectados a um microcomputador. O método utilizado para leitura dos extensômetros consistia em um sistema de ponte de *Wheatstone* completa, o qual apresenta a configuração de instalação ilustrada na Figura 4.13.

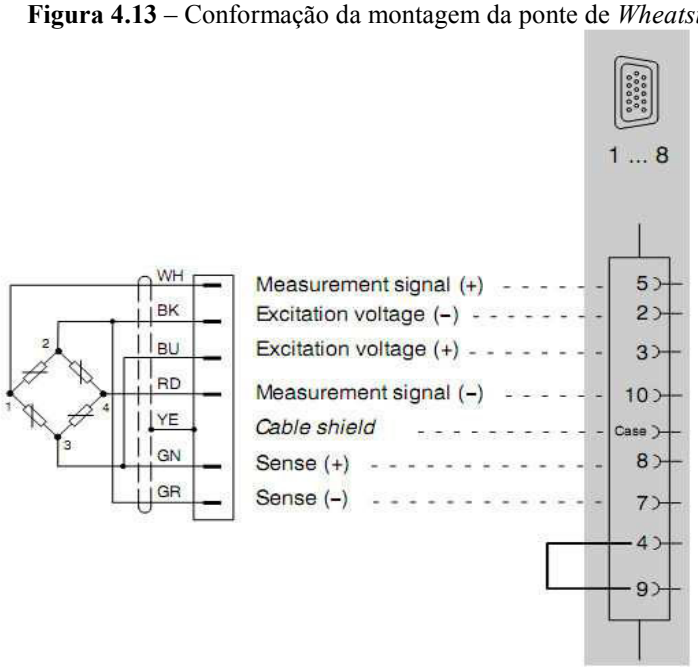
Figura 4.12 – Detalhe da disposição dos extensômetros no corpo de prova de compressão "P".



Fonte: Autor.

Na segunda fase do ensaio avaliou-se o comportamento de corpos-de-prova de BLC, com dimensões nominais de 5,00 x 5,00 (base) x 15,00 cm (altura) compostos por 15 (quinze) ripas de bambu que foram coladas entre si e aplainadas. Desta forma, seguiram-se as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997) com relação ao tamanho do corpo de prova, com o intuito de padronizar o ensaio e podê-lo comparar com os resultados de outros autores. Estes espécimes serão designados pela letra "G" - grande. Na Figura 4.14 mostram-se às vistas ortogonais e a perspectiva isométrica do corpo de prova de compressão "G", que detalham a distribuição das ripas de bambu compondo o espécime.

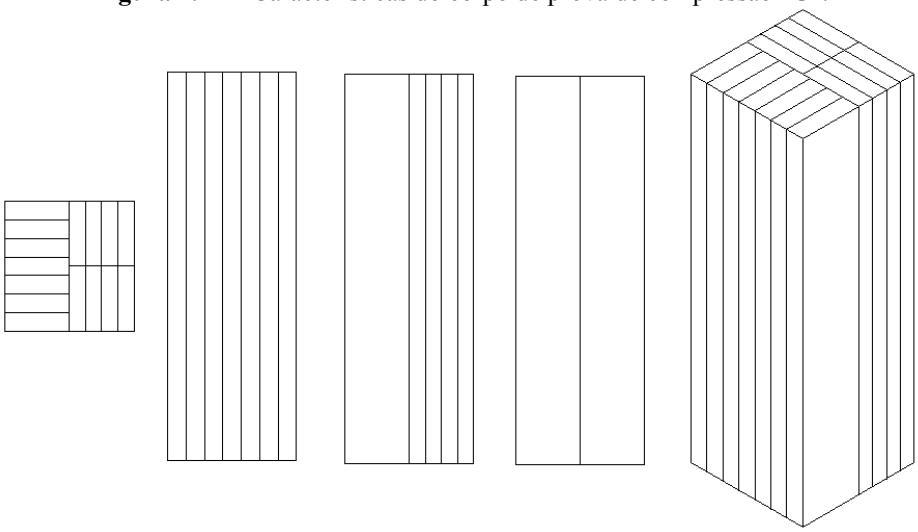
Figura 4.13 – Conformação da montagem da ponte de *Wheatstone*.



Wire colors: WH=white; BK=black; BU=blue; RD=red; YE=yellow; GN=green; GR=gray

Fonte: Operating Manual Quantium X (2003).

Figura 4.14 – Características do corpo de prova de compressão "G".



Fonte: Autor.

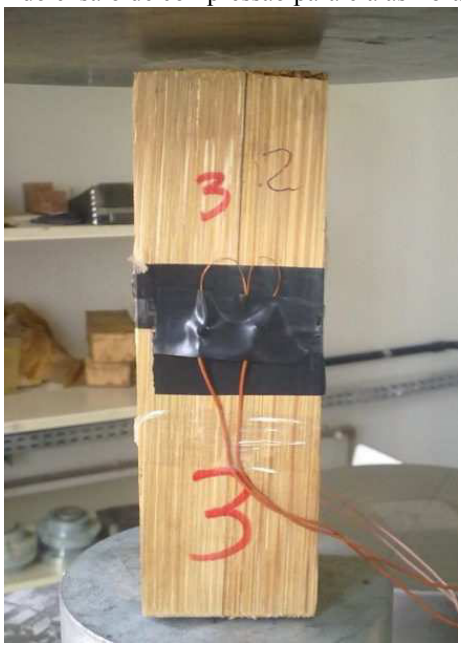
Nesta fase, os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sob controle de deslocamento, com capacidade de carga de 2000 kN.

Foram utilizados 6 corpos de prova que eram mensurados nas três dimensões por três vezes (utilizando um paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade), sendo 3 (três) destes, fabricados com adesivo CASCOPHEN e, os outros 3 (três), com adesivo CASCOREZ.

Em 2 (dois) dos 6 (seis) corpos de prova utilizados instrumentaram-se 4 (quatro) extensômetros elétricos (*gage factor* = 2,12 e $R = 350\ \Omega$) na direção paralela às fibras, medido-se as deformações em faces opostas dos espécimes; com o objetivo de mensurar o

módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC. A aquisição dos dados seguiu as mesmas etapas utilizadas para os corpos de prova pequenos. Na Figura 4.15 mostra-se o corpo de prova instrumentado, preparado para o ensaio de compressão paralela às fibras.

Figura 4.15 – Montagem do ensaio de compressão paralela às fibras (corpo de prova "G").



Fonte: Autor.

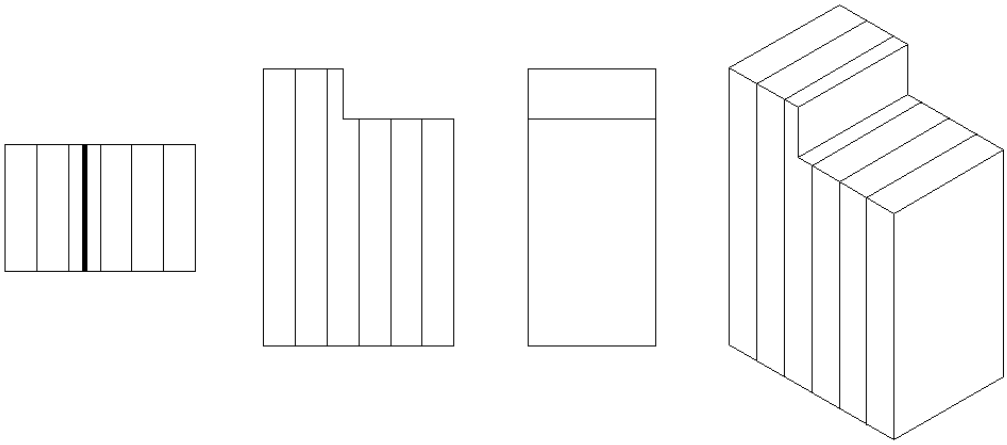
Salienta-se que foram feitos corpos de prova em dimensões distintas às estabelecidas pela ABNT NBR 7190 (1997), por economia de material de ensaio, de forma a verificar-se a compatibilidade das duas etapas do ensaio de compressão paralelas às fibras, ou seja, observar a similaridade entre os resultados dos corpos de prova pequenos (P) em relação aos corpos de prova grandes (G).

4.3.3 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DO BAMBU

Realizou-se ensaio de cisalhamento paralelo às fibras em 8 (oito) espécimes. Os corpos de prova foram constituídos por 6 (seis) ripas de bambu da região internodal com 0,73 cm de espessura, coladas umas às outras por adesivo à base de PVA (CASCOREZ).

Os corpos apresentaram dimensões nominais iguais a 6,1 x 4,2 x 2,8 cm, que foram adaptadas para o caso dos espécimes de BLC para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras do bambu; seguindo-se as proporções estabelecidas pela ABNT NBR 7190 (1997). Na Figura 4.16 mostram-se às vistas ortogonais e a perspectiva isométrica do corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras, em que se mostra o detalhe da disposição das ripas de bambu que formam o espécime.

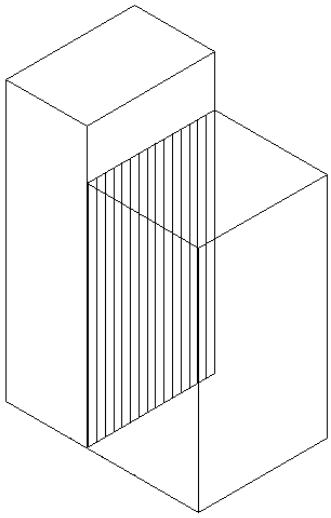
Figura 4.16 – Características do corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras do bambu.



Fonte: Autor.

Buscou-se um plano de cisalhamento de modo a não atingir o plano de cola, sendo a área de cisalhamento em média igual a 2,8 x 5,0 cm (Figura 4.17).

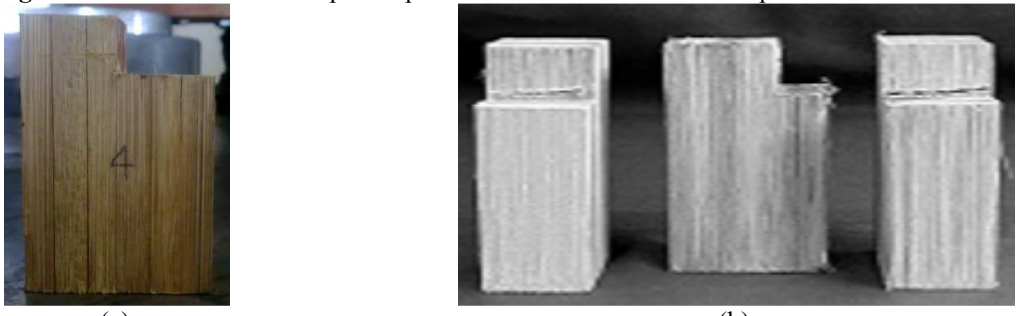
Figura 4.17 – Detalhe do plano de cisalhamento no corpo de prova.



Fonte: Autor.

Na Figura 4.18 apresentam-se as características dos corpos de prova idealizados para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras do bambu. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sob controle de deslocamento, com capacidade de carga de 2000 kN. Na Figura 4.19 mostra-se a montagem do ensaio.

Figura 4.18 – Detalhes dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



(a) (b)

Fonte: Autor.

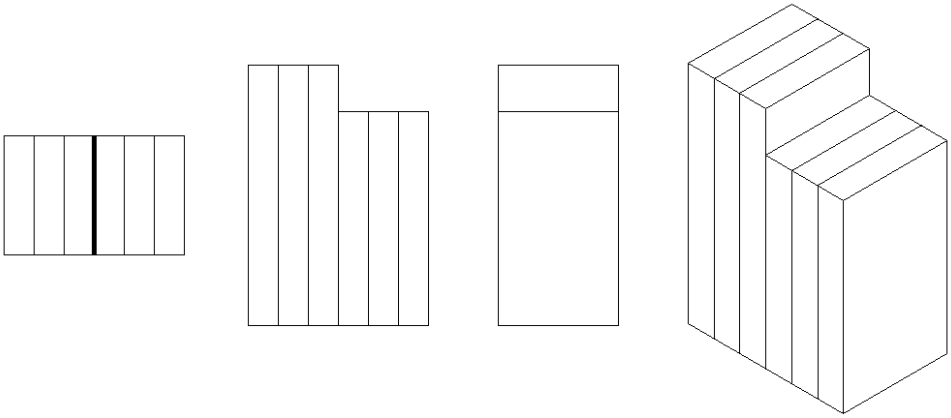
Figura 4.19 – Montagem do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras do bambu.

Fonte: Autor.

4.3.4 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM DO BLC

Com o propósito de verificar o comportamento do plano de colagem em uma peça de BLC, foram ensaiados, quanto ao cisalhamento no plano de colagem, 19 (dezenove) corpos de prova de laminado colado de bambu com dimensões nominais iguais a 6,1 x 4,2 x 2,8 cm; dos quais, 9 (nove) foram fabricados com adesivo CASCOREZ e, os outros 10 (dez), com adesivo CASCOPHEN. Buscou-se um plano de cisalhamento de modo a coincidir com o plano da cola, sendo a área de cisalhamento em média igual a 2,8 x 5,0 cm. Na Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 apresentam-se as características: do plano de colagem, dos corpos de prova e da montagem do ensaio. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sob controle de deslocamento, com capacidade de carga de 2000 kN. Na Figura 4.20 mostram-se às vistas ortogonais e a perspectiva isométrica do corpo de prova de cisalhamento paralelo ao plano de colagem, em que se mostra o detalhe da disposição das ripas de bambu que formam o espécime.

Figura 4.20 – Características do corpo de prova de cisalhamento paralelo ao plano de colagem do BLC.



Fonte: Autor.

4.3.5 FLEXÃO DO BLC

Foram ensaiadas vigas biapoiadas, com vão de 21,0 cm, em ensaio de flexão de três pontos, sendo um ponto de carregamento ativo (P) no meio do vão e dois reativos nos apoios extremos. O ensaio foi realizado por meio de um cilindro hidráulico de aplicação de carga acoplado a uma célula de carga com capacidade de 100 kN (Figura 4.21).

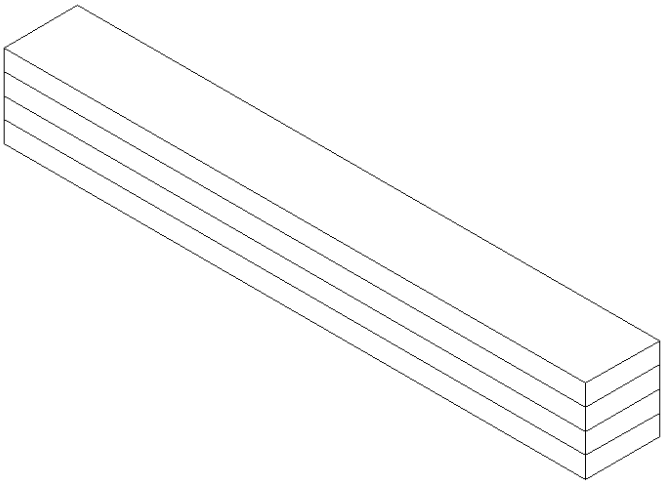
Figura 4.21 – Montagem do ensaio de flexão.

Fonte: Autor.

Foram confeccionados 6 (seis) corpos de prova, cada um dos quais compostos por 4 (quatro) ripas de bambu coladas entre si (Figura 4.22), sendo 3 (três) fabricados utilizando-se adesivo CASCOPHEN e 3 (três) com adesivo CASCOREZ.

Os espécimes apresentavam as seguintes dimensões médias: 2,66 cm (base); 3,00 cm (altura) e 21,0 cm (comprimento). As ripas dos corpos de prova foram numeradas de cima para baixo, por exemplo, a ripa mais acima é denominada número 1 (um), assim como a mais inferior é denominada número 4 (quatro).

Figura 4.22 – Características do corpo de prova de flexão do BLC.



Fonte: Autor.

4.4 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Nesta seção estão descritos os ensaios realizados para avaliar o comportamento dos elementos estruturais fabricados utilizando-se BLC. Desta forma, será exposta a metodologia de ensaio das treliças planas tipo *Howe* e de suas ligações e das vigas de seção retangular.

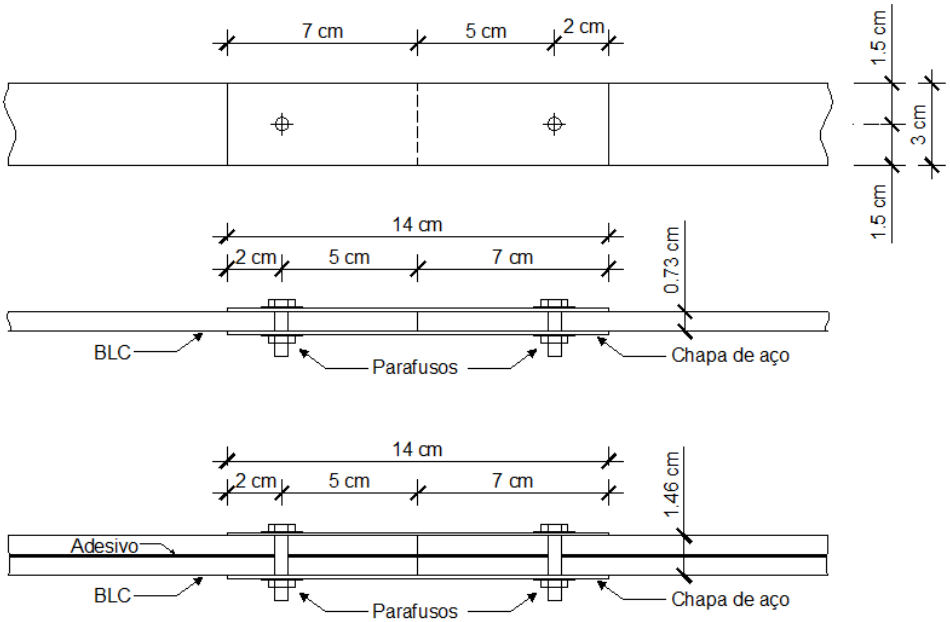
4.4.1 LIGAÇÕES DAS TRELIÇAS PLANAS

Ensaiaram-se 30 (trinta) corpos de prova de ligações das treliças com o objetivo de avaliar o seu comportamento para terem-se subsídios ao projeto das treliças.

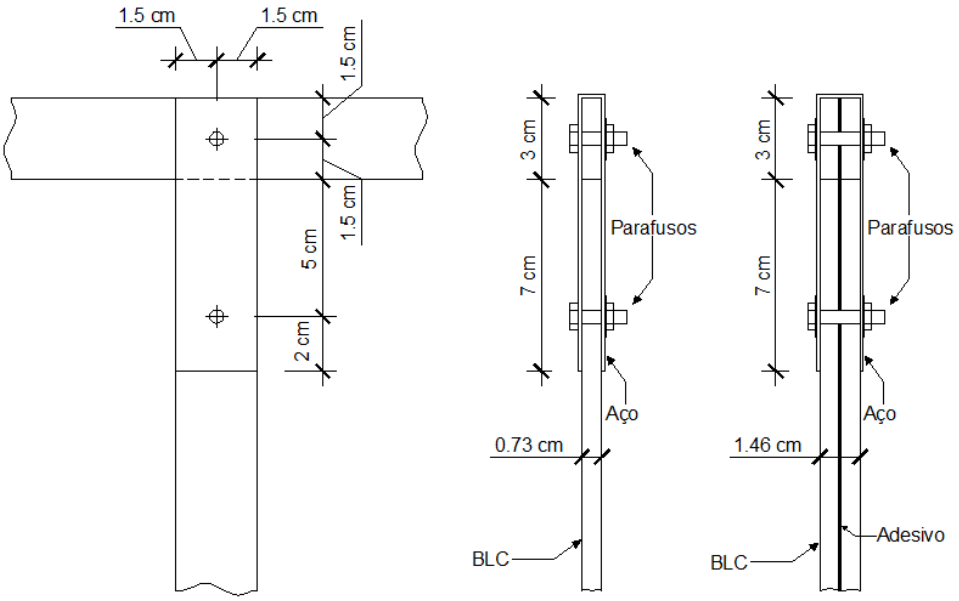
Estes ensaios apresentaram três variáveis, quais sejam: o ângulo de montagem das ligações, que podiam ser a 0º (zero grau, paralelo) ou a 90º (noventa graus, perpendicular); o tipo de adesivo utilizado na colagem entre as ripas de bambu e entre o bambu e as chapas de aço, sendo utilizados dois tipos de adesivos (CASCOREZ ou CASCOPHEN); e o número de ripas de bambu utilizadas para confecção dos espécimes, tendo-se amostras compostas por 1 (uma) ripa ou 2 (duas) ripas. Optou-se por realizar o ensaio das ligações a 0º e a 90º, pois a partir da resistência nessas duas direções obtém-se a resistência em uma direção intermediária pela fórmula de Hankison. Adicionalmente, a treliça terá ligações nas quais convergiram uma ou duas ripas de bambu, o que justifica a utilização dessas quantidades no ensaio das ligações.

Na Figura 4.23 mostram-se os detalhes dos corpos de prova do ensaio das ligações das treliças, tanto com 1 (uma) quanto com 2 (duas) ripas de bambu.

Figura 4.23 – Detalhes dos corpos de prova das ligações das treliças.



(a) Corpo de prova a 0º (zero grau) ou paralelo.



(b) Corpo de prova a 90º (noventa graus) ou perpendicular.

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.5 expõem-se as combinações de corpos de prova no ensaio das ligações. A priori obter-se-iam 8 (oito) possíveis exemplares de corpos de prova e, confeccionando-se 5 (cinco) réplicas para cada tipo de espécime, resultariam em 40 corpos de prova. No entanto, ao ensaiarem-se as ligações paralelas a 0º (zero grau), percebeu-se que não havia influência significativa do tipo de adesivo utilizado; desta forma, optou-se, devido à economia de material de ensaio, por não fabricar os seguintes tipos de amostras: 90_CASCOREZ_1 (ligação perpendicular com uma ripa utilizando adesivo CASCOREZ) e 90_CASCOPHEN_2 (ligação perpendicular com duas ripas utilizando adesivo CASCOPHEN). Portanto, têm-se 6 (seis) tipos de corpos de prova, e, fabricando-se 5 (cinco) réplicas de cada, resulta-se num total de 30 (trinta) espécimes, conforme supracitado.

Tabela 4.5 – Combinações dos ensaios de ligações das treliças.

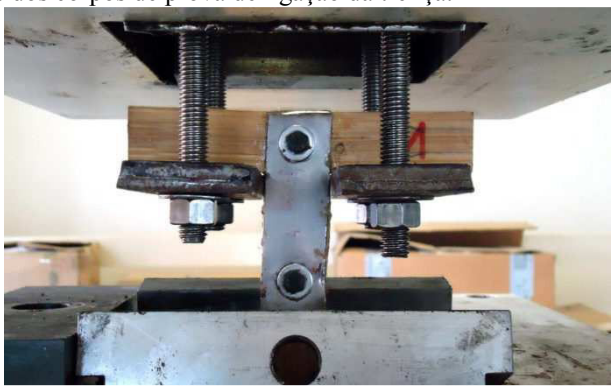
Ângulo de Montagem	Adesivo	Número de ripas	Combinação
0º	CASCOREZ	1	0_CASCOREZ_1
		2	0_CASCOREZ_2
	CASCOPHEN	1	0_CASCOPHEN_1
		2	0_CASCOPHEN_2
90º	CASCOREZ	2	90_CASCOREZ_2
	CASCOPHEN	1	90_CASCOPHEN_1

Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sob controle de deslocamento, com capacidade de carga de 2000 kN. Na Figura 4.24 estão apresentados os corpos de prova dos ensaios das ligações das treliças.

Figura 4.24 – Características dos corpos de prova de ligação da treliça.

(a) Ligação a 0º.



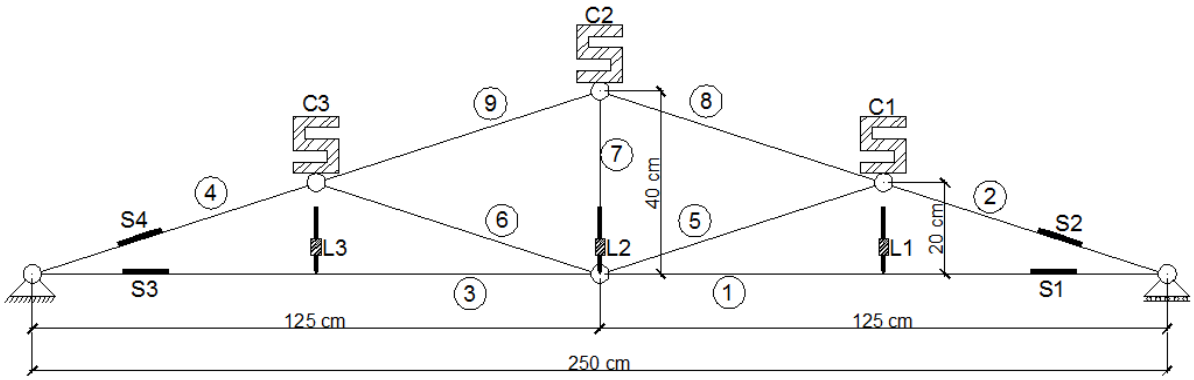
(b) Ligação a 90º.

Fonte: Autor.

4.4.2 TRELIÇA PLANA TIPO HOWE

Optou-se por utilizar neste estudo a treliça plana tipo *Howe* devido à grande aplicabilidade desse tipo de treliça em construções correntes (telhados) da região agreste pernambucana. Na Figura 4.25 mostra-se o modelo reticulado esquemático das treliças ensaiadas.

Figura 4.25 – Esquema reticulado experimental da treliça ensaiada.



Fonte: Autor.

Ensaiaram-se 4 (quatro) treliças planas tipo *Howe* fabricadas com BLC conforme o modelo da Figura 4.25, sendo duas fabricadas utilizando-se adesivo tipo CASCOREZ e as outras duas com adesivo tipo CASCOPHEN.

O ensaio desta estrutura foi realizado em uma mesa de reação juntamente com um sistema de aplicação de carga hidráulico, utilizando-se três pontos de carga acoplados a três células de carga (C1, C2 e C3 da Figura 4.25) com capacidade de 100 kN. Assim, o ensaio foi realizado aplicando-se estágios de carga; ou seja, aplicaram-se incrementos de carga de

20 kgf. Portanto, aplicava-se 20 kgf, estabilizava-se a carga para análise do comportamento da treliça e depois se acrescentava mais 20 kgf. Realizou-se tal procedimento para análise até a ruptura de cada uma das treliças.

A rigor, pelo método da área de influência, ter-se-ia que aplicar carga nos cinco nós superiores da treliça. No entanto, por restrições experimentais, decidiu-se calcular toda a carga do telhado e dividi-la por três para aplicá-las nos três nós centrais (Figura 4.25). Além disso, considerou-se que a distância entre treliças, no telhado experimental analisado, é igual a 1,8 m.

Cada treliça foi instrumentada por meio de 4 (quatro) extensômetros elétricos (*gagefactor* = 2,12 e $R = 120\ \Omega$) dispostos nas barras de maior esforço (S1, S2, S3 e S4 da Figura 4.25) que foram ligados a um sistema de aquisição de dados digital que se encontrava interligado a uma caixa seletora de canais de forma a medir a leitura de um extensômetro por vez, e ambos (sistema de aquisição de dados e caixa seletora) conectados a um microcomputador. Além disso, utilizou-se, para leitura dos extensômetros, um sistema de ponte de *Wheatstone* completa, conforme ilustrado na Figura 4.13.

As treliças foram instrumentadas também, utilizando-se 3 (três) medidores de deslocamento potenciométricos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) com curso máximo de 100 mm e precisão de 0,01 mm, postos no banzo inferior da treliça, diretamente abaixo dos três pontos de aplicação de carga (L1, L2 e L3 da Figura 4.25).

As leituras do sistema de aquisição de dados (cargas, deformações e deslocamentos) foram realizadas a uma frequência de 2,0 Hz e gravadas em um computador.

Definiram-se as dimensões médias das seções transversais e dos comprimentos dos elementos das treliças em função do número de ripas de bambu utilizadas no preparo do laminado colado de bambu. Assim, na Tabela 4.6 têm-se as informações a respeito de cada uma das barras das treliças.

Tabela 4.6 – Características das barras das treliças planas tipo *Howe*.

Nº da barra	Quantidade de ripas	Forma de fabricação	Dimensões da seção transversal (mm)	Comprimentos das barras (cm)	Tipo de seção transversal
1 e 3	2	Colagem das ripas	14,11 x 28,93	125,0	Simples
2, 4, 8 e 9	3	Colagem das ripas com posterior serragem da peça longitudinalmente	2 (9,55 x 28,57) espaçadas de 8,05	65,6	Múltipla (espaçadores interpostos)
5 e 6	2	Ripas isoladas	2 (7,33 x 29,63) espaçadas de 7,62	65,6	Múltipla (espaçadores interpostos)
7	1	Ripa isolada	7,13 x 29,96	40,0	Simples

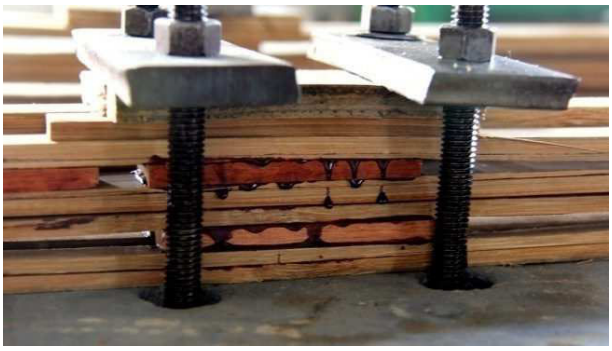
Fonte: Autor.

As barras da treliça de seção simples seguem o método de fabricação do BLC. Para as barras de seção múltipla, além da fabricação do BLC, teve-se que realizar a colagem e prensagem dos espaçadores interpostos, conforme Figura 4.26. Os espaçadores interpostos foram fabricados com madeira mista com as seguintes dimensões: 10,0 cm de comprimento; largura igual a das ripas de bambu; e espessura igual ao espaçamento entre as ripas de bambu, conforme Tabela 4.6.

Figura 4.26 – Esquema de prensagem das barras da treliça com espaçadores interpostos.

(a) Vista geral.

(b) Prensagem dos espaçadores com adesivo CASCOREZ.

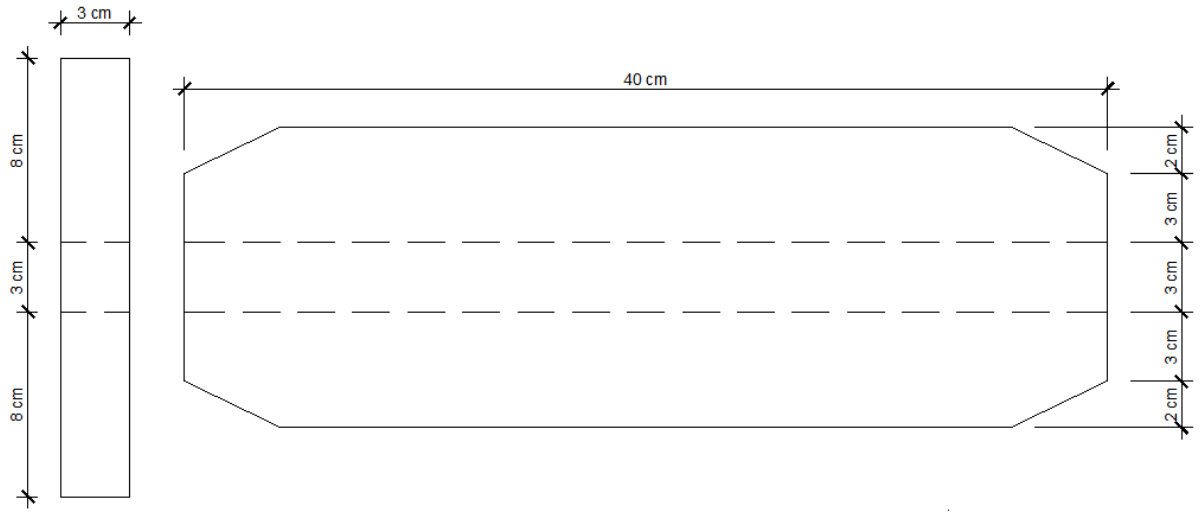


(c) Prensagem dos espaçadores com adesivo CASCOPHEN.

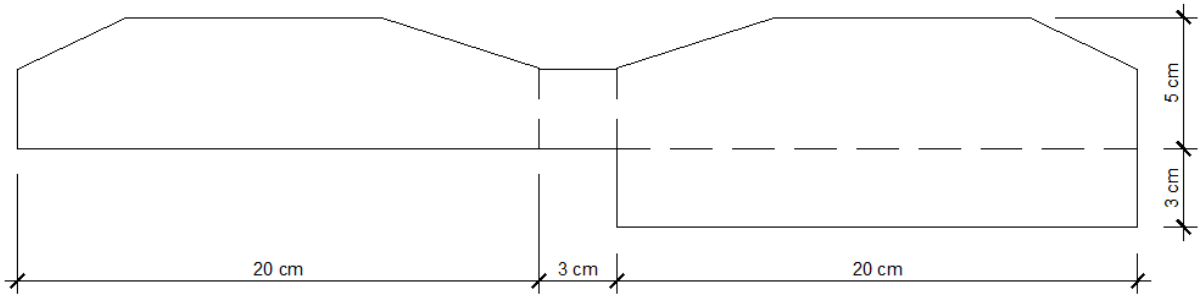
Fonte: Autor.

As ligações das treliças foram feitas pelo seguinte conjunto: chapa de aço 1020 com espessura de 1,25 mm; e parafusos (com porca e arruela) de alta resistência ISO 4016 Classe 8.8, com diâmetro nominal de 5,0 mm, tensão de escoamento igual a 640 MPa e tensão de ruptura igual a 800 MPa. Na Figura 4.27 mostram-se as planificações das chapas de aço utilizadas nas ligações das treliças. E, na Figura 4.28 expõem-se as ligações metálicas das treliças com chapa de aço, parafusos, porcas e arruelas.

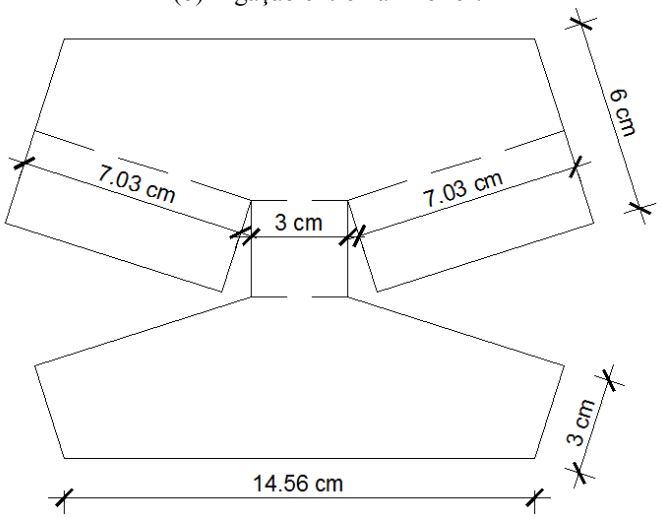
Figura 4.27 – Detalhes das planificações das chapas de aço utilizadas nas ligações.



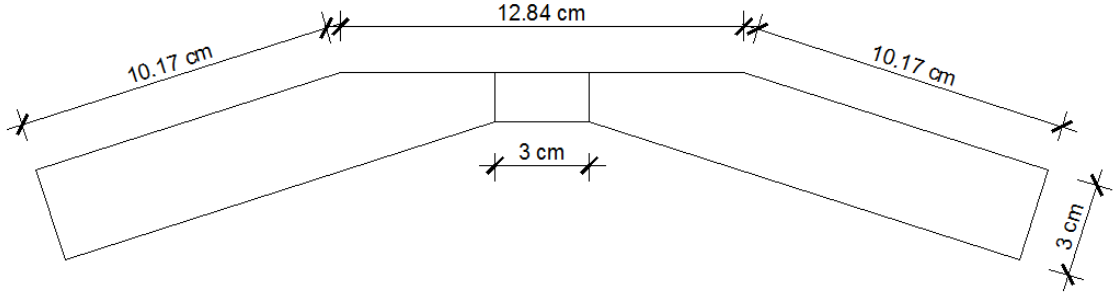
(a) Ligação central inferior.



(b) Ligação extrema inferior.

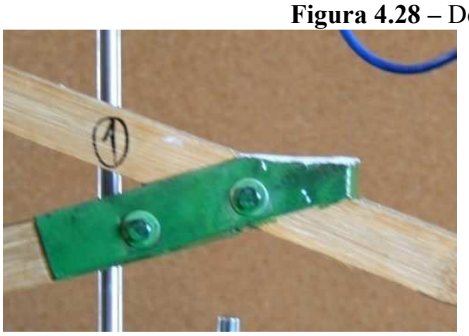


(c) Ligação central superior.



(d) Ligação intermediária.
Fonte: Autor.

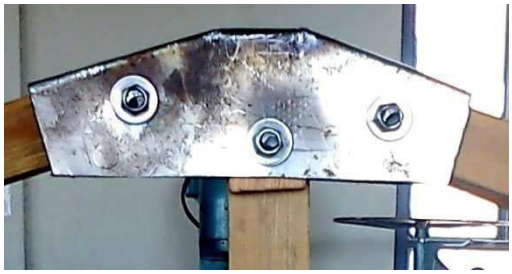
Figura 4.28 – Detalhe das ligações das treliças.



(a) Ligação entre as barras 2, 5 e 8.

(b) Ligação entre as barras 1 e 2.

(c) Ligação entre as barras 1, 3, 5, 6 e 7.



(d) Ligação entre as barras 7, 8 e 9.

Fonte: Autor.

Finalmente, na Figura 4.29 mostra-se uma das treliças pronta para ser ensaiada. Além disso, expõe-se no Apêndice A o arranjo básico das treliças ensaiadas com detalhes das ligações segundo critérios do Anexo A da ABNT NBR 7190 (1997).

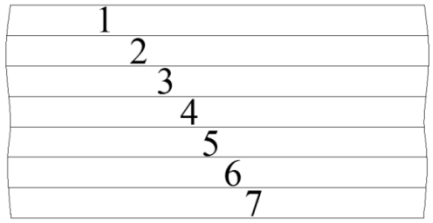
Figura 4.29 – Arranjo experimental das treliças planas tipo *Howe* ensaiadas.

Fonte: Autor.

4.4.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR

As vigas foram confeccionadas com sete ripas de bambu (numeradas de cima a baixo conforme Figura 4.30); com seção transversal média de 2,88 cm de base por 4,99 cm de altura e 80,8 cm de comprimento. As vigas em BLC foram preparadas com quatro diferentes disposições dos nós e emendas (A, B, C e D), conforme Figura 4.31. Resolveu-se estudar vigas de seção retangular fabricadas a partir de laminados colados, pois a grande maioria dos elementos estruturais componentes de estruturas de madeira (telhados, por exemplo) estão submetidos à flexão.

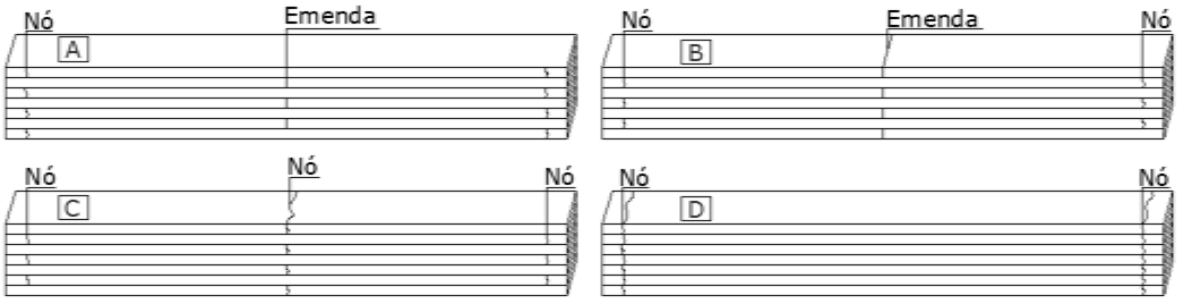
Figura 4.30 – Numeração das ripas de bambu ao longo da altura da viga.



Fonte: Autor.

A disposição "A" apresenta nós nas extremidades das ripas 1, 3, 5 e 7; e emendas de topo nas ripas 2, 4 e 6. Na conformação "B" têm-se nós nas extremidades das ripas 2, 4 e 6; e emendas nas ripas 1, 3, 5 e 7. Já para o tipo "C" não se têm emendas; em contrapartida, apresentam-se nós nas extremidades das ripas 2, 4 e 6; e nós nos centros das ripas 1, 3, 5 e 7. Finalmente, o tipo "D" apresenta nós nas extremidades e ausência de emendas em todas as ripas da viga.

Figura 4.31 – Disposição das ripas e nós nas vigas de BLC (A, B, C e D).



Fonte: Autor.

Para junção das ripas de bambu foram utilizados dois adesivos: CASCOPHEN e CASCOREZ; ambos foram preparados e utilizados conforme orientação do fabricante.

Foram confeccionadas 15 (quinze) vigas para realização do ensaio, das quais: 8 (oito) foram fabricadas com adesivo CASCOPHEN, duas vigas de cada um dos tipos "A", "B", "C" e "D"; e, 7 (sete) foram fabricadas com adesivo CASCOREZ, duas vigas de cada um dos tipos "A", "B" e "C", adicionadas de apenas uma do tipo "D".

Na Figura 4.32 mostra-se o processo de união das vigas por meio da prensagem das ripas coladas entre si. Após a cura do adesivo retirava-se o espécime da condição de prensagem e aplicava-lhe o acabamento por meio da serragem e lixamento das extremidades (até se obter comprimento adequado da viga) e aplainamento de suas faces. Na Figura 4.33 expõem-se as vigas prontas após o acabamento antes da realização do ensaio.

Figura 4.32 – Processo de prensagem para fabricação das vigas de BLC.

Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Vigas de seção retangular em BLC.

(a) (b)

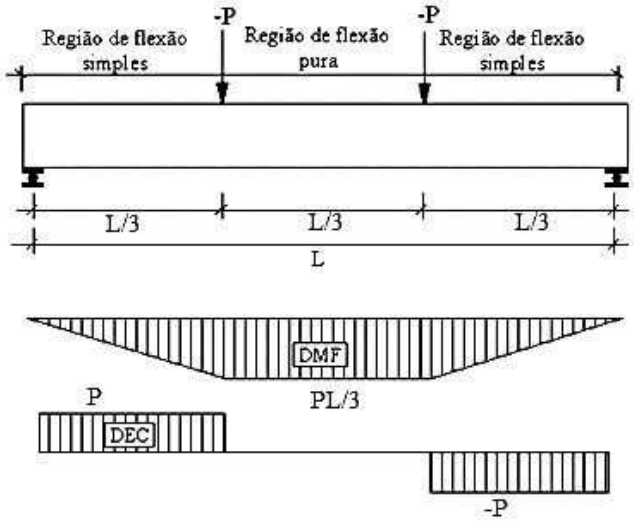
Fonte: Autor.

Objetivando-se a comparação entre as vigas de BLC e vigas de madeira natural de reflorestamento, usualmente empregadas na construção civil, foram fabricadas quatro vigas de madeira serrada padrão com dimensões similares as vigas de BLC; sendo duas de *Eucalyptus grandis* (E1 e E2) e outras duas de *Araucaria angustifolia* ou Pinho do Paraná (P1 e P2).

As vigas biapoiadas isostáticas, com vão de 75,0 cm, foram ensaiadas à flexão por meio do ensaio e flexão de quatro pontos, sendo dois pontos de carregamento ativo (P + P) nos terços médios e dois reativos nos apoios extremos, o qual é dito ensaio de Stuttgart (Figura 4.34). As cargas foram aplicadas através de dois cilindros hidráulicos, conectados cada um, a uma célula de carga, com capacidade de 100 kN. Os deslocamentos centrais verticais (no meio do vão) foram obtidos através de medidores de deslocamento potenciométricos, com curso de 100 mm e precisão de 0,01 mm. As leituras foram realizadas por um sistema de aquisição de dados a 2,0 Hz e gravadas em um computador. Além disso, o

ensaio foi realizado seguindo estágios de carregamento com incremento de carga igual a 20 kgf em cada um dos cilindros hidráulicos. Na Figura 4.35 exibe-se uma viga de BLC preparada para o ensaio.

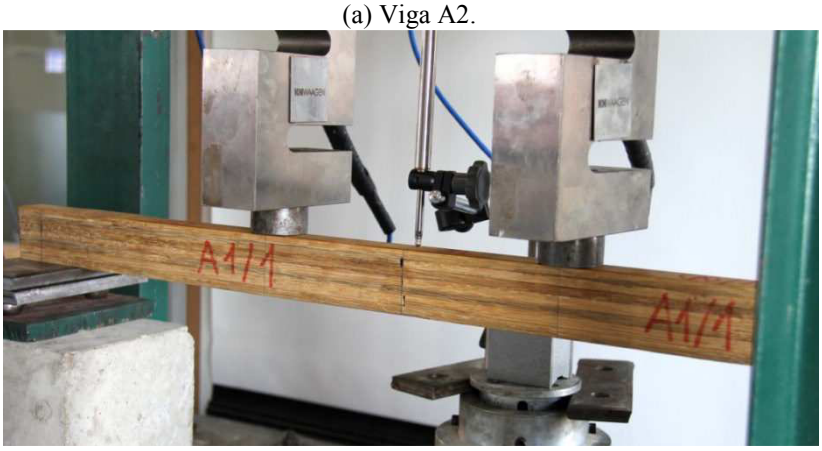
Figura 4.34 –Detalhe do ensaio de Stuttgart.



Fonte: Adaptado de Lima Jr. (2005).

Figura 4.35 – Esquema experimental do ensaio das vigas de BLC.

(a) Viga A2.



(b) Viga A1.
Fonte: Autor.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos nos ensaios desta dissertação. Primeiramente, expor-se-ão os dados referentes às propriedades físico-mecânicas do bambu e do Bambu Laminado Colado (BLC), sendo este fabricado com dois tipos de adesivos: CASCOREZ e CASCOPHEN. Portanto, foram analisadas as propriedades a seguir elencadas: absorção de água do bambu; massa específica do BLC; tração paralela às fibras do bambu; compressão paralela às fibras do BLC; módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC; cisalhamento paralelo às fibras do bambu e no plano de colagem; e flexão estática. Na Tabela 5.1 têm-se um resumo dos valores médios das propriedades físico-mecânicas obtidas nos ensaios.

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados das propriedades físico-mecânicas.

Ensaios físico-mecânicos do bambu/BLC	Valores
Densidade aparente do BLC (kg/m^3)	770
Tração paralela às fibras do Bambu na região internodal (MPa)	261,8
Tração paralela às fibras do Bambu na região nodal (MPa)	76,1
Compressão paralela às fibras do BLC à base de adesivo CASCOREZ (MPa)	100,9
Compressão paralela às fibras do BLC à base de adesivo CASCOPHEN (MPa)	97,6
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC (GPa)	22,1
Cisalhamento paralelo às fibras do bambu (MPa)	8,4
Cisalhamento no plano de colagem do BLC à base de adesivo CASCOREZ (MPa)	5,1
Cisalhamento no plano de colagem do BLC à base de adesivo CASCOPHEN (MPa)	8,1
Tensão de cisalhamento longitudinal máxima à flexão do BLC à base de adesivo CASCOREZ (MPa)	7,0
Tensão de cisalhamento longitudinal máxima à flexão do BLC à base de adesivo CASCOPHEN (MPa)	8,8
Tensão normal máxima à flexão do BLC à base de adesivo CASCOREZ (MPa)	97,3
Tensão normal máxima à flexão do BLC à base de adesivo CASCOPHEN (MPa)	123,5

Fonte: Autor.

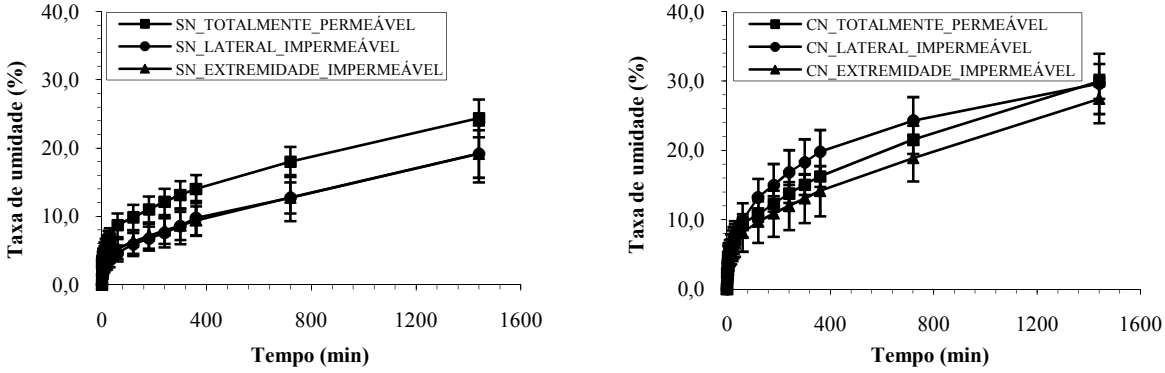
Por fim, avaliaram-se os resultados das estruturas fabricadas à base de BLC. Inicialmente, apresentaram-se os resultados das ligações metálicas das treliças, que serviam de base para o dimensionamento destas. Em seguida, comentou-se a respeito do dimensionamento das treliças, o qual está detalhado no Apêndice B (Memorial de cálculo das treliças). Para análise das treliças tipo *Howe* plotaram-se gráficos carga x deslocamento (experimental-numérica) e tensão x carregamento aplicado (experimental-teórica). Finalmente, avaliaram-se as vigas de BLC de seção transversal retangular, por meio dos dados de carga x deslocamento.

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

5.1.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BAMBU

Na Figura 5.1 apresentam-se as curvas de variação da taxa de umidade vs. tempo. Na Figura 5.1a têm-se os dados dos corpos de prova de bambu sem nó (indicados por SN), e na Figura 5.1b mostram-se os dados referentes aos corpos de prova com a região nodal presente. Além disso, estes resultados são concernentes às amostras ensaiadas sem e com tratamento impermeabilizante (impermeabilização lateral ou impermeabilização das extremidades), tendo um intervalo de confiabilidade considerando uma probabilidade de 95% e utilizando distribuição t de *Student*, que é utilizada para pequenas amostras com menos de 30 (trinta) dados (n < 30).

Figura 5.1 – Diagrama taxa de umidade versus tempo.



(a) Bambu sem nó. (b) bambu com nó.

Fonte: Autor.

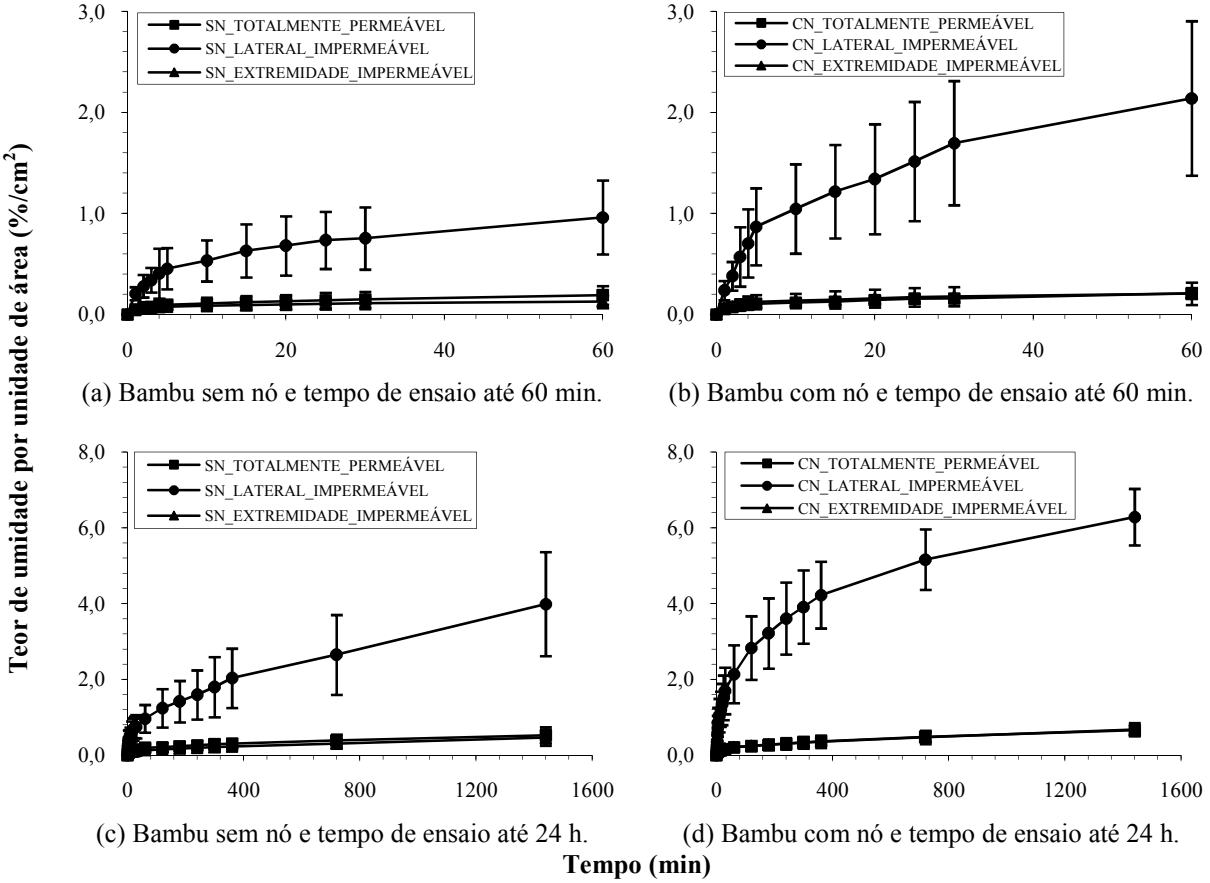
Observa-se que, para as amostras sem e com nó, a taxa de absorção de água atingiu valores médios de 24,4 e 30,0%, respectivamente, aos 1440 min (24 h); valores estes que concordam com os encontrados na literatura (GHAVAMI, 2005). Observa-se ainda que a taxa de absorção de água da região nodal é cerca de 25% superior do que da região sem a presença de nó para o tempo final do ensaio (24 h); comprovando a maior porosidade da região nodal.

Analisando as curvas das taxas de umidade dos corpos de prova sem nó com extremidades ou laterais impermeabilizadas (SN_EXTREMIDADE_IMPERMEÁVEL e SN_LATERAL_IMPERMEÁVEL, respectivamente), observa-se que estas apresentaram o mesmo comportamento; contudo, com resultados inferiores ao dos corpos sem impermeabilização. Já para o bambu com nó verifica-se que os corpos de prova com extremidades livres (CN_LATERAL_IMPERMEÁVEL) apresentaram valores maiores da taxa de absorção para tempos entre 100 e 800 min; contudo, em 24 h de ensaio os valores estabilizaram e se igualaram aos corpos de prova sem tratamento de impermeabilização

(CN_TOTALMENTE_PERMEÁVEL), devido ao fato de ocorrer saturação das amostras de bambu, por conseguinte, para um tempo infinito de submersão de bambu em água. As curvas da Figura 5.1 indicam o ponto de máxima taxa de absorção.

Com o objetivo de verificar qual face (extremidades ou laterais) absorve mais água por unidade de área em função do tempo de ensaio, calcularam-se as variações das taxas de umidade em relação à área em contato com a água. Desta forma, na Figura 5.2, apresentam-se as curvas da variação da taxa de umidade vs. a área de exposição à água, para 24 h e 60 min de ensaio.

Figura 5.2 – Diagrama variação da taxa de umidade por unidade de área versus tempo.



(a) Bambu sem nó e tempo de ensaio até 60 min. (b) Bambu com nó e tempo de ensaio até 60 min.

(c) Bambu sem nó e tempo de ensaio até 24 h. (d) Bambu com nó e tempo de ensaio até 24 h.

Fonte: Autor.

Analisando as curvas da Figura 5.2 percebe-se que é evidente que a face da extremidade, ou seja, perpendicular à direção das fibras e vasos, tanto para o bambu com nó quanto para o sem nó, apresenta a maior taxa de absorção.

Considerando os pontos correspondentes aos tempos de 24 h e 60 min, observa-se que a face da extremidade é cerca de 8 e 10 vezes mais absorvente que a face lateral para o bambu sem nó e com nó, respectivamente; e que a face da extremidade da região nodal é cerca de 2 vezes mais absorvente que da região sem nó. Na Figura 5.3 apresenta-se em detalhe a absorção da água pela face das extremidades nos corpos de prova com lateral impermeável.

Observa-se uma região com tonalidades mais escuras, próxima às extremidades da amostra, caracterizada pela maior concentração de água.

Figura 5.3 – Penetração de água pela face da extremidade do bambu.

Fonte: Autor.

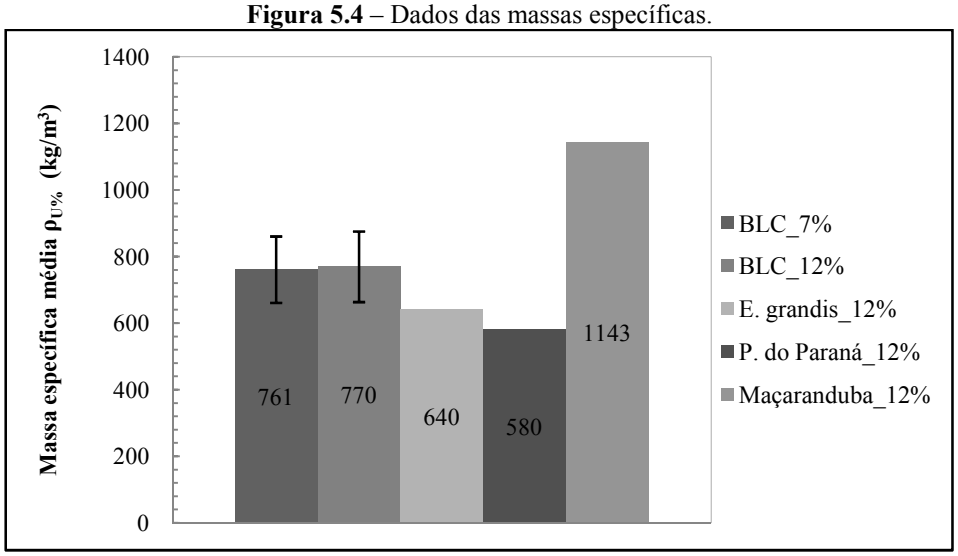
5.1.2 ENSAIO DA MASSA ESPECÍFICA DO BLC

A massa específica média obtida, para as 8 (oito) amostras utilizadas de BLC, foi de 760,85 kg/m^3, com coeficiente de variação igual a 15,69%; para um teor de umidade médio das amostras de 7,0%, com respectivo desvio-padrão de 0,7%. Tal condição de umidade simula a condição do BLC utilizado nos ensaios das estruturas (treliças planas tipo *Howe* e vigas de seção retangular), pois os espécimes do ensaio de massa específica, assim como o bambu utilizado na fabricação das estruturas desta dissertação, já haviam passados pelo processo de secagem pós corte dos colmos (ao ar livre e em estufa). Para as amostras secas em estufa até atingir a condição seca (umidade igual a 0%), a massa específica média foi de 733,11 kg/m^3, com coeficiente de variação igual a 15,80%. Adicionalmente, utilizando-se a expressão proposta por Logsdon (1998), calcula-se a densidade aparente média do BLC igual a 769,51 kg/m^3.

A ABNT NBR 7190 (1997) expõe no anexo E algumas características físico-mecânicas das principais madeiras. A densidade aparente a 12% de umidade para as madeiras *Eucalyptus grandis* e *Araucaria angustifolia* (Pinho do Paraná) são iguais a 640 kg/m^3 e 580 kg/m^3, respectivamente. Assim, o BLC (bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*) apresenta valores de massa específica maiores que as supracitadas madeiras; no entanto, estes valores são, em geral, inferiores aos das madeiras dicotiledôneas utilizadas em estruturas de telhados, como a Maçaranduba (*Manilkara spp*), com densidade aparente igual a 1143 kg/m^3.

Na Figura 5.4 mostram-se os dados de massa específica com os respectivos intervalos de confiança, utilizando-se a distribuição de probabilidade t de *Student* com um nível de confiabilidade de 95%. Por fim, constata-se que os valores das massas específicas do BLC deste trabalho concernem com os encontrados na literatura (OLIVEIRA, 2006), para o bambu da mesma espécie do que foi utilizado na fabricação do laminado colado.

Figura 5.4 – Dados das massas específicas.



Fonte: Autor.

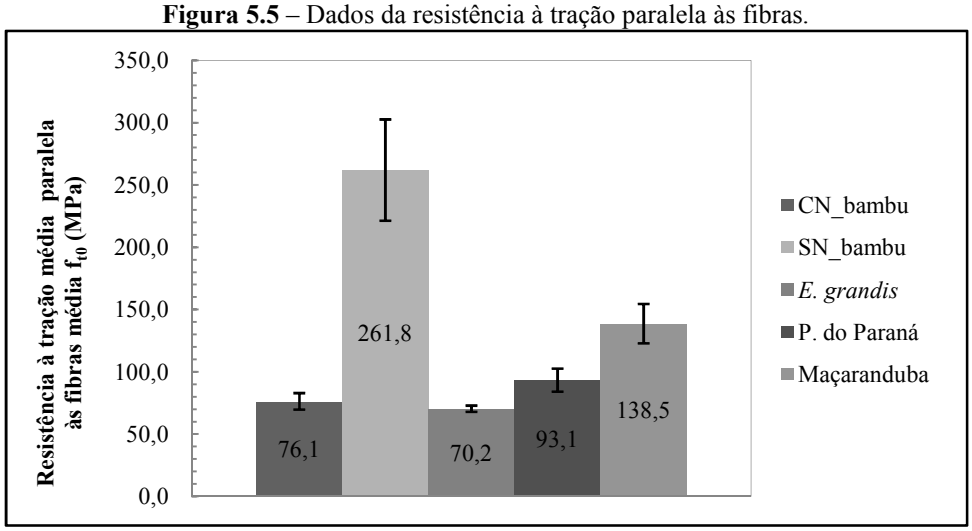
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.2.1 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BAMBU

Nos ensaios de caracterização do bambu, obteve-se uma resistência média à tração paralela às fibras de 261,8 MPa e coeficiente de variação (CV) igual a 12,5%, para corpos de prova sem nó (região internodal) e de 76,1 MPa para corpos de prova com nó com CV igual a 7,0%. Desta forma, a resistência à tração na região internodal é cerca de 3,5 vezes maior do que na região nodal.

Na Figura 5.5 apresentam-se os resultados de resistência à tração, tendo um intervalo de confiabilidade considerando uma probabilidade de 95% e utilizando a distribuição t de *Student* para os espécimes de bambu com e sem nó; além dos dados da ABNT NBR 7190 (1997) referentes às seguintes madeiras: *Eucalyptus grandis*, *Araucaria angustifolia* (Pinho do Paraná) e Maçaranduba (*Manilkara spp*). Tal instrumento normativo considera o coeficiente de variação igual a 18% para resistências a solicitações normais (com pressão e tração paralelas às fibras).

Figura 5.5 – Dados da resistência à tração paralela às fibras.



Fonte: Autor.

Contata-se que a resistência média à tração paralela às fibras deste bambu na região internodal é equiparável às resistências características ao escoamento (f_{yk}) do aço de construção categoria CA – 25 e do aço estrutural tipo MR (média resistência mecânica) 250, ambos com tensão de escoamento igual a 250 MPa. No entanto, como a resistência média à tração paralela às fibras na região nodal é sensivelmente menor, torna-se necessário a composição adequada das ripas de bambu na fabricação do laminado, de forma a ter-se uma resistência intermediária entre regiões nodal e intermodal evitando-se, por exemplo, seções transversais de peças de laminados colados compostas por ripas com regiões nodais comuns a esta seção.

5.2.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO BLC

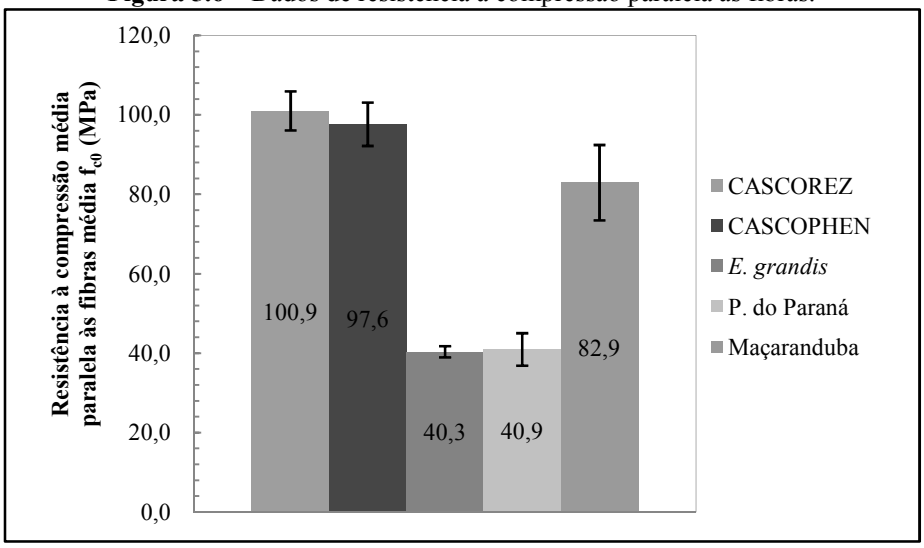
Nos ensaios de compressão simples paralela às fibras, obtiveram-se as seguintes resistências médias para os tipos de corpos de prova ensaiados: 101,2 MPa e CV igual 7,6% para os corpos de prova pequenos (2,75 x 3,00 x 5,00 cm) colados com adesivo CASCOREZ, denominados "CASCOREZ_P"; 100,1 MPa e CV igual 13,1% para os corpos de prova grandes (5,00 x 5,00 x 15,00 cm) colados com adesivo CASCOREZ, denominados "CASCOREZ_G"; 97,4 MPa e CV igual 8,4% para os corpos de prova pequenos colados com adesivo CASCOPHEN, denominados "CASCOPHEN_P"; e, 98,3 MPa e CV igual 15,9% para os corpos de prova grandes colados com adesivo CASCOPHEN, denominados "CASCOPHEN_G".

Dentre os dados obtidos, a maior resistência à compressão paralela às fibras foi igual a 116,0 MPa, para uma amostra do tipo CASCOPHEN_G; e a menor foi igual a 82,1 MPa, em uma amostra do CASCOREZ_P.

Apesar de o adesivo CASCOREZ apresentar em média melhor comportamento à compressão do que o adesivo CASCOPHEN, por meio do teste de hipótese com nível de confiabilidade de 95%, observou-se que o tipo de adesivo utilizado não influencia na resistência à compressão paralela às fibras. Utilizando o mesmo procedimento, constata-se que o tamanho dos corpos de prova não influencia de maneira significativa à resistência à compressão; o teste de hipótese para um nível de confiabilidade de 95% assegura a similaridade entre os dois tipos de amostras (corpos de prova grandes e pequenos).

Desta forma, na Figura 5.6 apresentam-se os resultados de resistência à compressão paralela às fibras média do BLC para um intervalo de confiabilidade com probabilidade de 95% segundo a distribuição t de *Student*, considerando-se os dois tipos de corpo de prova diferenciados pelo tipo de adesivo utilizado, já que o tamanho do espécime não influenciara nos resultados. Adicionalmente, têm-se os dados referentes às madeiras *Eucalyptus grandis* (40,3 MPa), Pinho do Paraná (40,9 MPa) e Maçaranduba (82,9 MPa); conforme a ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 5.6 – Dados de resistência à compressão paralela às fibras.



Fonte: Autor.

Observa-se que a resistência à compressão paralela às fibras do BLC é 2,4 vezes maior que a resistência das madeiras dicotiledônea e conífera, *E. grandis* e P. do Paraná, respectivamente. Além disso, a f_{c0} do BLC é cerca de 20% maior que a da Maçaranduba.

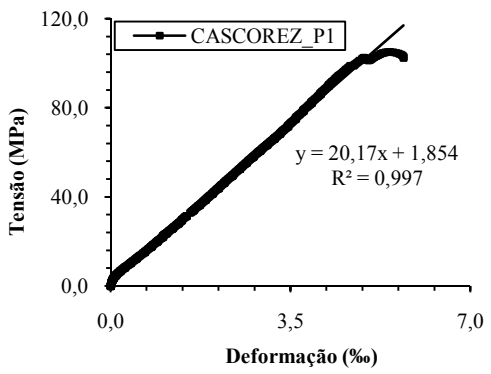
Para medir-se o módulo de elasticidade à compressão médio utilizaram-se 8 (oito) corpos de prova, sendo 6 (seis) espécimes pequenos e 2 (dois) grandes; no entanto, em metade

destes teve-se problemas nos extensômetros ou na aquisição dos dados. Desta forma, na Figura 5.7 estão apresentados 4 (quatro) gráficos de tensão vs. deformação dos corpos de prova submetidos à compressão paralela às fibras. Adicionalmente, fez-se a aproximação linear dos dados pelo método dos mínimos quadrados, tendo-se o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC numericamente igual ao coeficiente angular da reta de aproximação dos dados.

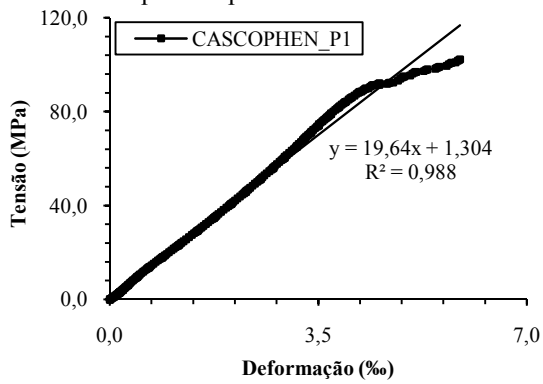
Na verdade, a ABNT NBR 7190 (1997) define que o módulo de elasticidade à compressão igual à inclinação da reta secante entre os pontos a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes valores: 19,9 GPa para o corpo de prova pequeno (2,75 x 3,00 x 5,00 cm) número 1 colado com adesivo CASCOREZ, denominado "CASCOREZ_P1"; 20,0 GPa para o corpo de prova pequeno número 1 colado com adesivo CASCOPHEN, denominado "CASCOPHEN_P1"; 26,1 GPa para o corpo de prova pequeno número 2 colado com adesivo CASCOREZ, denominado "CASCOREZ_P2"; e, 22,4 GPa para o corpo de prova grande (5,00 x 5,00 x 15,00 cm) número 1 colado com adesivo CASCOPHEN, denominado "CASCOPHEN_G1". Portanto, o módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras médio (E_{c0}) do BLC é igual a 22,1 GPa com CV igual a 13,2%; este valor similar ao E_{c0} da madeira Maçaranduba (22,7 GPa) e cerca de 72% e 45% superior as madeiras *E. grandis* e Pinho do Paraná, respectivamente.

De forma geral, o comportamento à compressão paralela às fibras do BLC é linear até o limite de proporcionalidade. A partir deste, o diagrama tensão vs. deformação resulta não-linear, provavelmente pelo fenômeno de flambagem das fibras do bambu. Assim, o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras é calculado para o trecho linear do gráfico tensão x deformação.

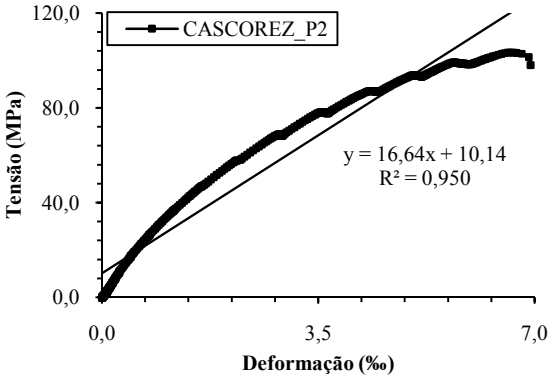
Figura 5.7 – Curvas tensão vs. deformação do BLC à compressão paralela às fibras.



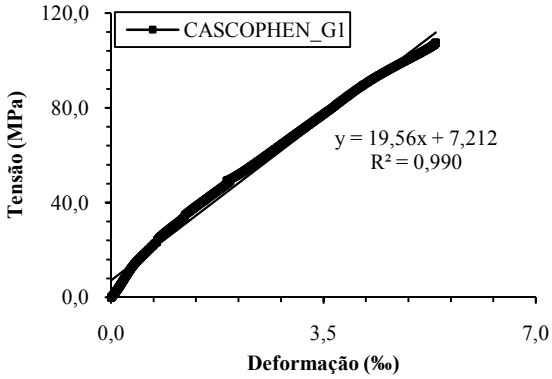
(a) Espécime pequeno 1 com adesivo CASCOREZ.



(b) Espécime pequeno com adesivo CASCOPHEN.



(c) Espécime pequeno 2 com adesivo CASCOREZ.

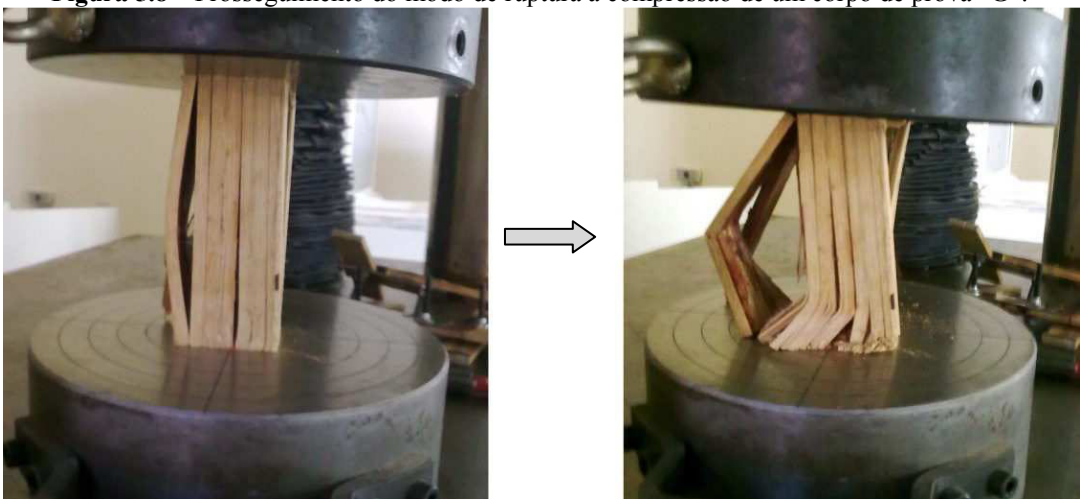


(d) Espécime grande 1 com adesivo CASCOPHEN.

Fonte: Autor.

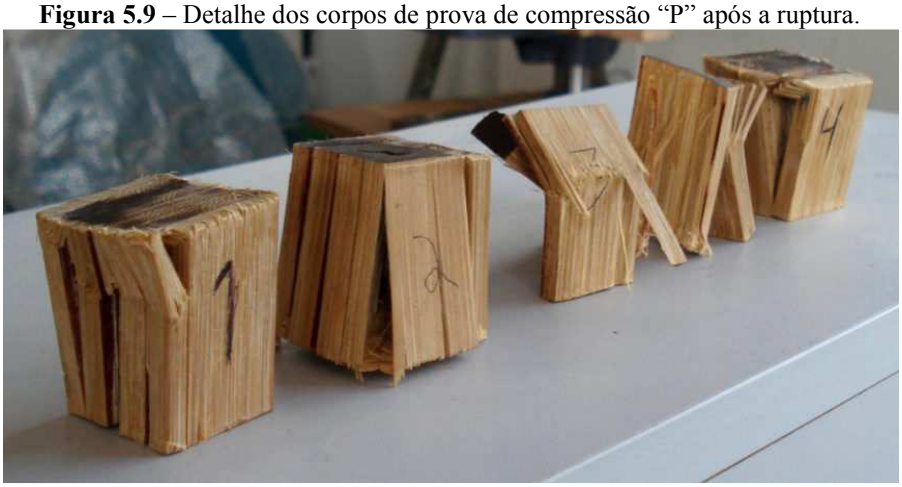
Nas Figura 5.8 e Figura 5.9 vê-se o modo de ruptura à compressão paralela às fibras dos espécimes. A ruptura se inicia pelo descolamento do adesivo seguido pela ruptura a compressão através do fenômeno de flambagem das ripas que compõem o corpo de prova.

Figura 5.8 – Prosseguimento do modo de ruptura à compressão de um corpo de prova "G".



Fonte: Autor.

Figura 5.9 – Detalhe dos corpos de prova de compressão "P" após a ruptura.



Fonte: Autor.

5.2.3 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DO BAMBU

Para os corpos de prova submetidos ao cisalhamento obteve-se uma resistência ao cisalhamento paralelo às fibras média de 8,42 MPa com CV igual a 14,0%. Na Figura 5.10 estão expostas as superfícies cisalhadas após a ruptura dos espécimes.

Figura 5.10 – Modo de ruptura ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu.

(a) (b)

Fonte: Autor.

Na Figura 5.12 apresentam-se os dados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu (f_{v0}). Adicionalmente, têm-se as resistências ao cisalhamento das madeiras *E. grandis*; Pinho do Paraná e Maçaranduba; conforme um coeficiente de variação de 28% para resistências a solicitações tangenciais, estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997).

5.2.4 CISALHAMENTO NO PLANO DE COLAGEM DO BLC

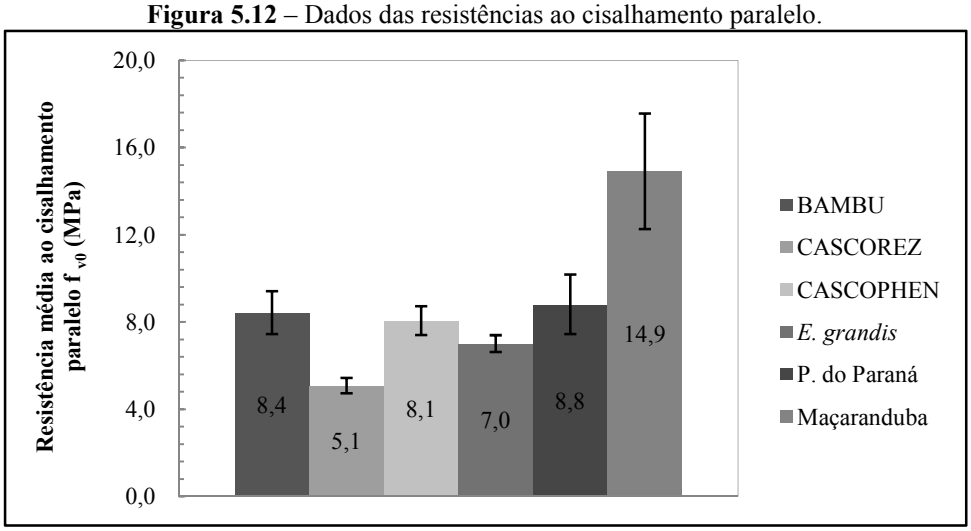
Para os espécimes submetidos ao cisalhamento no plano de colagem obteve-se uma resistência média ao cisalhamento de 5,07 MPa (CV = 9,0%) e de 8,05 MPa (CV = 11,4%), para os adesivos CASCOREZ e CASCOPHEN, respectivamente. Na Figura 5.11 estão expostas as superfícies de cisalhamento após a ruptura e na Figura 5.12 apresentam-se os dados de resistência ao cisalhamento paralelo ao plano de adesão do BLC (f_{gv0}).

Figura 5.11 – Modo de ruptura ao cisalhamento no plano de cola.

(a) Adesivo CASCOPHEN. (b) Adesivo CASCOPEZ.

Fonte: Autor.

Figura 5.12 – Dados das resistências ao cisalhamento paralelo.



Fonte: Autor.

Pela análise do gráfico da Figura 5.12 e avaliando-se os dados de cisalhamento através do teste de hipótese com nível de confiabilidade de 95%, verifica-se que as amostras do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras do bambu e do ensaio de cisalhamento no plano do adesivo CASCOPHEN apresentam estatisticamente a mesma resistência ao cisalhamento. O mesmo não pode ser afirmado para o ensaio de cisalhamento no plano do adesivo CASCOREZ com relação ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu (BAMBU). Desta forma, o adesivo não é indiferente quando se trata de resistência ao cisalhamento direto; já que o adesivo CASCOREZ apresenta resultados de resistência ao cisalhamento cerca de 60% menores que o BAMBU e o adesivo CASCOPHEN.

Por fim, observa-se que a resistência ao cisalhamento do bambu é equiparável às madeiras *E. grandis* e Pinho do Paraná; no entanto, corresponde a apenas 34% da resistência ao cisalhamento paralela às fibras da madeira dicotiledônea Maçaranduba. Ademais, salienta-se que esta madeira tem o 3º (terceiro) maior valor de resistência ao cisalhamento paralela às fibras catalogada pela ABNT NBR 7190 (1997).

5.2.5 FLEXÃO DO BLC

No ensaio de flexão, dos 6 (seis) corpos de prova ensaiados, apenas 1 (um) rompeu por tração devido à flexão, os demais romperam por fluxo de cisalhamento longitudinal no plano de colagem entre as ripas de bambu.

A tensão média de cisalhamento longitudinal foi igual a 7,0 MPa (CV = 8,3%) e 8,8 MPa (CV = 9,0%) para os corpos de prova fabricados com adesivo CASCOREZ e CASCOPHEN, respectivamente.

A tensão média normal máxima (atuante no bordo mais distante da linha neutra da secção transversal da peça fletida) à flexão foi igual a 97,3 MPa (CV = 8,7%) e 123,5 MPa (CV = 12,5%) para os espécimes fabricados com adesivo CASCOREZ e CASCOPHEN, respectivamente. Salienta-se que estes valores de tensão normal à flexão não constituem a resistência à flexão do BLC (f_M), já que, de maneira geral, não houve ruptura dos corpos de prova devida a este fenômeno, e sim devido ao fluxo de cisalhamento longitudinal.

Na Figura 5.13 mostra-se o modo de ruptura dos corpos de prova de BLC submetidos ao ensaio de flexão.

Figura 5.13 – Detalhe da ruptura dos corpos de prova de flexão.

(a) Ruptura por fluxo de cisalhamento entre a 2ª e a 3ª ripas e por tração na fibra mais tracionada com presença de nó.

(b) Ruptura por fluxo de cisalhamento entre a 3ª e a 4ª ripas; e início de ruptura por tração na 3ª ripa (região nodal) e na 4ª ripa (região internodal).

Fonte: Autor.

5.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

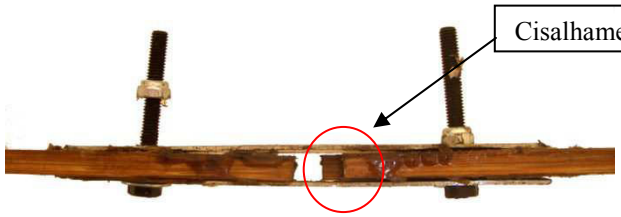
Nos itens que se seguem serão descritos os resultados dos elementos estruturais fabricados utilizando-se BLC. Assim, serão expostos os dados e as suas respectivas discussões referentes às treliças planas tipo *Howe* ensaiadas; às ligações de treliças planas ensaiadas para subsidiar o projeto das supracitadas treliças; e às vigas de seção transversal retangular.

5.3.1 LIGAÇÕES DAS TRELIÇAS PLANAS

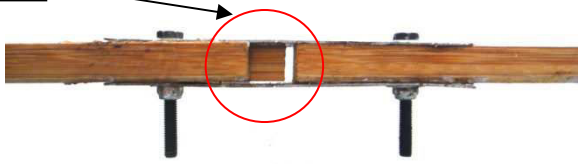
Nos ensaios das ligações a 0º (paralelo), verificou-se que a ruptura ocorria por cisalhamento na região de embutimento do parafuso sobre o bambu, para todas as combinações de adesivos e números de ripas utilizados.

Na Figura 5.14 têm-se os detalhes e os modos de ruptura dos corpos de prova das ligações a 0º (paralelo). Nas Figura 5.14a e b verifica-se o deslocamento devido ao cisalhamento da região embutida, após a realização do ensaio. Nas Figura 5.14c à f têm-se as características pós-ruptura dos espécimes das ligações, após a desmontagem dos corpos de prova, ou seja, retirada dos parafusos e das chapas de aço.

Figura 5.14 – Detalhes do ensaio das ligações a 0º.



(a) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOREZ_1 após o ensaio.



(b) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOREZ_2 após o ensaio.

(c) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOPHEN_1.

(d) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOREZ_2.

(e) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOREZ_1.

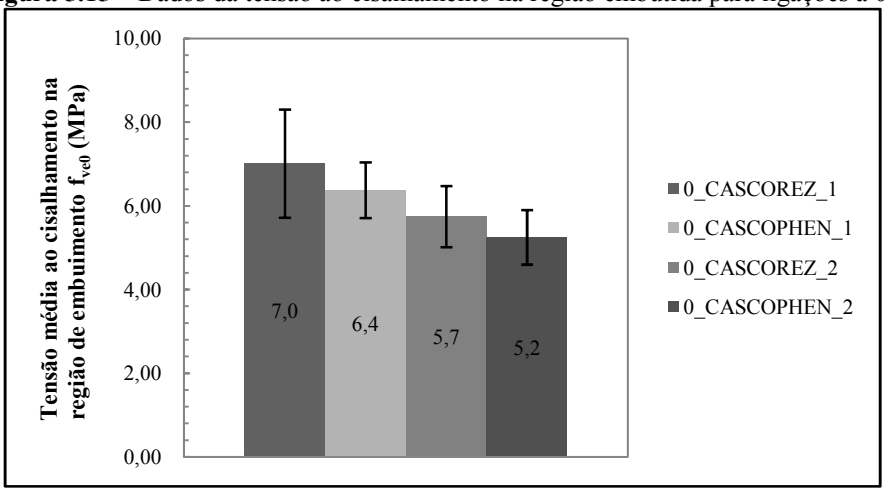
(f) Detalhe de um corpo de prova 0_CASCOREZ_2.

Fonte: Autor.

A tensão ao cisalhamento na região embutida apresentou os seguintes valores médios: 7,01 MPa (CV = 14,8%), para o 0_CASCOREZ_1; 6,37 MPa (CV = 8,4%), para o 0_CASCOPHEN_1; 5,74 MPa (CV = 10,3%), para o 0_CASCOREZ_2; e, 5,25 MPa (CV = 10,0%), para o 0_CASCOPHEN_2. Avaliou-se esta tensão de cisalhamento através do teste de hipótese com nível de confiabilidade de 95% e concluiu-se que o tipo de adesivo utilizado não influencia na tensão ao cisalhamento da região embutida.

Na Figura 5.15 apresentam-se os resultados da tensão média ao cisalhamento na região de embutimento, sendo utilizado um intervalo de confiabilidade de 95% para a distribuição t de *Student*.

Figura 5.15 – Dados da tensão ao cisalhamento na região embutida para ligações a 0º.

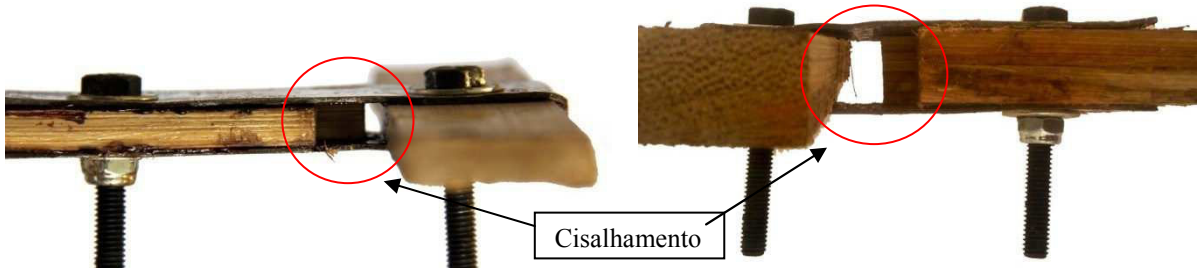


Fonte: Autor.

Nos ensaios das ligações a 90º (paralelo), verificou-se que a ruptura ocorria por cisalhamento na região de embutimento do parafuso sobre o bambu ou tração perpendicular às fibras devido à aplicação do esforço resultar perpendicular a uma das peças da ligação. Na verdade, para condições de projeto devem-se evitar peças submetidas à tração perpendicular às fibras, pois o bambu apresenta baixa resistência à tração perpendicular às fibras devido à baixa resistência do *Parenchyma*.

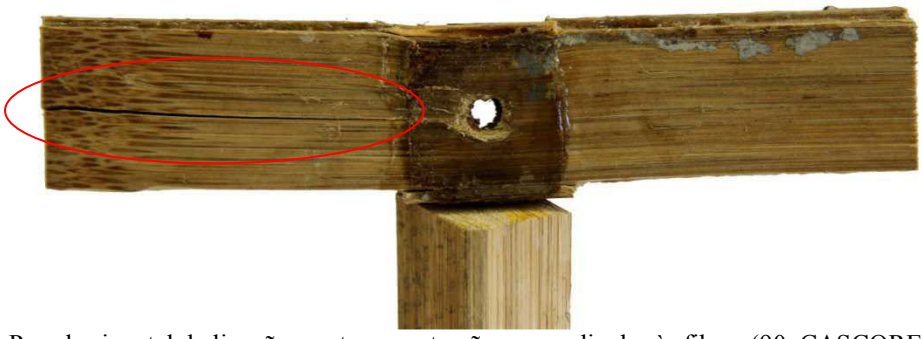
Na Figura 5.16 têm-se os detalhes e os modos de ruptura dos corpos de prova das ligações a 90º (perpendicular). Nas Figura 5.16a e b verifica-se o deslocamento devido ao cisalhamento da região embutida, após a realização do ensaio. Nas Figura 5.16*c* e *d* têm-se as características pós-ruptura dos espécimes das ligações, após a desmontagem dos corpos de prova.

Figura 5.16 – Detalhes do ensaio das ligações a 90º.



(a) Detalhe de um corpo de prova 90_CASCOPHEN_1 após o ensaio.

(b) Detalhe de um corpo de prova 90_CASCOREZ_2 após o ensaio.



(c) Peça horizontal da ligação: ruptura por tração perpendicular às fibras (90_CASCOREZ_2).

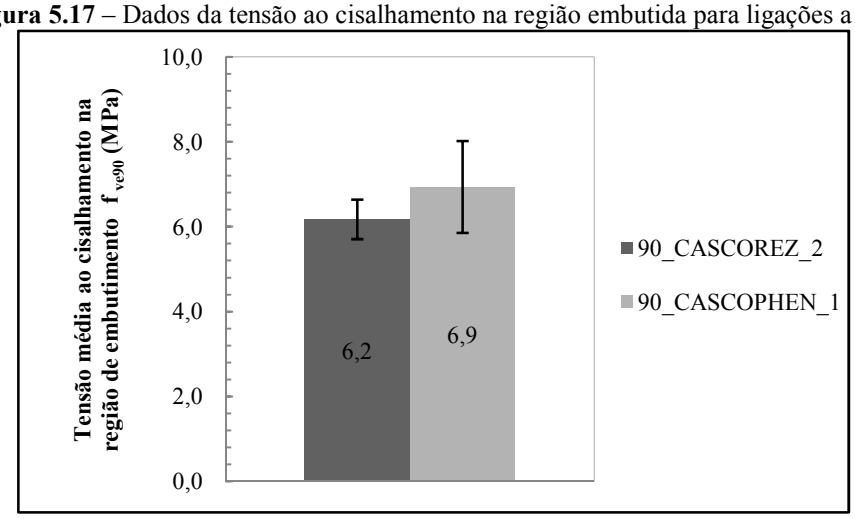
(d) Peça vertical da ligação: ruptura por cisalhamento na região de embutimento (90_CASCOPHEN_1)

Fonte: Autor.

A tensão ao cisalhamento na região embutida apresentou os seguintes valores médios: 6,17 MPa (CV = 6,1%), para o 90_CASCOREZ_2; e 6,93 MPa (CV = 12,6%), para o 90_CASCOPHEN_1.

Na Figura 5.17 apresentam-se os resultados da tensão média ao cisalhamento na região de embutimento, sendo utilizado um intervalo de confiabilidade de 95% para a distribuição t de *Student*. Além disso, como foi observado que o tipo de adesivo utilizado não influencia na resistência das ligações, optou-se por não fabricar e ensaiar as possíveis amostras: 90_CASCOREZ_1 e 90_CASCOPHEN_2.

Figura 5.17 – Dados da tensão ao cisalhamento na região embutida para ligações a 90º.



Fonte: Autor.

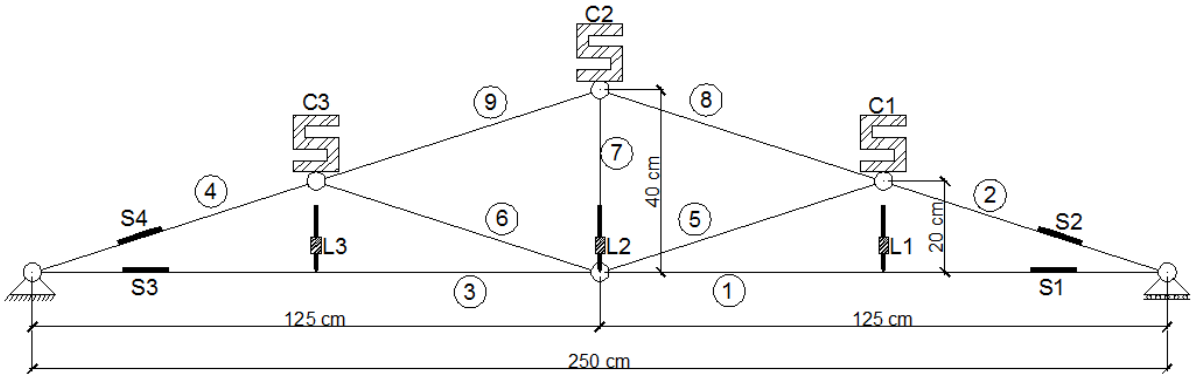
5.3.2 TRELIÇAS PLANAS TIPO HOWE

5.3.2.1 Projeto (Dimensionamento)

Para o dimensionamento das treliças utilizou-se as propriedades mecânicas obtidas por meio dos ensaios previamente realizados, quais sejam: resistência à tração paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e a resistência das ligações de treliças.

A Figura 5.18, idêntica a Figura 4.25 do capítulo anterior (denomina novamente a numeração estabelecida para as barras da treliça), servirá de base para o entendimento do texto que se segue.

Figura 5.18 – Esquema reticulado experimental da treliça ensaiada.



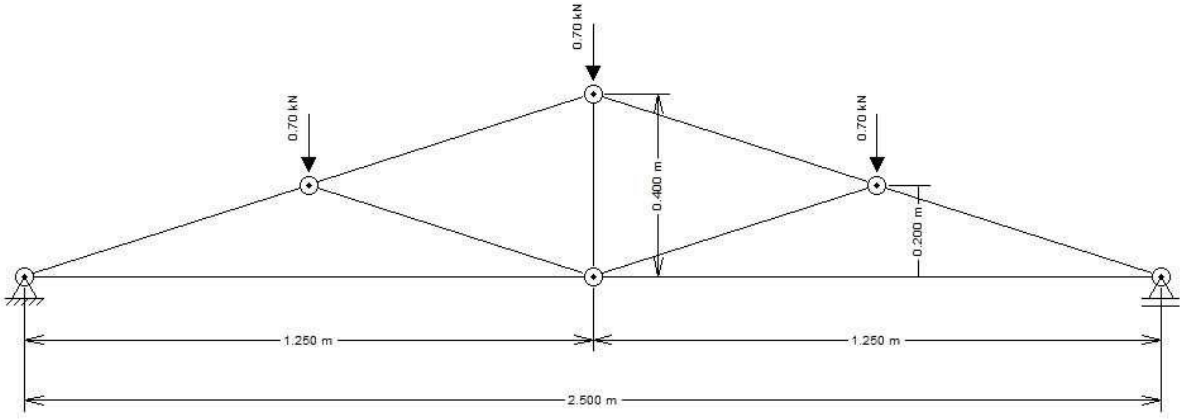
Fonte: Autor.

A carga de projeto em cada um dos 3 (três) nós superiores da treliça é obtida pela combinação última normal das cargas distribuídas em projeção horizontal de: peso próprio da treliça pela fórmula empírica de *Howe* (44,7 N/m^2); peso próprio das terças (45 N/m^2); peso

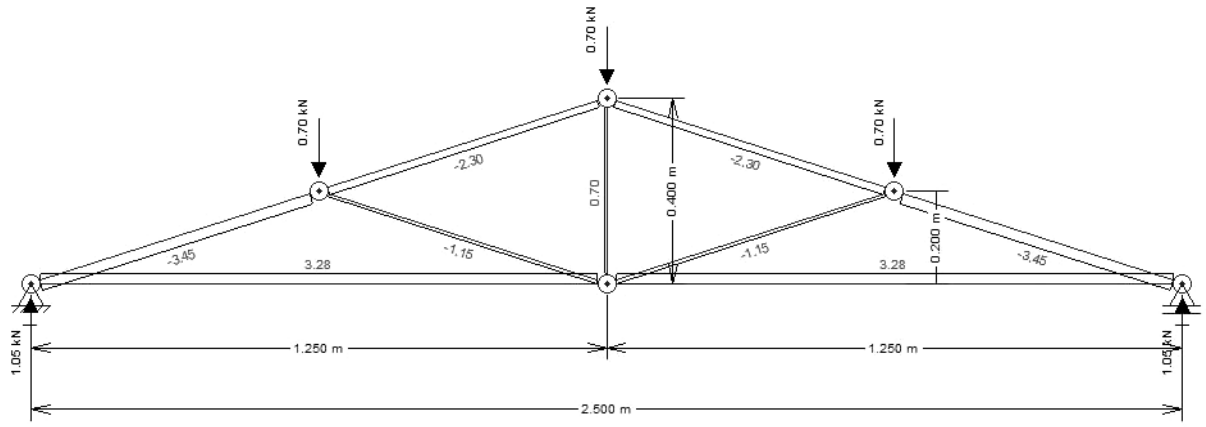
próprio do forro tipo eucatex adicionado de sua estrutura de sustentação (155 N/m^2); vento em sobrepressão, adotado conforme Moliterno (2010) e ABNT NBR 6123 (1988), apesar de não se terem definidos os parâmetros necessários para um cálculo mais elaborado desta ação (66,7 N/m^2); peso próprio das telhas de PVC com perfil cimento-amianto (31,5 N/m^2); e, peso próprio dos elementos metálicos das ligações (6,3 N/m^2). A carga distribuída de projeto resultante da combinação última normal é igual a 465,5 N/m^2. Sendo a distância entre treliças no telhado igual a 1,8 m e a distribuição das cargas realizada em 3 (três) nós, a carga de projeto em cada um dos 3 (três) nós superiores da treliça resulta igual a 0,70 kN, conforme Figura 5.19a. Na Figura 5.19b têm-se os esforços de projeto nos elementos da treliça. Desta forma, as barras 1 (3,28 kN), 3 (3,28 kN) e 7 (0,70kN) foram solicitadas à tração, enquanto que as barras 2 (- 3,45 kN), 4 (- 3,45 kN), 5 (- 1,15 kN), 6 (- 1,15 kN), 8 (- 2,30 kN) e 9 (- 2,30 kN) ficam solicitadas à compressão.

O memorial de cálculo do dimensionamento de todos os elementos componentes (barras comprimidas, barras tracionadas e ligações) das 4 (quatro) treliças ensaiadas está apresentado no Apêndice B. O dimensionamento foi realizado seguindo, de maneira geral, os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 7190 (1997) e ABNT NBR 8800 (2008); e os cálculos foram efetuados com o auxílio do *software Mathcad* 14.0.

Figura 5.19 – Modelagem da treliça no *software Ftool* versão 3.00.



(a) Esquema da treliça com cargas de projeto.



(b) Esforços normais na treliça para a carga de projeto.

Fonte: Autor.

5.3.2.2 Análise experimental-numérica

Para efeito de comparação realizou-se uma na análise numérica das treliças, na qual, admite-se comportamento linear físico e geométrico, ou seja, há proporcionalidade entre o carregamento aplicado e os deslocamentos imediatos. Desta forma, realizou-se a análise no campo dos pequenos deslocamentos, assim, a posição dos elementos da estrutura antes e após o carregamento é similar (linearidade geométrica), não gerando efeitos de segundo ordem que incrementem os esforços e deslocamentos finais. Adicionalmente, o comportamento do bambu é elástico linear à tração paralela às fibras, e é elástico linear até próximo da carga de ruptura (quando se inicia o fenômeno de flambagem) à compressão paralela às fibras; portanto, admite-se também a linearidade física devido ao comportamento tensão x deformação do material (BLC) ser linear.

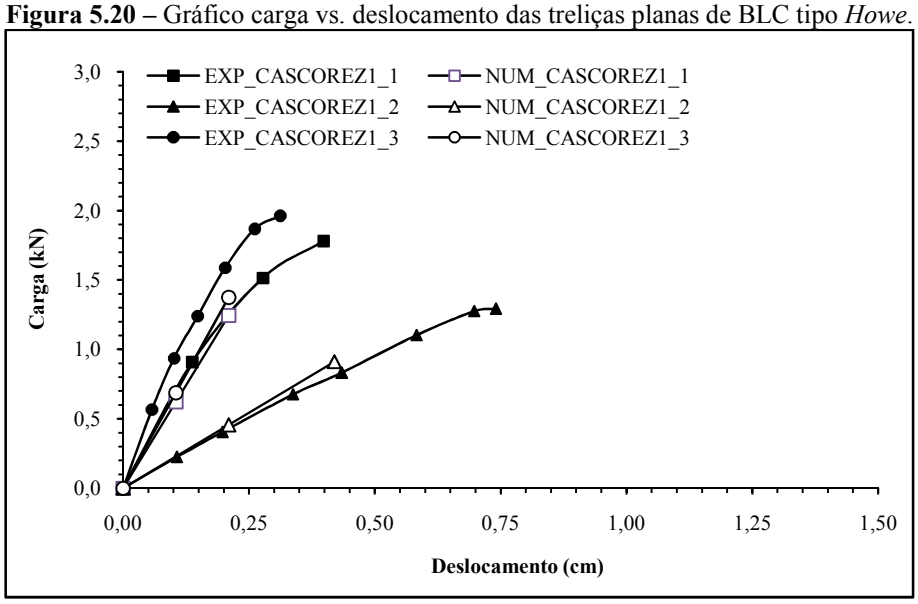
Utilizou-se, para análise numérica, uma carga igual a 70% da carga de ruptura das treliças; até onde se tem, aproximadamente, comportamento elástico linear nas curvas tensão x deformação do BLC em compressão paralela às fibras (Figura 5.7).

A modelagem das treliças foi realizada no *software Ftool* versão 3.00, devido a este ser uma ferramenta simples, unindo em uma única interface, recursos para uma eficiente criação e manipulação do modelo (pré-processamento), além de rápida visualização dos resultados (pós-processamento). A modelagem numérica foi realizada em concordância com os ensaios experimentais, ou seja, obtiveram-se os dados de deslocamentos provenientes da análise numérica a partir das cargas aplicadas no ensaio. Assim, utilizou-se um modelo bidimensional com: elementos de barra e cargas aplicadas no plano da estrutura. Adicionalmente, a simulação numérica foi realizada segundo uma análise elástica linear para

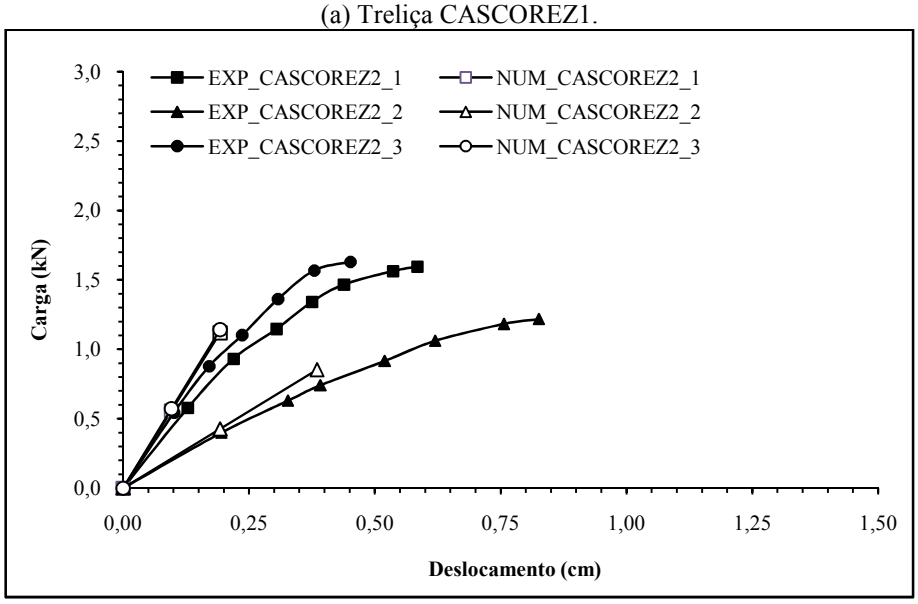
carregamentos de projeto aplicados, pois a estrutura conserva um comportamento linear em condições de serviço.

Na Figura 5.20 mostram-se os gráficos carga vs. deslocamento das 4 (quatro) treliças ensaiadas, conforme a seguinte denominação: EXP_CASCOREZ1, NUM_CASCOREZ1, EXP_CASCOREZ2, NUM_CASCOREZ2, EXP_CASCOPHEN1, NUM_CASCOPHEN1, EXP_CASCOPHEN2 e NUM_CASCOPHEN2. O prefixo "EXP" designa os dados experimentais e o "NUM" indica o resultados numéricos. Além disso, o número seguinte indicará a que célula de carga/LVDT refere-se, por exemplo, EXP_CASCOPHEN1_3: curva carga vs. deslocamento experimental referente à célula de carga/LVDT número 3 (três) (Figura 5.18) da treliça de BLC à base de adesivo CASCOPHEN número 1 (um).

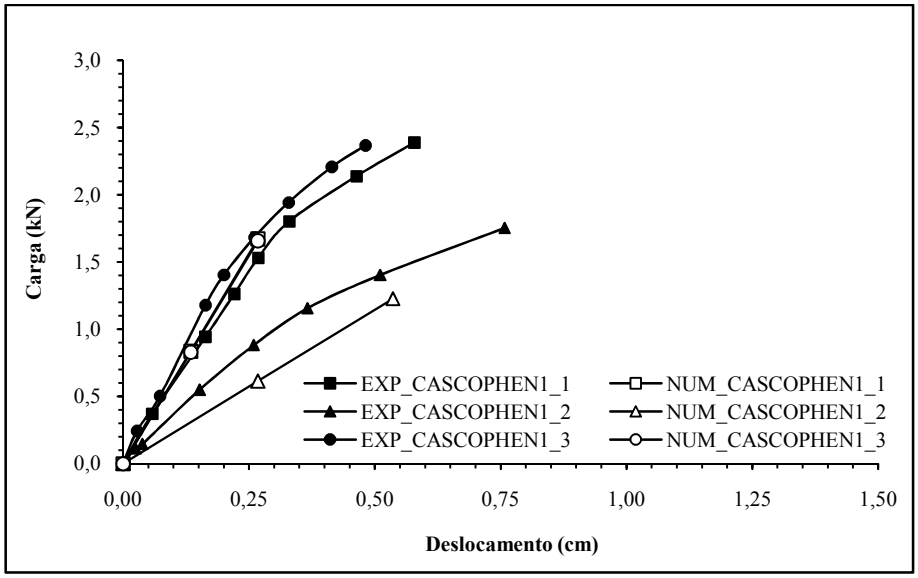
Figura 5.20 – Gráfico carga vs. deslocamento das treliças planas de BLC tipo *Howe*.



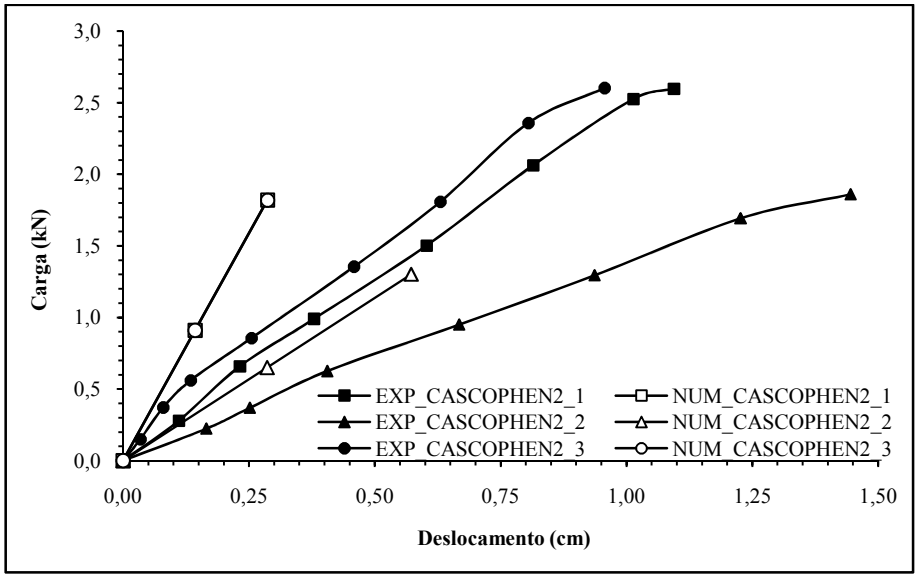
(a) Treliça CASCOREZ1.



(b) Treliça CASCOREZ2.



(c) Treliça CASCOPHEN1.



(d) Treliça CASCOPHEN2.

Fonte: Autor.

Analisando as curvas carga x deslocamento (Figura 5.20) vê-se, claramente, que as treliças a base BLC fabricado com adesivo CASCOPHEN apresentaram capacidade de carga maior do que as fabricadas utilizando-se adesivo CASCOREZ.

As curvas da Figura 5.20 apresentam, de forma geral, o mesmo comportamento. Percebe-se que em todos gráficos, a carga C2 (no meio do vão da treliça) apresenta valores abaixo das demais (C1 e C3); além disso, os deslocamentos L2 (meio do vão) têm valores mais pronunciados. As cargas de ruptura C2, em relação às médias das cargas de ruptura C1 e C3, correspondem a: 69,5%, 75,5%, 73,5% e 71,5% para as treliças CASCOREZ1, CASCOREZ2, CASCOPHEN1 e CASCOPHEN2, respectivamente. No entanto, tal disparidade entre as cargas não prejudicou os ensaios, pois ainda assim obteve-se simetria de

carregamento e de geometria, já que as cargas extremas (C1 e C3) mantiveram-se praticamente iguais.

Na Tabela 5.2 expõem-se as cargas de ruptura correspondentes às 4 (quatro) treliças ensaiadas e o percentual de superioridade da capacidade de carga destas quando comparadas a carga total (2,1 kN) de projeto.

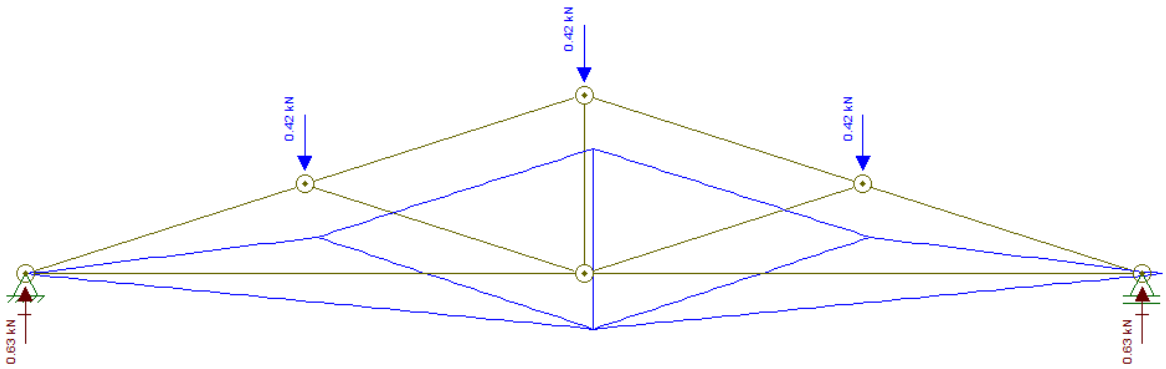
Tabela 5.2 – Cargas de ruptura das treliças ensaiadas.

Treliça	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	Comparação
PROJETO	0,70	0,70	0,70	-
CASCOREZ 1	1,78	1,30	1,96	140%
CASCOREZ 2	1,60	1,22	1,63	110%
CASCOPHEN 1	2,39	1,75	2,37	210%
CASCOPHEN 2	2,60	1,86	2,60	240%

Fonte: Autor.

Os deslocamentos experimentais máximos verticais no meio do vão das treliças foram iguais a: 7,41 mm, 8,26 mm, 7,58 mm e 14,45 mm para as treliças CASCOREZ1, CASCOREZ2, CASCOPHEN1 e CASCOPHEN2, respectivamente. No entanto, para se poder comparar os deslocamentos máximos nas treliças ao limite estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997) tem-se que utilizar o deslocamento das treliças na condição de serviço. A carga de serviço aplicada em cada um dos três nós superiores da treliça é igual a 0,42 kN, para este carregamento obtiveram-se os seguintes deslocamentos experimentais máximos nas treliças: 2,15 mm, 2,15 mm, 1,39 mm e 2,82 mm para as treliças CASCOREZ1, CASCOREZ2, CASCOPHEN1 e CASCOPHEN2, respectivamente. Tais valores estão bem abaixo do limite estabelecido pela ANBT NBR 7190 (1997), que igual a 12,5 mm (1/200 do vão). Na Figura 5.21 mostra-se a deformada da treliça para o carregamento de serviço, a qual foi obtida no *Ftool* segundo um fator de deformação igual a 70.

Figura 5.21 – Deformada da treliça para condições de serviço.



Fonte: Autor.

Na Tabela 5.3 mostram-se os dados de deslocamentos experimentais e numéricos a uma carga de 70% da de ruptura.

Tabela 5.3 – Valores de deslocamentos máximos nas treliças a 70% da carga de ruptura.

	CASCOREZ1			CASCOREZ2			CASCOPHEN1			CASCOPHEN2		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
EXP (mm)	1,98	4,55	1,63	2,87	4,71	2,40	2,89	3,94	2,48	7,24	9,36	6,14
NUM (mm)	2,10	4,20	2,10	1,93	3,85	1,93	2,68	5,36	2,68	2,86	5,72	2,86

Fonte: Autor.

A exceção da treliça CASCOPHEN2, os dados experimentais de deslocamento se aproximam dos valores numéricos, principalmente para uma carga próxima a de projeto. Acredita-se que os deslocamentos excessivos da treliça CASCOPHEN2 sejam provenientes da não-linearidade de contato da treliça, que está relacionada com as alterações nas condições de vinculações das barras, como escorregamento das barras devido a alguma folga na região de ligação (nó).

5.3.2.3 Análise experimental-teórica

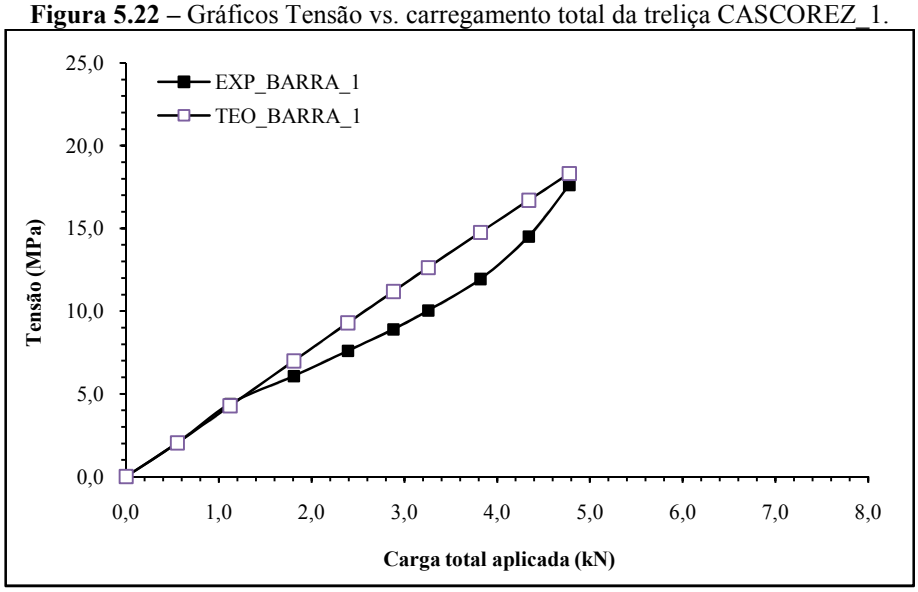
A partir das leituras de deformação dos extensômetros que foram instalados nas barras 1, 2, 3 e 4 da treliça, obteve-se os resultados de tensão nestas barras. Estes valores de tensão foram calculados pela lei de Hooke utilizando-se o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, mesmo para as barras tracionadas, devido à similaridade entre os módulos de elasticidade à tração e à compressão paralela às fibras.

Para efeito de comparação, calcularam-se as tensões teóricas atuantes nas barras das treliças. Estes valores de tensão foram calculados a partir das forças nas barras (obtidas pelo método dos nós, já que a treliça é isostática) e das áreas das seções transversais.

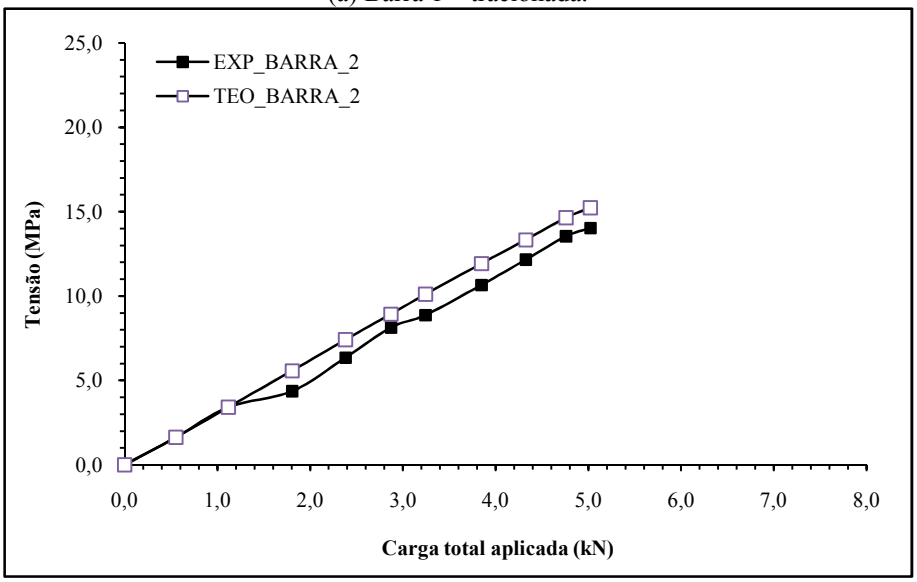
Com base em Calil, Marin e Palma (2004) e em Fernández (2010), construíram-se os gráficos das tensões atuantes nas barras vs. carregamento total aplicado (Figura 5.22, Figura 5.25, Figura 5.27 e Figura 5.28). As tensões foram obtidas experimentalmente (extensômetros instalados) e teoricamente (método dos nós); assim, nestes gráficos, os prefixos NUM e TEO significam numérico e teórico, respectivamente. O carregamento total aplicado resulta das somas dos valores das três cargas aplicadas à treliça durante o ensaio.

Na Figura 5.22 expõe-se a curvas Tensão vs. carregamento total das barras 1, 2, 3 e 4 para a treliça CASCOREZ_1.

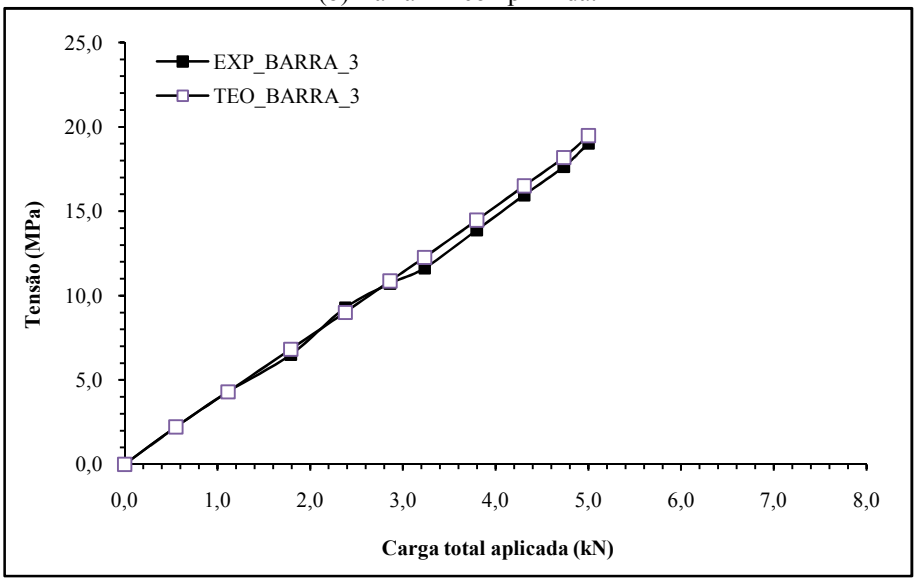
Figura 5.22 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOREZ_1.



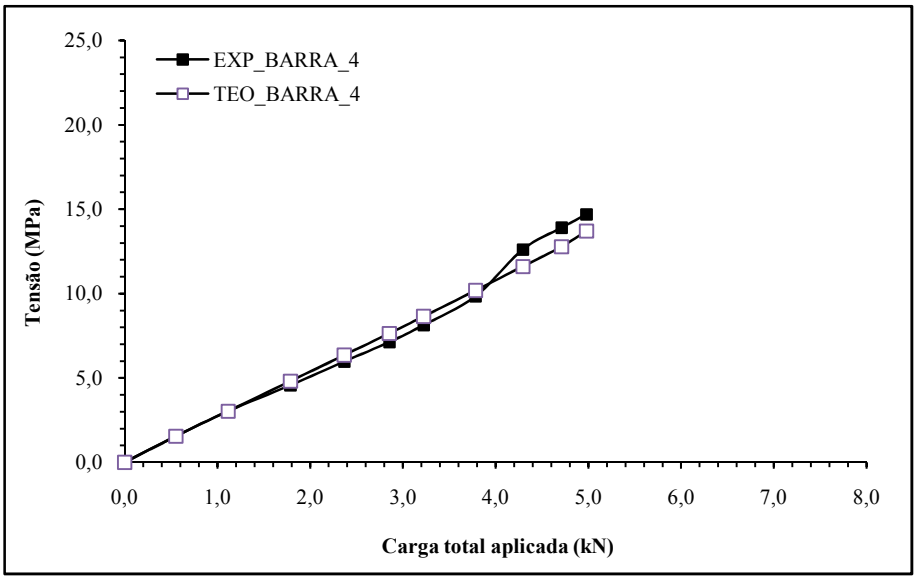
(a) Barra 1 – tracionada.



(b) Barra 2 – comprimida.



(c) Barra 3 – tracionada.



(d) Barra 4 – comprimida.
Fonte: Autor.

Para a treliça CASCOREZ_1, observa-se que os dados de tensões nas barras versus carregamentos totais aplicados, nas análises teórica e experimental das barras 2, 3 e 4, estão próximos.

As tensões normais máximas de tração teórica e experimental obtidas foram iguais a 19,47 MPa e 19,02 MPa, respectivamente, ambas para barra 3; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à tração paralela às fibras na região nodal do bambu igual a 26,19 MPa (conforme, Apêndice B – Memorial de cálculo das treliças).

As tensões normais máximas de compressão teórica e experimental obtidas foram iguais a 15,23 MPa (barra 2) e 14,70 MPa (barra 4), respectivamente; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras do BLC (fabricado com adesivo CASCOREZ) igual a 43,45 MPa (conforme, Apêndice B – Memorial de cálculo das treliças).

Na verdade, o critério determinante na ruptura de todas as treliças foi a flambagem; uma vez que foi necessária a construção de treliças econômicas, com seções transversais reduzidas, para economizar o material de estudo (bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*). Portanto, para realização do ensaio das treliças foram empregadas contenções laterais no comprimento médio das barras comprimidas (Figura 5.23), de forma a reduzir o índice de esbeltez das barras da treliça. Os índices de esbeltezas máximos das barras comprimidas das treliças foram iguais a: 107 para as barras 2, 4, 8 e 9; e, 136 para as barras 5 e 6. Portanto, todas as barras comprimidas da treliça ensaiada são classificadas como esbeltas (índice de esbeltez maior do que 80) pelos critérios da ABNT NBR 7190 (1997);

adicionalmente, as barras 5 e 6 têm índice de esbeltez muito próximo ao limite de 140 estabelecido pela norma supracitada.

Figura 5.23 – Detalhe da contenção lateral na treliça ensaiada.

Fonte: Autor.

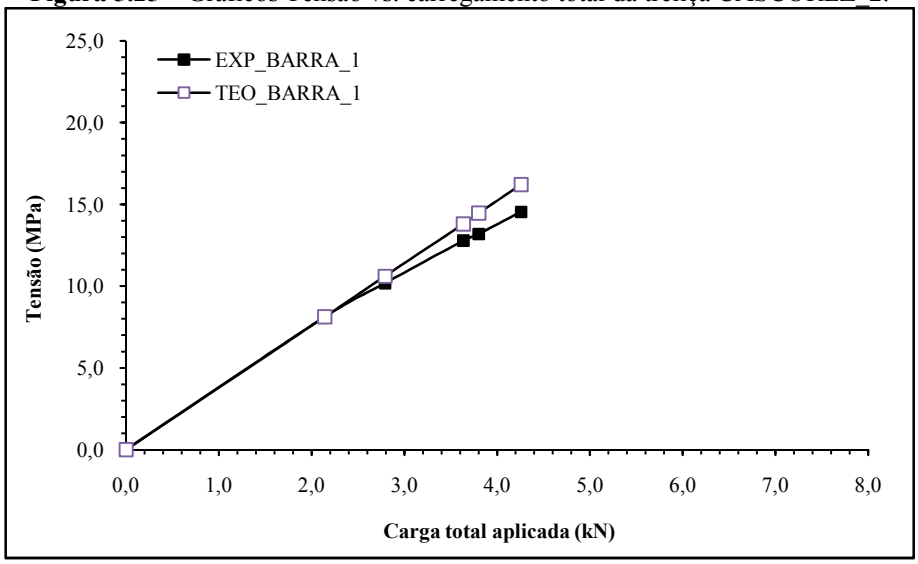
A treliça CASCOREZ1 rompeu por flambagem na barra 2, conforme Figura 5.24.

Figura 5.24 – Vista superior da ruptura por flambagem da treliça CASCOREZ_1.

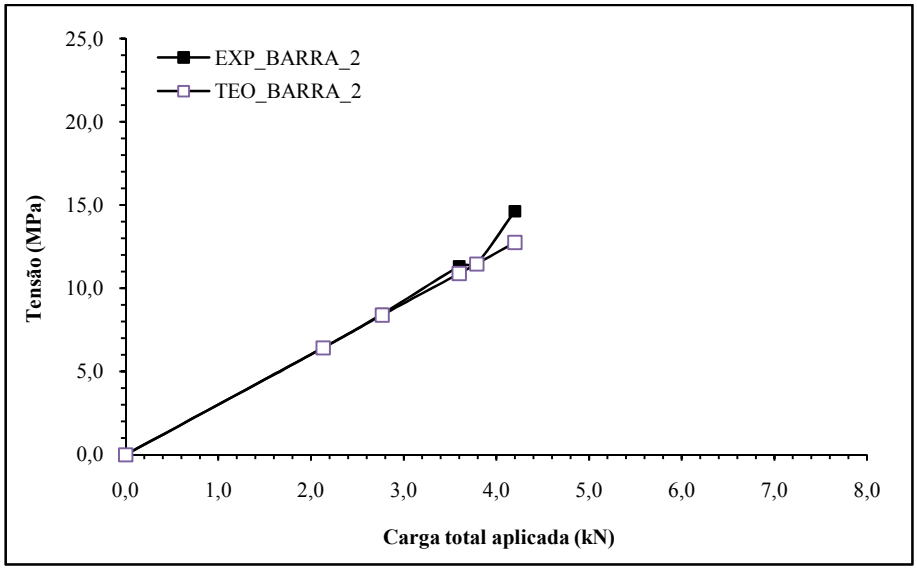
Fonte: Autor.

Nas Figura 5.25 tem-se a curvas Tensão vs. carregamento total das barras 1, 2, 3 e 4 para a treliça CASCOREZ_2.

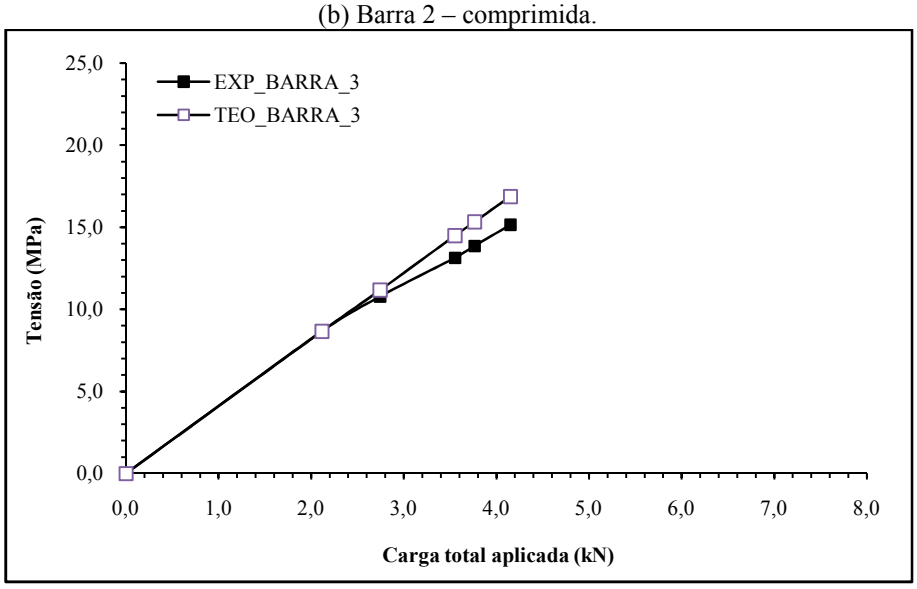
Figura 5.25 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOREZ_2.



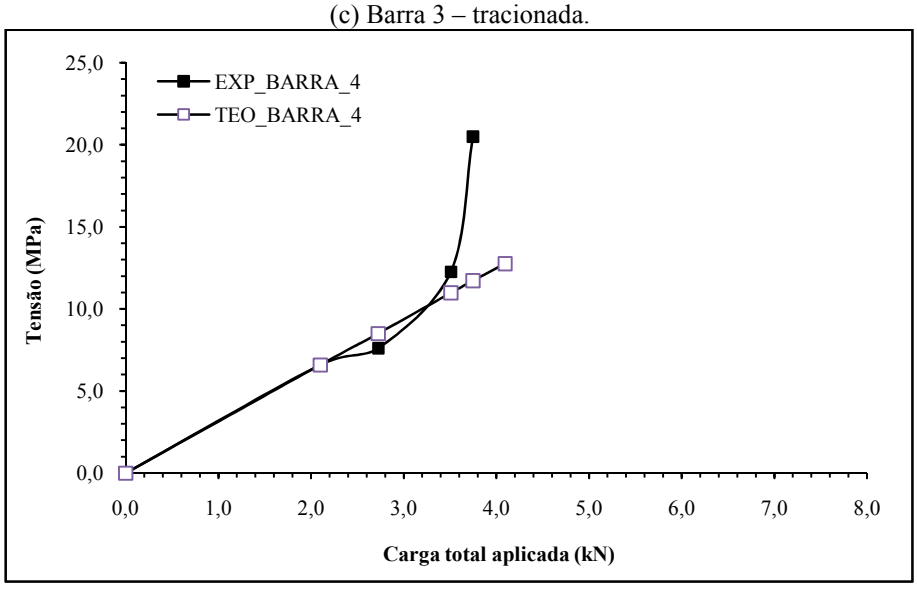
(a) Barra 1 – tracionada.



(b) Barra 2 – comprimida.



(c) Barra 3 – tracionada.



(d) Barra 4 – comprimida.
Fonte: Autor.

Para a treliça CASCOREZ_2, observa-se que as relações entre os carregamentos totais aplicados e as tensões normais, quando comparadas as análises teórica e experimental das barras 1, 2 e 3, apresentam bom comportamento. Para a barra 4 houve relevantes discrepâncias entre as tensões teóricas e experimentais, provavelmente pelo acréscimo de deformação devido à flexão proveniente da flambagem, neste caso especificamente.

As tensões normais máximas de tração teórica e experimental obtidas foram iguais a 16,85 MPa e 15,14 MPa, respectivamente, ambas para barra 3; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à tração paralela às fibras na região nodal do bambu igual a 26,19 MPa.

As tensões normais máximas de compressão teórica e experimental obtidas foram iguais a 12,74 MPa (barra 2) e 20,49 MPa (barra 4), respectivamente; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras do BLC (fabricado com adesivo CASCOREZ) igual a 43,45 MPa.

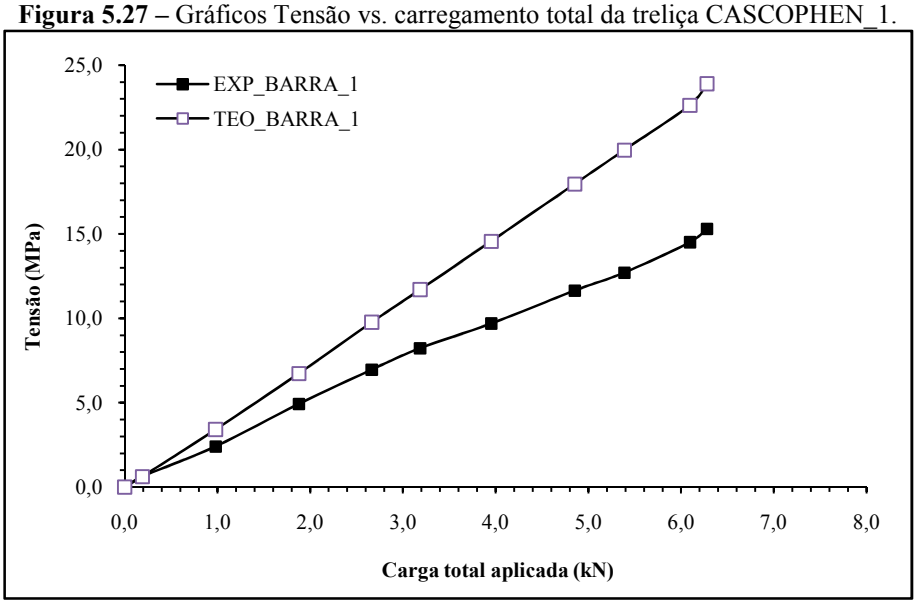
Mais uma vez, observou-se o modo de ruptura por flambagem, neste caso, para treliça CASCOREZ_2, conforme Figura 5.26. Para esta treliça a ruptura ocorreu na barra 4.

Figura 5.26 – Vista superior da ruptura por flambagem da treliça CASCOREZ_2.

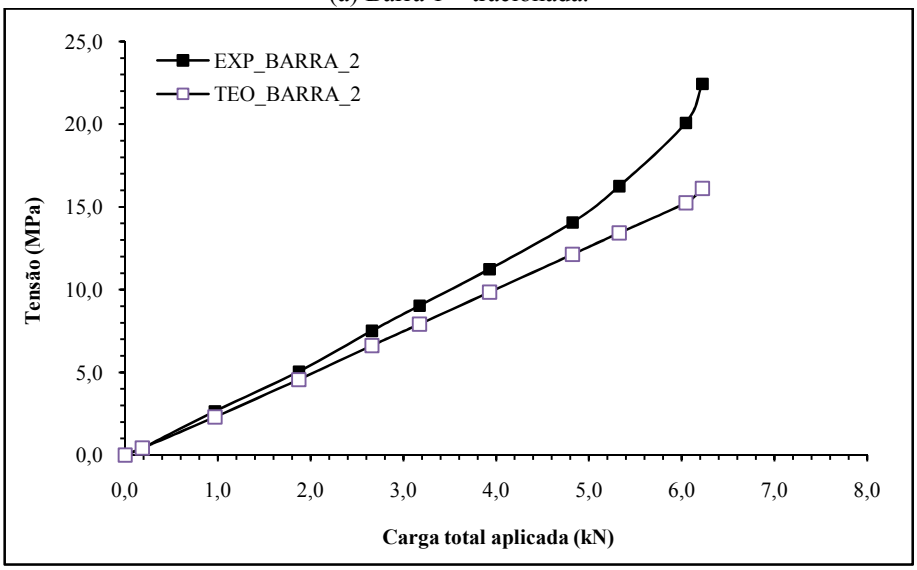
Fonte: Autor.

Nas Figura 5.27 tem-se a curvas Tensão vs. carregamento total das barras 1, 2, 3 e 4 para a treliça CASCOPHEN_1.

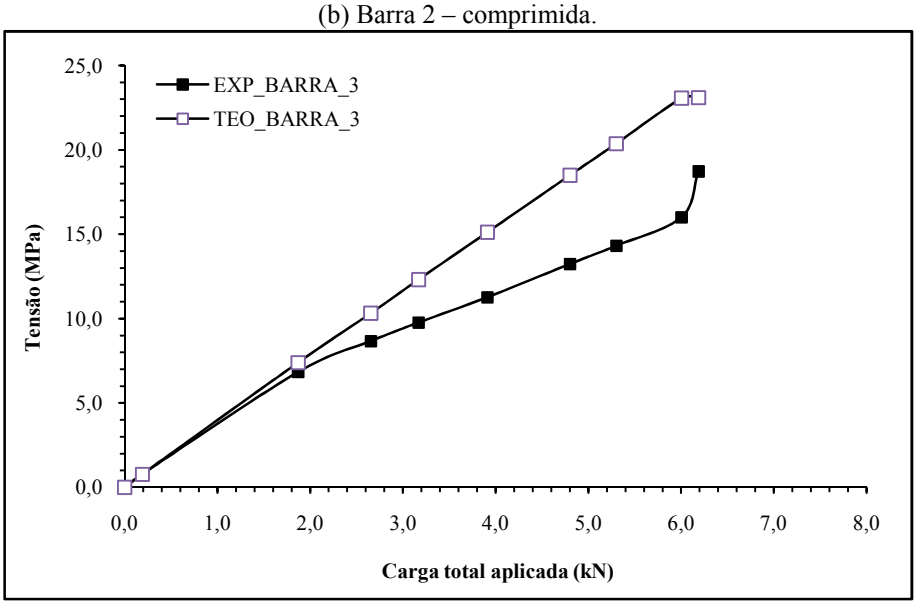
Figura 5.27 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOPHEN_1.



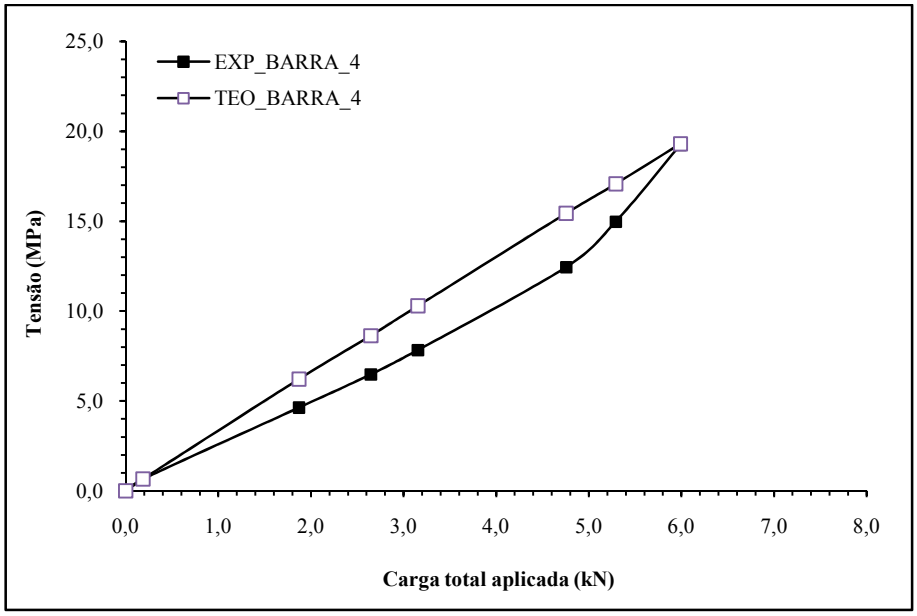
(a) Barra 1 – tracionada.



(b) Barra 2 – comprimida.



(c) Barra 3 – tracionada.



(d) Barra 4 – comprimida.

Fonte: Autor.

Para a treliça CASCOPHEN_1, percebe-se os dados experimentais de tensão das barras 1, 3 e 4 apresentaram valores abaixo das tensões teóricas nessas barras. Enquanto que para a barra 2, a qual não sofreu flambagem, os valores de tensões experimentais mostraram-se superiores aos teóricos.

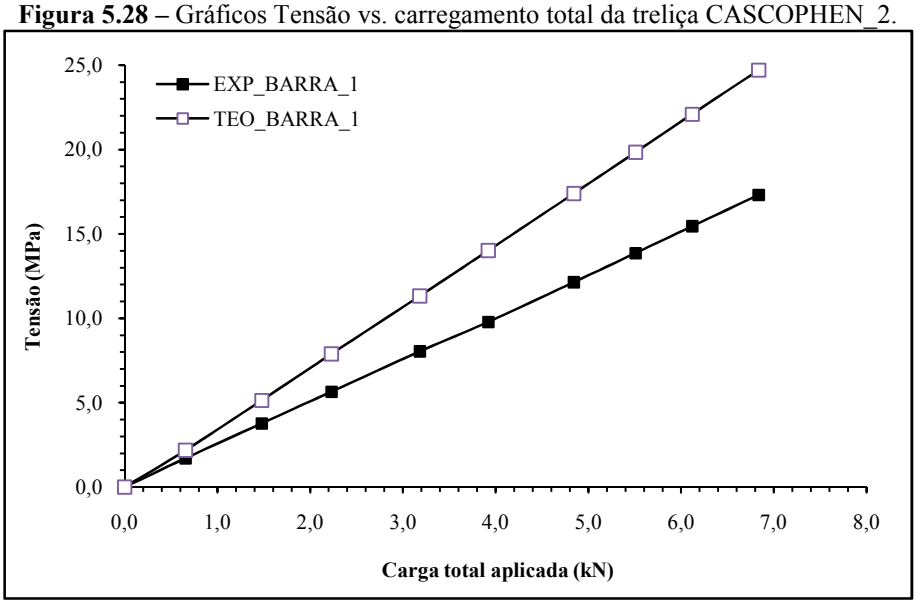
As tensões normais máximas de tração teórica e experimental obtidas foram iguais a 23,89 MPa (barra 1) e 18,71 MPa (barra 3), respectivamente; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à tração paralela às fibras na região nodal do bambu igual a 26,19 MPa.

As tensões normais máximas de compressão teórica e experimental obtidas foram iguais a 19,30 MPa (barra 4) e 22,46 MPa (barra 2), respectivamente, para barra 4; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras do BLC (fabricado com adesivo CASCOPHEN) igual a 41,02 MPa.

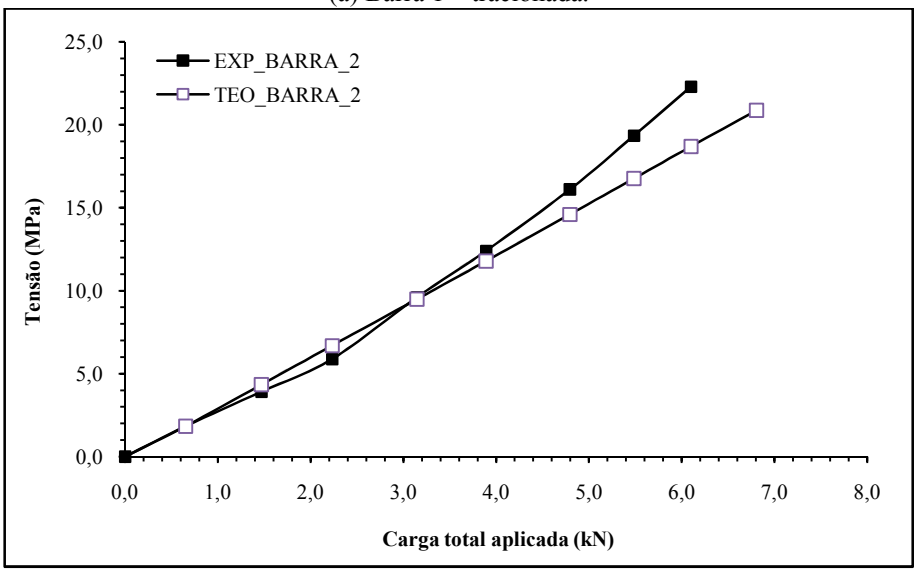
A treliça CASCOPHEN1 rompeu por flambagem na barra 4.

Nas Figura 5.28 tem-se a curvas Tensão vs. carregamento total das barras 1, 2, 3 e 4 para a treliça CASCOPHEN_2.

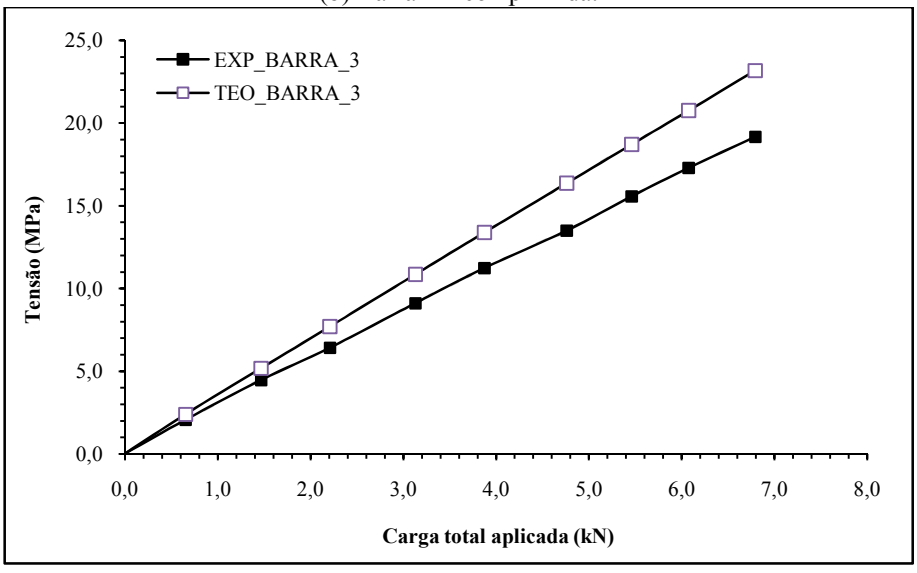
Figura 5.28 – Gráficos Tensão vs. carregamento total da treliça CASCOPHEN_2.



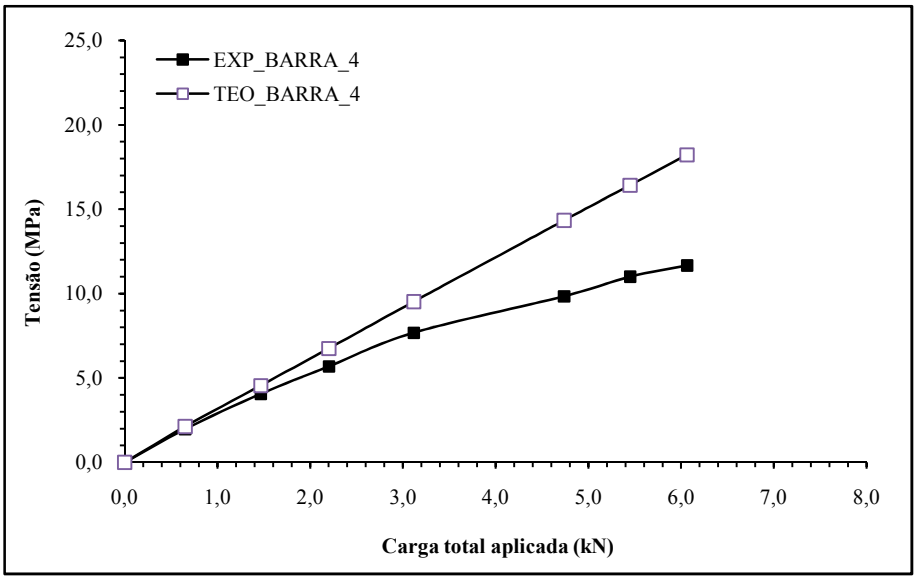
(a) Barra 1 – tracionada.



(b) Barra 2 – comprimida.



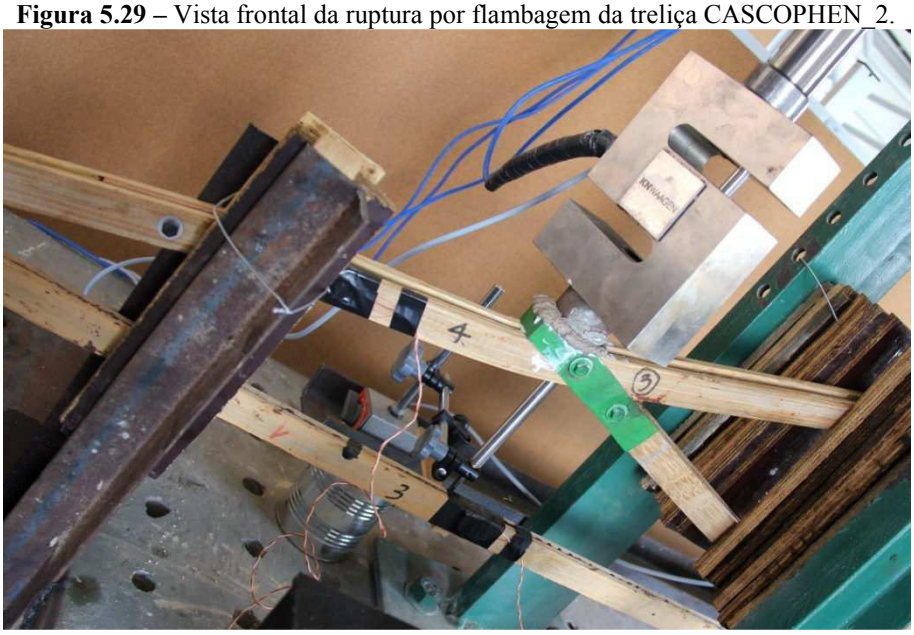
(c) Barra 3 – tracionada.



(d) Barra 4 – comprimida.
Fonte: Autor.

Para a treliça CASCOPHEN_2, os dados experimentais de tensão das barras 1 e 3 (tracionadas) apresentaram valores abaixo das tensões teóricas nessas barras. Para barra 4, onde se iniciou a ruptura por flambagem (Figura 5.29), tem-se valores de tensão experimental abaixo dos valores de tensão numérica. Em seguida, após a flambagem da barra 4, observou-se a flambagem da barra 2. Desta forma, para a treliça CASCOPHEN_2, houve ruptura por flambagem nas barras 2 e 4.

Figura 5.29 – Vista frontal da ruptura por flambagem da treliça CASCOPHEN_2.



Fonte: Autor.

As tensões normais máximas de tração teórica e experimental obtidas foram iguais a 24,71 MPa (barra 1) e 19,18 MPa (barra 3), respectivamente; tais valores, mesmo sob

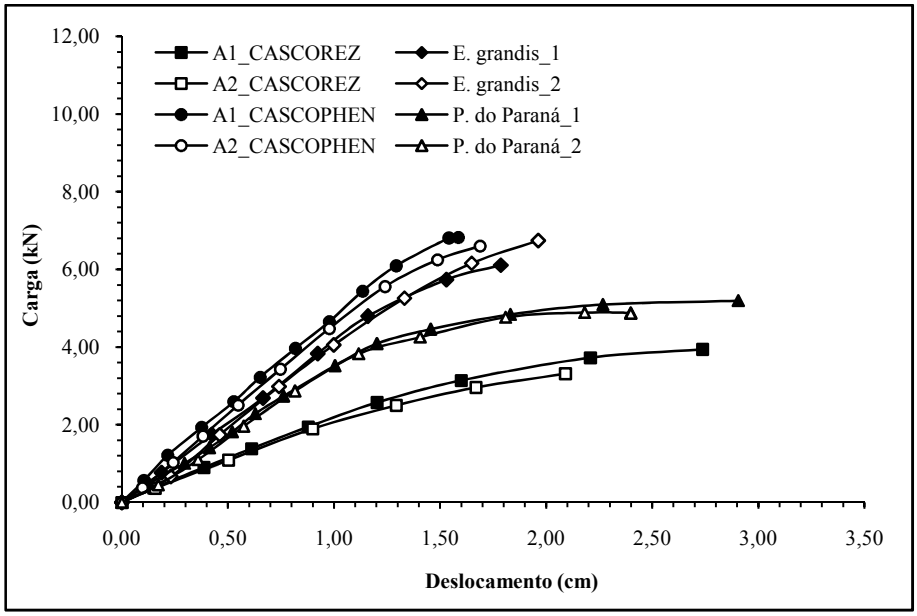
condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à tração paralela às fibras na região nodal do bambu igual a 26,19 MPa.

As tensões normais máximas de compressão teórica e experimental obtidas foram iguais a 18,68 MPa e 22,30 MPa, respectivamente, ambas para barra 2; tais valores, mesmo sob condições da capacidade resistente máxima, apresentaram-se inferiores a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras do BLC (fabricado com adesivo CASCOPHEN) igual a 41,02 MPa.

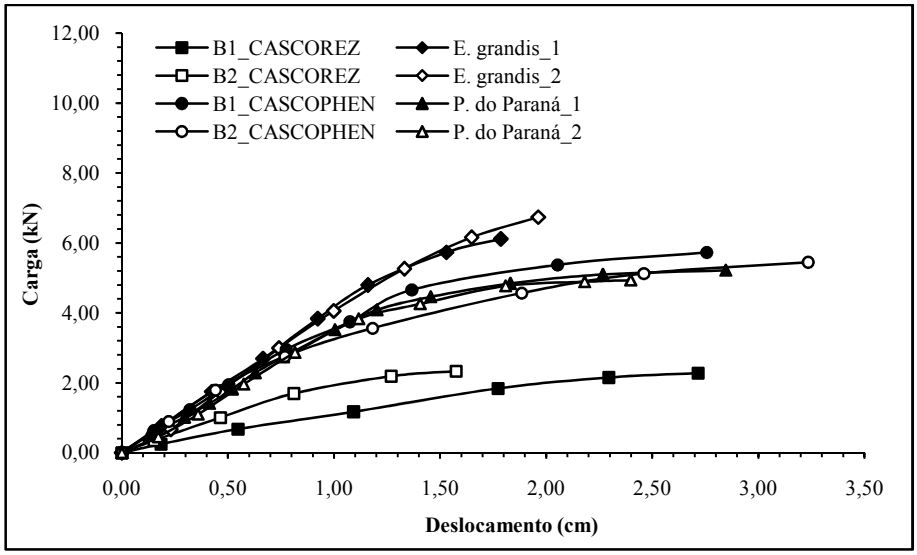
5.3.3 VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR

Nos ensaios de flexão das vigas de BLC verificou-se que a metodologia de ensaio e leituras de dados mostrou-se adequada. Para análise das vigas ensaiadas construiu-se gráficos carga vs. deslocamento central (Figura 5.30); nos quais a carga é a média das duas cargas aplicadas e o deslocamento central é o deslocamento mensurado no meio do vão pelo LVDT. Observou-se um comportamento praticamente linear até próximo da carga de ruptura para todas as vigas ensaiadas, tanto para as vigas de BLC (à base dos adesivos CASCOREZ e CASCOPHEN) quanto para as vigas de madeira (*Eucalyptus grandis* e *Araucaria angustifolia* - Pinho do Paraná).

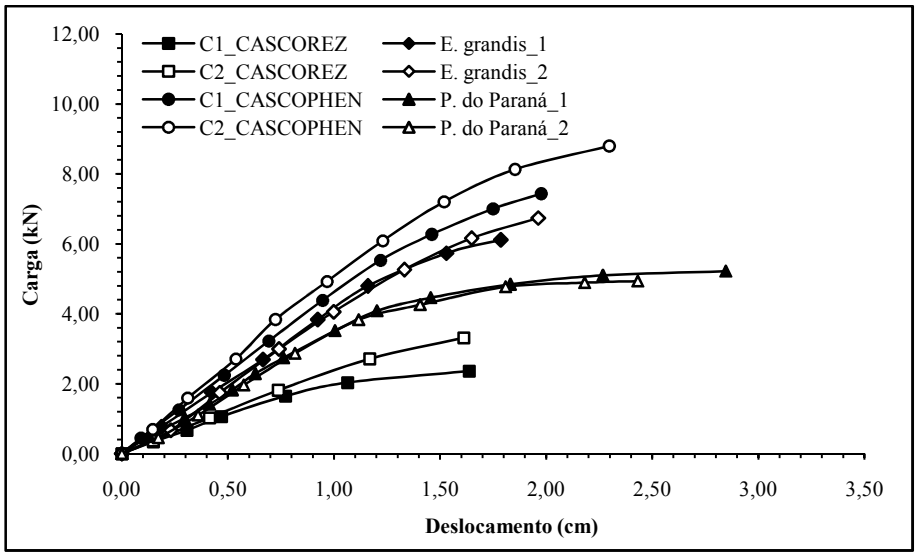
Figura 5.30 – Curvas carga x deslocamento para vigas de BLC e das madeiras *Eucalyptus grandis* e Pinho do Paraná.



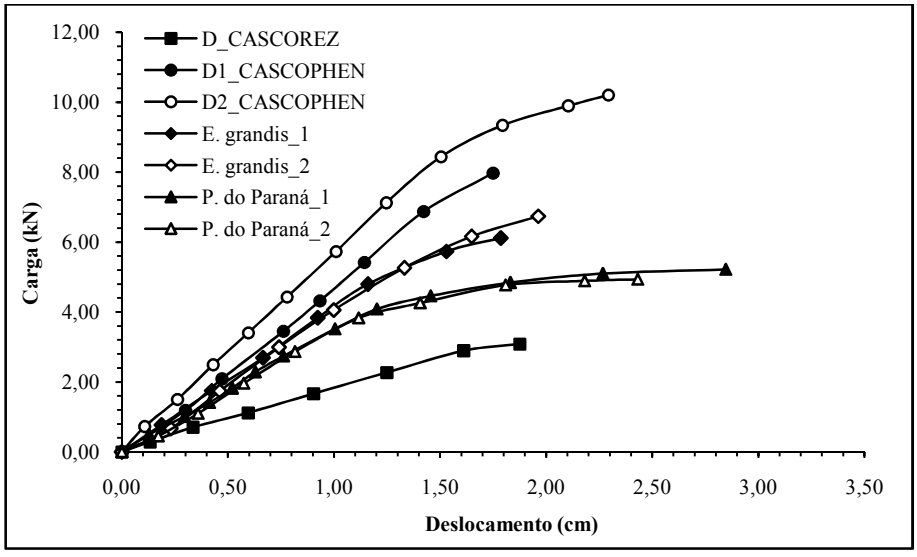
(a) Vigas tipo “A”.



(b) Vigas tipo "B".



(c) Vigas tipo "C".

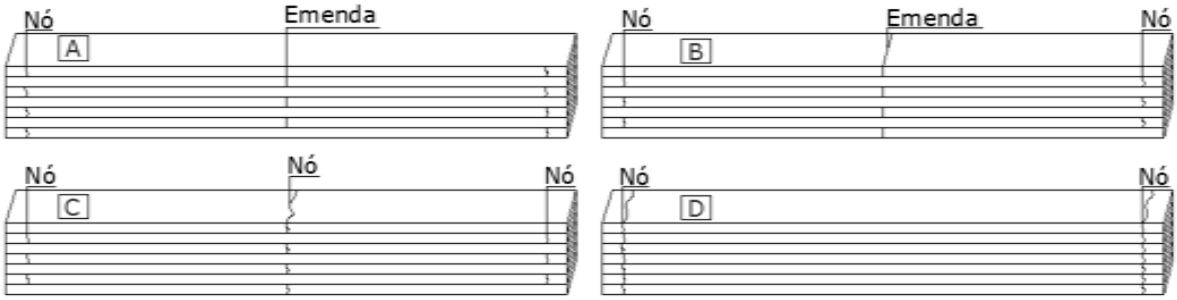


(d) Vigas tipo "D".

Fonte: Autor.

A seguir discute-se o modo de ruptura das vigas ensaiadas. Desta forma, lembra-se que a numeração das 7 (sete) ripas que compõem as vigas de BLC foi adotada de cima para baixo, ou seja, a 1ª (primeira) encontra-se na região mais comprimida e a 7ª (sétima) na região mais tracionada. Além disso, mostra-se novamente a configuração das vigas utilizadas no ensaio, de acordo com a disposição das ripas nas vigas, conforme Figura 5.31.

Figura 5.31 – Disposição das ripas e dos nós nas vigas de BLC, tipos: A, B, C e D.



Fonte: Autor.

As cargas de ruptura das vigas de BLC (A, B, C e D) coladas com adesivo CASCOPHEN apresentaram-se superiores às coladas com adesivo CASCOREZ. Além disso, os modos de ruptura do adesivo CASCOREZ foram causados por fluxo de cisalhamento no plano de colagem, para todas as vigas deste adesivo; assim, o adesivo CASCOPHEN apresentou-se mais adequado para uso estrutural que o adesivo CASCOREZ.

As vigas tipo "B" com emendas centrais nas ripas externas (1ª e 7ª) e nas intercaladas (3ª e 5ª) apresentaram as menores cargas de ruptura e menor rigidez à flexão, em função da diminuição da inércia, nesta região. Nestas ocorreu inicialmente o desprendimento das lâminas externas e, com o aumento das cargas, a ruptura se deu: por tração na 6ª ripa para as vigas CASCOPHEN; e, for fluxo de cisalhamento para as vigas CASCOREZ.

As vigas tipo A_CASCOREZ apresentaram rigidez (inclinação da reta secante aos pontos a 10% e 50% da carga última no gráfico carga vs. deslocamento) superior às vigas tipo C_CASCOREZ que, por sua vez, são mais rígidas de as vigas tipo D_CASCOREZ. Em termos de capacidade de carga, estas são ordenadas da maior para menor: A_CASCOREZ, D_CASCOREZ e C_CASCOREZ.

As vigas tipo A_CASCOPHEN apresentaram rigidez e capacidade carga superiores às vigas tipo B_CASCOPHEN, porém inferior às vigas tipo C_CASCOREZ. As vigas tipo D_CASCOPHEN apresentaram os melhores resultados, porém com rupturas por cisalhamento paralelo às fibras, o que limitou a capacidade de carga das vigas, pois não apresentaram ruptura por compressão e/ou tração paralelas às fibras. Tal fato indica que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu é um fator limitador a capacidade resistente das vigas.

As vigas de madeira natural de Pinho do Paraná apresentaram rigidezes e cargas de ruptura semelhantes às vigas de BLC tipo B_CASCOPHEN. Em relação às vigas de *Eucalyptus grandis*, estas se mostraram com comportamento aproximado as vigas de BLC tipo A_CASCOPHEN, em termos de rigidez e de cargas de ruptura.

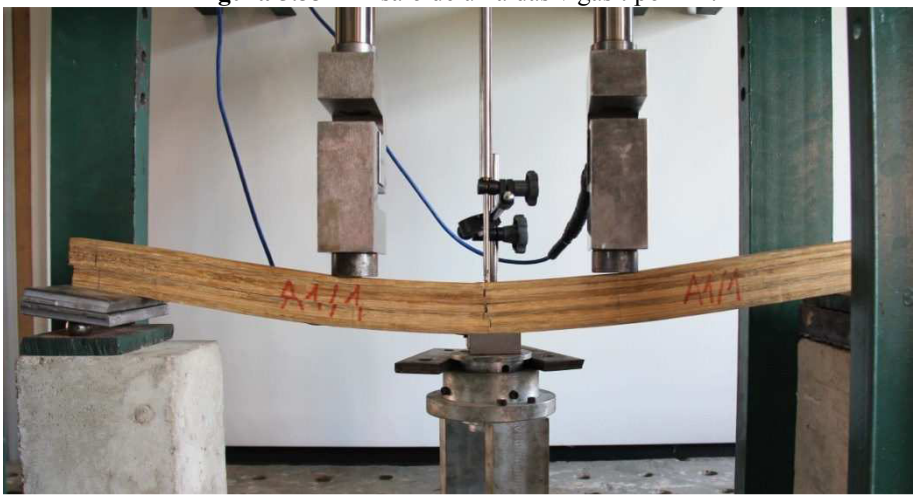
Segundo o modo de ruptura, a viga A1_CASCOREZ apresentou uma tensão normal de compressão máxima igual a 125,82 MPa (Figura 5.32a); salienta-se que as vigas do tipo "A" contribuem com apenas 4 (quatro) ripas, das 7 (sete) que compõem a viga, para o cálculo do momento de inércia em relação a linha neutra do elemento fletido, uma vez que, são realizadas emendas de topo. Para as mesmas condições, a tensão de cisalhamento máxima, entre a 4ª e a 5ª ripas, é igual a 4,19 MPa. Já para a viga A2_CASCOREZ a tensão de cisalhamento máxima, entre a 3ª e a 4ª ripas, é igual a 3,55 MPa (Figura 5.32b). Adicionalmente, a tensão de cisalhamento máxima paralela às fibras do bambu na 5ª ripa da viga A1_CASCOPHEN resultou igual a 6,40 MPa. Na Figura 5.33 mostra uma viga tipo "A" fletida durante o ensaio.

Figura 5.32 – Modos de ruptura das vigas tipo "A".

(a) Compressão da fibra superior. (b) Fluxo de cisalhamento.

Fonte: Autor.

Figura 5.33 – Ensaio de uma das vigas tipo "A".



Fonte: Autor.

As vigas B1_CASCOREZ e B2_CASCOREZ romperam por fluxo de cisalhamento, entre a 3ª e a 4ª ripas, após o descolamento da ripa inferior (Figura 5.34) e apresentaram uma tensão de cisalhamento máxima igual a 2,69 MPa e 2,98 MPa, respectivamente.

Ambas as vigas B_CASCOPHEN romperam por tração na 6ª ripa após o descolamento da ripa inferior com uma tensão normal de tração máxima igual a 200,51 MPa e 187,91 MPa para as vigas B1 e B2, respectivamente.

Uma vez que as vigas tipo B_CASCOPHEN romperam efetivamente por mecanismos de flexão, decidiu-se por calcular os seus módulos de elasticidade à flexão (rigidez à flexão) a partir da inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento nos pontos de 50% e 10% da carga máxima de ensaio, conforme é especificado pela ABNT NBR 7190 (1997). No entanto, como foi realizado um ensaio de flexão de 4 (quatro) pontos, diferentemente da supracitada norma que considera o ensaio de 3 (três) pontos, o módulo de elasticidade a compressão é dado pela Eq.(5.1):

$$E_{M0} = \left(\frac{F_{M,50\%} - F_{M,10\%}}{v_{50\%} - v_{10\%}}\right) \cdot \frac{23L^3}{54bh^3} \tag{5.1}$$

na qual, E_{M0} é o módulo de elasticidade à flexão; $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as cargas referentes à 10% e 50% da carga máxima de ensaio, respectivamente; $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$são os deslocamentos no ponto médio do vão referentes à 10% e 50% da carga máxima; L é o vão entre apoios; b é a base da seção transversal da viga; e h é a altura da seção transversal da peça fletida. Portanto, o módulo de elasticidade à flexão para as vigas B1_CASCOPHEN e B2_CASCOPHEN resultaram iguais a 18,15 GPa e 16,53 GPa, respectivamente.

Figura 5.34 – Modos de ruptura das vigas tipo "B".

(a) Descolamento da ripa inferior. (b) Fluxo de cisalhamento.

Fonte: Autor.

A ruptura das vigas C1_CASCOREZ e C2_CASCOREZ se deram também por fluxo de cisalhamento no adesivo com uma tensão máxima de cisalhamento igual a 2,36 MPa e 3,25 MPa, respectivamente.

Para as vigas C1_CASCOPHEN e C2_CASCOPHEN teve-se uma ruptura por tração na flexão na 7ª ripa com os seguintes valores de tensões normais de tração máximos: 199,27 MPa e 235,74 MPa, respectivamente. Além disso, os módulos de elasticidade à flexão foram iguais a 22,46 GPa e 24,08 GPa para as vigas C1_CASCOPHEN e C2_CASCOPHEN, respectivamente.

A tensão máxima de cisalhamento longitudinal na viga D_CASCOREZ foi de 3,14 MPa. Além disso, observou-se a ruptura de um nó de bambu que se encontrava diretamente abaixo da carga aplicada (Figura 5.35).

Figura 5.35 – Ruptura do nó de bambu da viga D_CASCOREZ.

(a) Vista. (b) Após a abertura da viga.

Fonte: Autor.

Ambas as vigas do tipo "D" fabricadas com adesivo CASCOPHEN tiveram uma ruptura por fluxo de cisalhamento paralelo às fibras do bambu na 5ª ripa; desta forma, as tensões máximas de cisalhamento para ambas as vigas foram de 7,42 MPa e 9,51 MPa, respectivamente, para as vigas D1_CASCOPHEN e D2_CASCOPHEN. Além disso, como este tipo de viga foi o que apresentou em média maior capacidade de carga, devido à ausência de emendas e nós centrais, resolveu-se calcular o módulo de elasticidade à flexão apesar da ruptura não ter sido por mecanismos de flexão. Assim, o módulo de elasticidade à "flexão" aproximado para as vigas D1_CASCOPHEN e D2_CASCOPHEN resultou igual a 22,53 GPa e 26,10 GPa, respectivamente.

Os dois espécimes de vigas de madeira *Eucalyptus grandis* romperam por tração nas fibras inferiores (Figura 5.36) com as seguintes tensões máximas de tração: 121,50 MPa e 134,03 MPa, para as vigas E1 e E2, respectivamente. Além disso, o módulo de elasticidade à flexão resultou igual a 18,81 GPa para viga E1 e 20,75 GPa para a viga E2.

Por fim, as vigas de madeira Pinho do Paraná romperam por tração na flexão (Figura 5.36) apresentando as tensões normais máximas das vigas P1 e P2 iguais a 103,81 MPa e 98,04 MPa, respectivamente. Adicionalmente, o módulo de elasticidade à flexão resultou igual a 16,67 GPa para viga P1 e 18,65 GPa para a viga P2.

Figura 5.36 – Ruptura por tração nas vigas de madeira.

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.4 concatenam-se os principais dados das vigas ensaiadas, na qual estão dispostos os valores das cargas máximas, os deslocamentos centrais verticais correspondentes e a forma de ruptura.

Tabela 5.4 - Comportamento das vigas: carga-deslocamento e forma de ruptura.

Vigas	Carga de ruptura (kN)	Deslocamento central (cm)	Modo de ruptura
Vigas de BLC com adesivo CASCOREZ			
A1	3,94	2,74	Compressão das fibras superiores e fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 4ª e a 5ª ripas.
A2	3,31	2,08	Fluxo de cisalhamento entre a 3ª e a 4ª ripas.
B1	2,28	2,71	Ruptura na emenda da ripa inferior (7ª ripa) devido ao descolamento da mesma. Fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 3ª e a 4ª ripas.
B2	2,33	1,57	Ruptura na emenda da ripa inferior (7ª ripa) devido ao descolamento da mesma. Fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 3ª e a 4ª ripas e entre a 5ª e a 6ª ripas.
C1	2,36	1,64	Fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 4ª e a 5ª ripas e entre a 5ª e 6ª ripas.
C2	3,31	1,61	Fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 4ª e a 5ª ripas.
D	3,08	1,87	Fluxo de cisalhamento no adesivo entre a 3ª e a 4ª ripas e entre a 5ª e a 4ª ripas.
Vigas de BLC com adesivo CASCOPHEN			
A1	6,87	1,57	Fluxo de cisalhamento paralelo às fibras do bambu na 5ª ripa.
A2	6,60	1,69	Tração junto ao nó da lâmina inferior (7ª ripa).
B1	5,73	2,76	Ruptura na emenda da ripa inferior (7ª ripa) com posterior ruptura por tração na 6ª ripa.
B2	5,37	3,23	
C1	7,43	1,98	Ruptura por tração no nó central da ripa inferior (7ª ripa).
C2	8,79	2,30	
D1	7,97	1,75	Fluxo de cisalhamento paralelo às fibras do bambu na 5ª ripa.
D2	10,21	2,29	
Vigas de madeira *Eucalyptus grandis*			
E1	6,11	1,79	Compressão das fibras superiores e consequente ruptura das fibras inferiores por tração.
E2	6,74	1,96	
Vigas de madeira Pinho do Paraná			
P1	5,22	2,85	Compressão das fibras superiores e consequente ruptura das fibras inferiores por tração.
P2	4,93	2,43	

Fonte: Autor.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação investigou o comportamento experimental de quatro treliças planas tipo *Howe* com 2,50 m de vão e de quinze vigas de seção retangular com vão de 75,0 cm, fabricadas utilizando BLC (Bambu Laminado Colado). Para confecção dos laminados colados, foram utilizados bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* e adesivos à base de resorcinol-formaldeído (CASCOPHEN) e de poliacetato de vinila (CASCOREZ). Realizou-se inicialmente a caracterização físico-mecânica do bambu e do BLC. E, executou-se um estudo experimental de ligações metálicas para treliças planas, no qual foram ensaiadas 30 ligações classificadas segundo três variáveis: o ângulo de montagem das ligações; o tipo de adesivo utilizado na colagem entre as ripas de bambu e entre o bambu e as chapas de aço; e o número de ripas de bambu utilizadas para confecção dos espécimes.

Com base nos estudos descritos, podem-se tecer as seguintes conclusões:

1) Caracterização físico-mecânica

Na caracterização física do bambu, verificou-se que as amostras sem e com nó imergidas em água apresentaram uma taxa de absorção em um tempo de 24 h de 24,4% e 30,0%, respectivamente. Além disso, observou-se uma maior porosidade da região nodal quando comparada com a região internodal. De modo complementar, considerando os pontos correspondentes aos tempos de 24 h e 60 min, observou-se que a face perpendicular às fibras do bambu (extremidade) é cerca de 8 e 10 vezes mais absorvente que a face lateral para o bambu sem nó e com nó, respectivamente; e que a face da extremidade da região nodal é cerca de 2 vezes mais absorvente que da região sem nó.

Com relação à massa específica, o BLC apresentou, em média, um valor de massa específica maior que as madeiras *Eucalyptus grandis* e Pinho do Paraná. No entanto, a massa especifica do BLC apresenta-se inferior as madeiras dicotiledôneas utilizadas comumente na construção de telhados, como a Maçaranduba.

O bambu apresenta excelente resistência à tração paralela às fibras, de forma que na região internodal seus valores de resistência à tração são comparáveis às tensões de escoamento aos aços estruturais (MR 250) e de construção (CA 25).

A resistência à compressão paralela às fibras do BLC é 2,4 vezes maior que a resistência das madeiras dicotiledônea e conífera, *E. grandis* e P. do Paraná. Em adição, a f_{c0}

do BLC é cerca de 20% maior que a da Maçaranduba. Através de análise estatística, conclui-se que o tipo de adesivo utilizado na fabricação do BLC não interfere na resistência à compressão paralela às fibras. O módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do BLC (22,1 GPa) mostrou-se similar ao módulo de elasticidade da Maçaranduba (22,7 GPa) e superior aos módulos do *E. grandis* (12,8 GPa) e do Pinho do Paraná (15,2 GPa).

No que diz respeito à resistência ao cisalhamento paralela às fibras, o bambu é equiparável às madeiras *E. grandis* e Pinho do Paraná, em contra partida, corresponde a apenas 34% da resistência ao cisalhamento paralela às fibras da madeira dicotiledônea Maçaranduba.

Na avaliação dos adesivos com relação ao cisalhamento no plano de colagem, percebeu-se que o adesivo CASCOPHEN apresentou resistência ao cisalhamento estatisticamente igual à resistência ao cisalhamento paralela às fibras do bambu. Deste modo, observou-se que não se faz necessária a utilização de adesivos com maior resistência que a do CASCOPHEN, uma vez que, a ruptura do BLC fica limitada pela resistência do bambu. O adesivo CASCOREZ, no entanto, apresentou baixa resistência ao cisalhamento no plano de colagem.

Para os ensaios de flexão estática, o modo de ruptura dos corpos de prova foi governado pelo por fluxo de cisalhamento no plano de colagem em decorrência da alta resistência do bambu aos esforços normais (tração e compressão).

2) Treliças planas tipo <u>Howe</u>

Com relação aos ensaios das ligações metálicas das treliças a 0º, conclui-se que, de forma geral, a ruptura ocorre por cisalhamento na região de embutimento do parafuso para todas as combinações de adesivos e números de ripas utilizados. Adicionalmente, avaliou-se que o tipo de adesivo utilizado não influencia na tensão ao cisalhamento da região embutida. Para as ligações metálicas das treliças a 90º, verificou-se que a ruptura ocorre por cisalhamento na região de embutimento do parafuso sobre o bambu ou tração perpendicular às fibras.

Os critérios do elemento normativo ABNT NBR 7190 (1997) de Projeto de estruturas de madeira mostraram-se adequados no dimensionamento das treliças de BLC. Desta forma, conclui-se que elementos estruturais de BLC apresentam comportamento semelhante às estruturas correntes de madeira.

Para as treliças, o adesivo CASCOPHEN apresentou-se mais eficiente do que o adesivo CASCOREZ, já que as treliças fabricadas com este apresentaram menor capacidade

de carga. Adicionalmente, o comportamento "carga x deslocamento experimental" apresentou-se semelhante ao comportamento numérico, principalmente para um nível de carregamento próximo ao de projeto. A exceção recorre na treliça CASCOPHEN_2 que apresentou valores de deslocamentos experimentais discrepantes (superiores) aos dados numéricos, fato que pode ter ocorrido devido a não-linearidade de contato nas vinculações desta treliça.

Por fim, a análise teórica-experimental dos gráficos "tensão nas barras x carregamento total aplicado" mostrou que o comportamento das treliças ocorreu de modo satisfatório até cerca de 70% da carga máxima; a partir deste valor, observaram-se algumas discrepâncias entre dados experimentais e teóricos que foram provenientes do modo de colapso das treliças (flambagem).

3) Vigas de seção retangular

Os gráficos "carga x deslocamento" das vigas ensaiadas apresentaram comportamento linear até próximo da carga de ruptura, tanto para vigas de BLC quanto para as vigas de madeira (*Eucalyptus grandis* e Pinho do Paraná).

As cargas de ruptura das vigas de BLC (A, B, C e D) coladas com adesivo CASCOPHEN apresentaram-se superiores às coladas com adesivo CASCOREZ. Além disso, todas as vigas CASCOREZ romperam por fluxo de cisalhamento no plano de colagem, enquanto que as vigas CASCOPHEN apresentaram modos de rupturas diferenciados em função do tipo de viga ensaiada. Desta forma, este adesivo apresentou-se mais adequado para uso estrutural que o adesivo CASCOREZ.

A rigidez e a capacidade de cargas das vigas de BLC variam de acordo com a disposição de nós e emendas. As vigas tipo "B" apresentaram as menores cargas de ruptura e menor rigidez à flexão. As vigas tipo D_CASCOPHEN apresentaram os melhores resultados, porém romperam por fluxo de cisalhamento paralelo às fibras. Isso indica que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do bambu é um fator limitador a capacidade resistente das vigas BLC. O comportamento das vigas de madeira natural de Pinho do Paraná, em termos de rigidez e cargas de ruptura, foi semelhante às vigas de BLC tipo B_CASCOPHEN. Em relação às vigas de *Eucalyptus grandis*, estas se mostraram com comportamento aproximado as vigas de BLC tipo A_CASCOPHEN.

4) Sugestão de estudos para continuidade da pesquisa

- Introduzir forças horizontais nas treliças para poder-se simular adequadamente a ação do vento, uma vez que este atua perpendicular a superfície do telhado

resultando em componentes de cargas verticais e horizontais. Ou seja, realizar uma melhor análise das cargas de vento;

- Analisar outros mecanismos de ligações entre peças de BLC para treliças e demais tipos de estruturas;
- Preparar amostras e obter outras propriedades físico-mecânicas do BLC, tais como: estabilidade dimensional, dureza, resistência ao impacto na flexão, tração normal à lâmina de cola; resistência de emendas dentadas e biseladas;
- Estudar outros adesivos para que, a exemplo do adesivo CASCOPHEN, encontrem-se outros materiais que tenham comportamento estrutural adequado à fabricação de laminados colados de bambu;
- Estudar outras estruturas e/ou elementos estruturais fabricadas com BLC, tais como: pilares; lajes (forros); elementos componentes da trama de um telhado (ripas, caibros, terças, vigas inclinadas) etc.

REFERÊNCIAS

AHMAD, M. **Analysis of calcutta bamboo for structural composite materials**. Dissertation, Wood Sci. and Forest Products, VT. pp. 210. 2000.

ALMEIDA NETO, J. A. de. **Contribuição ao estudo do bambu:** o comportamento hidráulico de tubos de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*). 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

ALVIM, R. de C. **Projeto de estruturas de madeira**: peças compostas comprimidas. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2009. 226p. ISBN: 978-85-61209-73-5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 7190:** Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 8800:** Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237p.

BALLARIN, W. A. **Tesouras de madeira**: aula 05. Propriedades mecânicas e fundamentos das estruturas de madeira, 2008. 26 p.

BARELLI, B. G. P.; PEREIRA, M. A. R.; LANDIM, P. C. **A tecnologia na confecção de protótipos em bambu laminado colado desenvolvida na Unesp-Bauru**. Design, arte e tecnologia. São Paulo: Rosari, Universidade Anhembi Morumbi, PUC-Rio e Unesp-Bauru, 2008.

BERALDO, A. L.; RIVERO, L. A. Bambu Laminado Colado (BLC). **Floresta e Ambiente**, v. 10, n.2, p. 36-46, ago./dez., 2003.

BERNDSEN, R. S. **Caracterização Anatômica, Física E Mecânica de lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*)**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Campus Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BONO, C. T. **Madeira laminada colada na arquitetura**: sistematização de obras executadas no Brasil. 365 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CALIL JR., C. LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri, SP: Manole, 2003. 152 p. ISBN 85-204-1515-6.

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 71-77,1997.

CALIL JR, C.; MARIN, C. P.; PALMA, G.; **Ponte treliçada modular pré-fabricada de madeira**. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá - MT. **Anais**... Cuiabá IX EBRAMEM, 2004.

CARDOSO JÚNIOR, M. L. **Recomendações para Projeto de Piso de Bambu Laminado Colado – BLC**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Produção e Gestão do Ambiente Constuído) - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

CASTRO E SILVA, R. M. de. **O bambu no Brasil e no mundo**. [2005?] Disponível em: <http://www.embambu.com.br/imagens/bambu_brasil_mundo.pdf>. Acesso em: 12 nov.2011.

COLLA, W. A. **Efeito do tratamento térmico nas características físicas e mecânicas do bambu (*Dendrocalamus giganteus* Munro)**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 5**:Design of timber Structures. Brussels, 1993.

CULZONI, R. A. M. **Caraterísticas dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto**.134 f.Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

DA ROSA, S. P. A. P. **Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambu**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. **DIN 1052**. Structural use of timber: design and construction. Berlin, 1988.

DUNKELBERG, K. **Bamboo as a building material**: bamboo-IL 31. Stuttgart: University of Stuttgart, Institute for Lightweight Structures, 1985. 431 p.

ESTRUCTURAS DE MADERA Y ESTRUCTURAS DE GUADUA – Capítulo G.1 Requisitos generales. **NSR 10**.

FARRELLY, D. **The book of bamboo**. London: Thames and Hudson, 1996. 321p.

FERNÁNDEZ, B. O. **Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira**: uma boa alternativa para o Estado do Pará. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GARBINO, L. V.; GONÇALVES, M. T. T.; PEREIRA, M. A. R. **Métodos de ensaio para amostras de bambu laminado**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais**… Uberlândia: EBRAMEM, 2002.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**: notas de aula. Uberlândia: UFU, 2003. 93 p. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

GHAVAMI, K. **Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**. In: Symposium Materials for Low Income Housing, 3, 1989, Mexico City. **Symposium**...Mexico: CIB/RILEM, 1989. p.526-536.

GHAVAMI, K. **Bamboo as reinforcement in structural concrete elements**. Cement and Concrete Composites, v.27, p.637-649, 2005.

GHAVAMI, K. **Bambu**: Um material alternativo na Engenharia. Engenharia - Revista do Instituto de Engenharia, São Paulo, v.492, p.2-7, 1992.

GHAVAMI, K. Ultimate Load Behavior of Bamboo-Reinforced Lightweight Concrete Beams. **Cement and Concrete Composites**, n. 17, p. 281-288, 1995.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Determinação das propriedades dos bambus das espécies**: *Mosó*, *Matake*, *Guadua angustifolia*, *Guadua tagoara* e *Dendrocalamus giganteus* para utilização na engenharia. 1. ed. Rio de Janeiro: RMNC do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2001. 53p.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 107-114, 2005.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades geométricas e mecânicas de colmos dos bambus para aplicação em construções. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 415-424, 2003.

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

GHAVAMI, K.; SOUZA, M. V. de. **Propriedades mecânicas do bambu**. Rio de Janeiro: Relatório Interno apresentado ao PIBIC, PUC-Rio. ago., 2000.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo consumo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v.12, n.1, p.1-19, 1992.

GONÇALVES, M. T. T.; PEREIRA, M. A. dos R.; GONÇALVES, C. D. **Ensaios de resistência mecânica em peças laminadas de bambu**. In: XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2000, Fortaleza. **Anais**… Fortaleza: CONBEA, 2000.

HENKEL ALBA ADESIVOS. **Boletim Técnico**: CASCOREZ E CASCOPHEN. 2007.

HIBBELER, R. C. **Estática**: mecânica para engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 528 p.

HIDALGO LÓPEZ, O. **Nuevas Técnicas de construcción con Bambú**. Colombia: Estudios Tecnicos Colombianos. Ltda Bogotá, 1978. 95 p.

HIDALGO LÓPEZ, O. **Bamboo**: the gift of the gods. Bogotá: D'Vinni, 2003. 553p.

JANSSEN, J. J. A. **Bamboo in building structures**. v. 1, 235 p. Thesis (PhD in Building and Planning) - Eindhowen University of Technology, Eindhowen, 1981.

KOGA, R. C.; BITTENCOUR, R. M.; GONÇALVES, M. T. T. **Resistência à abrasão do bambu gigante e espécies de madeiras para utilização como elemento piso**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais**…Uberlândia: EBRAMEM, 2002.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technogy**. v. 1. Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg. New York, Tokyo. Springer-Verlar: 1968-1984.

LAPO, L. E. R.; BERALDO, A. L. Bambu Laminado Colado (BLC). **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 165-177, maio/ago. 2008.

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, 1994. p. 40-46.

LIESE, W. **Anatomy and properties of bamboo**. In: Recent Research on Bamboos. Chinese Academy of Forestry, China and International Development Research Centre, Canada. p. 196-208, 1987.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms. Technical Report**, International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, Eindhoven, New Delhi, 1998, 208p.

LIMA JÚNIOR, H.C. et alii. **Características mecânicas do bambu Dendrocalamus giganteus: Análise teórica e experimental**. In: Barbosa, N.P.; Swamy, R.N. and Lynsdale, C. (eds.). SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa: SNT, p. 394-406.

LIMA JÚNIOR, H. C.; DIAS, A. A. Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado colado: análise teórica e experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 5, n. 3, p. 519-524, 2001.

LIMA JÚNIOR, H. C.; MESQUITA, L. P.; FABRO, G.; WILLRICH, F. L. Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus I*: análise experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 9, n. 4, p. 642-651, 2005.

LOGSDON, N B. **Influência da umidade em propriedades da madeira**. 174 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu:** características físico-mecânicas**.** Campinas. 165 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

MANHÃES, A. P. **CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO BAMBU NO BRASIL**: ABORDAGEM PRELIMINAR. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

Manual de aços Gerdau: aços finos PIRATNI. São Paulo: Gerdau, 2003

MARQUES, J. L. S. **Desenvolvimento de Adesivos Nanocompósitos de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgia e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MATÉRIA BAMBU NO JAPÃO. **Revista cotents**, Tókio, Japão, n. 128, p. 4-16, jul. 2002.

MELO, C. **Apostila de Fabricação de Instrumentos Musicais**. Instituto do bambu. Grupo Bambuzal. 2004.

MOIZÉS, F. A. **Painéis de Bambu, uso e aplicações**: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2007.

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 268 p. ISBN 978-85-212-0554-8.

MOREIRA, L. E. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NASCIMENTO, A. M. do. **Estrutura do Colmo e Propriedades Fisicas do Bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus*)**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1990.

NAVARRO, E. H. A. **Estudo Teórico Experimental a Flexão de Lajes de Concreto Reforçadas com Bambu**. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

NMBA. **Processing bamboo shoots**. Training manual. New Delhi, India. 2004. 27 p.: il.

NOGUEIRA, C. L. **Painel de bambu laminado colado estrutural**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

OLIVEIRA, A. K. F; PAEZ, J. B. **Caracterização físico–mecânica de laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*) para revestimento de pisos**. BRASIL NOCMAT 2006 - Salvador, BA.

PAKOTIPRAPHA, B.; PAMA, R. P.; LEE, S. L.. Behavior of a bamboo fiber-cement paste composite**. Journal of Ferrocement**, 1983, vol. 13, n. 3.

PEIXOTO, L. K. **SISTEMA CONSTRUTIVO EM BAMBU LAMINADO COLADO:** PROPOSIÇÃO E ENSAIO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UMA TRELIÇA PLANA DO TIPO *WARREN*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2008.

PENÃ, J. E. L. **Validación de la Guadua angustifolia como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles**. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE BOGOTÁ, 2010. 190 p.

PEREIRA, M. A. dos R. **Viabilidade da utilização do bambu para fins de irrigação - aspectos técnicos**. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita, Botucatu, SP, 1992.

PEREIRA, M. A. dos R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma.** Bauru: Canal6, 2008. 240p.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003. 224 p.

PFEIL , W; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 2010. 357 p.

PIMENTEL, M. A. **O bambu e os desafios do Brasil**. 1997. Disponível em: <www.bambubrasileiro.com/arquivos/O%20e%20os%20Desafios%20do%20Brasil%20-%20Pimental.pdf> .Acesso em: 14 nov. 2011.

PORTAL G1. BAHIA. REDE BAHIA DE TELEVISÃO. **No sul da Bahia, arquiteto colombiano constrói casas utilizando bambu**. Disponível em: <http://g1.globo.com/bahia/noticia/2012/06/no-sul-da-bahia-arquiteto-colombiano-constroi-casas-utilizando-bambu.html>. Acesso em: 06 dez. 2012 .

Projeto PRODES. Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE). Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>. Acesso em: 26 dez. 2012.

Operating Manual Quantium X. HBM, 2003.

QISHENG, Z.; SHENXUE, J. **Bamboo Based Panels in China**. Forestry University, China: Bamboo Engineering Research Center Nanjing. 2001. p. 1-14.

RECHT, C.; WETTERWALD, M. F. **Bamboos**. London: B.T. Batsford Ltd, 1994.

RIVERO, L. A. **Laminado colado e contraplacado de bambu.** 99 f. Dissertação (Mestrado na área de Construções Rurais e Ambiência) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RITTER, M. A. **Timber Bridges**: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. Washington, DC,1990. 944 p.

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

SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Equipamentos e processos necessários para produção de compensado de bambu**. Porto Alegre: SENAI-RS, 10 ago. 2005. Disponível em: <http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt1196.pdf?PHPSESSID=6aa56910df57f5c60f1bee9de0deeaf0> . Acesso em: 10 jun. 2011.

STAMATO, G. C.; GÓES, J. L. N. **A madeira como material estrutural**: Notas de aula. Centro de Pós-graduação UNILINS, Engenharia de estruturas – Estruturas de madeira.

TELES, R. F. **PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA PRODUZIDAS COM LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*)**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2009.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**: volume I. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. 256 p.

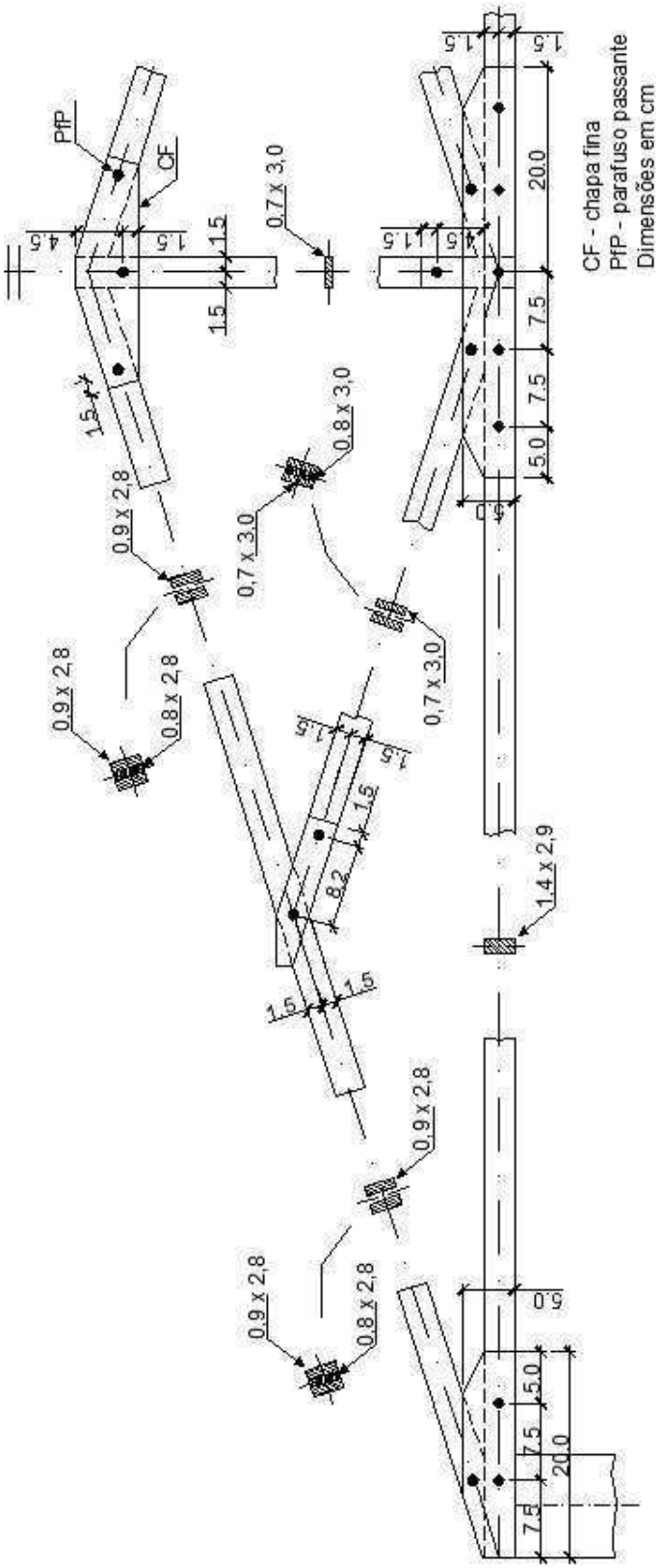
WELLONS, J. D. **Adhesion to woody substrates**. Oregon State University, Forest Research Laboratory , 1997, p. 1115.

WIKIPEDIA. **Cascavel (Paraná)**. nov. 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cascavel_(Paran%C3%A1)>. Acesso em: 21 nov. 2012.

ZANGIÁCOMO, A. L. **EMPREGO DE ESPÉCIES TROPICAIS ALTERNATIVAS NA PRODUÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

Apêndice A

ARRANJO BÁSICO DA TRELIÇA TIPO <u>HOWE</u> EM BLC



Apêndice B

MEMORIAL DE CÁLCULO DAS TRELIÇAS

B.1 Dados do projeto

Vão da treliça: $L_t := 2.5m$

Espaçamento entre tesouras: $a := 1.8m$

Tensão de escoamento característica do parafuso: $f_{yk} := 640MPa$

Tensão de ruptura característica do parafuso: $f_{ub} := 800MPa$

Diâmetro médio do parafuso: $d_b := 5.82mm$

Coeficiente minorador de resistência para o parafuso: $\gamma_s := 1.10$

Coeficiente majorador de carga permanente: $\gamma_G := 1.4$

Coeficiente majorador de carga variável: $\gamma_Q := 1.4$

Fatores de combinação: $\psi_1 := 0.2$ $\psi_2 := 0$

Módulo de elasticidade à compressão: $E_{c0} := 22.1GPa$

Coeficiente modificador de resistência 1 (Longa duração): $K_{mod1} := 0.70$

Coeficiente modificador de resistência 2 (Classe 2 de umidade): $K_{mod2} := 1.00$

Coeficiente modificador de resistência 3 (1ª Categoria - MLC): $K_{mod3} := 1.00$

Coeficiente modificador de resistência: $K_{mod} := K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot K_{mod3} = 0.70$

Resistência média à compressão paralela às fibras do BLC: $f_{c0} := 97.6MPa$

Coeficiente de variação da resistência à compressão do BLC: $\delta_c := 9.69\%$

Coeficiente minorador de resistência à compressão: $\gamma_{wc} := 1.4$

Coeficiente de fluência: $\phi := 0.8$

Resistência média à tração paralela às fibras na região nodal: $f_{t0cn} := 76.1MPa$

Coeficiente de variação da resistência à tração na região nodal: $\delta_{tcn} := 7.0\%$

Resistência média à tração paralela às fibras na região internodal: $f_{t0sn} := 261.8MPa$

Coeficiente de variação da resistência à tração na região internodal: $\delta_{tsn} := 12.5\%$

Coeficiente minorador de resistência à tração da madeira: $\gamma_{wt} := 1.8$

Resistência média ao cisalhamento na ligação paralela com 2 ripas: $f_{ve2} := 5.47MPa$

Coeficiente de variação da resistência ao cisalhamento na ligação: $\delta_{ve2} := 10.6\%$

Resistência média ao cisalhamento na ligação paralela com 1 ripa: $f_{ve1} := 6.66MPa$

Coeficiente de variação da resistência ao cisalhamento na ligação: $\delta_{ve1} := 12.2\%$

Espessura média da ripa de bambu: $t := mean(7.67, 6.90)\,mm = 7.285 \cdot mm$

Espessura da chapa metálica: $t_a := 1.2mm$

Largura da chapa metálica: $b := 2.8cm$

Tensão de escoamento característica da chapa: $f_y := 330MPa$

Tensão de ruptura característica da chapa: $f_u := 450MPa$

Coeficiente minorador de resistência à tração do aço (escoamento): $\gamma_{a1} := 1.1$

Coeficiente minorador de resistência à tração do aço (ruptura): $\gamma_{a2} := 1.35$

B.2 Definição do carregamento concentrado

B.2.1 Peso próprio da treliça:

Peso próprio da treliça: $g_T := 0.0245\left(1 + 0.33\cdot\frac{L_t}{m}\right)\cdot\frac{kN}{m^2} = 0.045\cdot\frac{kN}{m^2}$

B.2.2 Peso próprio das terças:

$g_0 := 45\frac{N}{m^2}$ (MOLITERNO, 2010, p. 21)

B.2.3 Carga do Forro

Estrutura de sustentação: $g_{sus} := 120\frac{N}{m^2}$ (MOLITERNO, 2010, p. 22)

$g_F := g_{sus} + 0.035\frac{kN}{m^2} = 155\cdot\frac{N}{m^2}$ (Forro de Eucatex. MOLITERNO, 2010, p. 20)

B.2.4 Carga de vento em sobrepressão adotada

$g_w := \frac{0.1}{a\cdot\frac{L_t}{3}}kN = 66.667\cdot\frac{N}{m^2}$ (MOLITERNO, 2010, p. 173)

B.2.5 Peso próprio das telhas (PVC rígido)

$g_i := 0.03\frac{kN}{m^2}$ (MOLITERNO, 2010, p. 17)

$g_c := \frac{g_i}{\frac{1.25}{1.312}} = 0.031\cdot\frac{kN}{m^2}$ (Carga equivalente em projeção horizontal. MOLITERNO, 2010, p. 19)

B.2.6 Carga elementos metálicos

$g_m := 0.03\cdot\left(g_T + g_0 + g_{sus}\right) = 6.291\cdot\frac{N}{m^2}$

B.2.7 Carga permanente total

$g := g_c + g_0 + g_T + g_F + g_m = 0.282\cdot\frac{kN}{m^2}$

B.2.8 Carga total de combinação última normal

$$g_d := \left(g_c + g_0 + g_T + g_F + g_m\right)\cdot\gamma_G + 0.75\cdot\gamma_Q\, g_w = 0.465\cdot\frac{kN}{m^2}$$

$$g_{dmet} := \left(g_c + g_0 + g_T + g_F + g_m\right)\cdot\gamma_G + \gamma_Q\, g_w = 0.489\cdot\frac{kN}{m^2}$$

$$g_{duti} := \left(g_c + g_0 + g_T + g_F + g_m\right) + \psi_2\cdot g_w = 0.282\cdot\frac{kN}{m^2}$$

B.2.9 Carga nodal aplicada de cálculo

$$P_d := g_d\cdot\left(a\cdot\frac{L_t}{3}\right) = 0.70\cdot kN \qquad P_{dmet} := g_{dmet}\cdot\left(a\cdot\frac{L_t}{3}\right) = 0.73\cdot kN \qquad P_{duti} := g_{duti}\cdot\left(a\cdot\frac{L_t}{3}\right) = 0.42\cdot kN$$

B.2.10 Carga nodal aplicada característica permanente

$$P_g := (g)\cdot\left(a\cdot\frac{L_t}{3}\right) = 0.42\cdot kN$$

B.2.11 Carga nodal aplicada característica de vento

$$P_w := \left(g_w\right)\cdot\left(a\cdot\frac{L_t}{3}\right) = 0.10\cdot kN$$

B.3 Verificação da flambagem nas peças comprimidas

B.3.1 Banzo comprimido inferior (barras 2 e 4)

Esforço normal de compressão majorado: $N_d := 3.45kN$

Comprimento de flambagem do banzo comprimido: $L_0 := 65.6cm$

Seção do elemento componente:

$b_1 := 9.55mm \qquad h_1 := 28.57mm \qquad esp := 8.05mm$

$$a_1 := \frac{esp + b_1}{2} = 8.8\cdot mm$$

$$h := 2\cdot a_1 + b_1 = 27.15\cdot mm$$

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 2.728 \cdot cm^2$$

$$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^{\,3}}{12} = 1.856 \cdot cm^4$$

$$I_2 := \frac{h_1 \cdot b_1^{\,3}}{12} = 0.207 \cdot cm^4$$

Seção composta: $n := 2$

$$A := n \cdot A_1 = 5.457 \cdot cm^2$$

$$I_x := n \cdot I_1 = 3.712 \cdot cm^4$$

$$I_y := n \cdot I_2 + 2 \cdot A_1 \cdot \left(a_1\right)^2 = 4.641 \cdot cm^4$$

Número de intervalos em que fica dividido o comprimento de total do pilar: $m_p := 2$

Para espaçadores interpostos: $\alpha_y := 1.25$

$$\beta_I := \frac{I_2 \cdot m_p^{\,2}}{I_2 \cdot m_p^{\,2} + \alpha_y \cdot I_y} = 0.125$$

$$I_{y_ef} := \beta_I \cdot I_y = 0.581 \cdot cm^4$$

$$\lambda_y := \frac{\frac{L_0}{2}}{\sqrt{\frac{I_{y_ef}}{A}}} = 100.56 \qquad \lambda_x := \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} = 79.54$$

$$\lambda := \max\left(\lambda_y, \lambda_x\right) = 100.56 \qquad \text{(Peças esbeltas } 80 < \lambda <= 140\text{)}$$

Excentricidade acidental: $e_a := \max\left(\frac{h}{30}, \frac{\frac{L_0}{2}}{300}\right) = 1.093 \cdot mm$

Excentricidade de primeira ordem: $e_i := 0mm$

Carga normal permanente característica: $N_{gk} := 2.12kN$

Carga normal variável característica: $N_{qk} := 0.49kN$

Carga normal permanente de projeto $N_{gd} := \gamma_G \cdot N_{gk} = 2.968 \cdot kN$

Momento de cálculo de primeira ordem permanente: $M_{1g_d} := 0kN \cdot cm$

Excentricidade inicial permanente: $e_{ig} := \frac{M_{1g_d}}{N_d} = 0 \cdot mm$

Módulo de Elasticidade efetivo: $E_{c0ef} := K_{mod} \cdot E_{c0} = 15.47 \cdot GPa$

Carga crítica de Euler: $N_{cr} := \frac{\pi^2 E_{c0ef} \cdot I_{y_ef}}{\left(\frac{L_0}{2}\right)^2} = 8.239 \cdot kN$

Excentricidade de fluência: $e_c := \left(e_{ig} + e_a\right) \cdot \left[e^{\left[\frac{\phi \cdot \left[N_{gk} + \left(\psi_1 + \psi_2\right) \cdot N_{qk} \right]}{N_{cr} - \left[N_{gk} + \left(\psi_1 + \psi_2\right) \cdot N_{qk} \right]} \right]} - 1 \right] = 0.375 \cdot mm$

Excentricidade efetiva de primeira ordem: $e_{1_ef} := e_a + e_i + e_c = 1.468 \cdot mm$

Momento de cálculo: $M_d := N_d \cdot e_{1_ef} \cdot \left(\frac{N_{cr}}{N_{cr} - N_d} \right) = 0.871 \cdot kN \cdot cm$

Área Líquida de compressão: $A_{liqc} := A - d_b \cdot 2 \cdot b_1 = 4.345 \cdot cm^2$

Tensão solicitante à compressão: $\sigma_{Nd} := \frac{N_d}{A_{liqc}} = 7.94 \cdot MPa$

Tensão solicitante à flexão: $\sigma_{Md} := \frac{M_d \cdot b_1}{I_{y_ef} \cdot 2} + \frac{M_d}{2 \cdot a_1 \cdot A_1} \cdot \left(1 - n \cdot \frac{I_2}{I_{y_ef}} \right) = 7.685 \cdot MPa$

Verificação - compressão: $\frac{N_d}{A_{liqc}} + \frac{M_d \cdot b_1}{I_{y_ef} \cdot 2} + \frac{M_d}{2 \cdot a_1 \cdot A_1} \cdot \left(1 - n \cdot \frac{I_2}{I_{y_ef}}\right) = 15.624 \cdot MPa$

Resistência à compressão de projeto: $f_{c0d} := K_{mod} \cdot \frac{\left(1 - 1.645 \cdot \delta_c\right) \cdot f_{c0}}{\gamma_{wc}} = 41.021 \cdot MPa$

Fórmula da iteração: $\frac{\frac{N_d}{A_{liqc}} + \frac{M_d \cdot b_1}{I_{y_ef} \cdot 2} + \frac{M_d}{2 \cdot a_1 \cdot A_1} \cdot \left(1 - n \cdot \frac{I_2}{I_{y_ef}}\right)}{f_{c0d}} = 0.381 \quad < 1$

Verificação da estabilidade local dos trechos de comprimentos L_1:

$9 \cdot b_1 = 8.595 \cdot cm \qquad L_1 := \frac{L_0}{m_p} = 32.8 \cdot cm \qquad 18 \cdot b_1 = 17.19 \cdot cm$

Apesar da condição $L_1 < 18.b_1$ não ter sido atendida, resolveu-se por continuar com a mesma configuração das barras das treliças por questões construtivas e limitação de material (bambu).

Verificação dos espaçadores e des suas ligações:

Distância mínima entre parafuso e a extremidade do espaçador: $7 \cdot d_b = 4.074 \cdot cm$

Logo, adotou-se espaçadores com comprimento de 10 cm.

$\lambda_{ef} := \lambda_y = 100.56$

Esforço cortante a ser resistido na seção transversal da peça:

$V_d := \frac{N_d \cdot \lambda_{ef}}{40} \cdot e_{1_ef} \cdot \frac{N_{cr}}{N_{cr} - N_d} \cdot \frac{\pi}{L_0} = 0.10 \cdot kN \qquad F_{sd} := \frac{V_d \cdot L_1}{2a_1} = 1.955 \cdot kN$

Cálculo da ligação do espaçador interposto:

$t_e := b_1 = 9.55 \cdot mm$

$\beta := \frac{t_e}{d_b} = 1.641 \qquad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 581.818 \cdot MPa \qquad \beta_{lim} := 1.25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{c0d}}} = 4.708$

Embutimento no BLC: $R_{vd1} := 0.40 \cdot \frac{t_e^{\,2}}{\beta} \cdot f_{c0d} = 0.912 \cdot kN$

Número de parafusos: $n_p := \frac{F_{sd}}{2R_{vd1}} = 1.0$

B.3.2 Banzo comprimido superior (barras 8 e 9)

Estas barras 8 e 9 apresentam as mesmas condições geométricas e estruturais que as barras 2 e 4, porém como estão submetidas a um esforço normal menor, não será necessário o cálculo das barras 8 e 9.

B.3.3 Diagonal comprimida

Esforço normal de compressão majorado: $N_{d1} := 1.15kN$

Comprimento de flambagem do banzo comprimido: $L_0 := 65.6cm$

Seção do elemento componente:

$b_1 := 7.33mm$ $h_1 := 29.63mm$ $esp := 7.62mm$

$a_1 := \frac{b_1 + esp}{2} = 7.475 \cdot mm$

$h := 2 \cdot a_1 + b_1 = 2.228 \cdot cm$

$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 2.172 \cdot cm^2$

$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^{\,3}}{12} = 1.589 \cdot cm^4$

$I_2 := \frac{h_1 \cdot b_1^{\,3}}{12} = 0.097 \cdot cm^4$

Seção composta: $n := 2$

$A := n \cdot A_1 = 4.344 \cdot cm^2$

$I_x := n \cdot I_1 = 3.178 \cdot cm^4$

$I_y := n \cdot I_2 + 2 \cdot A_1 \cdot (a_1)^2 = 2.622 \cdot cm^4$

Número de intervalos em que fica dividido o comprimento de total do pilar: $m_p := 2$

Para espaçadores interpostos: $\alpha_y := 1.25$

$$\beta_I := \frac{I_2 \cdot m_p^{\,2}}{I_2 \cdot m_p^{\,2} + \alpha_y \cdot I_y} = 0.106$$

$$I_{y_ef} := \beta_I \cdot I_y = 0.278 \cdot cm^4$$

$$\lambda_y := \frac{\frac{L_0}{2}}{\sqrt{\frac{I_{y_ef}}{A}}} = 129.616 \qquad \lambda_x := \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} = 76.694$$

$\lambda := \max(\lambda_y, \lambda_x) = 129.616$ (Peças esbeltas 80<λ<=140)

Excentricidade acidental: $e_a := \max\left(\frac{h}{30}, \frac{L_0}{300}\right) = 2.187 \cdot mm$

Excentricidade de primeira ordem: $e_i := 0mm$

Carga normal permanente característica: $N_{gk} := 0.71kN$

Carga normal variável característica: $N_{qk} := 0.16kN$

Carga normal permanente de projeto $N_{gd} := \gamma_G \cdot N_{gk} = 0.994 \cdot kN$

Momento de cálculo de primeira ordem permanente: $M_{1g_d} := 0kN \cdot cm$

Excentricidade inicial permanente: $e_{ig} := \frac{M_{1g_d}}{N_d} = 0 \cdot mm$

Carga crítica de Euler: $N_{cr} := \frac{\pi^2 E_{c0ef} \cdot I_{y_ef}}{\left(\frac{L_0}{2}\right)^2} = 3.948 \cdot kN$

Excentricidade de fluência: $e_{cc} := (e_{ig} + e_a)\cdot\left[e^{\left[\frac{\phi\cdot N_{gk}+(\psi_1+\psi_2)\cdot N_{qk}}{N_{cr}- N_{gk}+(\psi_1+\psi_2)\cdot N_{qk}}\right]} - 1\right] = 0.445\cdot mm$

Excentricidade efetiva de primeira ordem: $e_{1_ef} := e_a + e_i + e_c = 2.631\cdot mm$

Momento de cálculo: $M_d := N_d\cdot e_{1_ef}\cdot\left(\frac{N_{cr}}{N_{cr} - N_d}\right) = 0.427\cdot kN\cdot cm$

Área Líquida de compressão: $A_{liqc} := A - d_b\cdot 2\cdot b_1 = 3.491\cdot cm^2$

Tensão solicitante à compressão: $\sigma_{Nd} := \frac{N_d}{A_{liqc}} = 3.295\cdot MPa$

Tensão solicitante à flexão: $\sigma_{Md} := \frac{M_d\cdot b_1}{I_{y_ef}\cdot 2} + \frac{M_d}{2\cdot a_1\cdot A_1}\cdot\left(1 - n\cdot\frac{I_2}{I_{y_ef}}\right) = 6.022\cdot MPa$

Verificação: $\frac{N_d}{A_{liqc}} + \frac{M_d\cdot b_1}{I_{y_ef}\cdot 2} + \frac{M_d}{2\cdot a_1\cdot A_1}\cdot\left(1 - n\cdot\frac{I_2}{I_{y_ef}}\right) = 9.316\cdot MPa$

Fórmula da iteração: $\frac{\frac{N_d}{A_{liqc}} + \frac{M_d\cdot b_1}{I_{y_ef}\cdot 2} + \frac{M_d}{2\cdot a_1\cdot A_1}\cdot\left(1 - n\cdot\frac{I_2}{I_{y_ef}}\right)}{f_{c0d}} = 0.227 \quad < 1$

Verificação da estabilidade local dos trechos de comprimentos L_1:

$9\cdot b_1 = 6.597\cdot cm$ $\quad L_1 := \frac{L_0}{m_p} = 32.8\cdot cm$ $\quad 18\cdot b_1 = 13.194\cdot cm$

Apesar da condição $L_1 < 18.b_1$ não ter sido atendida, resolveu-se por continuar com a mesma configuração das barras das treliças por questões construtivas e limitação de material (bambu).

Verificação dos espaçadores e des suas ligações:

Distância mínima entre parafuso e a extremidade do espaçador: $7 \cdot d_b = 4.074 \cdot cm$

Logo, adotou-se espaçadores com comprimento de 10 cm.

$\lambda_{ef} := \lambda_y = 129.616$

Esforço cortante a ser resistido na seção transversal da peça:

$$V_d := \frac{N_d \cdot \lambda_{ef}}{40} \cdot e_{1_ef} \cdot \frac{N_{cr}}{N_{cr} - N_d} \cdot \frac{\pi}{L_0} = 0.07 \cdot kN \qquad F_{sd} := \frac{V_d \cdot L_1}{2a_1} = 1.454 \cdot kN$$

Cálculo da ligação do espaçador interposto:

$t_e := b_1 = 7.33 \cdot mm$

$$\beta := \frac{t_e}{d_b} = 1.259 \qquad \beta_{lim} := 1.25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{c0d}}} = 4.708$$

Embutimento no BLC: $$R_{vd1} := 0.40 \cdot \frac{t_e^{\,2}}{\beta} \cdot f_{c0d} = 0.7 \cdot kN$$

Número de parafusos: $$n_p := \frac{F_{sd}}{2R_{vd1}} = 1.0$$

B.4 Verificação das peças tracionadas

B.4.1 Banzo tracionado (barras 1 e 3)

Esforço normal de tração majorado: $N_d := 2.02kN$

Área da seção transversal líquida: $A_{liq} := 14.11mm \cdot \left(28.93mm - d_b\right) = 3.261 \cdot cm^2$

2 (DUAS) BARRAS

Tensão de tração devida à força normal, na região nodal: $$\sigma_{tdcn} := \frac{N_d}{A_{liq}} = 6.195 \cdot MPa$$

Resistência à tração de projeto na reigião nodal: $f_{t0dcn} := K_{mod}\cdot\frac{\left(1 - 1.645\cdot\delta_{tcn}\right)\cdot f_{t0cn}}{\gamma_{wt}} = 26.187\cdot MPa$

Fórmula da iteração (tração na área bruta nodal): $\frac{\sigma_{tdcn}}{f_{t0dcn}} = 0.237$ < 1

Verificação da Esbeltez máxima:

$a_{min} := \min(14.11mm, 28.93mm) = 14.11\cdot mm$

$L := 1.25m$

$\frac{L}{50\cdot a_{min}} = 1.772$

Por economia de material se continuou com duas barras.

B.4.2 Pendural tracionado (barra 7)

Esforço normal de tração majorado: $N_d := 0.43kN$

Área da seção transversal líquida: $A_{liq} := 7.13mm\cdot\left(29.96mm - d_b\right) = 1.721\cdot cm^2$

1 (UMA) BARRA

Tensão de tração devida à força normal na região nodal: $\sigma_{tdcn} := \frac{N_d}{A_{liq}} = 2.498\cdot MPa$

Fórmula da iteração (tração na área bruta nodal): $\frac{\sigma_{tdcn}}{f_{t0dcn}} = 0.095$ < 1

$a_{min} := \min(7.13mm, 29.96mm) = 7.13\cdot mm$

$L_0 := 40cm$

$\frac{L_0}{50\cdot a_{min}} = 1.122$ Por economia de material, ainda utilizou-se uma barra.

B.5 Dimensionamento das ligações

B.5.1 Ligações inferior central e lateral da barra horizontal

B.5.1.1 Verficação da barra de bambu

Resistência ao cisalhamento de projeto na ligação de projeto: $f_{ved2} := K_{mod} \cdot \frac{\left(1 - 1.645 \cdot \delta_{ve2}\right) \cdot f_{ve2}}{\gamma_{wc}} = 2.258 \cdot MPa$

Esforço normal majorado: $P_d := 2.02kN$

Comprimento de bambu na ligação: $c := Ceil\left(\frac{P_d}{f_{ved2} \cdot 2(14.11mm)}, 1cm\right) = 4 \cdot cm$

Espessurra da ligação (corte duplo): $t_l := \frac{14.11mm}{2} = 7.055 \cdot mm$

$\beta := \frac{t_l}{d_b} = 1.212$ $\quad$ $\beta_{lim} := 1.25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{c0d}}} = 4.708$

Embutimento no BLC: $R_{vd1} := 0.40 \cdot \frac{t_l^2}{\beta} \cdot f_{c0d} = 0.674 \cdot kN$

Número de parafusos: $n_p := \frac{P_d}{2R_{vd1}} = 1.5$

$\frac{t_l}{d_b} = 1.212$ Não foi obdecida a condição de t>=2d_b devido a grandeza das dimensões, pois a treliça ensaiada foi um modelo reduzido.

Espaçamento mínimo entre parafusos: $6 \cdot d_b = 3.492 \cdot cm$

Espaçamento mínimo entre parafuso e borda da peça: $7 \cdot d_b = 4.074 \cdot cm$

B.5.1.2 Verificação da tração na chapa de aço

Área bruta da secão da chapa: $A_g := 2t_a \cdot b = 0.672 \cdot cm^2$

Escoamento da seção bruta: $N_{tRde} := \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 20.16 \cdot kN$

Área efetiva da secão da chapa: $A_e := 2t_a \cdot \left(b - d_b\right) = 0.532 \cdot cm^2$

Ruptura da seção líquida: $N_{tRdr} := \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 17.744 \cdot kN$

Fórmula da iteração: $\frac{P_d}{\min\left(N_{tRde}, N_{tRdr}\right)} = 0.114$

B.5.1.3 Verificação da pressão de contato na chapa

Distância entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre: $l_f := 1cm$

Pressão de apoio (contato conector-chapa): $F_{cRdp} := \frac{1.2 \cdot l_f \cdot t_a \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 4.8 \cdot kN$

Rasgamento: $F_{cRdr} := \frac{2.4 \cdot d_b \cdot t_a \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 5.587 \cdot kN$

Fórmula da iteração: $\frac{P_d}{\min\left(2F_{cRdp}, 2F_{cRdr}\right)} = 0.21$

B.5.1.4 Verificação do cisalhamento da seção transversal do parafuso

Força de cisalhamento resistente de cálculo: $F_{vRd} := \frac{\left(0.7 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^{\,2}}{4}\right) \cdot \left(0.6 \cdot f_{ub}\right)}{\gamma_{a2}} = 6.621 \cdot kN$

Fórmula da iteração: $n_p := \frac{P_d}{2F_{vRd}} = 0.153$

2 ϕ 5.8 mm

B.5.2 Ligações inferior e superior centrais da barra vertical (barra 7)

B.5.2.1 Verficação da barra de bambu

Esforço normal majorado: $P_d := 0.43kN$

Comprimento de bambu na ligação: $c := Ceil\left(\frac{P_d}{f_{ved2}\cdot 2\cdot(14.11mm)}, 1cm\right) = 1\cdot cm$

Espessurra da ligação (corte duplo): $t_l := \frac{7.13mm}{2} = 3.565\cdot mm$

$\beta := \frac{t_l}{d_b} = 0.613$ $\beta_{lim} := 1.25\cdot\sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{c0d}}} = 4.708$

Embutimento no BLC: $R_{vd1} := 0.40\cdot\frac{t_l^2}{\beta}\cdot f_{c0d} = 0.34\cdot kN$

Número de parafusos: $n_p := \frac{P_d}{2R_{vd1}} = 0.632$

$\frac{t_l}{d_b} = 0.613$ Não foi obdecida a condição de t>=2d, devido a de grandeza das dimensões (treliça em modelo reduzido).

Espaçamento entre parafusos: $6\cdot d_b = 3.492\cdot cm$

Espaçamento entre parafuso e borda da peça: $7\cdot d_b = 4.074\cdot cm$

B.5.2.2 Verificação da tração na chapa

Área bruta da secão da chapa: $A_g := 2t_a\cdot b = 0.672\cdot cm^2$

Escoamento da seção bruta: $N_{tRdg} := \frac{A_g\cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 20.16\cdot kN$

Área efetiva da secão da chapa: $A_e := 2t_a\cdot\left(b - d_b\right) = 0.532\cdot cm^2$

Ruptura da seção líquida: $N_{tRdr} := \frac{A_e\cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 17.744\cdot kN$

Fórmula da iteração: $\frac{P_d}{\min\left(N_{tRde}, N_{tRdr}\right)} = 0.024$

B.5.2.3 Verificação da pressão de contato na chapa

Distância entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre: $l_f := 1\,cm$

Pressão de apoio (contato conector-chapa): $F_{cRdp} := \frac{1.2 \cdot l_f \cdot t_a \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 4.8 \cdot kN$

Rasgamento: $F_{cRdr} := \frac{2.4 \cdot d_b \cdot t_a \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 5.587 \cdot kN$

Fórmula da iteração: $\frac{P_d}{\min\left(2 \cdot F_{cRdp}, 2 \cdot F_{cRdr}\right)} = 0.045$

B.5.2.4 Verificação do cisalhamento no parafuso

Força de cisalhamento resistente de cálculo: $F_{vRd} := \frac{\left(0.7 \cdot \frac{\pi \cdot d_b^{\,2}}{4}\right) \cdot \left(0.6 \cdot f_{ub}\right)}{\gamma_{a2}} = 6.621 \cdot kN$

Fórmula da iteração: $n_p := \frac{P_d}{2F_{vRd}} = 0.032$

1 ϕ 5.8 mm