



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Alexandre Oliveira Vitor

**Guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu**

Florianópolis  
2023

Alexandre Oliveira Vitor

**Guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Poliana Dias de Moraes, Dra.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vitor, Alexandre Oliveira

Guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu / Alexandre Oliveira Vitor ; orientadora, Poliana Dias de Moraes, 2023.

117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Bambu. 3. Estruturas em bambu. 4. Manual de projeto e construção. 5. Cálculo estrutural. I. Moraes, Poliana Dias de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Alexandre Oliveira Vitor

**Guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.a Andrea Salomé Jaramillo Benavides, Dr.  
Universidad Regional Amazónica Ikiam (Equador)

Prof.a Juliana Cortez Barbosa Dr.  
Universidade Estadual Paulista

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Poliana Dias de Moraes, Dr.  
Orientadora

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado à minha querida família.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo incentivo e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Civil.

A todos que, de certo modo, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Poliana Dias de Moraes pela orientação deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos do discente.

À CAPES pelo financiamento do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A seleção dos materiais de construção possui peso expressivo sobre o impacto ambiental de um empreendimento, tornando a busca por materiais mais ecológicos, tal como o bambu, ponto crucial para o desenvolvimento sustentável de uma nação. Atrelado à vasta extensão de terras brasileiras aptas ao plantio de espécies com potencial estrutural, o bambu mostra-se como uma opção ambientalmente amigável, socialmente justa e economicamente viável para o setor da construção, gerando renda e novos empregos por meio da inovação em infraestrutura e das oportunidades oriundas da ampliação de sua cadeia produtiva no país. No ano de 2020 foi publicada a primeira versão da norma brasileira de estruturas em bambu, a NBR 16828, representando um grande impulso à consolidação deste como material construtivo aceito no mercado brasileiro. Dado o grande número de produções científicas sobre a matéria-prima bambu e a escassez de compilações literárias na língua portuguesa sobre sua correta utilização na construção civil, o objetivo desta pesquisa é a elaboração de um guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu que facilite o acesso à informação sobre o uso correto do bambu como material de construção. A partir de uma ampla pesquisa bibliográfica sobre o tema, o guia sintetiza, em um único volume, informações técnico-científicas e conhecimentos práticos sobre o preparo, o projeto e a utilização de varas roliças de bambu, assim como apresenta as propriedades físico-mecânicas para parte das espécies comumente utilizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil e os princípios básicos de dimensionamento de elementos de bambu propostos pelas normativas colombiana (NSR-10), peruana (NTE.100), equatoriana (NEC *GaK*) e brasileira (NBR 16828). O guia está organizado em tópicos que abordam: as características fisiológicas da planta; as etapas do beneficiamento de colmos de bambu para uso estrutural (manejo, colheita, tratamento preservativo, secagem e estocagem); as normativas e padronizações específicas para construção; as propriedades físicas e mecânicas dos bambus; os elementos estruturais e sistemas construtivos em bambu; as noções básicas para o projeto de estruturas em bambu e; a verificação de segurança de elementos estruturais em bambu conforme o tipo de solicitação mecânica. Como resultado obteve-se um guia com linguagem visual padronizada e com sequenciamento de leitura que facilita a assimilação do conhecimento por arquitetos e engenheiros, assim como a análise comparativa entre as principais normativas utilizadas na América do Sul para estruturas em bambu. Concluindo que: o tratamento eficaz mais prático, de baixo custo e baixa toxicidade é o de imersão em sais de boro; os ensaios para determinação das propriedades físico-mecânicas dos bambus devem ser realizados segundo padronizações internacionais para melhor comparação entre os resultados obtidos para cada espécie; mesmo após a atualização da ISO 22157, ainda não existe um método de teste padronizado para a determinação da resistência ao esmagamento perpendicular às fibras; é necessário o desenvolvimento de pesquisas que investiguem a solidariedade entre os elementos de uma peça composta, experimentando os possíveis tipos de elementos de ligação utilizados para uni-las; mesmo que recente, a norma brasileira NBR 16828 representa um grande passo para o desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu no Brasil.

**Palavras-chave:** Bambu. Manual. Construção. Projeto. Estruturas em bambu. Cálculo estrutural.

## ABSTRACT

The selection on construction materials has a significant weight on the environmental impact of an enterprise, making the search for more ecological materials, such as bamboo, a crucial point for the sustainable development of a nation. Linked to the vast expanse of Brazilian land suitable for planting species with structural potential, bamboo is an environmental friendly, socially fair and economically viable option for the construction sector, generating income and new jobs through innovation in infrastructure and opportunities from the expansion of its production chain in the country. In 2020, the first version of the Brazilian standard for bamboo structures, NBR 16828, was published, representing a great boost to the consolidation of this as a constructive material accepted in the Brazilian market. Given the large number of scientific productions about bamboo and the scarcity of literary compilations in Portuguese about its correct use in civil construction, the objective of this research is to develop a guide for the design and construction of structural elements in bamboo that facilitate access to information about the correct use of bamboo as a building material. Based on an extensive bibliographic research on the subject, the guide synthesizes, in a single volume, technical-scientific information and practical knowledge about the preparation, design and use of bamboo culms, as well as presenting the physical-mechanical properties for part of the species commonly used in the national territory and basic principles of designing bamboo elements proposed by the Colombian (NSR-10), Peruvian (NTE.100), Ecuadorian (NEC *GaK*) and Brazilian (NBR 16828) regulations. The guide is organized into topics that cover: the physiological characteristics of the plant; the stages of processing bamboo culms for structural use (management, harvesting, preservative treatment, drying and storage); the specific norms and standards for construction; the physical and mechanical properties of bamboos; the structural elements and constructive systems in bamboo; the basics for designing bamboo structures and; the safety verification of bamboo structural elements according to the type of mechanical stress. As a result, we obtained a guide with standardized visual language and reading sequencing that facilitates the assimilation of knowledge by architects and engineers, as well as a comparative analysis between the main regulations used in South America for bamboo structures. Concluding that: the most practical, low cost and low toxicity effective treatment is the immersion in boron salts; the tests to determine the physical-mechanical properties of the bamboos must be carried out according to international standards for a better comparison between the results obtained for each species; even after the ISO 22157 update, there is still no standardized test method for determining the crush strength perpendicular to the bamboo fibers; it is necessary to develop research that investigates the solidarity between the elements of a composite piece, experimenting the possible types of connecting elements used to unite them; although recent, the Brazilian standard NBR 16828 represents a great step towards the development of the bamboo production chain in Brazil.

**Keywords:** Bamboo. Design and construction guide. Bamboo structures. Structural calculation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Morfologia de um colmo de bambu .....	24
Figura 2 – Estrutura subterrânea básica de uma planta de bambu.....	25
Figura 3 – Estrutura interna da parede dos colmos de bambu. (a) Seção transversal do colmo; (b) Faixa da seção transversal da parede. ....	26
Figura 4 – Demarcação da idade de cada colmo de bambu utilizando números.....	29
Figura 5 – Cortes do colmo de bambu.....	30
Figura 6 – Tratamento preservativo do bambu com sais de boro.....	33
Figura 7 – Secagem e estocagem do material .....	35
Figura 8 – Exemplificação para os tipos de pilares mencionados. ....	47
Figura 9 – Arranjo da ligação entre pilares compostos por quatro colmos. ....	48
Figura 10 – Exemplos de tipos de vigas de bambu variando em função do arranjo estrutural.	49
Figura 11 – Treliças bidimensionais.....	50
Figura 12 – Detalhe da ligação entre as peças da treliça. ....	51
Figura 13 – Pórticos simples variando em função do arranjo estrutural. ....	51
Figura 14 – Pórticos com contraventamento lateral variando em função do arranjo estrutural. ....	52
Figura 15 – Pórtico com treliça. ....	53
Figura 16 – Grelha encaixada sobre pilares compostos. ....	53
Figura 17 – Projeto de uma passarela coberta em estrutura de bambu.....	54
Figura 18 – Bambus secando no gabarito para configurarem formato arqueado.....	55
Figura 19 – Cortes em “V” para arquear o colmo. ....	55
Figura 20 – Modelo virtual da ponte em bambu em Guanezhoua, China. ....	56
Figura 21 – Construção de uma parabolóide hiperbólica (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC). ....	57
Figura 22 – Construção da estrutura de uma tenda yurt (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC). ....	58
Figura 23 – Construção da torre paramétrica (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC). ....	59
Figura 24 – Processo de ripar um colmo de bambu. ....	60
Figura 25 – Alternativa industrial para o processo de ripar um colmo de bambu.....	60
Figura 26 – Processos para planificar um colmo de bambu de forma integral. ....	61
Figura 27 – Protótipo experimental em bambu da UFSC. ....	62
Figura 28 – Forro feito com <i>esterillas</i> de bambu fixas perpendicularmente sobre os caibros .	63

Figura 29 – Fixação do corte boca de peixe a outro elemento perpendicular por meio de barras rosqueadas. ....	65
Figura 30 – Fixação do corte bico de flauta a outro elemento estrutural por meio de barra rosqueada. ....	66
Figura 31 – Fixação de elementos cruzados em diferentes planos por meio de elementos metálicos. ....	66
Figura 32 – Uniões longitudinais conforme tipo de ligação. ....	67
Figura 33 – Fixação de peças compostas. ....	68
Figura 33 – Distanciamentos mínimos para a união entre fundação e pilar. ....	68
Figura 30 – Principais tipos de corte para unir peças inclinadas. ....	69
Figura 35 – Seção transversal do bambu: diâmetro (D) e espessura (t). ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre bambus e árvores (madeira).....	23
Tabela 2 – Normativas e padronizações para projeto estrutural e construção com bambu.....	38
Tabela 3 – Valores de densidade para as principais espécies utilizadas para construção de estruturas de bambu no Brasil segundo diferentes autores.....	40
Tabela 4 – Fator anisotrópico conforme a espécie. ....	42
Tabela 5 – Valores do módulo de elasticidade conforme a espécie e segundo diferentes autores. ....	43
Tabela 6 – Valores característicos de resistência mecânica conforme a espécie, local de plantio e metodologia aplicada segundo diferentes autores. ....	45
Tabela 7 – Recomendações das normas ISO 22156, NSR-10, NTE.100, IS 15912 e NEC-GaK para proteção do bambu no projeto. ....	74
Tabela 8 – Resumo de cálculo para o momento de inércia de peças compostas por mais de um colmo de bambu conforme função estrutural e normativa referente. ....	78
Tabela 9 – Valor do módulo de seção para dois possíveis arranjos de viga composta. ....	81
Tabela 10 – Fatores de redução conforme o tipo de solicitação i.....	84
Tabela 11 – Resistências características ( $f_i$ ) e Módulos de elasticidade ( $E_{i,}$ ) conforme a nacionalidade da norma. ....	85
Tabela 12 – Coeficientes de modificação respectivos às normativas NSR-10, NEC GaK, NTE.100 e NBR-16828 .....	86
Tabela 13 – Determinação das propriedades mecânicas de cálculo.....	87
Tabela 16 – Critério de dimensionamento à flexão de elementos em bambu. ....	89
Tabela 17 – Valor do coeficiente de modificação por estabilidade lateral ( $C_L$ ou $k_{mod4}$ ).....	90
Tabela 18 – Recomendações para proporcionar maior estabilidade lateral às peças compostas. ....	90
Tabela 15 – Valores descritivos do vão teórico (L).....	91
Tabela 14 – Deslocamentos máximos em função do vão teórico e das condições de serviço. ....	92
Tabela 19 – Critérios de dimensionamento ao cisalhamento na flexão. ....	93
Tabela 20 – Critérios de dimensionamento ao esmagamento do entrenó do bambu. ....	94
Tabela 21 – Coeficiente de redução a ser adotado caso o preenchimento do entrenó sobrecarregado não seja realizado .....	95
Tabela 22 – Coeficiente de comprimento efetivo conforme o tipo de vinculação. ....	96
Tabela 23 – Classificação dos elementos comprimidos axialmente segundo à esbeltez.....	97

Tabela 24 – Resumo de cálculo para a verificação da segurança à compressão axial para cada tipo de elemento. ....	98
Tabela 25 – Cálculo da excentricidade total segundo a norma brasileira NBR-16828.....	100
Tabela 26 – Levantamento de dados: espécies de bambu comercializadas no Brasil.....	109
Tabela 27 – Coeficientes de modificação por tipo de carregamento ( $C_D$ ) .....	111
Tabela 28 – Coeficientes de modificação por umidade relativa do ambiente ( $C_m$ ).....	111
Tabela 29 – Coeficientes de modificação por temperatura ( $C_t$ ) .....	112
Tabela 30 – Coeficiente de modificação por redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$ )..	112
Tabela 31 – Coeficiente de modificação por efeito cortante ( $C_c$ ) .....	112
Tabela 32 – Coeficientes de modificação por tipo de carregamento ( $C_D$ ) .....	112
Tabela 33 – Coeficiente de modificação por redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$ )..	113
Tabela 34 – Coeficiente de modificação conforme o tipo de carregamento ( $k_{mod,1}$ ).....	113
Tabela 35 – Coeficiente de modificação conforme o a umidade relativa do ambiente ( $k_{mod,2}$ ) .....	113
Tabela 36 – Coeficiente de modificação conforme a qualidade do colmo ( $k_{mod,3}$ ).....	113
Tabela 37 – Coeficientes de minoração das resistências características do bambu, $\gamma_m$ .....	114
Tabela 38 – Coeficientes de comprimento de flambagem para diferentes tipos de vinculação. .....	115

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIS Bureau of Indian Standards

BLC Bambu Laminado Colado

EPS Poliestireno Expandido

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEA Instituto de Pesquisa e Economia Aplicada

RCD Resíduos da Construção e Demolição

INBAR International Network for Bamboo and Rattan

ICG Instituto de la Construcción y Gerencia

ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO International Organization for Standardization

PSF Ponto de Saturação das Fibras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>18</b>
1.2	DELIMITAÇÕES .....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
<b>2</b>	<b>O BAMBU COMO MATERIAL CONSTRUTIVO .....</b>	<b>21</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DA PLANTA .....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Estrutura macroscópica do bambu .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Estrutura microscópica do colmo de bambu .....</b>	<b>26</b>
2.2	BENEFICIAMENTO DE COLMOS DE BAMBU PARA USO ESTRUTURAL ..	27
<b>2.2.1</b>	<b>Manejo e colheita .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Tratamento preservativo dos colmos de bambu .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Secagem e estocagem .....</b>	<b>35</b>
2.3	REFERÊNCIAS NORMATIVAS PARA O USO DE COLMOS DE BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	36
<b>3</b>	<b>PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS BAMBUS.....</b>	<b>39</b>
3.1	DENSIDADE.....	39
3.2	TEOR DE UMIDADE .....	40
3.3	VARIAÇÃO DIMENSIONAL (RETRABILIDADE).....	41
3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	43
3.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BAMBUS .....	44
<b>4</b>	<b>ELEMENTOS ESTRUTURAIS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM BAMBU .....</b>	<b>47</b>
4.1	PILARES .....	47
4.2	VIGAS .....	48

4.3	TRELIÇAS .....	50
4.4	PÓRTICOS .....	51
4.5	GRELHAS .....	53
4.6	ARCOS .....	54
4.7	PONTES .....	56
4.8	ESTRUTURAS PARAMÉTRICAS EM BAMBU .....	56
<b>4.8.1</b>	<b>Estrutura parabolóide hiperbólica .....</b>	<b>57</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Tenda <i>Yurt</i> .....</b>	<b>58</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Torre paramétrica.....</b>	<b>58</b>
4.9	PAREDES, PISOS E FORROS .....	59
4.10	CONEXÕES ENTRE PEÇAS DE BAMBUS.....	63
<b>4.10.1</b>	<b>Elementos de ligação.....</b>	<b>64</b>
<b>4.10.2</b>	<b>Perfurações e preenchimento de entrenós .....</b>	<b>64</b>
<b>4.10.3</b>	<b>Tipos de ligação .....</b>	<b>65</b>
<b>4.10.4</b>	<b>Tipos de corte .....</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>NOÇÕES BÁSICAS PARA O PROJETO DE ESTRUTURAS EM BAMBU</b>	<b>71</b>
5.1	PRINCÍPIOS PARA A CONCEPÇÃO DE PROJETOS EM BAMBU.....	71
5.2	RECEBIMENTO DO MATERIAL.....	72
5.3	DURABILIDADE E MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE UMA EDIFICAÇÃO EM BAMBU .....	72
<b>5.3.1</b>	<b>Fatores arquitetônicos que influenciam a durabilidade da edificação .....</b>	<b>73</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Recomendações normativas .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Manutenção preventiva da edificação.....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM BAMBU .....</b>	<b>76</b>
6.1	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS .....	76
<b>6.1.1</b>	<b>Área da seção transversal.....</b>	<b>76</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Momento de inércia .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Raio de giração.....</b>	<b>80</b>

6.1.4	<b>Momento resistente da seção transversal ou módulo de seção .....</b>	<b>80</b>
6.2	<b>VALORES CARACTERÍSTICOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....</b>	<b>82</b>
6.3	<b>VALORES DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....</b>	<b>85</b>
6.4	<b>DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....</b>	<b>87</b>
6.4.1	<b>Verificação da segurança à flexão .....</b>	<b>87</b>
6.4.2	<b>Verificação do deslocamento máximo .....</b>	<b>91</b>
6.4.3	<b>Verificação da resistência ao cisalhamento .....</b>	<b>93</b>
6.4.4	<b>Verificação da resistência ao esmagamento perpendicular às fibras.....</b>	<b>94</b>
6.4.5	<b>Verificação da segurança à tração.....</b>	<b>95</b>
6.4.6	<b>Verificação da segurança à compressão axial .....</b>	<b>96</b>
6.4.7	<b>Verificação da segurança de elementos à flexo-compressão .....</b>	<b>99</b>
6.4.8	<b>Verificação da segurança de elementos à flexo-tração .....</b>	<b>101</b>
7	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A – Levantamento de dados: espécies de bambu comercializadas no Brasil .....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE B – Coeficientes de modificação.....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE C – Coeficiente de comprimento de flambagem para diferentes tipos de vinculação .....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A escolha dos materiais de construção possui peso expressivo sobre o impacto ambiental de um empreendimento, causando interferência no meio ambiente desde a extração dos recursos naturais, processamento da matéria-prima, transformação e incorporação como produto, até seu descarte sob forma de resíduo. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), o setor de edificações foi responsável em 2010 por 32% do uso final de energia e pela emissão de 8,8 Gt de CO<sub>2</sub> (principal gás do efeito estufa), o que representa 18,4% das emissões globais. No que se diz respeito aos resíduos da construção e demolição (RCD), segundo o Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil (INSTITUTO DE PESQUISA E ECONOMIA APLICADA, 2012), estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção.

Em contrapartida à ampla movimentação socioeconômica pela qual o setor da construção civil é responsável, direta e indiretamente, o mesmo não pode ser considerado plenamente sustentável pois, de acordo com John Elkington (1998), para que o setor seja sustentável deve-se respeitar os três pilares do modelo *Triple Bottom Line*: o econômico, o social e o ambiental. Assim sendo, o uso de materiais mais ecológicos, tal como o bambu, pode e deve ser incorporado à construção civil, pois este material além de possuir excelentes propriedades mecânicas (JANSSEN, 2000; HIDALGO-LÓPEZ, 2003), propriedades físicas únicas (JANSSEN, 1995) e elevada durabilidade quando corretamente preparado e incorporado à construção (UBIDIA, 2016), trata-se de uma matéria-prima biodegradável com alta taxa de renovação e de cultura perene (LIESE, 1985).

O bambu é uma planta com valor de conservação ambiental capaz de mitigar o fenômeno resultante das mudanças climáticas globais, sendo uma boa maneira para reduzir os impactos do aquecimento global (BAHTIAR *et al.*, 2012; CLARK *et al.*, 2015;). Com um bom plano de manejo, os bambuzais podem ser explorados anualmente sem a necessidade de replantio, gerando florestas e reduzindo a pegada ambiental da atividade madeireira. Ambientalmente amigável, o bambu é capaz de atender a diversos setores para além da construção civil, como por exemplo a indústria química, a produção de fibras e de celulose, a fabricação de carvão, a alimentação humana, dentre outros. O bambu também representa um valioso ativo social e econômico, por proporcionar geração de emprego e renda através dos adventos de sua cadeia produtiva (VITOR *et al.*, 2019). Em 2019, o valor global gerado pela

exportação de produtos de bambu foi de US\$ 3,054 bilhões, dois quais 67% provém exclusivamente da China (INBAR, 2021).

O uso de bambus roliços para a construção é comum em diversas regiões do mundo, onde faz parte da cultura vernacular e da tradição construtiva dos povos (BALLESTÉ, 2017). Tradicionalmente empregado na Colômbia, o gênero florestal nativo com maiores possibilidades econômicas é o bambu *Guadua*, uma vez que sua utilização como matéria-prima na construção permite reduzir custos e mitigar problemas sociais presentes na região rural do país (RODRIGUEZ, C. e MORALES, E., 2008).

Antecedendo a publicação de normas específicas sobre o bambu, foram compilados por Hidalgo-López (1981, 2003), Janssen (1981, 2000) e Ubidia (2001), os principais manuais para a correta utilização do bambu na construção. Enquanto isso no Brasil da década de 90, com o intuito de produzir matéria-prima para estudos, foi concebido o Projeto Bambu na Universidade Estadual Paulista-Unesp (PEREIRA, 2012). Segundo conteúdo disponível na plataforma *online* do Projeto Bambu, 30 espécies foram cultivadas e estudadas. (PROJETO BAMBU, s.d.).

Para explorar o potencial do bambu como elemento estrutural de alto desempenho, engenheiros, arquitetos e construtores precisam ter ciência, através de padronizações e de códigos construtivos, quanto ao seu correto emprego como material construtivo (GNANAHARAN, R. *et al.*, 1995). Segundo Janssen (2005), em busca da padronização e da aceitação do bambu como material construtivo a nível internacional, no ano de 2005 o *International Network for Bamboo and Rattan* (INBAR), em cooperação com a *International Standardization Organization* (ISO), desenvolveram e tornaram públicas as normas ISO 22156: *Bamboo – structural design* e a ISO 22157: *determination of physical and mechanical properties* (parte 1 e parte 2).

Estimulados pelo desenvolvimento e pela publicação das primeiras normas internacionais, países como China, Índia, Colômbia e Peru lideraram a criação de seus próprios códigos nacionais de construção com bambu (GATÓO *et al.* 2014). Atrelados à criação de tais normativas, foram publicados importantes manuais de construção com bambu: *Building with bamboo* (MINKE, 2012); *Manual de construcción de estructuras com bambú* (OYAGUE, 2014) e; *Construir con bambú* (UBIDIA, 2015). Em sequência, no ano de 2016, o Equador publicou seu próprio código nacional de construção com bambu.

Baseado nas normativas latinoamericanas da Colômbia (ICONTEC, 2010), Peru (ICG, 2012) e Equador (INEN, 2016), em 2020, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), representada pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil (CB-002), tornou públicas duas normas brasileiras que reúnem informações para o uso do colmo de bambu como material construtivo. A norma NBR-16828-1- Estruturas de bambu – parte 1: Projeto (ABNT, 2020a), sobre projeto e dimensionamento de estruturas de bambu e a norma NBR16828-2 – Estruturas de bambu – parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu (ABNT, 2020b), sobre métodos de ensaio para determinação de tais propriedades.

Fatores como a crescente demanda por materiais mais sustentáveis, a possibilidade de geração de renda e de novos empregos atrelados à industrialização do bambu, a vasta extensão de terras brasileiras aptas ao plantio de espécies de bambu de valor comercial (DRUMOND *et al.*, 2017) e a publicação das primeiras normas brasileiras para construção com bambu representam grande incentivo para a implementação da cadeia produtiva deste material que, em conjunto com pesquisas científicas e o desenvolvimento tecnológico na área, podem consolidar o uso do bambu como material construtivo aceito no mercado brasileiro.

As principais dificuldades em se construir estruturas em bambu no Brasil estão ligadas à insipiência de sua cadeia produtiva, com destaque para: a falta de capacitação do produtor rural quanto o manejo, o tratamento, a estocagem e a venda de varas para uso estrutural; a falta de material de qualidade em pronto estoque e; a falta de mão de obra especializada. Além destes fatores, a concepção e o desenvolvimento de construções em bambu devem seguir certas premissas básicas que visam garantir segurança, durabilidade e maior agilidade durante o ato de construir. Em função deste conjunto de fatores, as obras de bambu no Brasil requerem uma engenharia simultânea, exigindo a presença do projetista em obra para acompanhamento da execução (VITOR *et al.*, 2019) e a indicação dos procedimentos de manutenção periódica ao usuário, para garantir uma maior durabilidade a estrutura.

Para auxiliar o desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu no país, no que se diz respeito ao uso estrutural do material em seu formato natural (roliço) para construções fixas e efêmeras, surge a necessidade da elaboração de um manual que compile o estado atual da arte, em um único volume, desde os processos de beneficiamento da matéria-prima até as fases de projeto, dimensionamento e construção de estruturas em bambu.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é, a partir da revisão extensiva da literatura, elaborar um guia para o projeto e a construção de elementos estruturais em bambu com o intuito de facilitar a assimilação do conhecimento por arquitetos e engenheiros quanto ao correto preparo e incorporação do bambu como elemento estrutural para construções fixas e efêmeras.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) sintetizar em um único volume informações técnico-científicas e conhecimentos práticos sobre o uso do bambu como material construtivo;
- b) apresentar o potencial do bambu como material construtivo nos aspectos físico-mecânicos quando corretamente preparado e incorporado à construção civil;
- c) realizar levantamento bibliográfico das propriedades físicas e mecânicas das espécies *Guadua angustifolia* Kunth, *G. chacoensis*, *Phyllostachys aurea*, *P. bambusoides*, *P. edulis*, *P. nigra* var. *henonis*, *Dendrocalamus asper*, *D. latiflorus*, *Bambusa oldhamii* e *B. tuldoides*;
- d) ilustrar os sistemas construtivos nos quais o bambu é o protagonista através de linguagem visual padronizada;
- e) apresentar os princípios de dimensionamento propostos pelas normas nacionais e internacionais para a construção em bambu.

## 1.2 DELIMITAÇÕES

Nesta pesquisa, serão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas das espécies de bambu que possuem comércio e distribuição estabelecidos nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo elas: *Guadua angustifolia* Kunth, *G. chacoensis*, *Phyllostachys aurea*, *P. bambusoides*, *P. edulis*, *P. nigra* var. *henonis*, *Dendrocalamus asper*, *D. latiflorus*, *Bambusa oldhamii* e *B. tuldoides*. Em todo o trabalho, ao relatar a palavra bambu sem utilizar a classificação quanto à tribo pertencente, trata-se apenas da parcela de bambus lenhosos (tribos *Arundinarieae* e *Bambuseae*).

Serão apenas descritos e ilustrados os métodos de tratamento que utilizam sais de boro para a preservação dos colmos de bambu, devido à sua comprovada eficácia, baixo custo e por ser menos contaminantes para seus usuários do que outros produtos conservantes de madeiras e de bambus. Não serão contemplados os métodos naturais de preservação dos bambus, devido à sua ineficiência em ser utilizado em larga escala e, portanto, excluindo toda e qualquer consideração quanto à estação do ano, à fase da lua e o horário mais indicado para colheita.

Os elementos e os sistemas construtivos contemplam construções do tipo residenciais, comerciais, de infraestrutura, rurais e efêmeras, podendo conferir funcionalidade estrutural ou de vedação. Será explorado o uso do bambu em formato natural (roliço), em ripas e no formato planificado, não abordando os laminados e outros tipos de bambu industrializado.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 7 capítulos: a introdução, o bambu como material de construção, as propriedades físicas e mecânicas dos bambus, elementos e sistemas construtivos, projeto de elementos estruturais, princípios de dimensionamento e conclusões. Na introdução são apresentados o contexto, a problemática e a justificativa deste trabalho. Nos capítulos seguintes será apresentada a revisão bibliográfica, que reúne temáticas pertinentes ao reconhecimento, preparo e utilização do bambu como material construtivo de alto desempenho, finalizando a dissertação com as conclusões e as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração da mesma. O trabalho também possui 1 apêndice e 1 anexo.

Mais especificamente, o capítulo inicial de introdução apresenta o conceito da sustentabilidade associado à incorporação do bambu como material construtivo, a relevância do desenvolvimento de normativas e de códigos de construção, a fronteira do conhecimento, a problemática em projetar e construir estruturas de bambu no Brasil, as contribuições deste trabalho, as diretrizes gerais da pesquisa através dos objetivos geral e específicos e a delimitação do trabalho.

Do capítulo 2 ao 7 é apresentada e desenvolvida toda a revisão extensiva da bibliografia com o intuito de elaborar um guia para projeto e construção de elementos estruturais em bambu. Desta forma, o capítulo 2 introduz o conceito do bambu como material construtivo nos seguintes aspectos: características fisiológicas da planta; beneficiamento de colmos de bambu para uso estrutural (manejo, colheita, tratamento preservativo, secagem e estocagem) e; referências normativas para o uso de colmos de bambu na construção civil.

Em sequência, no capítulo 3, são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies de bambus utilizadas para a construção, tais como: densidade; teor de umidade; variação dimensional (retrabilidade); módulo de elasticidade e; a resistência mecânica dos bambus.

Uma vez apresentado o material bambu, o guia aborda ilustrativamente, através do capítulo 4, sistemas construtivos em bambu como pilares, vigas, treliças, pórticos, grelhas, arcos e pontes, introduz alguns tipos de estruturas paramétricas, apresenta as possibilidades de processamento de bambus para confeccionar paredes, pisos e forros, assim como as conexões comumente utilizadas para unir duas ou mais peças de bambu.

Passando para o capítulo 5, o guia apresenta os princípios básicos para concepção de projetos em bambu e os procedimentos recomendados para o recebimento do material no canteiro de obras.

Sequencialmente, no capítulo 6, são introduzidos princípios de dimensionamento segundo as principais normativas sul-americanas (Colômbia, Peru e Equador) em comparação com a mais recente norma brasileira de estruturas em bambu, a NBR-16828. Para tanto, o capítulo 6 é subdividido em tópicos que abordam as propriedades geométricas, valores característicos de propriedade mecânica, valores de cálculo de propriedade mecânica e o projeto de elementos conforme o tipo de solicitação (flexão, tração, compressão e ações conjuntas).

Finalizando o manual, por assim dizer, através das conclusões obtidas a partir deste trabalho, as quais são apresentadas no capítulo 7.

## 2 O BAMBU COMO MATERIAL CONSTRUTIVO

Taxonomicamente pertencente ao reino *Plantae* e à família *Poaceae* (angiospermas monocotiledôneas), o bambu é um representante da família das gramíneas, assim como o arroz, o trigo, o milho e a cana de açúcar, diferenciando-se das demais (subfamília *Bambusoideae*) por ser a única e a maior linhagem de gramíneas capazes de se adaptar e se diversificar dentro do habitat das florestas (JUDZIEWICZ *et al.*, 1999; CLARK *et al.*, 2015). Agrupados em três diferentes tribos, *Arundinarieae* (bambus lenhosos de clima temperado), *Bambuseae* (bambus lenhosos de clima tropical) e *Olyreare* (bambus herbáceos), os bambus são nativos em todos os continentes, com exceção da Antártica e da Europa. Possuem bom desenvolvimento entre 47° S e 50°30' N de latitude e podem se desenvolver em altitudes desde o nível do mar até os 4.300 m (CLARK *et al.*, 2015).

Existem mais de 1.600 espécies de bambu já identificadas no mundo, naturalmente distribuídas nas regiões tropicais e subtropicais (INBAR, 2019). O Brasil é o país que possui a maior diversidade de bambus das Américas, totalizando 256 espécies (subdividida em 34 gêneros), das quais 164 espécies (subdivididas em 17 gêneros) são classificadas como bambus lenhosos e os restantes como herbáceos (GRECO *et al.*, 2015).

Na construção civil, apenas uma parcela das espécies de bambus lenhosos é utilizada como material construtivo (PEREIRA E BERALDO, 2016). Muito embora a grande diversidade de espécies de bambus lenhosos, os gêneros *Guadua*, *Phyllostachys*, *Dendrocalamus* e *Bambusa* possuem a maior parcela de representantes comumente utilizados na construção de estruturas (PEREIRA, 2012). Dentre os bambus do gênero *Guadua*, naturais da região amazônica, o mais utilizado na construção é o *Guadua angustifolia* Kunth (MINKE, 2012), espécie idealizada pelas normas estruturais colombiana e equatoriana (ICONTEC, 2010; INEN, 2016).

No Brasil, segundo levantamento realizado por este pesquisador com 38 prestadores de serviços de bambu nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro (APÊNDICE A), são 10 as espécies de bambu que possuem produção e comércio estabelecidos e, portanto, mais utilizadas na construção, sendo elas: *Guadua angustifolia* Kunth, *G. chacoensis*, *Phyllostachys aurea*, *P. bambusoides*, *P. edulis*, *P. nigra* var. *henonis*, *Dendrocalamus asper*, *D. latiflorus*, *Bambusa oldhamii* e *B. tuldoides*.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DA PLANTA

Os bambus possuem alta capacidade de crescimento e ciclo anual de renovação por meio da propagação de seu sistema de rizomas e de raízes, dando origem a novos colmos. O desenvolvimento destes se divide em duas etapas: a primeira, gera brotos protegidos por folhas caulinares que se alongam até sua altura máxima, transformando-se em colmos cilíndricos geralmente ocos, a segunda, lignifica o colmo, tornando-o lenhoso, e desenvolvendo ramos com produção de folhagem (CLARK *et al.*, 2015; PEREIRA, 2012; JANSSEN, 2000).

Tratando-se de um grupo de plantas perenes, o bambuzal vive em equilíbrio com a colheita anual de varas e de brotos, sem a necessidade de replantio (PEREIRA, 2012). Cabe aqui destacar que os bambus gerados pelo bambuzal já nascem com seu diâmetro definitivo, ou seja, não possuem crescimento radial (PEREIRA, 2012; CLARK *et al.*, 2015). Sendo assim, nos anos iniciais de estabilização da planta, os novos colmos são normalmente mais grossos que os originados no ano anterior, fato que ocorre de forma contínua até atingirem as máximas dimensões da espécie (MOGNON, 2015).

Levando em consideração que os bambus lenhosos são um importante recurso não madeireiro e, com o intuito de exemplificar algumas das características únicas dos bambus, Clark *et al.* (2015) realizaram uma comparação fisiológica com as espécies arbóreas, a qual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre bambus e árvores (madeira)

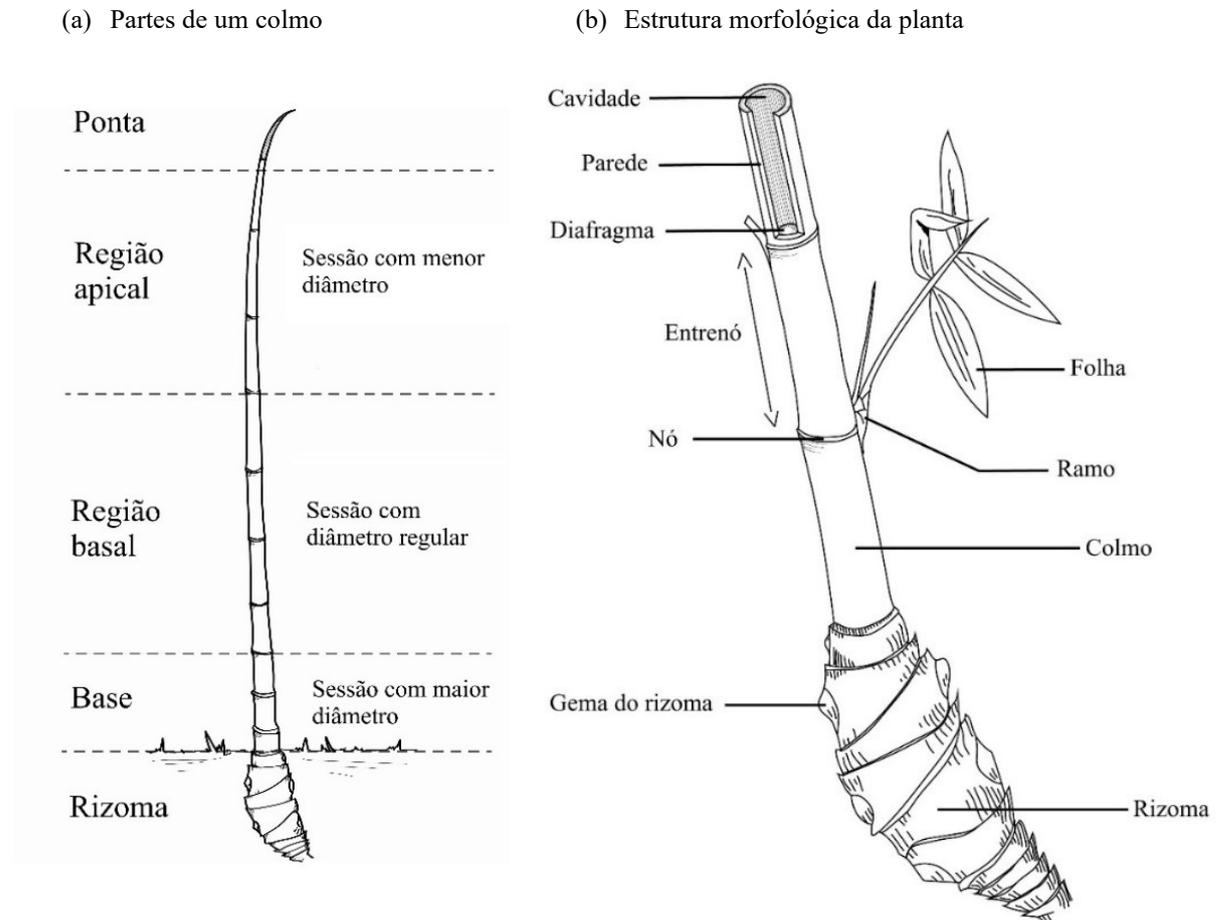
	<b>Bambus</b>	<b>Árvores (madeira)</b>
Parte subterrânea	Rizomas e raízes.	Raízes.
Caule	Colmos usualmente ocos e segmentados e sem casca.	Troncos sólidos, não segmentados e com casca.
Parte mais dura	Periferia do colmo.	Centro do tronco.
Crescimento radial	Não há câmbio vascular, então o colmo não cresce em diâmetro com a idade.	Há câmbio vascular, então o caule aumenta em diâmetro com a idade.
Velocidade de crescimento	Crescimento apenas em altura e extremamente rápido, atingindo o total da planta em apenas uma temporada de crescimento.	Crescimento lento em altura e em diâmetro, crescendo de maneira contínua por diversas temporadas.
Comunicação radial	Apenas na parte segmentada do caule.	Em todo o caule.
Tecidos condutores	Floema e xilema estão juntos dentro de cada feixe vascular.	Floema e xilema estão separados pelo câmbio vascular.
Interdependência	Os colmos de um mesmo bambuzal crescem em associação a uma rede de rizomas e, por estarem interconectados, cada colmo depende do outro. A colheita de um colmo de bambu afeta diretamente o resto da comunidade.	Normalmente, cada caule cresce como um indivíduo independente. A colheita de uma árvore não afeta diretamente o resto da comunidade.

Fonte: adaptado de Clark *et al.* (2015)

### 2.1.1 Estrutura macroscópica do bambu

A morfologia de um colmo de bambu é formada por uma série alternada de nós e de entrenós, que tendem a afunilar no sentido da base ao topo (Figura 1a). Segundo Janssen (2000), o entrenó do bambu oco possui parede e sua cavidade é separada transversalmente por diafragmas que, no exterior, apresentam-se como anéis em torno do colmo de bambu, ou seja, o nó do bambu é composto pelo diafragma interno e pelo anel externo. Devido à presença de gemas laterais nos nós dos colmos de bambu, onde há comunicação radial, ramos podem se originar e dar origem às folhas (Figura 1b).

Figura 1 – Morfologia de um colmo de bambu paquimorfo

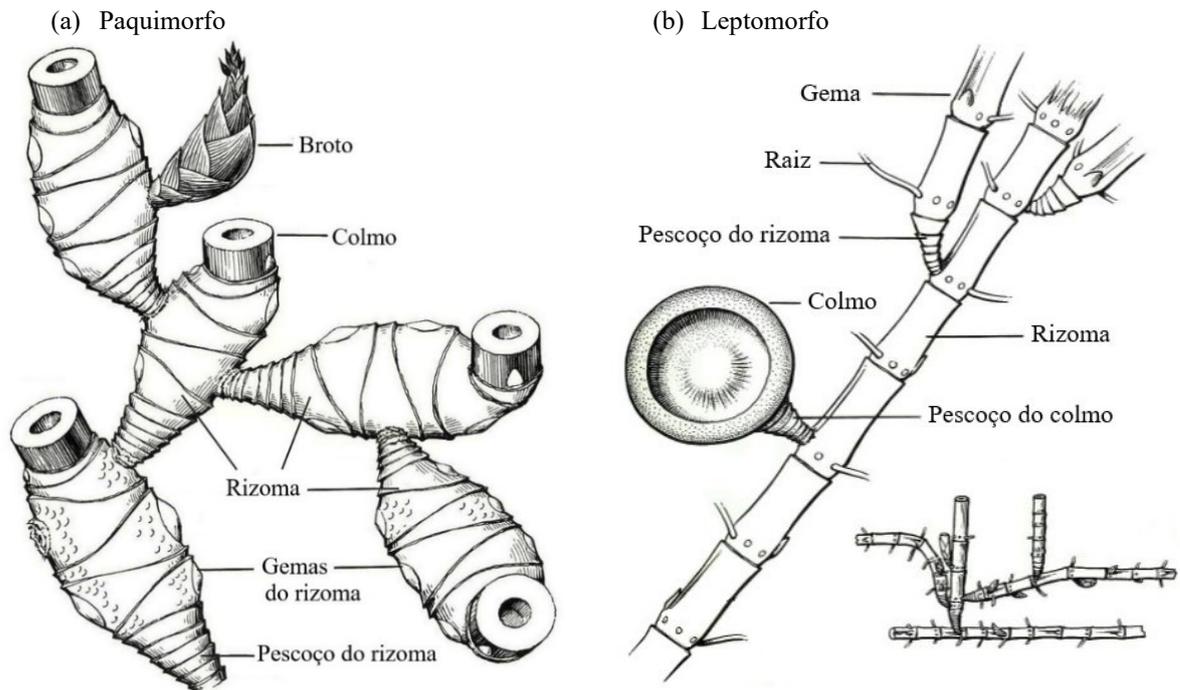


Fonte: autor

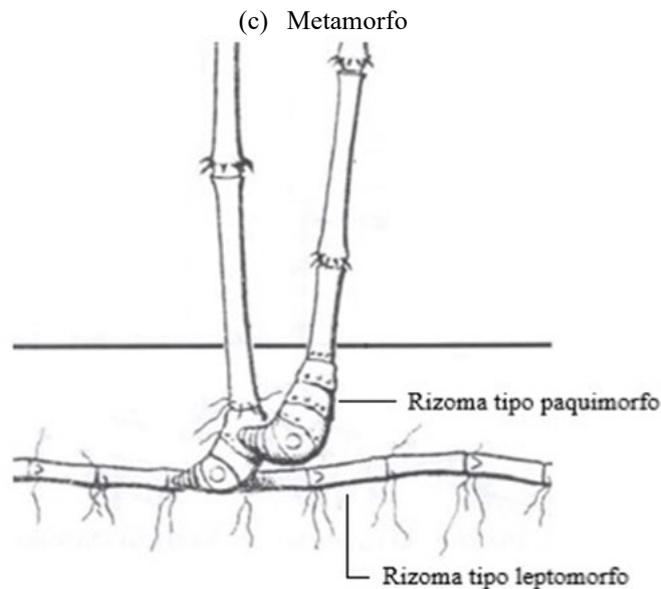
Os rizomas têm função de captar, transportar e armazenar os nutrientes para a reprodução vegetativa da planta, dando origem ao broto de bambu através de sua gema apical que, por sua vez, dá sequência ao crescimento da parte aérea da planta, transformando o broto em colmo de bambu (LIESE, 1998).

O tipo de crescimento dos bambus está diretamente ligado ao sistema subterrâneo de rizomas, o qual é subdividido em três grupos: paquimorfo, leptomorfo e metamorfo, conhecidos respectivamente como entouceirantes, alastrantes ou semi-alastrantes (LIESE, 1985). A estrutura subterrânea básica dos bambus quanto ao seu tipo de rizoma é ilustrada na Figura 2. De maneira simplificada, o tipo de crescimento dos bambus pode ser classificado em dois grupos: simpodial (que gera touceiras) ou monopodial (que se alastra).

Figura 2 – Estrutura subterrânea básica de uma planta de bambu



Fonte: Adaptado de McClure (1993).



Fonte: Adaptado de Hidalgo-López (2003).

Observa-se na Figura 2 que os colmos dos bambus do grupo paquimorfo partem do ápice da estrutura dos rizomas e possuem dimensões inferiores a estas (Figura 2a), enquanto os colmos do grupo leptomorfo partem de uma das gemas laterais e seu calibre é superior ao do rizoma (Figura 2b). Já os bambus do grupo metamorfo (Figura 2c) podem ser descritos como uma mescla entre os tipos básicos paquimorfo e leptomorfo, alastrando-se por meio de

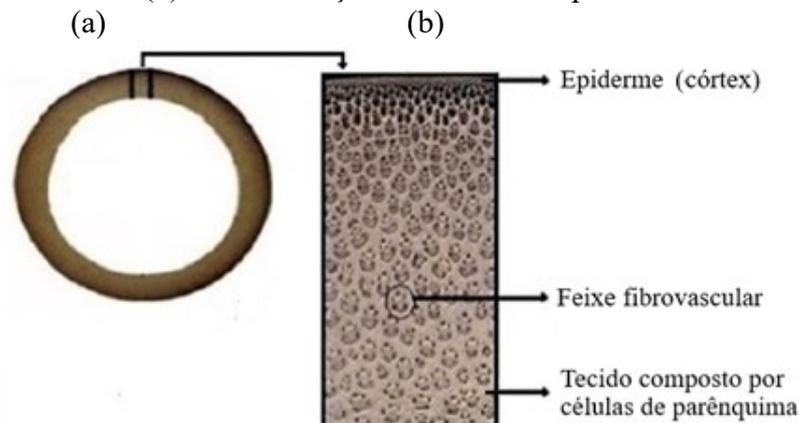
rizomas longos do tipo leptomorfo, mas que, ao invés de gerar pescoços de colmos, originam diversos bulbos interligados por pescoços de rizomas, tipo paquimorfo, gerando touceiras espaçadas (LIESE, 1998).

### 2.1.2 Estrutura microscópica do colmo de bambu

O diâmetro e a espessura da parede do colmo de bambu impactam diretamente nas propriedades mecânicas do material e, uma vez que estas medidas tendem a diminuir do sentido da base ao topo, faz-se necessário conhecer a estrutura microscópica do colmo de bambu para compreender intimamente o resultado dos ensaios mecânicos realizados com a parte basal, média e apical de um mesmo colmo de bambu.

Segundo Habibi e Lu (2014), o interior da parede dos colmos de bambu é composto por três tecidos fundamentais: a epiderme, os feixes fibrovasculares e as células de parênquima (Figura 3). A espessa epiderme trata-se da casca do bambu, os feixes fibrovasculares são componentes longitudinais que dão suporte ao bambu e as células de parênquima ocupam o resto do organismo (LO *et al.*, 2004).

Figura 3 – Estrutura interna da parede dos colmos de bambu. (a) Seção transversal do colmo; (b) Faixa da seção transversal da parede.



Fonte: Adaptado de Rusch *et al.* (2018)

A epiderme do bambu, ou córtex, consiste de duas camadas de células epidérmicas com alto conteúdo de sílica, sendo a camada externa do córtex revestida por uma camada cutinizada e com cera (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). Devido ao grande conteúdo de sílica

presente no córtex, as ferramentas de corte são desgastadas rapidamente durante o processo de colheita e de beneficiamento da matéria-prima (JANSSEN, 2000).

Na Figura 3, da face interna para a face externa da seção transversal da parede, nota-se que a concentração de feixes fibrovasculares (pontos escuros) aumenta e, por serem constituídos de vasos condutores de seiva envoltos em feixes de fibras, tornam a face externa a parcela mais densa e lignificada da planta, dificultando qualquer movimento lateral de líquidos (JANSSEN, 2000).

As fibras presentes nos feixes vasculares são responsáveis pelo reforço estrutural da planta e, devido ao seu padrão de distribuição, cuja a maior concentração está próxima à parede externa do colmo, o bambu se torna um material mais resistente à flexão. Caso a distribuição das fibras fosse dada de maneira homogênea, a planta teria menor resistência mecânica (JANSSEN, 2000). Segundo Pereira e Beraldo (2016), as propriedades mecânicas dos bambus são função da idade e da densidade do colmo e dependem, principalmente, do teor de fibras, sendo esta a principal responsável pela sua resistência.

Segundo Liese e Tang (2015), a variação dimensional do bambu no sentido da base ao topo é acompanhada pela redução do tecido composto por células de parênquima e pela pouca variação no número de feixes fibrovasculares. Em função disto, a resistência mecânica de um mesmo colmo de bambu varia de um extremo até o outro, o que proporciona dificuldades adicionais para a utilização desse material como elemento construtivo (JANSSEN, 2000; MINKE, 2012).

## 2.2 BENEFICIAMENTO DE COLMOS DE BAMBU PARA USO ESTRUTURAL

Segundo Hidalgo-Lopez (2003), assim como na madeira, as características mecânicas, físicas e anatômicas do bambu estão diretamente ligadas à espécie e às condições bioclimáticas onde ele é cultivado. Assim sendo, o controle de qualidade do material inicia-se no processo de plantio e na manutenção da planta. Para que o bambuzal atinja sua maturidade de maneira saudável e gere brotos de bambu anualmente, deve-se atentar às condições ambientais intrínsecas da região do plantio (altitude, tipo de solo, temperatura, pluviosidade, umidade relativa, irradiação solar e ventos), às questões de plantio (correção do solo, preparo da cova e coroamento) e ao manejo adequado (adubação, colheita e limpeza) (GRECO e CROMBERG, 2011; HIDALGO-LOPEZ, 2003).

Pereira e Beraldo (2008) analisaram os dados de produção e de produtividade gerados pelo acompanhamento do plantio e do desenvolvimento de touceiras de bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus* cultivadas na Unesp/Campus de Bauru, concluindo que, após o sétimo ano de plantio, o diâmetro medido à altura do peito (DAP) e a altura dos colmos mostram uma tendência à estabilização. Portanto, pode-se considerar um período médio de 7 anos para que as touceiras tenham atingido a maturidade em termos de produção e de dimensões dos colmos. Aqui vale destacar que a contagem da idade do bambuzal se inicia quando o mesmo é plantado como muda e a idade dos indivíduos gerados por ele, a partir de cada brotação. Uma vez que o colmo de bambu de uso estrutural deve ter, no mínimo, 3 anos de idade (ABNT, 2020a), estima-se que a primeira colheita de varas comerciais poderá ocorrer após 10 anos do plantio.

Por meio de observações de campo realizadas pelo autor da dissertação, conclui-se que para que uma plantação comercial de bambus se torne produtiva dentro do prazo desejado, deve-se contratar um profissional qualificado, a fim de realizar o estudo completo da região para depois, e somente depois, selecionar as espécies mais aptas, corrigir o solo caso for necessário, acompanhar o plantio e indicar o regime de manejo e adubação mais adequados para cada ocasião.

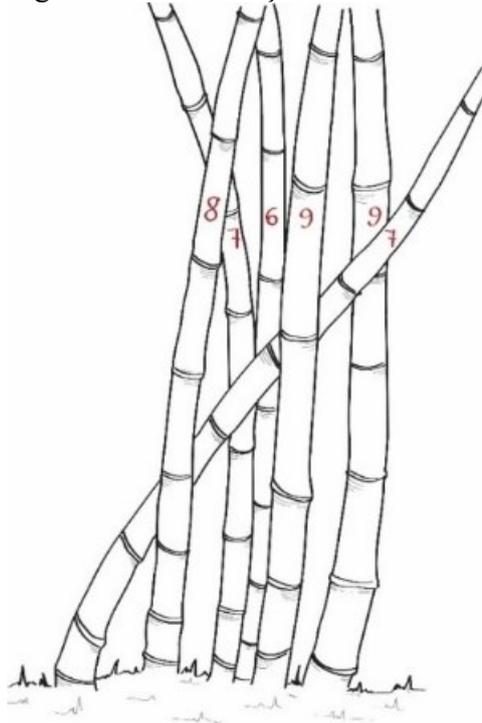
Para elevar a confiabilidade do bambu, transformando-o em mais um material de construção aceito pelo mercado, deve-se garantir sua durabilidade através de bons procedimentos de seleção dos colmos, tratamento, secagem, utilização e manutenção (MINKE, 2000).

### **2.2.1 Manejo e colheita**

O manejo e a colheita do bambu estão diretamente ligados ao seu uso. Devido à baixa resistência mecânica de um colmo de bambu durante seus primeiros anos de permanência no bambuzal, o uso de varas de bambu na construção civil somente poderá ser aceito para peças maduras (HIDALGO-LOPEZ, 2003). Segundo às normas colombiana NSR-10 (ICONTEC, 2010), peruana NTE.100 (ICG, 2012) e equatoriana NEC *GaK* (INEN, 2016) de construção em bambu, o colmo maduro para uso estrutural deve ter entre 4 e 6 anos de idade, enquanto a norma brasileira NBR 16828-1 (ABNT, 2020a) especifica que deve ter entre 3 e 7 anos.

O método mais seguro para saber a idade de cada colmo de bambu presente em uma touceira consiste em marcar os novos indivíduos após atingirem sua altura total. Isto ocorre, aproximadamente, 6 meses após o término do período da brotação (UBIDIA, 2015). Sugere-se que a demarcação da idade seja feita utilizando valores numéricos que referenciem o ano de brotação de cada colmo (Figura 4).

Figura 4 – Demarcação da idade de cada colmo de bambu utilizando números.



Legenda:

- 6 – Brotação de 2016
- 7 – Brotação de 2017
- 8 – Brotação de 2018
- 9 – Brotação de 2019

Fonte: autor

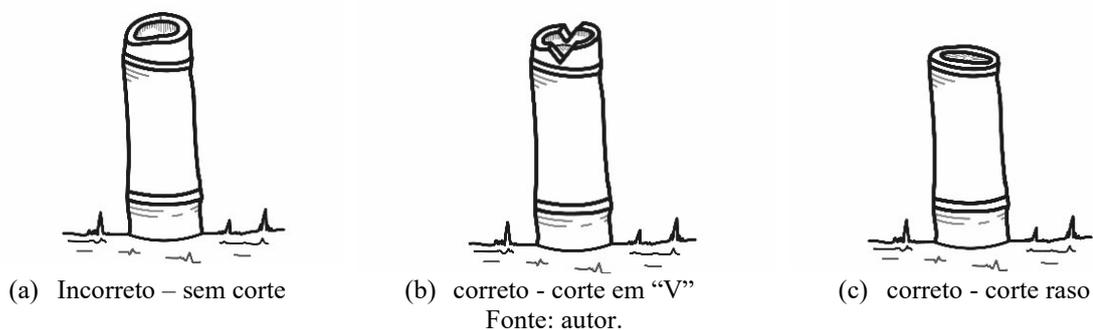
Para não comprometer a sobrevivência do bambuzal, a colheita de varas de bambu deve ser realizada por meio do manejo sustentável, de modo a otimizar o aproveitamento deste recurso renovável e cíclico. Hidalgo-Lopez (2003) recomenda as seguintes regras de manejo: colmos imaturos com menos de 2 anos não devem ser cortados; os colmos maduros devem ser cortados sobre o primeiro nó acima da superfície; caso os bambus mais velhos estejam no centro da touceira, protegidos por bambus mais novos, deve-se utilizar o método da ferradura<sup>1</sup>; para uma touceira com regime de colheita anual, bianual ou trianual, não se deve remover, respectivamente, mais de 50%, 65% ou 75% dos colmos maduros do bambuzal; os bambus super maduros, secos e com rachaduras devem ser removidos; todos os pedaços e os galhos do

<sup>1</sup> O método da ferradura consiste em criar um caminho para o centro da touceira e assim explorar os bambus de dentro para fora do bambuzal (vista superficial de uma ferradura)

bambu devem ser removidos do bambuzal; os bambus não devem ser cortados no ano de seu florescimento, devendo ser removidos após terem espalhado suas sementes. Em adição, Janssen (2000) destaca que a colheita deve ser realizada nas estações secas do ano, quando a taxa de umidade esteja baixa.

A colheita do bambu deve ser realizada com o auxílio de serrote ou motosserra respeitando as técnicas de manejo sustentável do bambuzal que, segundo Ubidia (2015), são importantes para garantir a reposição natural de bambus com alta qualidade para a construção. Segundo ele, para não trincar o colmo, deve-se fazer o corte em duas etapas. O primeiro corte no sentido ao contrário da direção de queda da vara e o segundo corte no sentido oposto ao primeiro, ambos iniciando pela casca e indo ao centro do diâmetro do colmo. Para não apodrecer as raízes da planta, deve-se evitar o empoçamento de água dentro da cavidade do toco remanescente (Figura 5a), fazendo um corte que permita o escoamento da água da chuva (Figura 5b e 5c).

Figura 5 – Cortes do colmo de bambu



Segundo a norma equatoriana INEN (2016), os produtores de bambu devem ter o controle da idade de cada colmo presente em suas touceiras, indicando a composição ideal de 10% de brotos, 30% de colmos jovens e 60% de colmos maduros. Caso a touceira não seja manejada regularmente, a mesma torna-se densa, dificultando o processo de corte e de colheita. Caso a colheita seja excessiva, novos indivíduos irão nascer com diâmetro reduzido em relação à brotação passada e, caso sejam cortados todos os colmos de bambu, tanto jovens quanto maduros, a touceira pode vir a morrer nos próximos 2 ou 3 anos (HIDALGO-LOPEZ, 2003).

### 2.2.2 Tratamento preservativo dos colmos de bambu

Após serem cortados, os colmos de bambu são altamente suscetíveis ao ataque de fungos e de insetos (HIDALGO-LOPEZ, 2003). A presença de fungos está relacionada ao teor de umidade, enquanto o ataque de insetos à presença de amido no interior dos feixes vasculares (MINKE, 2012).

Segundo Kleine (2010), as diversas espécies de fungos xilófagos, ou seja, aqueles que se alimentam de tecidos lenhosos como a madeira e o bambu, conseguem se desenvolver quando: em contato direto com o tecido lenhoso; com a presença de oxigênio (com raras exceções); com umidade acima de 20%; com temperatura ambiente entre 10 e 30 °C; em meio ácido (pH entre 2,0 e 7,5) e; com a ausência de produtos tóxicos, bastando eliminar uma das seis condições citadas para que os fungos não sobrevivam. Ainda segundo o autor, os estragos gerados pelos insetos xilófagos, como brocas e cupins, podem ser devastadores uma vez que ambos costumam escavar galerias e túneis na parte interna dos colmos, atacando de preferência o tecido parenquimático por ser mais macio e mais rico em amido e açúcares.

Nas Américas, o principal inseto a causar sérios danos ao colmo de bambu, no pós-colheita, é o *Dinoderus minutus* que, em busca de amido, perfura longitudinalmente a parede do colmo, ocasionando significativa perda de massa e, conseqüentemente, redução da resistência mecânica do material (HIDALGO-LOPEZ, 2003). No Brasil, há a ocorrência confirmada de duas espécies exóticas de brocas que causam danos ao bambu: o próprio *Dinoderus minutus* e o *Chlorophorus annularis* (KLEINE, 2010). Quanto aos fungos, sua infestação é mais comum em regiões tropicais, uma vez que o colmo recém cortado necessita estar com teor de umidade superior ao ponto de saturação das fibras para se desenvolver (HIDALGO-LOPEZ, 2003).

O tratamento preservativo representa um ponto crítico dentro do processo de transformação da matéria-prima, garantindo proteção contra o ataque biológico e gerando valor aos produtos de bambu. Neste sentido, os bambus de uso estrutural, além de serem colhidos com idade entre 4 e 6 anos, devem ser submetidos ao tratamento preservativo de acordo com suas aplicações e usos. Segundo Kleine (2010), apesar da existência de diversas medidas preventivas para reduzir a probabilidade de ataques dos agentes xilófagos, a garantia de uma longa durabilidade só pode ser obtida com o uso de produtos preservantes que repilam ou matem tais agentes.

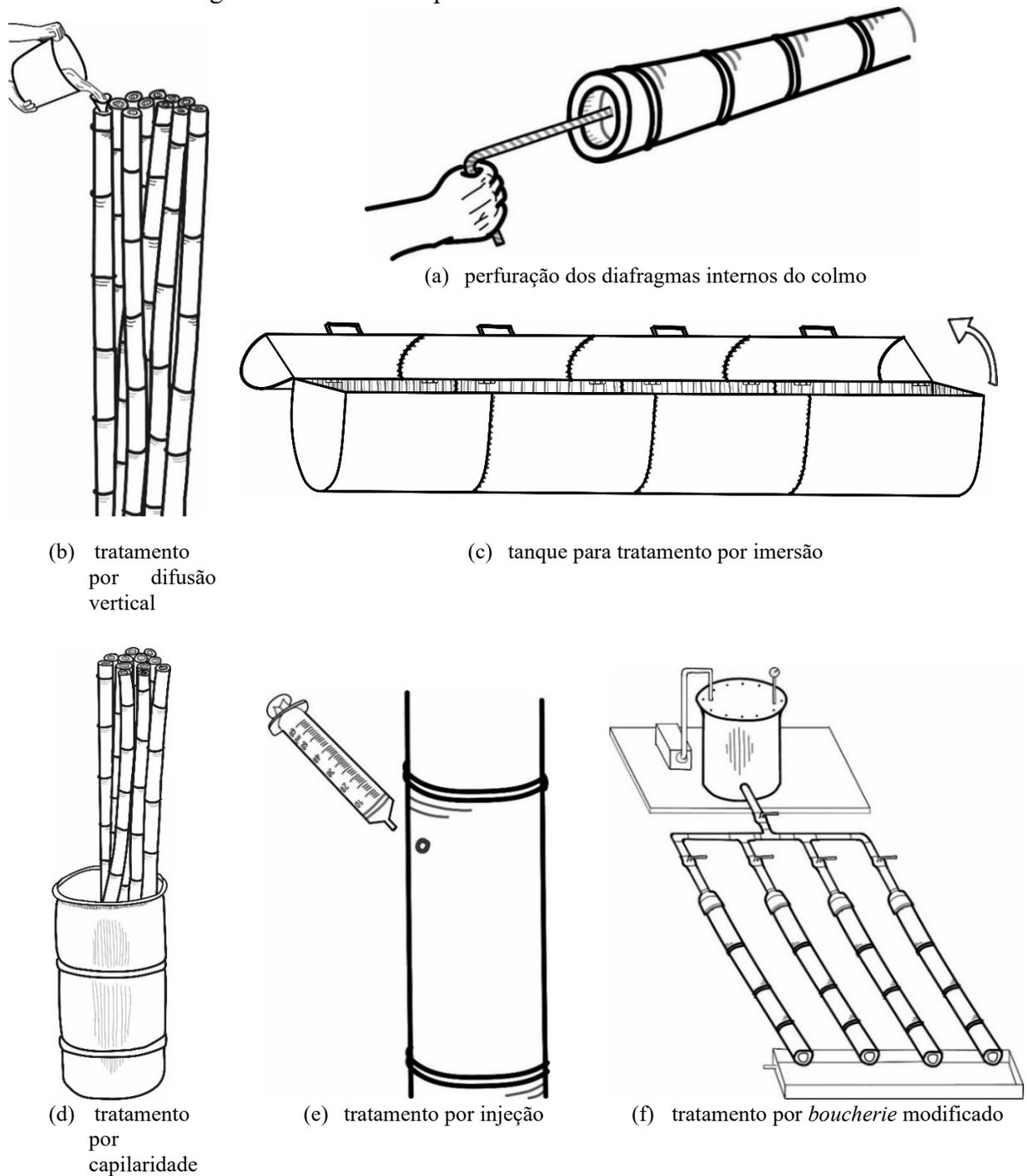
Atuando com eficácia na preservação do tecido lenhoso, os sistemas de tratamentos à base de boro são o futuro para a formulação de preservativos com menor impacto à saúde e ao ambiente, devido à sua baixa toxicidade aguda em mamíferos (CALDEIRA, 2010). Dentre os diversos produtos preservativos disponíveis no mercado, Minke (2012) destaca que aqueles à base de boro são mais baratos e menos contaminantes para seus usuários.

O tratamento preservativo em soluções aquosas com sais de boro pode ser realizado segundo diferentes métodos de tratamento, tais como: capilaridade (ou substituição de seiva), imersão, injeção, *boucherie* modificado e difusão vertical (*Vertical Soak Diffusion*). Enquanto o método de imersão requer a perfuração de todos os diafragmas internos do colmo de bambu (Figura 6a) para total submersão do material no tanque de tratamento (Figura 6c), o método de difusão vertical necessita que o último diafragma do colmo seja o único não perfurado para que a solução imunizante possa ficar armazenada dentro do próprio colmo de bambu (Figura 6b) (MONTROYA ARANGO, 2008; GARLAND, 2005).

Já os tratamentos por capilaridade (ou substituição de seiva), injeção e *boucherie* modificado, não exigem a perfuração dos diafragmas (LIESE, 2004; MONTROYA ARANGO, 2008), sendo que, segundo Kaminski *et al.* (2016), o não rompimento dos diafragmas diminui o surgimento de trincas e auxilia na etapa construtiva de preencher os entrenós considerados estruturais com argamassa de cimento, graute ou resina epoxy.

Para realizar o tratamento por capilaridade basta colocar os colmos de bambu, diretamente após a colheita, na posição vertical, dentro de um recipiente contendo a solução preservativa (Figura 6d), destacando que a vara deve ter 1/3 de seu comprimento imerso na solução, ou seja, para um tonel de 200 L, as varas devem ter entre 2 e 2,5 m de comprimento (PEREIRA e BERALDO, 2008). O método de injeção consiste na aplicação da solução preservativa dentro de cada entrenó da vara com o auxílio de uma seringa (Figura 6e), realizando os furos para injeção do produto na parte mais elevada de cada entrenó e de maneira alternada, ou seja, nunca na mesma linha longitudinal da vara. O tratamento por *boucherie* modificado exige um equipamento específico para forçar a penetração da solução preservativa pelos vasos internos da parede do bambu recém-colhido (Figura 6f).

Figura 6 – Tratamento preservativo do bambu com sais de boro



Fonte: autor.

Dentre os diferentes métodos de tratamento preservativo ilustrados na Figura 6, o tratamento por imersão (Figura 6c) pode ser considerado o mais viável devido à sua alta eficácia, praticidade e baixo custo (MINKE, 2012). Montoya (2002) experimentou quatro métodos de tratamento com solução de ácido bórico e bórax (proporção 2:1 e concentração de 3% em solução aquosa), *boucherie*, imersão e injeção, constatando que a imersão em solução

aquosa com sais de boro foi a mais efetiva na proteção contra insetos, matando o agente xilófago gradualmente após o mesmo ter se alimentado do bambu tratado. Cruz (1994) afirma que o tratamento por imersão em sais é um método econômico, prático, simples e com alto grau de efetividade.

Jorg Stamm, referência mundial na construção de estruturas em bambu, indica o método de imersão em solução aquosa com 2,5% de ácido bórico e 2,5% de bórax, ou seja, proporção 1:1 de cada produto somando uma concentração de 5% (MINKE, 2012). Atualmente Jorg Stamm substituiu a utilização de tais produtos por um único produto de mais fácil diluição em água e, também, com eficiência comprovada para a preservação do bambu contra agentes biológicos, o octaborato de sódio em concentração de 4% por um período de permanência de 5 dias no tanque de imersão (JORG STAMM MASTER OF BAMBOO, 2020).

O tratamento utilizando sais de boro consiste na absorção, retenção e penetração da solução preservativa dentro da parede celular do material. De acordo com a American Wood Preservers Association (AWPA), a madeira tratada com sais de boro deve apresentar retenção de 2,7 kg/m<sup>3</sup> de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CALDEIRA, 2010). Porém, para os bambus ainda não foi consolidada uma medida exata de retenção de sais de boro que garanta a eficiência do tratamento.

Segundo Liese (2003), a retenção adequada para os colmos de bambu varia entre 1 e 4 kg/m<sup>3</sup> de Equivalente de Ácido Bórico (EAB). A partir desta recomendação, Pinzón (2006) comprovou que o tratamento por imersão em solução aquosa com ácido bórico e bórax em proporção 2:1 (2 de ácido bórico para 1 de bórax), somando uma concentração entre 3 e 9% e durante o período de permanência no tanque entre 3 e 5 dias, cumpre com os valores mínimos de retenção de sais de boro para colmos de bambu. Sendo assim, sugere-se a realização de mais pesquisas sobre o bambu tratado que comprovem a retenção de EAB para as diferentes modalidades de tratamento preservativo com sais de boro.

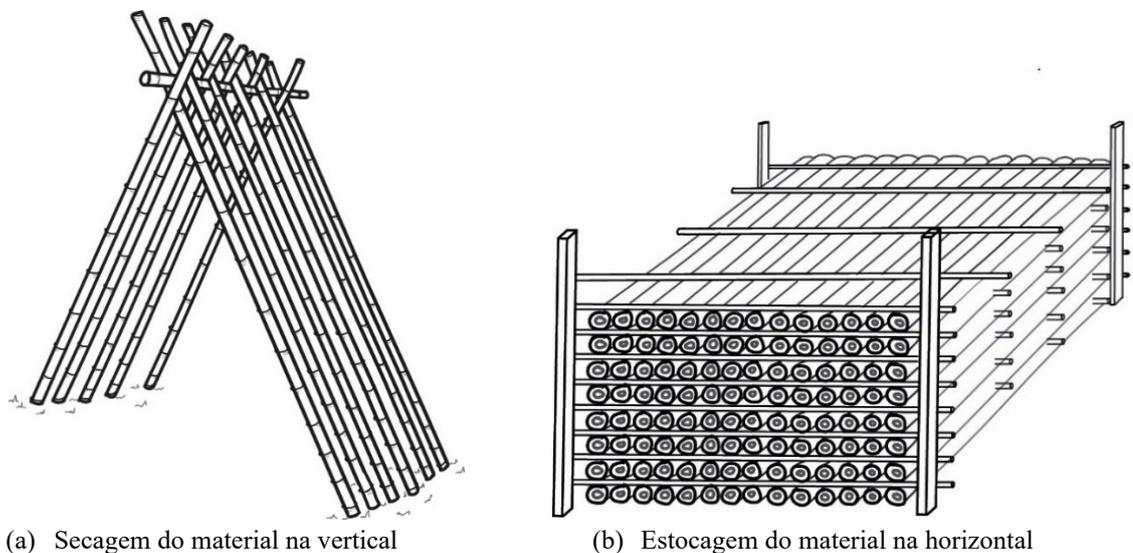
Na busca por maior produtividade, recomenda-se realizar o tratamento por imersão em sais de boro à temperatura constante de 60 graus celsius por 6 horas, seguido de secagem controlada em câmara (MONTROYA ARANGO, 2019).

### 2.2.3 Secagem e estocagem

Antes de serem usados como material de construção, os bambus maduros e tratados devem passar pelo processo de secagem, natural ou forçada, a fim de equilibrar o conteúdo de umidade presente na peça com a umidade do ar (ICONTEC, 2010). Ao optar pelos processos de secagem forçada, através de estufas controladas, fornos ou até mesmo pela injeção de ar quente no interior dos colmos de bambu, deve-se levar em consideração cuidados que garantam a integridade física das peças, evitando o surgimento de rachaduras excessivas durante o controle forçado da umidade relativa do material (MONTROYA e HINCAPIÉ, 2008).

O método natural de secagem ao ar livre consiste em organizar os bambus na posição vertical e sem contato direto com o solo, em local seco, coberto e ventilado (HIDALGO-LOPEZ, 2003). Caso não haja espaço suficiente para manter os bambus na posição vertical, os mesmos podem ser mantidos na posição horizontal, uma vez que o número de apoios seja suficiente para garantir que o colmo de bambu tratado não sofra deflexões com a evolução do processo de secagem (ICONTEC, 2010). No entanto, segundo Montoya e Hincapié (2008), para diminuir consideravelmente o período de secagem e garantir boa qualidade ao material, é aconselhável manter o bambu na vertical (Figura 7a) até que o teor de umidade da peça baixe para 30% - 35%, atentando-se para girar diariamente o material em torno do próprio eixo para garantir uma secagem homogênea e evitar o surgimento de manchas longitudinais, para depois estocá-los na horizontal (Figura 7b) e, para ambos os casos, em local seco, coberto e ventilado.

Figura 7 – Secagem e estocagem do material em local seco, coberto e ventilado



(a) Secagem do material na vertical

(b) Estocagem do material na horizontal

Fonte: autor

Diretamente ligada a fatores climáticos (temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento) e características inerentes aos próprios bambus (idade, diâmetro, espessura da parede, conteúdo de umidade), não existem regras exatas quanto à duração necessária para se concluir o processo de secagem natural dos colmos, isto é, até atingirem o equilíbrio de umidade com o ambiente. No entanto, sugere-se o período de dois meses, durante o verão, e de seis meses, durante o inverno, para a secagem ao ar livre (MONTROYA e HINCAPIÉ, 2008).

Independentemente do método empregado para a secagem, a estocagem dos bambus sempre deve ser realizada em local seco, coberto e ventilado, protegendo-se os colmos da ação das intempéries como também da ação de agentes biológicos causadores de fungos. Segundo Kaminski *et. al* (2016), o processo de secagem auxilia na proteção do bambu contra o ataque de agentes xilófagos, tais como fungos e insetos.

A variação do teor de umidade presente na peça favorece o surgimento de fissuras longitudinais. Embora as características dos bambus variem conforme a espécie, as fissuras tendem a ocorrer durante o processo de secagem (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). Assim sendo, o processo de secagem deve ser suficientemente lento para que as varas de bambu percam sua umidade de maneira uniforme, controlando sua variação dimensional e, conseqüentemente, diminuindo o surgimento de fissuras no material (KAMINSKI *et al.*, 2016).

Para entender o surgimento de fissuras ocasionadas pelo processo de secagem de colmos de bambu, deve-se ter em conta os conceitos físicos básicos de densidade, teor de umidade e retratibilidade dos bambus, os quais serão aprofundados, respectivamente, nos itens 3.1, 3.2 e 3.3.

## 2.3 REFERÊNCIAS NORMATIVAS PARA O USO DE COLMOS DE BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A primeira padronização para a matéria-prima bambu foi introduzida em 1973 pelo *Bureau of Indian Standards*, nomeada como IS:6874 – *Methods of tests for round bamboos* (BIS, 2008). Na década de 90, o Dr. Jules Janssen, por meio do INBAR (*International Bamboo and Rattan Organisation*), liderou a iniciativa de desenvolvimento de padronizações internacionais para o bambu (TRUJILLO e LOPEZ, 2016). Atuando de maneira conjunta, o

INBAR e a ISO tornaram possíveis as publicações das primeiras padronizações internacionais, a ISO 22156: *Bamboo – structural design* (ISO, 2004a) e a ISO 22157: *Bamboo – determination of physical and mechanical properties*, a qual é subdividida em duas partes (ISO, 2004b; ISO, 2004c).

A norma internacional para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos bambus (ISO 2004b) foi adotada pelo Equador (INEN, 2016) e pelo Peru (ICG, 2012) em seus códigos construtivos e adaptada, sob formato de norma nacional específica, pela China (PRC MoC, 2007), Colômbia (ICONTEC, 2007), Índia (BIS, 2008) e Brasil (ABNT, 2020b).

Na Colômbia, o uso estrutural do bambu da espécie *Guadua angustifolia* Kunth foi incorporado à norma nacional de construção sísmo-resistente (NSR-10) no capítulo dedicado “G12 – *Estructuras de Guadua*” (ICONTEC, 2010). O Peru, por meio do *Reglamento Nacional de Edificaciones*, criou a norma técnica E.100 Bambú, ampliando a aplicação também para outras espécies de bambu com características físico mecânicas similares ao do *Guadua Angustifolia* Kunth (ICG, 2012). O Equador, de maneira análoga à Colômbia, restringiu e sancionou uma norma para a utilização específica do bambu *Guadua Angustifolia* Kunth na construção, intitulada como *Estructuras de Guadúa* (INEN, 2016).

Inspirada nas normativas latinoamericanas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a normativa NBR-16828: *Estruturas de Bambu*, a qual expande seu campo de atuação para diferentes espécies de bambu, desde que as mesmas passem por ensaios de caracterização (ABNT, 2020a; ABNT, 2020b).

Segundo Ellingwood (1994), na história do desenvolvimento de novos materiais estruturais, as primeiras normas específicas são concebidas utilizando fatores de segurança maiores, sendo discutidas e ajustadas conforme o decorrer de décadas de pesquisas e aplicações práticas. Assim sendo, para o uso do bambu como material construtivo aceito pelo mercado, normas precisam ser redigidas e constantemente aprimoradas em consonância às boas práticas de pesquisa e de engenharia.

As normativas e as padronizações para projeto estrutural e construção com bambu encontradas na literatura estão sumarizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Normativas e padronizações para projeto estrutural e construção com bambu.

<b>País</b>	<b>Norma/Padronizações</b>
Brasil	NBR 16828-1: Estruturas de bambu – parte 1: Projeto (ABNT, 2020a) NBR 16828-2: Estruturas de bambu – parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu (ABNT, 2020b)
China	JG/T 199: <i>Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building</i> (PRC MoC, 2007)
Colômbia	<i>Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente. NSR 10 – Capítulo G12 Estructuras de Guadua</i> (ICONTEC, 2010) NTC 5301: <i>Preservación y Secado del Culmo de Guadua angustifolia Kunth</i> (ICONTEC, 2007) NTC 5525: <i>Métodos de Ensayo para Determinar las Propiedades Físicas y Mecânicas de la Guadua angustifolia Kunth</i> (ICONTEC, 2007) NTC 5407: <i>Uniones de Estructuras com Guadua angustifolia Kunth</i> (ICONTEC, 2018)
Equador	<i>Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC – Estructuras de Guadúa</i> (INEN, 2016) INEN 42: <i>Bambú caña guadua</i> (INEN 1976)
Índia	<i>National Building Code of India, section 3 Timber and bamboo: 3B</i> (BIS, 2010) IS 6874: <i>Method of tests for round bamboos</i> (BIS, 2008) IS 15912: <i>Structural design using bamboo – code of practice</i> (BIS, 2012)
Peru	<i>Reglamento Nacional de Edificaciones, Section III. Code E100 – Diseño y Construcción con Bambú</i> (ICG, 2012)
Internacional	ISO 22156: <i>Bamboo – structural design</i> (ISO, 2004a) ISO 22157-1: <i>Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 1: requirements</i> (ISO, 2004b) ISO 22157-2: <i>Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 2: laboratory manual</i> (ISO, 2004c) ISO 19624: <i>Bamboo – Grading of bamboo culms – Basic principles and procedures</i> (ISO, 2018) ISO 22157: <i>Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods</i> (ISO, 2019)

Fonte: Adaptado de Gatóo *et al.* (2014).

### 3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS BAMBUS

As características mecânicas dos bambus possuem grande variabilidade, sendo influenciadas pelas condições edafoclimáticas, do tipo da espécie, da idade do colmo, do teor de umidade e da localização da amostra em relação ao comprimento do colmo, se é da parte basal, média ou apical (GHAVAMI, 1989). Segundo Janssen (2005), a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos bambus é bastante complexa por se tratar de um tubo oco com espessura de parede variável, cônico, não perfeitamente reto e com a presença de nós em intervalos irregulares. Portanto, para estabelecer critérios confiáveis de dimensionamento para estruturas de bambu, faz-se necessário o estudo científico sistemático da espécie que se deseja empregar na construção, abrangendo os processos de plantio, a colheita, o tratamento e a secagem, seguidos de uma completa análise estatística das propriedades físicas e mecânicas de cada região dos colmos de bambu (GHAVAMI e MARINHO, 2004).

Segundo Hidalgo-Lopez (2003), as características físicas e mecânicas dos bambus diferem entre as espécies e, para a aplicação correta de cada uma, tais propriedades devem ser estudadas. Desta forma, a utilização de métodos padronizados para determinar as propriedades físicas e mecânicas das diferentes espécies de bambus é de cunho fundamental para promover aplicações de engenharia (GNANAHARAN, R. *et al.*, 1995).

Nesta seção, serão introduzidos os conceitos de teor de umidade e de variação dimensional, assim como os valores de densidade, de módulos de elasticidade e de resistência mecânica encontrados para as principais espécies utilizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

#### 3.1 DENSIDADE

Expressa pela razão entre massa e volume, a densidade é de extrema importância para determinação das propriedades mecânicas dos bambus (JANSSEN, 2000). A densidade varia, principalmente, em função da estrutura anatômica da planta, tais como a quantidade e a distribuição dos feixes de fibras ao redor dos vasos, bem como o diâmetro da fibra e a espessura da parede da célula (LIESE, 1998; HIDALGO-LOPEZ, 2003). Como a porcentagem das fibras tende a aumentar de dentro para fora da parede do colmo e da base para o topo de uma mesma vara, a densidade também aumenta segundo essa tendência. Trujillo e López (2016) concluem que o aumento em densidade no sentido da base para o topo é acompanhado pelo aumento da resistência à compressão e à tração.

Segundo Hidalgo-Lopez (2003), a massa específica de um colmo de bambu varia conforme a espécie e o tipo de rizoma, podendo assumir valores gerais entre 500 kg/m<sup>3</sup> e 900 kg/m<sup>3</sup>. Os valores de densidade para as principais espécies utilizadas para construção de estruturas de bambu no Brasil segundo diferentes autores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de densidade para as principais espécies utilizadas para construção de estruturas de bambu no Brasil segundo diferentes autores.

Espécies de bambu	Local do plantio	Metodologia de ensaio	Teor de umidade	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Referência
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	Colômbia	ISO 22157 (ISO, 2004)	>30%	708	Correal e Arbelaez, 2010
<i>Dendrocalamus asper</i>	MG – Brasil			730	Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
		ASTM D 143-09 (2009)		801,75	Srivaro Jakranod, 2016
<i>Dendrocalamus latiflorus</i>	Vietnã	TCVN 356-70	12%	800	Tran V. H., 2010
<i>Bambusa oldhamii</i>	PR – Brasil	ISO/TC165 N314 (1999)		840	Carbonari <i>et al.</i> , 2017
<i>Phyllostachys aurea</i>	MG – Brasil			780	Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
<i>Phyllostachys pubescens</i>	MG – Brasil			850	Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
	China			830	Ota, 1951 <i>apud</i> Janssen, 1991
	China			620	Yunlien e Yezhen, 1983 <i>apud</i> Janssen, 1991
	China	ASTM D2395 (ASTM 1997)		647,5	Yu <i>et al.</i> , 2007
<i>Phyllostachys nigra</i> var. <i>henonis</i>		Ensaio dinâmico visco-elástico (leitura de vibração)	12%	860	Gakkaishi 1973, <i>apud</i> Janssen, 1991
<i>Phyllostachys bambusoide</i>		Ensaio dinâmico visco-elástico (leitura de vibração)	12%	900	Gakkaishi 1973, <i>apud</i> Janssen, 1991

Fonte: Compilado pelo autor.

### 3.2 TEOR DE UMIDADE

De maneira similar às madeiras, a resistência mecânica do bambu é afetada pelo teor de umidade contido na amostra ensaiada (HIDALGO-LÓPEZ, 2013, TRUJILLO e LÓPEZ, 2016). Segundo a NBR 16828-2 (ABNT, 2020b), o teor de umidade pode ser mensurado através da condutividade elétrica ou calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100$$

Segundo Hidalgo-López (2003), o teor de umidade de colmos de bambu, além de ser específico para cada espécie, é influenciado pelo local de amostragem (parte basal, média ou apical), pela idade e pela estação do ano na qual o mesmo foi coletado. Os bambus não maduros possuem maior teor de umidade que aqueles maduros. Em um colmo em estado verde, o teor de umidade na parte basal é maior que na parte apical, sendo que o teor de umidade de bambus recém-colhidos pode variar entre 40% e 150% (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

A umidade presente em bambus verdes é em parte absorvida pelas paredes celulares e em parte absorvida pelas cavidades celulares (lúmen celular) por meio de forças capilares. À medida que o tecido lenhoso do bambu seca, primeiro esvaziam-se as cavidades celulares e depois as paredes celulares. O Ponto de Saturação das Fibras (PSF) compreende o momento em que as paredes celulares estão saturadas e o lúmen celular vazio, variando entre 13% e 20%, dependendo da espécie do bambu (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Devido ao comportamento higroscópico do bambu, capaz de absorver ou perder água para o meio ambiente, o teor de umidade da peça tende a entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). Desta forma, ao empregar o bambu como elemento construtivo, as quatro normas latinoamericanas (ICONTEC, 2010; ICG, 2012; INEN, 2016; ABNT 2020) recomendam que o teor de umidade da peça deve estar o mais próximo possível da umidade relativa do ambiente no qual ela será instalada. No entanto, a norma colombiana (ICONTEC, 2010) define que o teor de umidade dos bambus de uso estrutural deve estar abaixo de 19% antes de serem incorporados à construção (ICONTEC, 2010).

### 3.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL (RETRABILIDADE)

Devido à capacidade de absorver ou perder água para o meio ambiente, o colmo de bambu está sujeito a variações dimensionais de expansão e de retração em seu volume, principalmente durante o processo de secagem. A retração do tecido do bambu ocorre, principalmente, na direção radial, com uma deformação mínima na direção axial (HIDALGO-LÓPEZ, 2003). De acordo com Liese (1985), a secagem de um colmo de bambu recém colhido até atingir o PSF (20% de umidade) resulta na retração de 4 a 14% em espessura da parede e de

3 a 12% em diâmetro. O bambu possui variação mínima no eixo longitudinal, por isso os valores não foram expostos neste trabalho.

Devido à sua característica anisotrópica, as mudanças dimensionais observadas no bambu são diferentes ao longo de seus três eixos, nas direções tangencial, radial e longitudinal. O fator anisotrópico (FA) é definido pela relação entre a retratibilidade na direção tangencial e radial, podendo ser associado frequentemente às deformações ocasionadas pelas variações do conteúdo de umidade dos bambus (SMITS *et. al*, 2015). A Tabela 4 apresenta o FA de quatro espécies de gêneros distintos: *Phyllostachys*, *Guadua*, *Bambusa* e *Dendrocalamus*.

Tabela 4 – Fator anisotrópico conforme a espécie.

<b>Espécie</b>	<b>FA</b>	<b>Referência</b>
<i>Phyllostachys pubescens</i>	1,83	Smits <i>et al.</i> (2015)
<i>Guadua sp.</i>	1,49	Lima <i>et al.</i> (2012)
<i>Bambusa vulgaris</i>	1,93	Lima <i>et al.</i> (2012)
<i>Dendrocalamus sp.</i>	1,00	Morita <i>et al.</i> (2010)

Fonte: Compilado pelo autor.

O fator anisotrópico das quatro espécies foi determinado para o bambu no estado de ripas, constatando que as maiores contrações e inchamentos das lâminas ocorrem no sentido da espessura da parede. Quanto ao bambu em seu estado natural, ou seja, roliço, sua variação dimensional é influenciada pela presença ou ausência de nós e, por variar com maior amplitude na região dos entrenós, as alternâncias do teor de umidade podem gerar tensões internas e levar a formação de fissuras no material (OSTAPIV, 2011).

Tais variações dimensionais provocadas pela alternância do teor de umidade em um colmo de bambu devem ser controladas com a finalidade de evitar retrações excessivas e, conseqüentemente, o surgimento de fissuras e de trincas durante o processo de secagem. Quando incorporado a estruturas, deve-se atentar para a variação dimensional das peças na região dos encaixes, uma vez que a retração do bambu pode intensificar o afrouxamento das peças metálicas utilizadas para aperto (MINKE, 2012).

### 3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade varia de acordo com a densidade, apresentando maiores valores no topo da vara de bambu e na seção mais externa da parede de um mesmo colmo (MAMADA e KAWAMURA, 1973, *apud* JANSSEN, 1991), ou seja, quão maior for a concentração de fibras na seção ensaiada, maior será o módulo de elasticidade. Além de ser influenciado pela densidade, o módulo de elasticidade também difere conforme o teor de umidade da peça. Segundo dados apurados por Janssen (1991), o bambu em estado seco apresenta maior módulo de elasticidade que o bambu verde.

Podendo ser determinados a partir dos ensaios de compressão, tração ou flexão, os módulos de elasticidade (E) de parte das espécies de bambu mais utilizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil estão sumarizados na Tabela 5, conforme a metodologia de ensaio, o número de corpos de prova ensaiados e o teor de umidade das amostras para diferentes autores.

Tabela 5 – Valores do módulo de elasticidade conforme a espécie e segundo diferentes autores.

Espécies de bambu	Local do plantio	Metodologia de ensaio	Nº de CP	Teor de umidade	Módulo de elasticidade (E)			REFERÊNCIA
					Ensaio comp. (GPa)	Ensaio tração. (GPa)	Ensaio flexão (GPa)	
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	Guarulhos/SP	INBAR (1999)	3		12,58	14,59		Ghavami e Marinho, 2004
	Colômbia	ISO 22157 (ISO, 2004)		> 30%	17		17,2	Correal e Arbelaez, 2010
<i>Guadua chacoensis</i>	Ghana	BS 373:1957 para BLC <sup>a</sup>					7,3	Kubi <i>et al.</i> , 2014
	Bolívia	COPANT 742 e COPANT 555	40			11,18		PALM, 2007
<i>Dendrocalamus asper</i>	Londrina/PR	ISO/TC165 N314 (1999)			24			Carbonari <i>et al.</i> , 2017
	Indonésia	ASTM D 143-52 (1972)			13,13			SJAFII, 1984 <i>apud</i> Hidalgo-Lopez, 2003
		ASTM D 143-09 (2009)					19,16	Srivarso Jakranod, 2016
<i>Bambusa tuldoidea</i>		Ensaio de flexão com uma extremidade livre					20	Beraldo, 1987
<i>Phyllostachys pubescens</i>		Similar à caracterização do aço			15			Sakaray <i>et al.</i> , 2012
	China					14,975		Yu <i>et al.</i> , 2007

<sup>a</sup> Bambu Laminado Colado (BLC)

### 3.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BAMBUS

Embora seja grande o número de estudos acadêmicos sobre a determinação das propriedades mecânicas para bambus de diferentes espécies, não há concordância entre os métodos propostos para este fim. Sendo assim, os valores de resistência mecânica encontrados apresentam grandes variações. Entre 29 e 78 MPa, para resistência à compressão paralela às fibras (GHAVAMI *et al.*, 2004; TRAN, 2010). Entre 80 e 238 MPa, para resistência à tração paralela às fibras (DA SILVA RIBEIRO *et al.*, 2019; ZHOU, 1994 *apud* HIDALGO LOPEZ, 2003) e, entre 63 e 164 MPa, para resistência à flexão (OLIVEIRA *et al.*, 2010; TRAN, 2010).

Nesta subseção, apresentam-se dados relativos à resistência mecânica para parte das espécies mais utilizadas na construção de estruturas de bambu nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, os quais se encontram compilados em uma única tabela comparativa (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores característicos de resistência mecânica conforme a espécie, local de plantio e metodologia aplicada segundo diferentes autores.

Espécies de bambu	Local do plantio	Metodologia de ensaio	Nº de CP	Teor de umidade	Compressão // (MPa)		Tração (MPa)	Flexão (MPa)		Cisalhamento (MPa)	REFERÊNCIA
					Com nó	Sem nó		Limite elástico	Tensão ruptura		
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	PR – Brasil	ISO/TC165 N314 (1999)			45	42					Carbonari <i>et al.</i> , 2017
	SP – Brasil	INBAR (1999)	3		29		87			2,017	Ghavami e Marinho, 2004
	Colômbia	ISO 22157 (ISO, 2004)		> 30%	37				95	7,57	Correal e Arbelaez, 2010
<i>Guadua chacoensis</i>	Gana	BS 373:1957 para BLC <sup>a</sup>			38				80		Kubi <i>et al.</i> , 2014
	Bolívia	COPANT 742 e COPANT 555	40				94		25*		Palm, 2007
<i>Dendrocalamus asper</i>	PR – Brasil	ISO/TC165 N314 (1999)			51	50					Carbonari <i>et al.</i> , 2017
	MG – Brasil	Ensaio com ripa com casca	6				80				Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
	Indonésia	ASTM D 143-52 (1972)			60		213		164		Sjafii, 1984 <i>apud</i> Hidalgo-Lopez, 2003
	Tailândia	ASTM D 143-09 (2009)					170		160	12,875	Srivaro Jakranod, 2016
<i>Dendrocalamus latiflorus</i>	Vietnã	TCVN 356-70	30	12	78				164		Tran V. H., 2010
<i>Bambusa oldhamii</i>	PR – Brasil	ISO/TC165 N314 (1999)			72	70	106				Carbonari <i>et al.</i> , 2017
<i>Bambusa tuldoides</i>		Ensaio com 1 Extremidade livre						95	153		Beraldo, 1987
<i>Phyllostachys aurea</i>	MG – Brasil	Ensaio com ripa com casca	6				163				Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
		Flexão a 3 pontos	5						63		Oliveira <i>et al.</i> , 2010
<i>Phyllostachys pubescens</i>	MG – Brasil	Ensaio com ripa com casca	6				145				Ribeiro <i>et al.</i> , 2019
	China				59	63	238		134	12,65	Zhou, 1994 <i>apud</i> Hidalgo-lopez, 2003
	China	Ensaio com ripa			68						Ota, 1951 <i>apud</i> Janssen, 1991
	China	Ensaio com ripa			53		186		141	11,7	Yunlien e Yezhen, 1983 <i>apud</i> Janssen, 1991
	China	ASTM D2395 (ASTM 1997)					159				Yu <i>et al.</i> , 2007

<sup>a</sup> BLC – Bambu Laminado Colado \* ripa de 360 x 25 mm (e = 6-8mm)

Fonte: Compilado pelo autor.

Trujillo e López (2016), ao analisar dados de resistência à compressão de bambus da espécie *Phyllostachys pubescens* para diferentes teores de umidade, concluiu que as amostras, cujos teores estavam acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF), apresentaram resistência razoavelmente estável, enquanto aquelas com teor de umidade menor que o PSF apresentaram aumento em resistência inversamente proporcional ao teor de umidade.

Segundo à norma ISO 22157-1 (ISO, 2004a), que trata da determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu, os colmos de bambu podem apresentar diversos modos de ruptura quando sujeitos ao ensaio de flexão, o que pode afetar a interpretação dos resultados. Em busca de melhorias para o método de ensaio, Correal e Arbeláez (2010) desenvolveram uma variação para o ensaio de flexão, sugerindo a utilização de cintas para permitir a rotação do elemento nos pontos de carga e de suporte, distribuindo mais uniformemente as cargas e, conseqüentemente, evitando a ruptura localizada nos apoios. Em consonância com o desenvolvimento científico, a norma ISO 22157 (ISO, 2019) foi atualizada e agora sugere a utilização de celas ou cintas nos pontos de suporte de maneira a envolver metade da circunferência dos bambus para melhor distribuir as cargas e assim evitar o fissuramento e/ou esmagamento da parede da amostra na região do apoio.

A norma ISO 22157-1 (ISO, 2004b) não inclui os testes para determinar a resistência à compressão perpendicular às fibras, o que, segundo Trujillo e López (2016), é considerada uma séria omissão, pois tal propriedade é de extrema importância para o dimensionamento de estruturas de bambu. Após a atualização da norma ISO 22157 (ISO, 2019), nenhum método de teste para determinar a resistência ao esmagamento dos colmos de bambu foi mencionado ou apresentado, assunto este que deverá ser abordado em pesquisas futuras.

Segundo Richard e Harries (2015), os resultados obtidos para ensaios à tração podem variar drasticamente dependendo do tipo de fixação que a máquina possui e do local em que a amostra é retirada, concluindo que as lâminas de bambu extraídas próximas ao meio da parede do colmo possuem valores característicos mais uniformes e que a presença de nó na amostra reduz a capacidade de resistência em aproximadamente 50%.

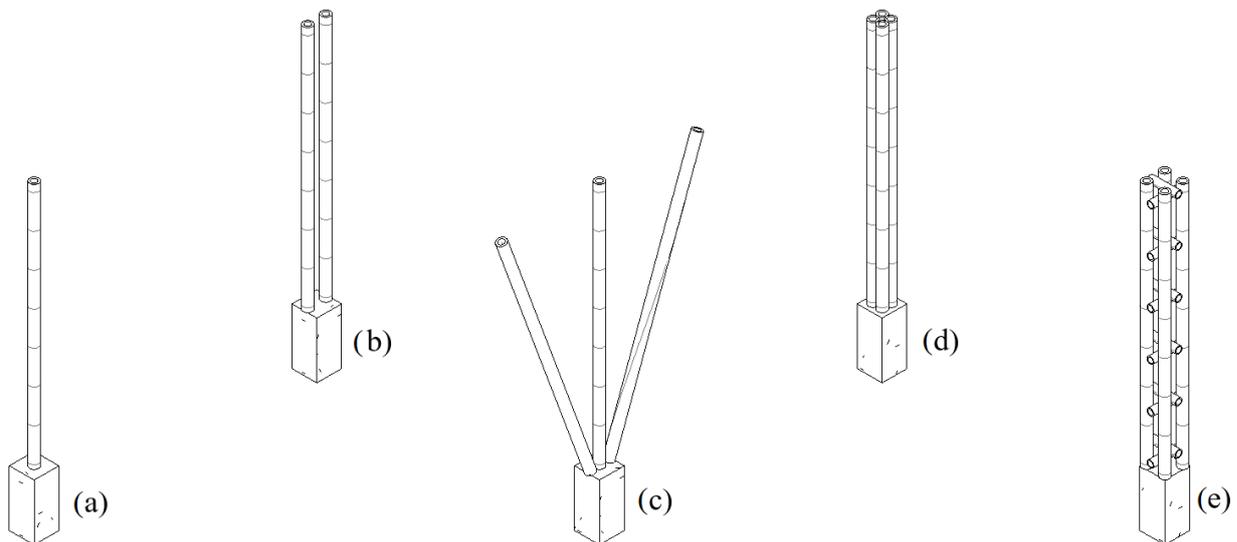
## 4 ELEMENTOS ESTRUTURAIS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM BAMBU

O bambu é um material resistente, leve e versátil que pode ser usado para a produção de vários elementos estruturais e sistemas construtivos. Na construção civil, ele pode ser usado para a construção de pilares, vigas, treliças, pórticos, grelhas, arcos, pontes, estruturas paramétricas, paredes, pisos e forros, tanto na forma natural roliça quanto na forma de ripas e de bambu planificado (ou *esterillas* de bambu). Estes elementos e sistemas construtivos serão detalhados a seguir.

### 4.1 PILARES

Os pilares em bambu podem ser formados por apenas uma peça (Figura 8a) ou constituídos por arranjos de peças isoladas verticais e/ou inclinadas (Figuras 8b e 8c), a partir da união de vários colmos formando peças compostas justapostas (Figura 8d) ou solidarizadas por espaçadores (Figura 8e). Os pilares são construídos sobre soclos de concreto (Figuras 8a-e) ou fixados por conexões metálicas, a fim de afastar os colmos da umidade oriunda do terreno.

Figura 8 – Exemplificação para os tipos de pilares mencionados.

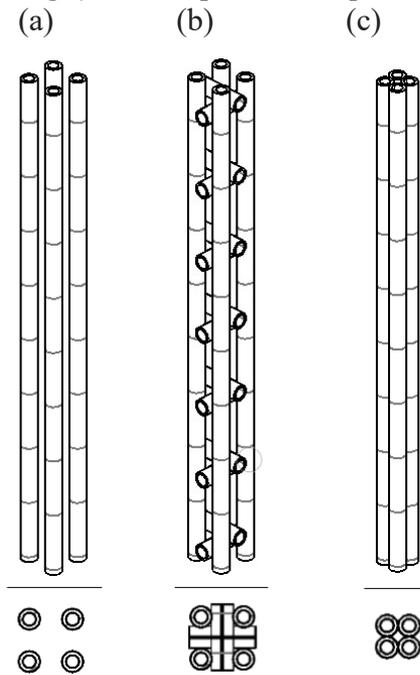


Fonte: autor.

Segundo às normas da Colômbia (ICONTEC, 2010), do Peru (ICG, 2012), do Equador (INEN, 2016) e do Brasil (ABNT, 2020a), quando se utilizam vários colmos para configurar um

elemento à compressão, os pilares são classificados quanto ao arranjo da ligação entre os colmos. A Figura 9 ilustra tal classificação no caso de pilares compostos por quatro bambus, sendo: (a) colmos sem ligação entre si; (b) colmos afastados entre si e conectados não continuamente; e (c) colmos garantidamente unidos ao longo do comprimento.

Figura 9 – Arranjo da ligação entre pilares compostos por quatro colmos.



Fonte: autor.

Nota-se, através da comparação entre os tipos de pilares ilustrados na Figura 4, que o primeiro arranjo (letra a) não possui conexão sólida entre seus elementos, comportando-se como quatro pilares independentes que, por sua vez, possuem menor estabilidade lateral quando comparado aos demais arranjos de quatro colmos.

## 4.2 VIGAS

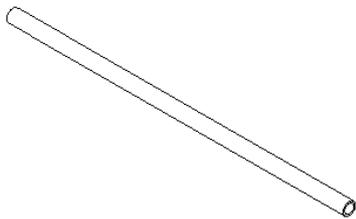
As vigas de bambu podem ser simples (Figura 10a) ou compostas por mais de um colmo, variando em função do arranjo estrutural e/ou da carga a ser suportada pelo elemento estrutural. Nas construções em bambu que utilizam espécies de menor diâmetro, é comum a utilização de vigas de seção composta para melhorar o desempenho da peça como um todo, podendo variar em

altura para maior resistência à flexão e em largura para maior estabilidade lateral (Figura 10b, 10c, 10d, 10e, 10f). Ao agrupar os colmos de bambu para formar uma viga composta, o construtor deve garantir o travamento entre seus elementos e, para tanto, recomenda-se realizar a união por meio de conectores alternadamente inclinados, de maneira a “costurar” as duas ou mais peças.

Figura 10 – Exemplos de tipos de vigas de bambu variando em função do arranjo estrutural.

(a) Viga simples 1 colmo

( $h = D$ )

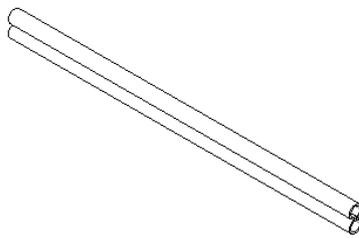


seção transversal da peça



(b) Viga composta 2 colmos

( $h = 2D$ )

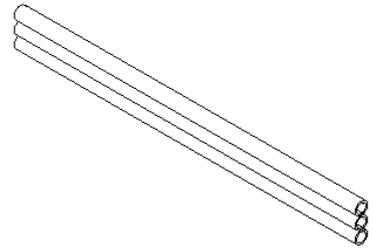


seção transversal da peça



(c) Viga composta 3 colmos

( $h = 3D$ )

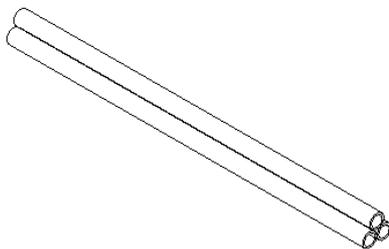


seção transversal da peça



(d) Viga composta 3 colmos

( $h = D \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + D$ )

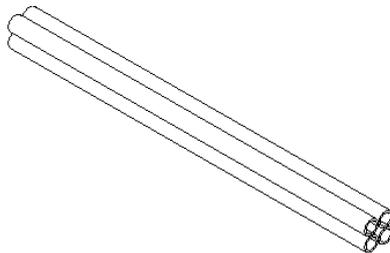


Seção transversal da peça



(e) Viga composta 4 colmos

( $h = 2D$ )

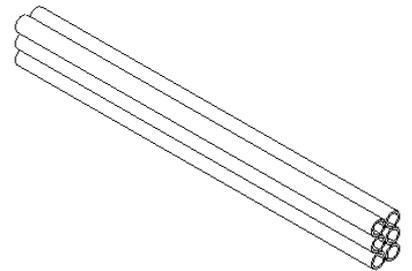


Seção transversal da peça



(f) Viga composta 6 colmos

( $h = 3D$ )



Seção transversal da peça



Sendo:  $h$  – altura da peça;  $D$  – diâmetro do colmo

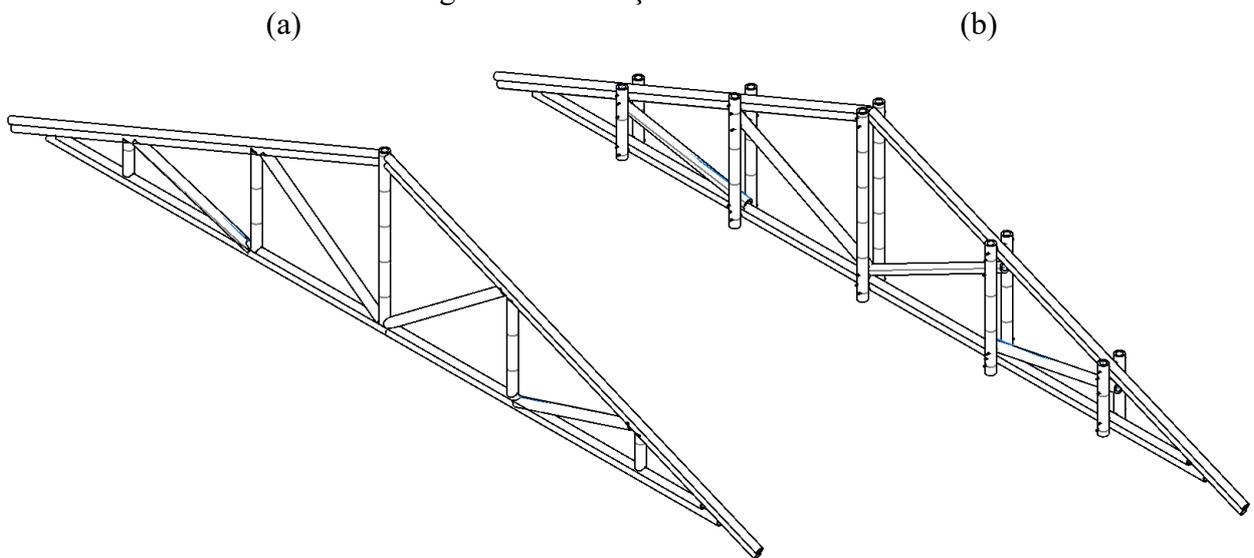
Fonte: autor.

Aqui cabe destacar que o dimensionamento de vigas de bambu depende de diversos fatores correlacionados aos esforços de flexão, sendo eles: a deflexão máxima da peça; a estabilidade lateral em vigas compostas; o efeito cortante paralelo às fibras (cisalhamento) e o efeito de esmagamento (compressão perpendicular às fibras) nos pontos de apoio. Tais pontos são apresentados com maior detalhe no Item 6.4.

### 4.3 TRELIÇAS

As treliças são sistemas estruturais tipicamente compostos por triangulações e pontos de conexão formados por elementos retos que transmitem os carregamentos por meio da decomposição vetorial, ora por compressão, ora por tração. Devida à sua boa resistência aos esforços de compressão e de tração paralela às fibras, o bambu é muito utilizado na confecção de treliças (Figura 11).

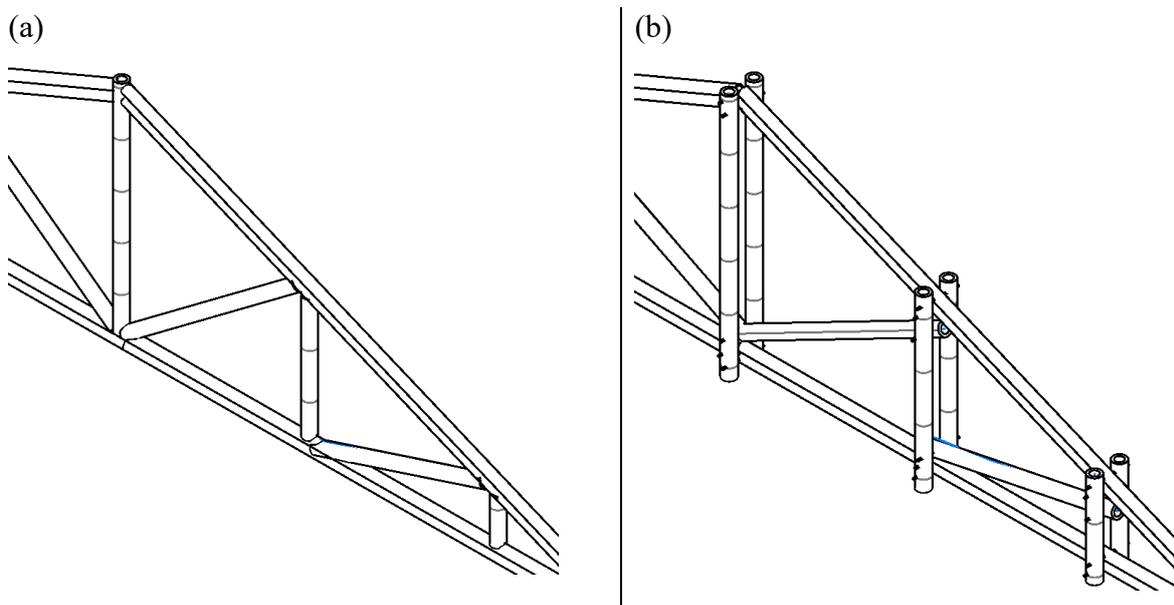
Figura 11 – Treliças bidimensionais.



Fonte: autor.

A treliça ilustrada na Figura 11b tem o pendural e os tirantes duplicados simetricamente ao longo do eixo principal da mesma, aumentando a produtividade durante a fase de construção, visto que as ligações por barras rosqueadas, com porcas e arruelas, utilizadas nestas peças passam a ser mais simples que os encaixes artesanais da treliça ilustrada na Figura 12a.

Figura 12 – Detalhe da ligação entre as peças da treliça.

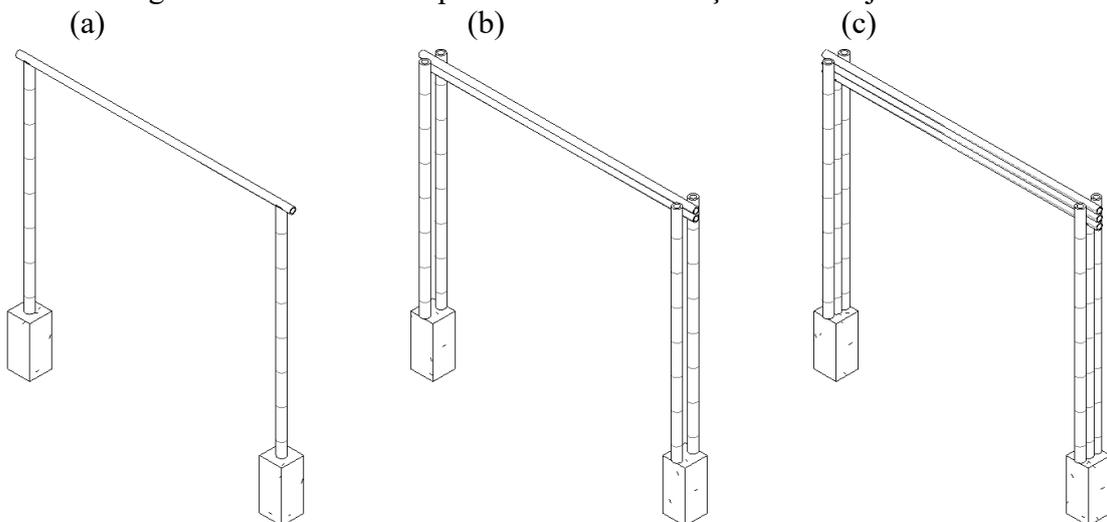


Fonte: autor.

#### 4.4 PÓRTICOS

A Figura 13 ilustra três sistemas estruturais de pórticos simples em três situações diferentes, sendo elas: (a) viga simples apoiada sobre pilar simples; (b) viga dupla apoiada entre pilar composto por 2 colmos sem ligação entre si e; (c) viga tripla apoiada sobre pilar composto por 3 colmos unidos continuamente ao longo do eixo.

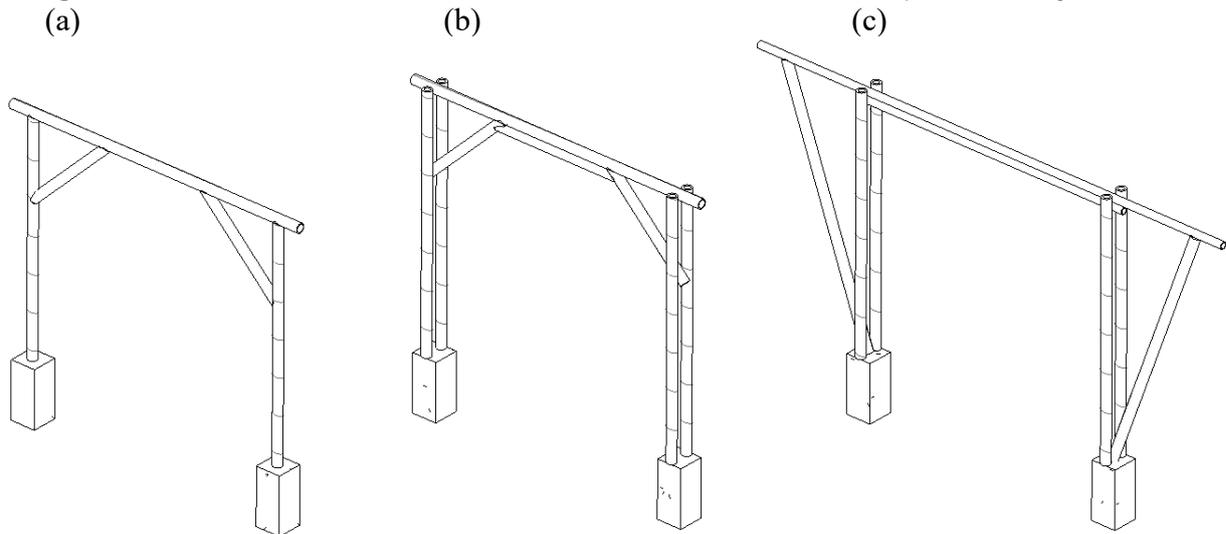
Figura 13 – Pórticos simples variando em função do arranjo estrutural.



Fonte: autor.

Nas estruturas em bambu, costuma-se construir pórticos com contraventamentos laterais, ou seja, utilizando elementos na diagonal para dar maior estabilidade à ligação pilar  $\times$  viga. Tais elementos podem ser considerados mãos francesas (Figura 14a e 14b) ou pilares inclinados (Figura 14c).

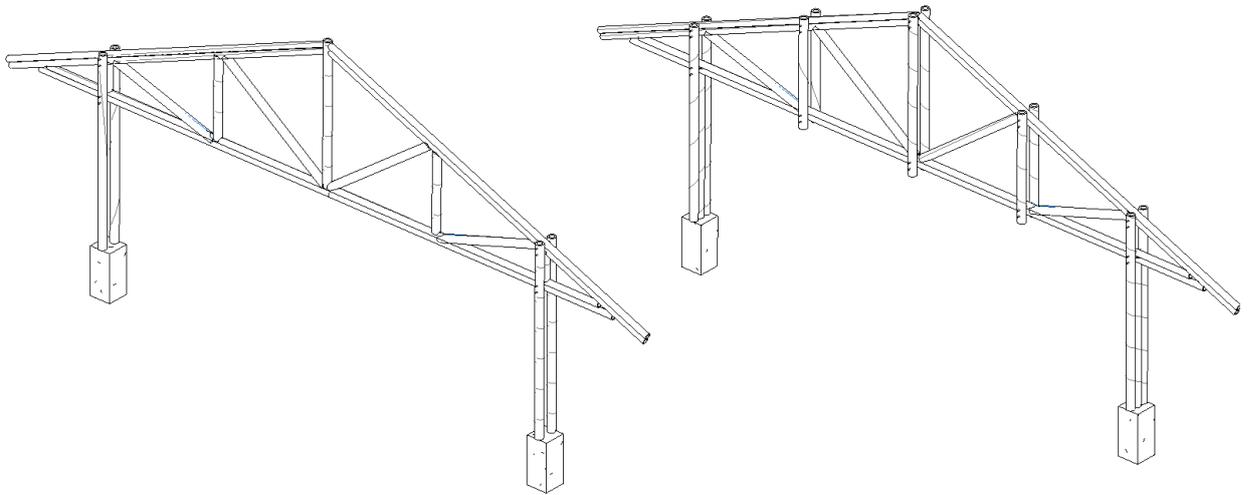
Figura 14 – Pórticos com contraventamento lateral variando em função do arranjo estrutural.



Fonte: autor.

Partindo desta ideia, as combinações entre elementos em bambu para configurar novos arranjos de pórticos são muitos, podendo variar o tipo de pilar, de viga e de contraventamento lateral para configurar um novo sistema construtivo. Os pórticos também podem ser formados pela combinação de pilares e de treliças, como exemplo na Figura 11 com a adição de pilares, configurando, portanto, um novo sistema, o de pórtico com treliça ou pórtico treliçado (Figura 15).

Figura 15 – Pórtico com treliça.



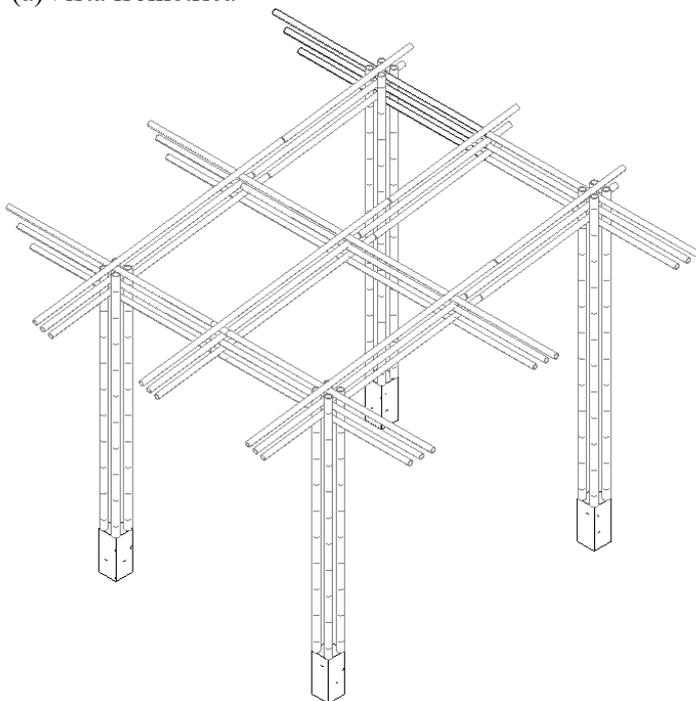
Fonte: autor.

#### 4.5 GRELHAS

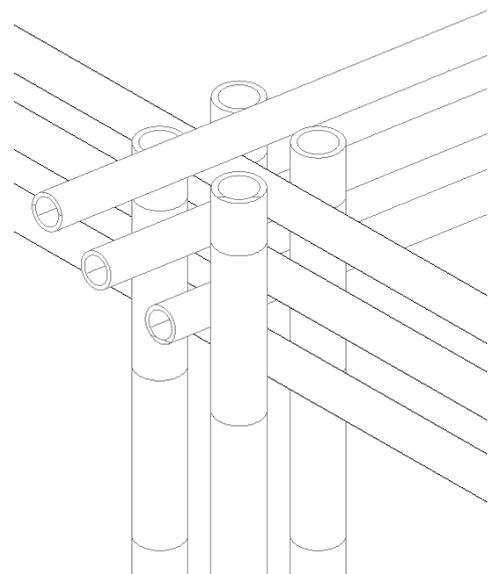
As grelhas em bambu são confeccionadas por meio do arranjo horizontal cruzado de vários colmos de bambu, os quais são solidarizados no encaixe sobre os pilares (Figuras 16a e 16b).

Figura 16 – Grelha encaixada sobre pilares compostos.

(a) Vista isométrica



(b) Detalhe da união



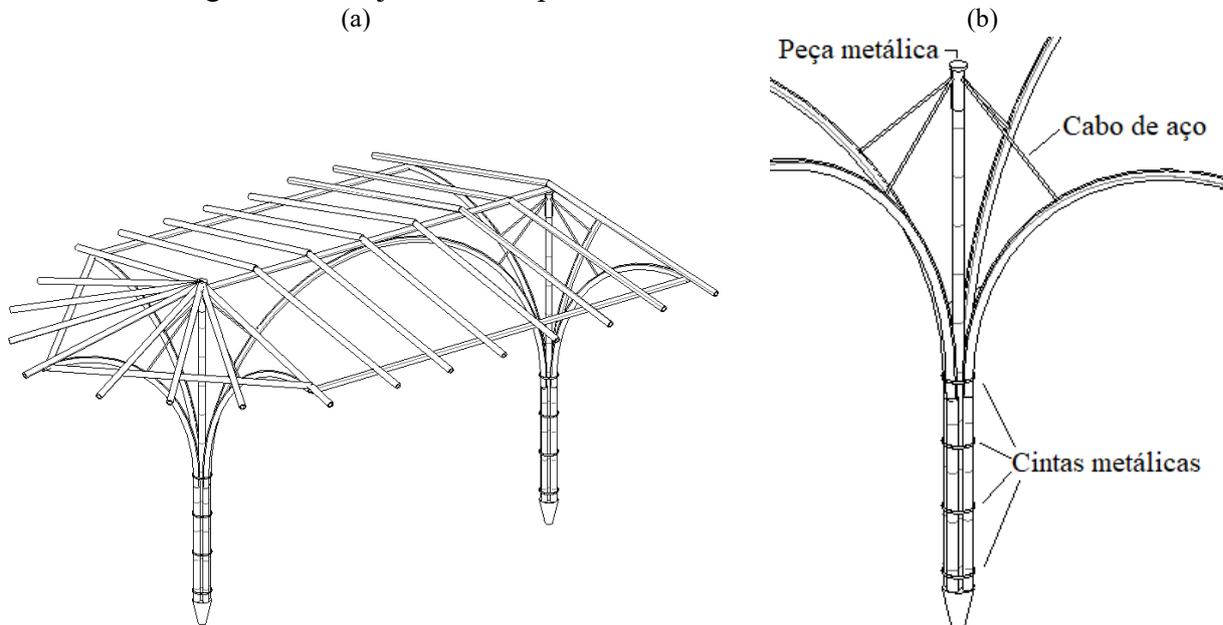
Fonte: autor.

Nota-se, através do detalhamento da grelha (Figura 16b) que a mesma é formada por vigas compostas de três bambus na vertical com espaçamento entre cada elemento, servindo de ponto de apoio e união para com as vigas perpendiculares. Sua fixação pode ser feita através de conexões metálicas e/ou amarrações, desde que executado por um profissional capacitado.

#### 4.6 ARCOS

Como exemplo de arcos, temos o projeto de uma passarela coberta que utiliza pilares centrais compostos por 4 bambus arqueados ao redor de 1 bambu vertical no centro (Figuras 17).

Figura 17 – Projeto de uma passarela coberta em estrutura de bambu.



Fonte: autor.

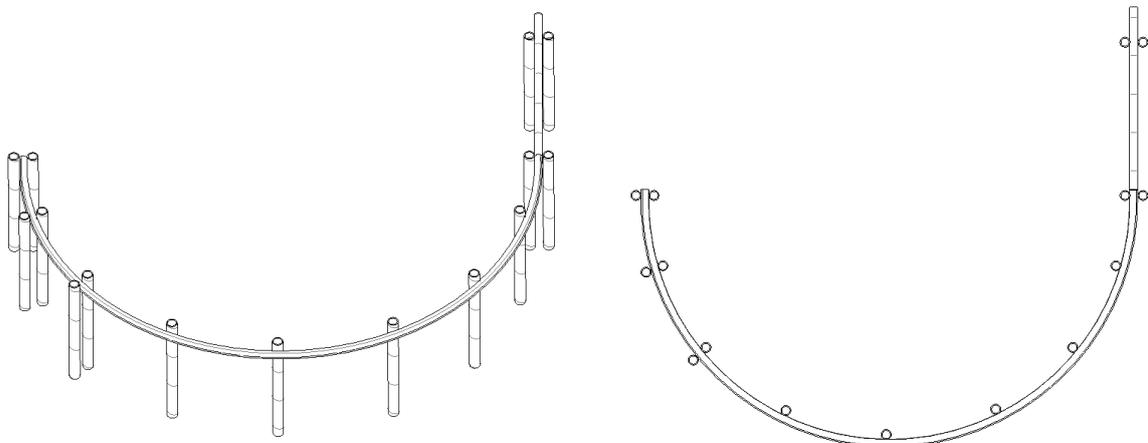
Na Figura 17b nota-se a utilização de peças metálicas com o intuito de garantir o trabalho conjunto dos pilares centrais, empregando cintas metálicas ao longo dos pilares e uma peça metálica no topo do colmo central que, através do tracionamento dos cabos de aço, interliga os demais colmos arqueados.

Por ser um material flexível e comprido, podendo chegar até 20 metros de altura, o bambu permite ser curvado em formato de arco. Quando ainda verde e/ou diretamente após o tratamento, recomenda-se curvar o bambu aos poucos, travando o mesmo em um gabarito fixo ao chão para

que seu processo de secagem ocorra dentro do formato desejado (Figura 18a e 18b). Tal processo pode ser facilitado através do aquecimento com maçarico, de maneira a percorrer o bambu da base ao topo e no sentido de suas fibras e, ao mesmo tempo, forçando sua curvatura para que se firme dentro do gabarito projetado. Segundo Ballesté (2017), o processo de arquear o colmo é facilitado por meio do aquecimento controlado até 120-150 °C e com o aumento de umidade.

Para elementos estruturais, arquear os bambus por meio da secagem em gabarito em um ambiente com controle de temperatura e de umidade é a melhor das opções.

Figura 18 – Bambus secando no gabarito para configurarem formato arqueado.  
(a) Vista 3D (b) Planta baixa



Fonte: autor.

Dentre as diversas formas de se arquear um colmo de bambu, a realização de cortes em “V” ao longo do comprimento do mesmo, conforme a Figura 19, não é recomendado para arcos estruturais. Assim sendo, é o número de cortes, sua profundidade e a distância entre eles que irá determinar a curvatura do colmo. Por estas e outras, cabe aqui ressaltar que arquear colmos de bambu através de cortes em “V” diminui a resistência dos colmos. Sugerindo, portanto, que os arcos sejam reforçados com peças compostas por mais de um colmo, ripas de bambu ou elementos metálicos e, sugerindo também, que sejam desenvolvidas mais pesquisas sobre este assunto.

Figura 19 – Cortes em “V” para arquear o colmo.



(a) Corte realizado nos entrenós do bambu

(b) Corte realizado ao lado dos nós do bambu

Fonte: autor.

Dentre as duas maneiras de se realizar cortes em “V” apresentadas pela Figura 19, Stamm (2008) recomenda que tal corte seja realizado ao lado dos nós do bambu, assim como ilustrado pela Figura 19b. Por meio de experiências práticas do autor desta dissertação, a ocorrência de trincas e fissuras longitudinais, que podem vir a se formar durante o processo de arqueamento com esta técnica, é menor quando os cortes em “V” são realizados próximo ao nó (Figura 19b) quando comparado aos cortes realizados no meio do entrenó (19a).

#### 4.7 PONTES

Para compor a estrutura principal de pontes em estrutura de bambu é comum a utilização arcos rasos compostos de maneira a interligar os dois pontos estruturais de fundação e formar longarinas. Desta maneira os arcos trabalham apenas sobre compressão devido ao conceito de linha de pressão, resultando no anulamento dos esforços de tração e de flexão.

Projetada pelo arquiteto colombiano Simon Vélez, em 2005, a ponte de bambu em Guanezhoua, China (Figura 20), país considerado como uma potência no contexto mundial de construções e de tradições relacionadas ao bambu. A ponte possui 38 m de comprimento, altura média de 4 m e largura de 2,5 m (DELGADO, 2006).

Figura 20 – Modelo virtual da ponte em bambu em Guanezhoua, China.



Fonte: Delgado (2006).

#### 4.8 ESTRUTURAS PARAMÉTRICAS EM BAMBU

Compostas por parâmetros pré-definidos, as estruturas paramétricas em bambu utilizam elementos retos que, por meio da repetição, cruzamento e sobreposição em diferentes planos, dão origem à modelos sinuosos com formas geometricamente complexas, como por exemplo as

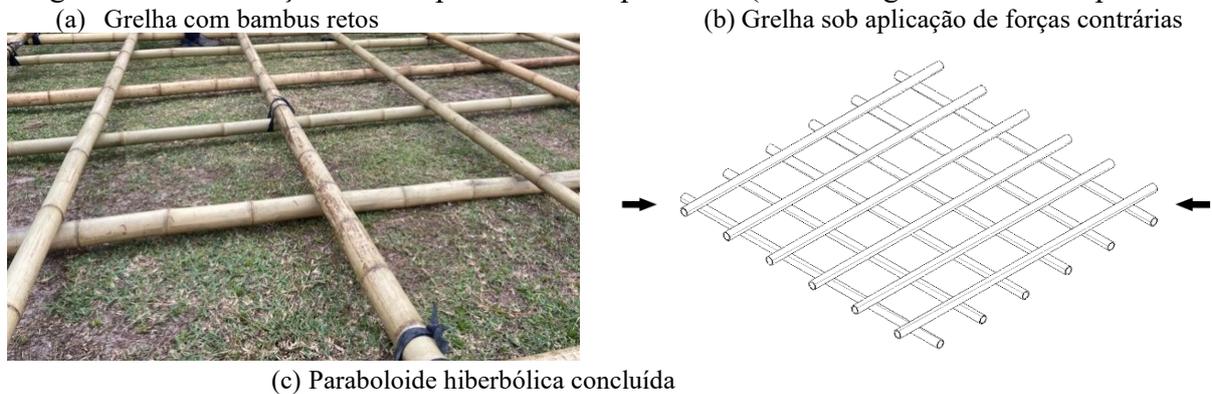
membranas anticlásticas. Neste manual são apresentadas três estruturas paramétricas em bambu: a parabolóide hiperbólica; a tenda *Yurt* e; a torre paramétrica.

#### 4.8.1 Estrutura parabolóide hiperbólica

A estrutura parabolóide hiperbólica é construída a partir de dois planos de elementos retos cruzados em formato de grelha e amarrados temporariamente com borracha durante a fase construtiva (Figura 21a), passando a ter aparência curva ao se alterar o ângulo de cruzamento dos planos a partir da aplicação de forças de compressão nos dois vértices opostos da grelha (Figura 21b). Após atingir o formato desejado, são utilizadas barras rosqueadas, porcas e arruelas para fixar os pontos de cruzamento entre os bambus, assim como ripas transversais para travamento (Figura 21c). Nesta etapa podem ser retiradas as borrachas de amarração.

As parabolóides hiperbólicas construídas em bambu costumam ser utilizadas como estrutura arquitetônica de cobertura para as mais diversas construções, sendo suspensa e fixada na forma final através de pilares inclinados. Também é comum anexar diferentes formas de estruturas parabolóides hiperbólicas umas às outras para configurarem uma estrutura de cobertura mais complexa.

Figura 21 – Construção de uma parabolóide hiperbólica (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC).



Fonte: autor.

### 4.8.2 Tenda *Yurt*

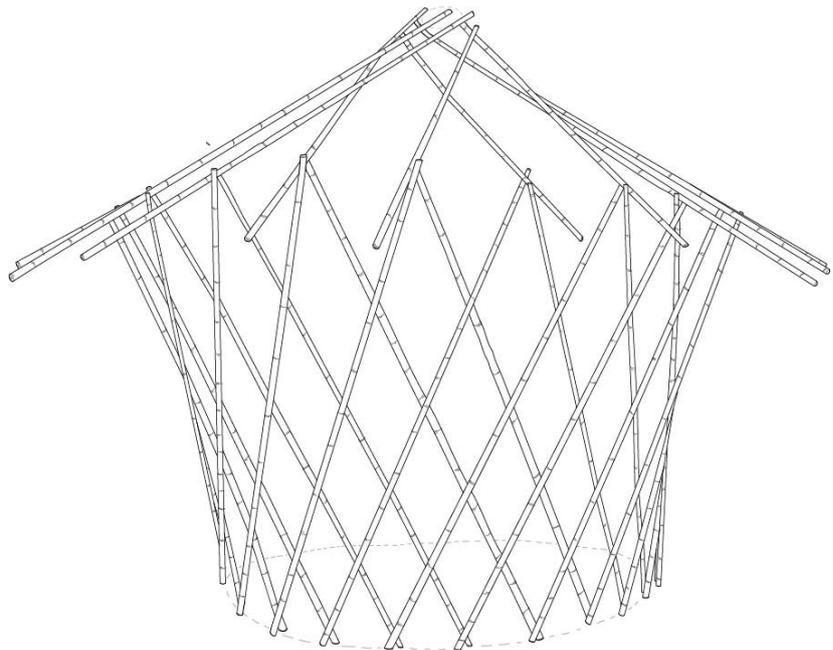
As tendas *Yurt* são construídas a partir de uma única parede treliçada pré-fabricada, de tal maneira que, após confeccionada, compõe uma estrutura circular de fácil montagem. Primeiramente, é confeccionada uma treliça articulada de comprimento igual ao do arco que se deseja formar e de altura mínima do menor usuário da tenda (Figura 22). Uma vez pronta, a treliça articulada é levantada e esticada de tal maneira que o início da treliça coincida com o final da mesma, configurando uma estrutura circular autoportante. Para finalizar a estrutura, colocam-se os caibros de bambu de maneira a ligar os pontos mais altos da treliça à um elemento circular suspenso no centro da tenda (neste caso foi utilizado o aro de uma roda de bicicleta).

Figura 22 – Construção da estrutura de uma tenda yurt (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC).

a) Treliça articulada com bambus retos sobre apoio



b) Estrutura de uma tenda *Yurt*



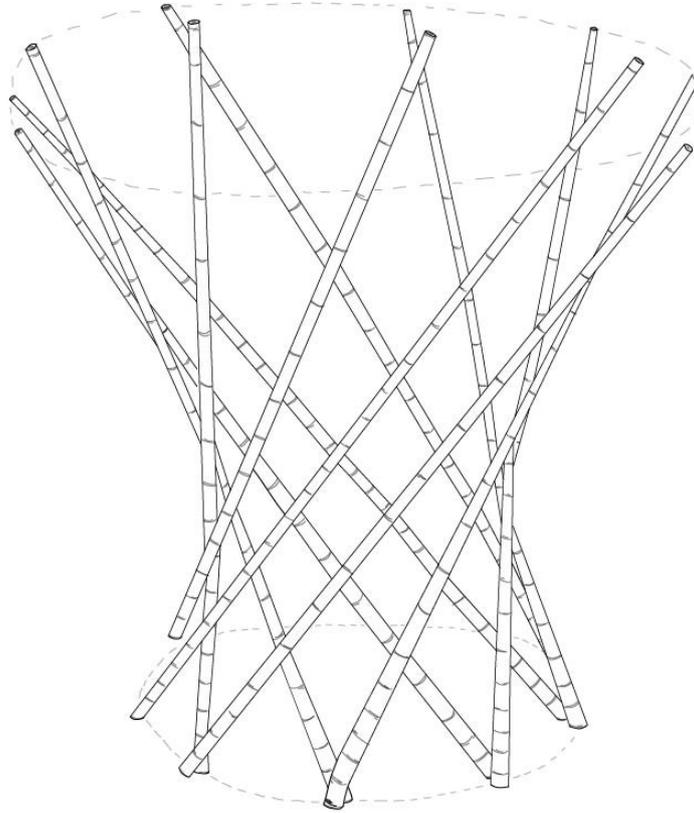
Fonte: autor.

### 4.8.3 Torre paramétrica

Assim como as outras estruturas paramétricas, a torre foi construída com a utilização de colmos retos de bambu que, após sua confecção, configuram aspecto curvado à estrutura (Figura 23). Diferentemente das estruturas anteriores, a torre paramétrica foi construída utilizando uma

torre de andaime como escora central para sustentar e posicionar cada bambu com a inclinação desejada ao redor do andaime.

Figura 23 – Construção da torre paramétrica (Curso Jorg Stamm – Garopaba / SC).

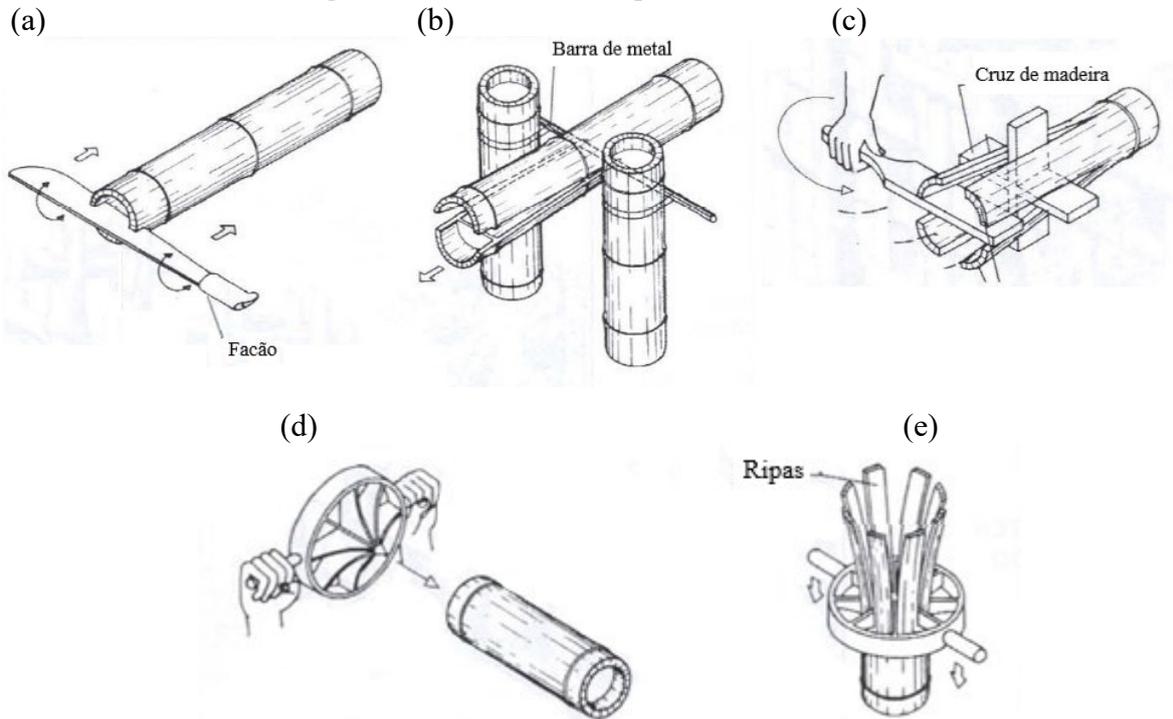


Fonte: autor.

#### 4.9 PAREDES, PISOS E FORROS

Para construir paredes, pisos e forros de bambu, o colmo roliço precisa ser manufaturado em forma de ripas ou aberto integralmente em forma planificada (em espanhol – *esterilla de bambú*). O processo de ripar o colmo de bambu é realizado ao ser aplicada uma força cortante na direção longitudinal da vara, podendo ser realizado artesanalmente com o auxílio de um facão (Figura 24a), uma barra de metal (Figura 24b) ou utilizando uma cruz de madeira como elemento divisor do bambu (Figura 24c). Com o intuito de manufaturar ripas uniformes de um mesmo colmo de bambu, foram desenvolvidas as facas radiais (Figuras 24d e 24e), as quais podem variar o número de lâminas em sua composição para produzir mais ou menos ripas. Lembrando que o processo de produção de ripas ou *esterillas* é facilitado quando feito a partir de um colmo de bambu recém-colhido, ou seja, quando o mesmo ainda está em estado verde.

Figura 24 – Processo de ripar um colmo de bambu.



Fonte: Hidalgo-López (2003).

As mesmas facas radiais, apresentadas nas Figuras 24d e 24e, podem ser utilizadas em escala industrial em uma máquina especial onde bambus de 4, 6 ou 8 m são forçados contra uma faca radial fixa em uma de suas extremidades para produzir ripas de bambu (HIDALGO-LOPEZ, 2003). A Figura 25 ilustra a máquina utilizada em uma indústria de laminados no Equador.

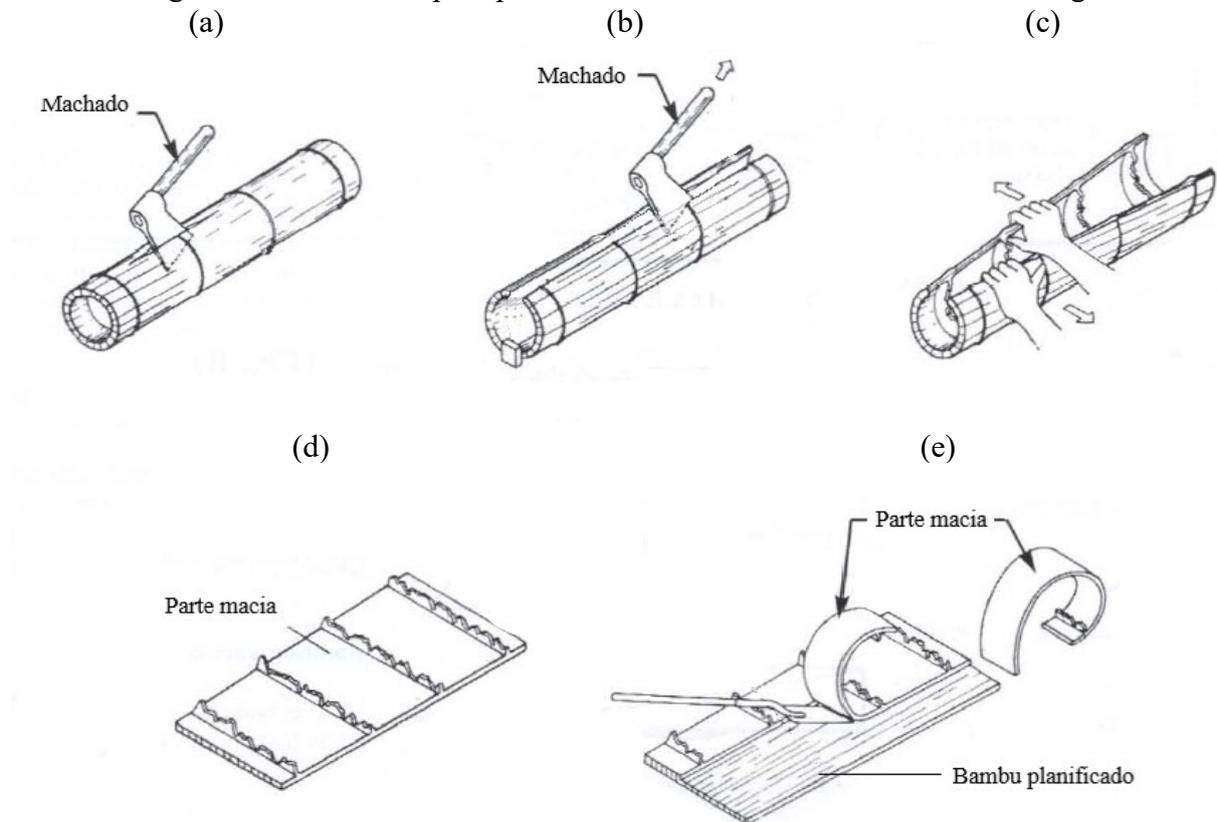
Figura 25 – Alternativa industrial para o processo de ripar um colmo de bambu.



Fonte: Vitor (2019).

Diferentemente do processo de seccionar o colmo de bambu em duas ou mais ripas, o processo de planificar o bambu possibilita a abertura do colmo de forma integral, transformando-o em uma única peça (em espanhol – *esterillas de bambú*). Para tanto, recomenda-se a utilização de um machado para rachar o bambu em toda sua longitude através de golpes repetidos ao longo da circunferência de cada nó do colmo (Figura 26a) seguidos de sua abertura longitudinal (Figura 26b e 26c) e remoção da parte macia do interior do bambu com uma pá de corte (Figura 26d e 26e).

Figura 26 – Processos para planificar um colmo de bambu de forma integral.



Fonte: Adaptado de Hidalgo-López (2003).

O bambu planificado é comumente utilizado como elemento de vedação para técnicas mistas de construção, possibilitando a criação de paredes de pisos. Para a construção do protótipo experimental em bambu da UFSC, Vitor (2019) adotou um sistema construtivo de paredes conhecido como *bahareque*. Tal sistema utiliza colmos de bambu para a estruturação e bambu planificado seguido de reboco para as vedações. Como proposta de finalização das vedações do protótipo experimental, Vitor *et al.* (2020) estudaram e experimentaram diferentes tipos e traços de argamassas de revestimento com terra seguido de caiação e pintura com pigmentos naturais para vedar e dar acabamento ao protótipo (Figura 27).

Figura 27 – Protótipo experimental em bambu da UFSC.

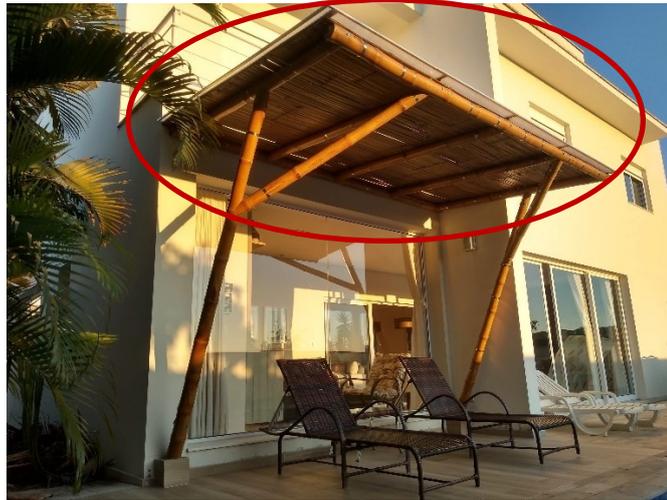


Fonte: autor (2019).

Nota-se que o *bahareque* foi feito apenas do lado exterior do protótipo (Figura 27), deixando a casca das *esterillas* expostas para o lado interno da casa. Para melhor conforto termoacústico, recomenda-se a realização o *bahareque* duplo, ou seja, em ambos os lados da parede, para configurar uma parede do tipo sanduíche que pode ser preenchida com argamassa de terra ou então com materiais convencionais tais como: EPS, lã de rocha ou lã de vidro.

Utilizando-se elementos básicos manufaturados a partir do bambu roliço como ripa e bambu planificado, também é possível criar sistemas de vedação para pisos e forros. Para os pisos recomenda-se aplainar as ripas de bambu nas quatro arestas e, em seguida, passar pelos processos de prensagem e de colagem, transformando o colmo roliço em placas de Bambu Laminado Colado (BLC). Já para os forros, pode-se utilizar as ripas de bambu, para compor painéis simples ou trançados ou então as *esterillas* de bambu, fixadas no sentido perpendicular dos caibros conforme ilustrado pela Figuras 28.

Figura 28 – Forro feito com *esterillas* de bambu fixas perpendicularmente sobre os caibros  
(a) Estrutura completa



(b) Detalhe – vista inferior do forro



(c) Detalhe – fixação das *esterillas*



Fonte: autor.

Assim como para os colmos roliços, as *esterillas* de bambu não devem ficar expostas diretamente às intempéries. A estrutura ilustrada na Figura 28a foi coberta com placas de policarbonato fixadas diretamente sobre o forro de *esterillas*. A Figura 28c ilustra a fixação das *esterillas* sobre todo o comprimento do caibro por meio de parafusos interligados com arame.

#### 4.10 CONEXÕES ENTRE PEÇAS DE BAMBUS

As uniões entre peças de bambu são consideradas como articuladas, não possuindo transmissão de momento fletor entre os elementos ligados, salvo para as uniões longitudinais, pois estas configuram continuidade ao elemento estrutural (ICONTEC, 2010).

#### **4.10.1 Elementos de ligação**

A união entre os colmos de bambu pode ser feita com: amarrações e/ou cavilhas de madeiras de densidade elevada e; auxílio de chapas e/ou parafusos metálicos. Dentre estes, o tipo de fixador mais estudado em trabalhos científicos e amplamente utilizado na construção de estruturas de bambu é realizado por barras rosqueadas, porcas e arruelas. Assim sendo, este será o principal elemento fixador estudado e elucidado nesta dissertação. Como sugestão para trabalhos futuros, é necessária a realização de pesquisas experimentais que estudem a eficiência de outros tipos de elementos de ligação para bambus.

#### **4.10.2 Perfurações e preenchimento de entrenós**

As perfurações devem ter diâmetro 1,5 mm maior que o diâmetro da barra rosqueada (MINKE, 2012). As barras rosqueadas devem ter no mínimo 9,5 mm de diâmetro e ser de aço estrutural com resistência à tensão superior a 240 MPa (ICONTEC, 2010).

Ao trabalhar com elementos de bambu unidos entre si através de pinos, deve-se atentar aos locais das perfurações para evitar o surgimento de fissuras e, posteriormente, a propagação de trincas. Para tanto, em casos onde há a necessidade de se utilizar cavilhas e/ou parafusos metálicos ao longo do comprimento do mesmo elemento de bambu, as perfurações devem ser realizadas de maneira alternada, evitando perfurações no mesmo eixo longitudinal do colmo (MINKE, 2012).

No caso de vigas compostas, não são permitidas perfurações na linha neutra em seções onde existam cargas pontuais ou próximo a região dos apoios, salvo quando tais perfurações tenham sido feitas justamente para realizar o preenchimento do entrenó com argamassa de cimento ou graute. Para situações diferentes destas, recomenda-se que as perfurações devem ser localizadas na linha neutra e, de maneira nenhuma, na zona de tensão dos elementos (ICONTEC, 2010; ICG, 2012; INEN, 2016).

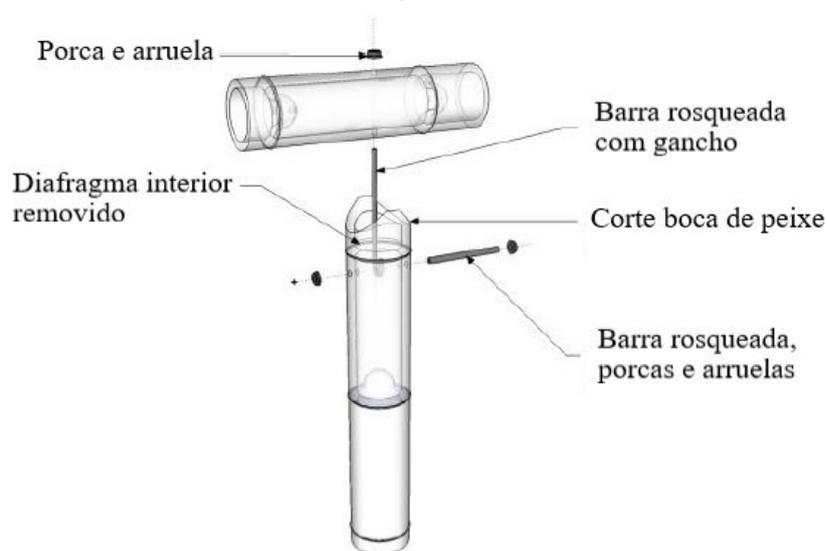
Todas as conexões estruturais, nos locais onde há transpasse de elementos de ligação ou pontos sujeitos à compressão perpendicular às fibras (esmagamento do colmo), devem ter seus entrenós preenchidos com argamassa de cimento ou de graute, sendo recomendada a realização de uma perfuração, com o auxílio de furadeira e serra copo com no máximo 40 mm de diâmetro, para facilitar o processo de preenchimento sem comprometer a resistência do bambu (ICONTEC,

2010). Segundo Minke (2012), o preenchimento do entrenó deve ser feito com argamassa de cimento com adição de brita 0, tendo o cuidado extra de se preparar a massa com pouca água na mistura de maneira a minimizar os efeitos de retração do concreto durante o processo de secagem e, conseqüentemente, o surgimento de espaços vazios entre a massa seca e a parede interna do bambu. Por experiência do autor, o traço recomendado é o de 1 de cimento para 3 de areia.

#### 4.10.3 Tipos de ligação

Para fixação de dois elementos estruturais no mesmo plano e perpendiculares entre si, recomenda-se utilizar uma barra rosqueada com gancho em apenas uma das extremidades e uma barra rosqueada comum, de modo que o gancho “pesque” o outro comprimento de barra rosqueada, que está perpendicular ao primeiro, no interior do colmo de bambu conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Fixação do corte boca de peixe a outro elemento perpendicular por meio de barras rosqueadas.

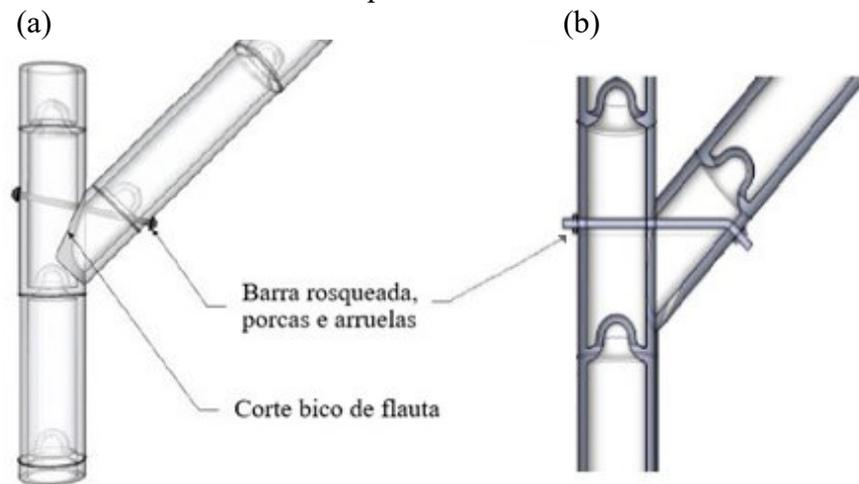


Fonte: Adaptada de ICG (2012).

Para fixação de um elemento inclinado a outro elemento estrutural no mesmo plano, recomenda-se unir as duas peças com a utilização de uma barra rosqueada de tal modo que a perfuração seja feita o mais próximo possível do último nó da peça recortada (Figuras 30). A barra rosqueada deve ser fixada de tal forma que a arruela se ajuste à inclinação entre as peças e exerça a pressão de maneira perpendicular às paredes externas de ambos os bambus. Para tanto, sugere-

se posicionar a barra rosqueada com leve inclinação (Figura 30a) ou horizontalmente com uma pequena dobra em uma das extremidades (Figura 30b).

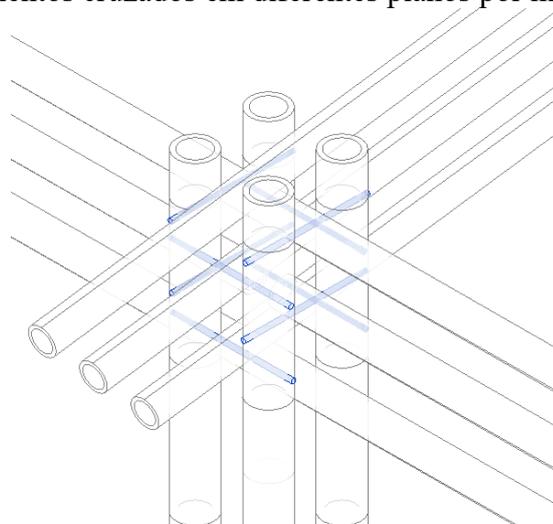
Figura 30 – Fixação do corte bico de flauta a outro elemento estrutural por meio de barra rosqueada.



Fonte: Adaptada de ICG (2012)

Ao optar por outro sistema construtivo, onde se cruzam os bambus em diferentes níveis tanto para fixação de elementos perpendiculares como inclinados entre si, diminui-se a necessidade da realização de cortes artesanais para encaixe entre elementos. De tal maneira, a fixação passa a ser realizada por meio de barras rosqueadas transpassadas entre os elementos de bambu (Figura 31).

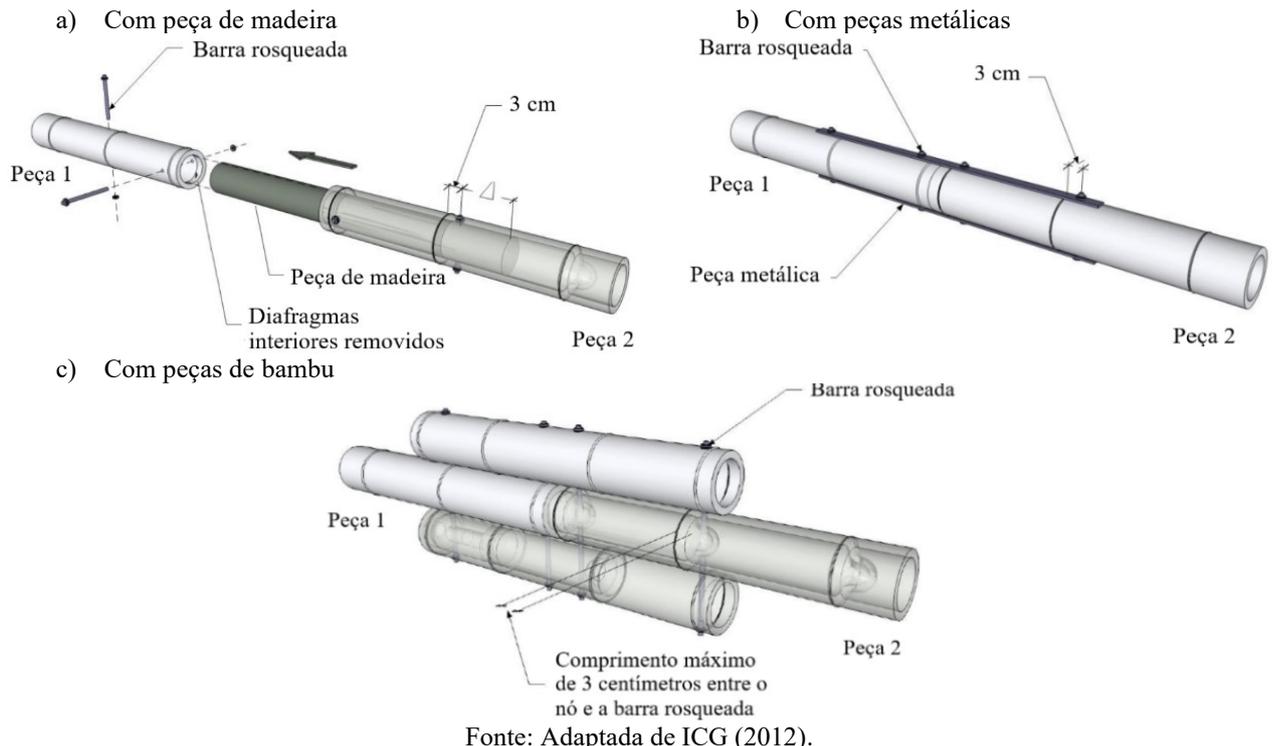
Figura 31 – Fixação de elementos cruzados em diferentes planos por meio de elementos metálicos.



Fonte: autor.

Para uniões longitudinais, quando se deseja dar continuidade estrutural ao elemento, a norma peruana E.100 BAMBÚ (ICG, 2012) recomenda a seleção de peças com diâmetros similares que possuam nós em suas extremidades. Ela indica três possíveis tipos de união: com peça de madeira (Figura 32a); com peças metálicas (Figura 32b); e com duas peças de bambu (Figura 32c):

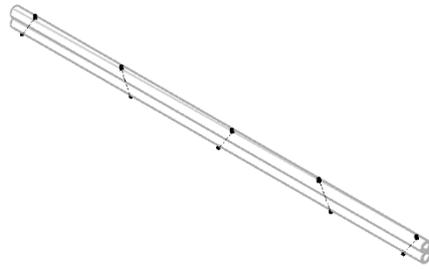
Figura 32 – Uniões longitudinais conforme tipo de ligação.



Para fabricação de peças compostas, a norma peruana E.100 BAMBÚ (ICG, 2012) estabelece que a fixação entre seus elementos estruturais é garantida utilizando amarras ou barras rosqueadas espaçadas entre si a cada, no mínimo,  $\frac{1}{4}$  do comprimento da viga ou  $\frac{1}{3}$  da altura da coluna (Figuras 33).

No caso da utilização de pinos ou barras rosqueadas, para garantir solidariedade entre as peças de uma viga composta, as uniões entre seus elementos devem ser realizadas por meio de conectores alternadamente inclinados, de maneira a “costurar” as peças e travar a viga composta (Figura 33a).

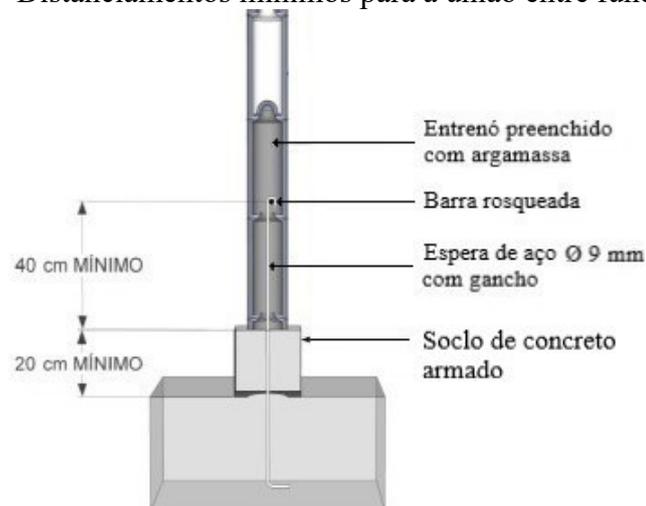
Figura 33 – Fixação de peças compostas.

(a) a cada  $\frac{1}{4}$  do comprimento da viga(b) a cada  $\frac{1}{3}$  da altura da coluna

Fonte: autor.

Quanto à união entre a fundação e a base dos pilares, a norma peruana E.100 BAMBÚ (ICG, 2012) estabelece distanciamento mínimo de 20 cm entre o nível do solo e a base dos pilares de bambu. Para tanto costuma-se construir pedestais com espera de barras de aço de diâmetro de 9,0 mm com gancho na extremidade e arranque de, no mínimo, 40 cm de comprimento. Para efetuar tal ligação, a norma prevê a utilização de um comprimento de barra rosqueada que passe dentro do gancho da espera, ancorando o pilar à fundação através do preenchimento dos entrenós com argamassa de cimento ou graute (Figura 33). O comprimento do engastamento dentro do concreto deve ter, no mínimo, 40 centímetros e ser projetado adequadamente para suportar os esforços solicitantes.

Figura 34 – Distanciamentos mínimos para a união entre fundação e pilar



Fonte: traduzida e adaptada de ICG (2012).

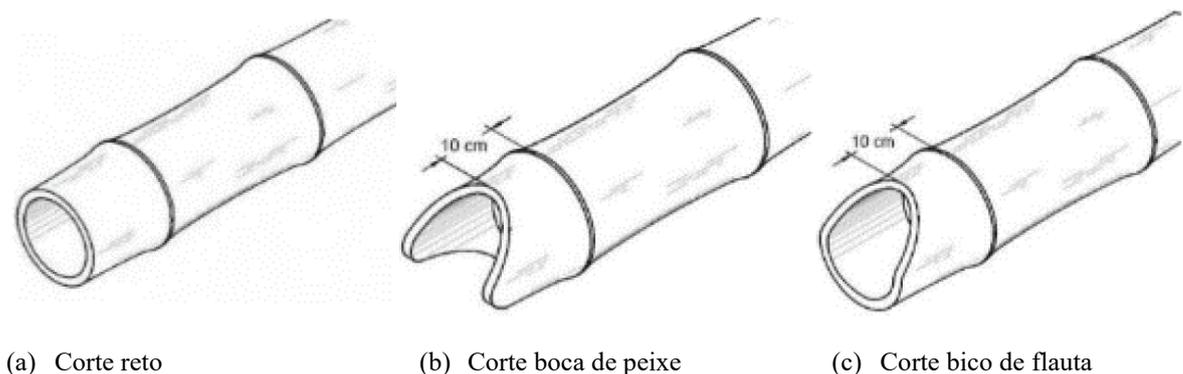
Dada a dificuldade em se “pescar” a espera de aço da fundação através de um arranque com gancho, costuma-se chumbar uma espera de aço comum (sem gancho) e simplesmente atravessar um comprimento de barra rosqueada perpendicularmente à tal espera, consolidando a ligação através do preenchimento dos entrenós conforme descrito pela normativa peruana.

Para impedir e/ou dificultar a percolação e a ascensão da água pela base dos pilares de bambu, o autor do presente trabalho recomenda a utilização de aditivo impermeabilizante na massa de concreto do soclo ou então a utilização de algum material isolante e de alta densidade entre o soclo de concreto armado e a base dos pilares de bambu.

#### 4.10.4 Tipos de corte

Conforme as normas colombiana NSR-10, peruana NTE.100 e equatoriana NEC *GaK* e brasileira NBR-16282, os três principais tipos de cortes utilizados para fabricar conexões de elementos de bambu para garantir a boa concordância entre as peças são: corte reto, corte boca de peixe e corte bico de flauta (Figuras 30). Para ligação entre peças que apresentam ângulo de 90° entre si, utiliza-se o corte “boca de peixe” e para os demais encaixes em ângulo utiliza-se o “bico de flauta” adaptado para cada inclinação. A distância entre o último nó e a parte mais baixa do corte deve ser de no máximo 10 cm (ICONTEC, 2010).

Figura 35 – Principais tipos de corte para unir peças inclinadas.



Fonte: ABNT, 2020a.

Os cortes artesanais comumente utilizadas para unir elementos estruturais de bambu, corte boca de peixe, corte bico de flauta e suas variações, representam uma das maiores dificuldades para o uso do material em larga escala na construção civil (PADOVAN, 2010).

Segundo Minke (2012), a transferência dos esforços entre elementos de bambu é favorecida quando a zona dos encaixes está completamente em contato uma com a outra, ou seja, quando há concordância perfeita entre as superfícies dos elementos. Assim sendo, ao optar pela utilização de encaixes artesanais como o “boca de peixe” e/ou o “bico de flauta” deve-se ter em conta, na fase de construção, que o encaixe deve ser perfeito para reduzir o surgimento de trincas na região das uniões que possam vir a surgir anos depois durante a utilização da estrutura.

Como alternativas de melhoria tecnológica para unir dois ou mais elementos de bambu e substituir os cortes realizados de maneira artesanal, conectores metálicos complexos vêm sendo projetados e testados especificamente para distribuir uniformemente os esforços entre seus elementos com a utilização de elementos complementares mais sofisticados (BALLESTÉ, 2017).

Segundo Ballesté (2017), a utilização de conexões com comportamento controlado e padronizado a partir de elementos pré-fabricados, tais como conectores metálicos desenvolvidos especificamente para às extremidades dos colmos, facilita a produção em alta escala e possui maior controle de qualidade que os cortes artesanais. Tais conectores não serão aprofundados nesta dissertação.

## 5 NOÇÕES BÁSICAS PARA O PROJETO DE ESTRUTURAS EM BAMBU

Nesta seção, serão abordados tópicos para o desenvolvimento de boas práticas durante o projeto e a construção de elementos estruturais de bambu. Apresentam-se as recomendações normativas para projeto, o recebimento e estocagem do material e a durabilidade e manutenção preventiva.

### 5.1 PRINCÍPIOS PARA A CONCEPÇÃO DE PROJETOS EM BAMBU

Como conceito geral para concepção de projetos em bambu, destaca-se que os bambus, além de maduros, devem estar devidamente imunizados e com umidade relativa próxima à umidade do ambiente ao qual será inserido (JANSSEN, 2000; MINKE, 2012; PEREIRA E BERARDO, 2016; ICONTEC, 2010; ICG, 2012; INEN, 2016).

Na América do Sul, encontram-se em vigor quatro normas para projeto de estruturas de bambu: a norma NSR-10 da Colômbia, norma NTE.100 do Peru, a norma NEC *GaK* do Equador e a norma NBR16828-1 do Brasil. Com exceção da regulamentação brasileira, as demais normas latinas limitam a aplicação dos bambus de uso estrutural para edificações de até dois pavimentos. Em adição, a norma colombiana NSR-10 não permite muros de alvenaria ou de concreto no nível superior das edificações, a norma peruana NTE.100 limita o carregamento de carga acidental em, no máximo, 2,45 kN/m<sup>2</sup> e a norma equatoriana NEC *GaK* em, no máximo, 2,0 kN/m<sup>2</sup> (ICONTEC, 2010; ICG, 2012; INEN, 2016; ABNT, 2020a)

Para a proteção contra incêndio, a norma colombiana NSR-10 de estruturas de *Guadua* sugere a utilização de substâncias impregnantes que retardem o processo de queima, não locar os bambus próximos a fontes de calor e evitar o emprego de elementos de calefação que aumentem perigosamente a temperatura interna dos ambientes (ICONTEC, 2010).

Para a proteção contra a umidade, recomenda-se que os projetos prevejam a proteção dos bambus estruturais por medidas que evitem seu contato direto com o solo, garantam sua proteção contra as intempéries, garantam ventilação suficiente e evitem seu uso em ambientes molhados como cozinhas e banheiros (ICONTEC, 2010; UBIDIA, 2015). Para evitar o contato direto do bambu com o solo, a norma peruana (ICG, 2012) sugere a utilização de soclos que elevem a base dos pilares em, no mínimo, 20 cm do solo. De maneira análoga, para proteger a estrutura contra as intempéries, recomenda-se a construção de beirais suficientemente largos (UBIDIA, 2015) e a aplicação de produto impermeabilizante (ICONTEC, 2010). Segundo Jorg Stamm (JORG

STAMM MASTER OF BAMBOO, 2020), o produto mais indicado para tal finalidade é o *stain* impregnante.

## 5.2 RECEBIMENTO DO MATERIAL

O recebimento do bambu na obra é uma etapa importante no processo construtivo do empreendimento. Segundo a norma colombiana de estruturas de bambu *Guadua angustifolia* Kunth (NSR-10), as peças estruturais devem passar por uma inspeção visual visando a utilização de colmos de bambu conforme o seguinte padrão: bambus maduros, tratados e secos; bambus com ausência de deformações no eixo superiores a 0,33% do comprimento da peça; bambus com índice de conicidade inferior a 1%; bambus com ausência de fissuras perimetrais nos nós, tampouco fissuras longitudinais ao longo do eixo da peça (caso haja fissuras, estas devem estar localizadas apenas na fibra externa, não podendo ultrapassar dois nós consecutivos); bambus com ausência de rachaduras iguais ou superiores a 20% do comprimento do colmo; bambus com ausência de perfurações causadas pelo ataque de agentes xilófagos e; bambus com nenhum grau de podridão (ICONTEC, 2010).

A vistoria no momento do recebimento do material é crucial para a durabilidade de toda a construção. Portanto, caso as peças estejam fora do padrão de qualidade especificado no parágrafo anterior, as mesmas devem ser recusadas no momento do descarregamento do material na obra.

Caso peças não maduras e/ou não tratadas sejam aceitas e descarregadas com as demais, elas irão se misturar e, durante o processo de secagem, podem tornar-se irreconhecíveis, prejudicando assim o desempenho da estrutura ao longo dos anos. Para diferenciar as varas de bambu conforme sua aplicação na edificação, recomenda-se fazer marcações nas mesmas.

## 5.3 DURABILIDADE E MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE UMA EDIFICAÇÃO EM BAMBU

Diretamente influenciada pela qualidade do projeto arquitetônico, a durabilidade de uma edificação é o resultado, ao longo do tempo, da interação entre seus componentes e o meio no qual estão inseridos. Segundo a norma ISO 15686 (ISO, 2001), a integridade de um componente

construtivo pode ser comprometida por meio de agentes de degradação de natureza mecânica, eletromagnética, térmica, química ou biológica. Assim sendo, o projeto de estruturas em bambu deve prever medidas protetivas específicas com a finalidade de minimizar a degradação dos elementos de bambu, potencializando assim a durabilidade da edificação como um todo ao longo dos anos.

Uma vez projetadas e devidamente dimensionadas, as estruturas em bambu podem apresentar problemas oriundos do processo de construção. Assim sendo, são diversos os cuidados a serem tomados durante a fase da construção que visam majorar a durabilidade dos elementos em bambu na edificação. Como por exemplo, no tocante aos pontos de união entre bambus, estes costumam apresentar problemas durante o uso da estrutura, podendo ser resultado do mal dimensionamento e/ou da má execução dos encaixes pela equipe de mão de obra.

Dada a importância em se realizar os encaixes artesanais com perfeição (Item 4.10), a equipe de mão de obra possui parcela significativa da responsabilidade sobre a durabilidade das edificações em bambu. Diferentemente de países latinos como Colômbia, Equador, Peru e Costa Rica, em que a construção com bambu faz parte da tradição vernacular de seus povos, no Brasil não existe mão de obra qualificada e em quantidade suficiente para trabalhar o material bambu em todas suas potencialidades (PEREIRA E BERVALDO, 2016).

### **5.3.1 Fatores arquitetônicos que influenciam a durabilidade da edificação**

Assim como as madeiras, o bambu é uma planta que, enquanto na mata e após sua coleta, está sujeita ao ataque de agentes xilófagos como também é capaz de absorver água do ambiente durante sua utilização. Devido a este fator, o projeto arquitetônico deve prever a proteção do bambu contra as intempéries através de três princípios básicos de projeto: elevar a base dos bambus em relação ao nível do solo; prever grandes beirais e; recomendar regime de impermeabilização, via pintura, dos elementos de bambu da estrutura.

Jaramillo (2019) destaca que as funções do projetista, além de responsável técnico pela segurança dos bambus por projeto (evitando a umidade, os raios solares, chuvas diretas e indiretas, etc.), se estendem desde a determinação das características dos colmos a serem utilizados na edificação (espécie, maturidade, tratamento e secagem), até a indicação da forma e do regime de manutenção da estrutura.

### 5.3.2 Recomendações normativas

Com base nas normativas ISO 22156 (ISO, 2001), NSR-10 da Colômbia (ICONTEC, 2010), NTE.100 do Peru (ICG, 2012), IS 15912 da Índia (BIS, 2012) e NEC-GaK do Equador (INEN, 2016), a pesquisadora Jaramillo Benavides (2019) desenvolveu uma tabela que compila as recomendações apontadas pelas normas que visam a proteção do bambu na fase de projeto (Tabela 7)

Tabela 7 – Recomendações das normas ISO 22156, NSR-10, NTE.100, IS 15912 e NEC-GaK para proteção do bambu no projeto.

Agente de degradação	Recomendações	
Umidade	Proteção contra a umidade por capilaridade	Impedir o contato direto do bambu com o solo. Os pilares de bambu devem ser colocados sobre bases (de concreto, pedra, através de conectores metálicos, etc.) que os afastem do nível do chão. Não colocar a base dos pilares em bambu dentro da concretagem das fundações. Isolamento (metálico ou de Neoprene) entre os pilares de bambu e as bases que os separam do solo.
	Proteção contra a umidade proveniente de chuvas	Uso de grandes beirais. Uso de canais para coleta de água de chuva nas coberturas. Em caso de bambus expostos às intempéries, usar produtos impermeabilizantes de proteção.
	Proteção contra a umidade por condensação	Ventilação dos espaços onde possa existir condensação de água (como cozinhas e banheiros). Proteção dos elementos de bambu com produtos impermeáveis.
Agentes bióticos	Secagem e tratamento preservativo do bambu. Vedação de aberturas entre elementos construtivos para evitar o ingresso de animais e/ou insetos.	
Uso e exposição ao longo do tempo	Inspeção das estruturas; Aplicação de tratamento por injeção dos elementos de bambu que apresentem sinais de ataques xilófagos; Substituição de peças que comprometam o adequado funcionamento dos componentes construtivos e da edificação.	

Fonte: Jaramillo Benavides (2019).

### 5.3.3 Manutenção preventiva da edificação

A ação danosa mais recorrente às estruturas de bambu bem projetadas e executadas está relacionada à sua exposição de longa duração às intempéries e à variação de umidade. Desta forma, para aumentar a durabilidade dos elementos de bambu, recomenda-se realizar a manutenção periódica da impermeabilização dos bambus sob regime anual para áreas externas cobertas, a cada dois anos em espaços interiores e, caso haja bambus expostos às intempéries, recomenda-se a aplicação de produto impermeabilizante a cada seis meses (UBIDIA, 2016). O regime de manutenção da aplicação de produto impermeabilizante depende do clima da região e do grau de exposição da peça às intempéries.

Ao realizar a manutenção preventiva de aplicação do produto impermeabilizante, a norma NSR-10 recomenda, conjuntamente, verificar o aperto dos elementos metálicos de ligação e inspecionar visualmente todos os bambus da estrutura para detectar e controlar eventuais problemas como, perfurações e perdas de massa, machas e mudanças de cor, trincas, rachaduras e esmagamento de entrenós. Caso algum elemento estrutural apresente rachaduras, deformações excessivas, tenha sofrido esmagamento do entrenó ou esteja sendo atacado por algum agente biológico, deve-se comunicar o ocorrido o mais rápido possível ao construtor para que tais peças sejam reparadas ou substituídas (ICONTEC, 2010).

## 6 ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM BAMBU

Para efeitos de cálculo, o bambu pode ser considerado como um tubo oco. Porém, devido à sua conicidade, as normas NSR-10 (ICONTEC, 2010) e NTE.100 (ICG, 2012) recomendam que o cálculo deve ser realizado com o valor médio entre as dimensões da base e do topo do colmo de bambu. Partindo do entendimento de que os elementos de bambu são tubos de seção circular que podem ser empregados na construção, tanto individualmente quanto em grupo, por meio de arranjos específicos de seção composta, neste capítulo serão apresentados os princípios básicos de dimensionamento de elementos estruturais em bambu. As principais normas utilizadas para o desenvolvimento do presente capítulo são: NSR-10 (ICONTEC, 2010), NTE.100 (ICG, 2012), NEC GaK (INEN, 2016) e NBR16828-1 (ABNT, 2020a).

De antemão, aqui cabe ressaltar que a norma NSR-10 da Colômbia (ICONTEC, 2010), NTE.100 do Peru (ICG, 2012) e NEC GaK do Equador (INEN, 2016) foram elaboradas considerando a incidência de abalos sísmicos devido às suas respectivas localizações geográficas, diferentemente para da norma brasileira NBR16828-1 (ABNT, 2020a), cujo país não se encontra em regiões sísmicas.

### 6.1 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

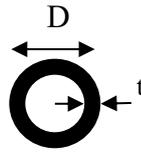
#### 6.1.1 Área da seção transversal

A área resistente do elemento estrutural ( $A$ ) é referente à seção transversal do colmo, podendo ser calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$A = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2], \quad (1)$$

sendo  $A$  = área da seção transversal da peça ( $\text{mm}^2$ );  $D$  = diâmetro externo médio do bambu (mm);  $t$  = espessura média da parede (mm), conforme ilustrado pela Figura 35.

Figura 36 – Seção transversal do bambu: diâmetro (D) e espessura (t).



Fonte: autor.

No caso de peças de seção composta por mais de um colmo, a área da seção transversal é dada pela somatória das áreas individuais de cada colmo, ou seja:

$$A = \sum A_i, \quad (2)$$

sendo,  $A_i$  = área da seção transversal do i-ésimo colmo.

### 6.1.2 Momento de inércia

Por se tratar de um tubo oco, o momento de inércia baricêntrico de um colmo de bambu é calculado utilizando a Equação 3.

$$I_0 = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2t)^4], \quad (3)$$

sendo,

$I_0$  = momento de inércia baricêntrico ( $\text{mm}^4$ ).

No caso de peças de seção composta por mais de um colmo, as normas NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR16828-1 apresentam diversos modos para a determinação do momento de inércia da seção transversal dos elementos estruturais, em função da natureza de cada um (pilares ou vigas) e solidariedade existente entre os colmos de bambu, conforme sumarizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo de cálculo para o momento de inércia de peças compostas por mais de um colmo de bambu conforme função estrutural e normativa referente.

Elemento estrutural	Especificação da ligação	Fórmulas para o cálculo do momento de inércia conforme as normativas de cada país			
		Colômbia: NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru: NTE.100 (ICG, 2012)	Equador: NEC GaK (INEN, 2016)	Brasil: ABNT 16828-1 (ABNT, 2020a)
Pilares	Colmos sem ligação entre si				$(I = \sum I_{oi})$
	Colmos afastados entre si e conectados não continuamente	$(I = \sum I_{oi})$	$(I = \sum I_{oi})$	$(I = \sum I_{oi})$	$I = k(\sum A_i d_i^2)$
	Colmos garantidamente unidos ao longo do comprimento	$I = \sum I_{oi} + \sum (A_i d_i^2)$	$I = \sum I_i + \sum (A_i d_i^2)$		$I = k(\sum I_{oi} + \sum A_i d_i^2)$
Vigas	Colmos sem ligação entre si			$(I = \sum I_{oi})$	$(I = \sum I_{oi})$
	Colmos afastados entre si e conectados não continuamente	$(I = \sum I_{oi})$	$(I = \sum I_{oi})$		
	Colmos garantidamente unidos ao longo do comprimento	$I = \sum I_{oi} + \sum (A_i d_i^2)$	$I = \sum I_{oi} + \sum (A_i d_i^2)$		

k = Coeficiente para correção do momento de inércia; k = 0,8 para pilares compostos por dois colmos; k = 0,7 para pilares compostos por três ou mais colmos.

Fonte: compilado pelo autor.

Por meio da Tabela 8, nota-se que o momento de inércia para pilares ou vigas compostas por colmos sem ligação entre si, segundo todas as normativas apresentadas, pode ser calculado pelo somatório dos momentos de inércia baricêntricos de cada área da seção transversal ( $I = \sum I_{0i}$ ). Isto significa que todas as normas possuem a mesma abordagem quanto peças compostas sem solidariedade entre seus elementos, em que o momento de inércia é calculado pela simples soma das inércias individuais. Comparativamente, apenas a norma equatoriana NEC *GaK* adota tal cálculo para todas as situações de ligação entre peças compostas e independentemente de sua função estrutural.

Ainda analisando a Tabela 8, percebe-se que os procedimentos adotados pelas normas NSR-10 e NTE.100 são os mesmos. Para elas, quando o construtor garante o trabalho conjunto da peça composta, o momento de inércia baricêntrico passa a ser calculado pelo teorema de Steiner dos eixos paralelos ( $I = \sum I_{0i} + \sum (A_i d_i^2)$ ). A utilização de tal teorema representa que há solidariedade entre os elementos da peça, que tais elementos estão trabalhando em conjunto como um todo, o que eleva, consideravelmente, a resistência mecânica da peça composta.

Diferindo das demais, a norma NBR16828-1 é a única que diferencia o cálculo do momento de inércia baricêntrico de peças compostas em função do elemento estrutural, ou seja, se é pilar ou viga. No caso de vigas compostas, a norma considera que o momento de inércia da seção composta é o somatório dos momentos de inércia baricêntrico de cada um dos colmos ( $I = \sum I_{0i}$ ), ou seja, que não há solidariedade entre os elementos da peça composta, nem mesmo se os colmos estiverem garantidamente unidos ao longo do comprimento. No caso de pilares compostos, a norma NBR16828-1 adota outros três procedimentos excepcionais: o primeiro de criar um coeficiente de minoração “k”; o segundo de inserir uma nova equação específica para a ligação entre colmos afastados entre si e conectados não continuamente ( $I = k(\sum A_i d_i^2)$ ); e o terceiro ao multiplicar o mesmo coeficiente de minoração “k” pela equação do teorema de Steiner dos eixos paralelos para a especificação de ligação de colmos garantidamente unidos ao longo do comprimento ( $I = k(\sum I_{0i} + \sum A_i d_i^2)$ ).

Como citado no Item 2.3, as normativas devem acompanhar o desenvolvimento de pesquisas na área, sendo constantemente aprimoradas em consonância com as boas práticas de engenharia. Dentre as 4 normas analisadas na Tabela 8, a norma equatoriana NEC *GaK* é a mais restritiva pois, tanto para pilares ou vigas, não considera nenhum grau de solidariedade entre os elementos de uma mesma peça. Já a norma brasileira NBR16828-1 apresenta-se como a segunda norma mais restritiva quanto ao cálculo do momento de inércia baricêntrico de peças compostas,

evidenciando em seus procedimentos de cálculo que não existe uma solidariedade perfeita entre todos os elementos de uma peça, considerando, portanto, somente uma parcela da inércia. Assim sendo, as normas NSR-10 e NTE.100 são as que possibilitam o melhor aproveitamento estrutural do material ao permitirem a utilização do teorema dos eixos paralelos caso o construtor garanta o trabalho conjunto dos elementos da peça composta, independentemente de sua função estrutural.

Tendo em vista as divergências para o cálculo do momento de inércia das seções transversais de elementos compostos em bambu, é necessário o desenvolvimento de pesquisas sobre os tipos de fixação e aderência relativa entre os elementos de uma mesma sessão composta, a fim de diminuir essas diferenças, reduzir os fatores de segurança e possibilitar, cada vez mais, o melhor aproveitamento estrutural do material.

### 6.1.3 Raio de giração

O raio de giração ( $r$ ) é a grandeza física relacionada à esbeltez e à flambagem de pilares e, de acordo com a norma brasileira (ABNT, 2020a), é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$r_i = \sqrt{\frac{I_i}{A_i}}. \quad (8)$$

### 6.1.4 Momento resistente da seção transversal ou módulo de seção

O momento resistente da seção transversal ( $W$ ) ou módulo de seção ( $S$ ) é o momento que se contrapõe à flexão e, de acordo com a norma brasileira (ABNT, 2020a), é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$W = 2 \frac{I}{h}, \quad (9)$$

onde,

$h$  = altura da seção da peça (mm).

Para o dimensionamento à flexão propriamente dito, as normativas da Colômbia NSR-10 (ICONTEC, 2010), do Peru NTE.100 (ICG, 2012) e do Equador NEC *GaK* (INEN, 2016), ao invés de fornecer a Equação 9 para o cálculo do módulo da seção, definem o desencadeamento da Equação 10 para apenas um único colmo de bambu, onde a altura da peça ( $h$ ) é igual ao diâmetro da mesma ( $D$ ), ou seja:

$$W = S = 2 \frac{I}{h} = 2 \cdot \frac{\pi}{64} \frac{[D^4 - (D - 2t)^4]}{h}, \quad (10)$$

como  $h = D$ ,

$$W = S = \frac{\pi [D^4 - (D - 2t)^4]}{32D}. \quad (11)$$

A Equação 11 é apresentada em todas as três normativas latino hispânicas (NSR-10, NTE.100 e NEC *GaK*) para o cálculo do módulo da seção de apenas um colmo de bambu quando submetido à flexão. Já para o cálculo do módulo da seção para peças compostas por mais de um colmo de bambu quando submetidas à flexão, as normativas da Colômbia NSR-10 (ICONTEC, 2010) e do Peru NTE.100 (ICG, 2012) disponibilizam uma tabela específica (Tabela 9) para apenas dois tipos de seção composta sem exemplificar como chegaram a tais valores e sem mencionar como realizar o cálculo para demais seções transversais.

Tabela 9 – Valor do módulo de seção para dois possíveis arranjos de viga composta.

Colômbia NSR-10 (ICONTEC, 2010) e do Peru NTE.100 (ICG, 2012)	
Arranjos para vigas compostas (seção transversal da peça)	Módulo de seção (S)
	$S = \frac{\pi[5D^4 - 4D^2(D - 2t)^2 - (D - 2t)^4]}{32D} \quad (12)$
	$S = \frac{\pi[35D^4 - 4D^2(D - 2t)^2 - (D - 2t)^4]}{96D} \quad (13)$

Fonte: ICONTEC (2010) e ICG (2012).

Ao desenvolver o cálculo para o módulo das duas seções apresentadas na Tabela 9, pode-se observar que ambas as fórmulas apresentadas foram obtidas utilizando o momento de inércia (I) de acordo com o teorema de Steiner dos eixos paralelos ( $I = \sum I_i + \sum(A_i d_i^2)$ ) aplicado à fórmula geral ( $W = S = 2 \frac{I}{h}$ ). Assim sendo, os módulos de seção apresentados nesta tabela devem ser utilizados apenas quando o construtor garantir o trabalho em conjunto dos colmos de bambu ao longo do comprimento de toda a peça (conforme apresentado via Tabela 8).

Portanto, o autor do presente trabalho acredita que o fornecimento, por parte das normativas NSR-10 e NTE.100, da Fórmula 11 e da Tabela 9 sem as devidas explicações de cálculo, dão espaço para a interpretação errônea quanto sua utilização e limitam o desenvolvimento do procedimento de cálculo para outros possíveis arranjos de vigas compostas.

## 6.2 VALORES CARACTERÍSTICOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Introdutoriamente importa enfatizar que existem 2 métodos de verificação da segurança de elementos estruturais: o método das tensões admissíveis e o método dos estados limites. As normas colombiana NSR-10, peruana NTE.100, e equatoriana NEC *GaK* adotam o método das tensões admissíveis, enquanto que a norma brasileira NBR 16828-1 adota o método dos estados limites.

O valor característico das propriedades mecânicas dos bambus é aquele que tem 5% de probabilidade de não ser atingido em um determinado número de corpos de prova ensaiados (ABNT, 2020a). Para tanto, a norma brasileira NBR-16828-1 estabelece a resistência característica genérica,  $f_k$ , conforme a seguinte equação:

$$f_k = f_{0,05} = f_m - 1,645 \times s \quad , \quad (14)$$

onde,

$f_k$  = valor característico;

$f_{0,05}$  = valor de cálculo de resistência para o percentil de 5% de probabilidade de falha

$f_m$  = valor médio dos dados experimentais;

$s$  = desvio-padrão dos resultados da amostra, devendo-se ensaiar pelo menos 12 corpos de prova por lote.

Já para as normas colombiana NSR-10 e equatoriana NEC *GaK*, os valores de resistência característica obtidos experimentalmente são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$f_{ki} = f_{0,05i} \left[ 1 - \frac{2,7 \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right] , \quad (15)$$

onde,

$f_{ki}$  = valor característico conforme o tipo de solicitação  $i$ ;

$f_{0,05i}$  = valor correspondente ao percentil 5 dos resultados dos dados experimentais conforme o tipo de solicitação  $i$ ;

$m$  = valor médio dos dados experimentais;

$s$  = desvio-padrão dos resultados da amostra;

$n$  = número de ensaios (devendo se ensaiar pelo menos 20 corpos de prova);

$i$  = subíndice que varia conforme o tipo de solicitação.

Por se tratarem de normas baseadas no método das tensões admissíveis;

$$f_i = \frac{FC}{F_s \times FDC} f_{ki} , \quad (16)$$

onde,

$f_i$  = esforço admissível conforme o tipo de solicitação  $i$ ;

$FC$  = fator de redução devido às diferenças de condições entre os ensaios de laboratório e as condições reais de aplicação de cargas na estrutura (Tabela 10);

$F_s$  = fator de segurança (Tabela 10);

$FDC$  = fator de duração de carga (Tabela 10);

Tabela 10 – Fatores de redução conforme o tipo de solicitação i.

	Flexão ( $M_0$ )	Tração ( $t_0$ )	Comp. // ( $c_0$ )	Comp. $\perp$ ( $c_{90}$ )	Corte ( $v_0$ )
FC	-	0,5	-	-	0,6
Fs	2,0	2,0	1,5	1,8	1,8
FDC	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1

Fonte: ICONTEC (2010); INEN (2016).

Embora o valor característico das propriedades dependa do resultado de cada ensaio específico, caso não seja possível determinar todas as propriedades experimentalmente, a norma brasileira NBR-16828 permite o uso da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) como valor base para obtenção das demais resistências características e do módulo de elasticidade (Tabela 11).

Diferentemente da NBR-16828, as normas NSR-10 e NEC *GaK*, por serem de uso exclusivo para bambus da espécie *Guadua angustifolia* Kunth (*GaK*), possibilitam a utilização de valores fixos para as resistências características e dois ou mais valores definidos para o módulo de elasticidade (Tabela 11). Por sua vez, a norma NTE.100 abrange o campo de aplicação para além de bambus da espécie *Guadua angustifolia* Kunth (*GaK*), possibilitando o uso de outras espécies de características físico mecânicas similares a mesma. Assim sendo, a norma NTE.100 também possui valores fixos para as resistências características e dois valores definidos para o módulo de elasticidade (Tabela 11).

Tabela 11 – Resistências características ( $f_i$ ) e Módulos de elasticidade ( $E_i$ ) conforme a nacionalidade da norma.

Propriedade	Valores característicos (MPa)			
	Colômbia: NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru: NTE.100 (ICG, 2012)	Equador: NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)	Brasil: NBR-16828 (ABNT, 2020a)
$f_{t0,k}$	18	16	19	$1,3 f_{c0,k}$
$f_{v,0k}$	1,2	1	1,2	$0,15 f_{c0,k}$
$f_{c0,k}$	14	13	14	$f_{c0,k}$
$f_{c90,k}$	1,4	1,3	1,4	$0,1 f_{c0,k}$
$f_{M0,k}$	15	5	15	$1,1 f_{c0,k}$
$E_{0,5}$	9500	-	12000	300 $f_{c0,k}$
$E_{0,05}$	7500	-	7500	
$E_{min}$	4000	7300	4000	
$E_{médio}$	-	9500	-	

Fonte: compilado pelo autor.

### 6.3 VALORES DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O cálculo das propriedades mecânicas do bambu depende de fatores como, tipo da força (flexão, tração, compressão e cisalhamento), duração da carga, conteúdo de umidade, temperatura, estabilidade lateral de vigas, estabilidade de colunas, dentre outros fatores de segurança, para a determinação de seus valores (ICONTEC, 2010; MINKE, 2012).

Os coeficientes de modificação dos valores característicos em valores de cálculo serão apresentados nesta seção através de tabelas comparativas entre os dados fornecidos pelas normativas NSR-10 da Colômbia, NTE.100 do Peru, NEC *GaK* do Equador e NBR16828-1 do Brasil.

As normas colombiana NSR-10 e equatoriana NEC *GaK* adotam coeficientes de modificação similares para o cálculo das tensões admissíveis, sendo eles: por tipo de carregamento ( $C_D$ ); pela umidade relativa do ambiente ( $C_m$ ); por temperatura ( $C_t$ ); por estabilidade lateral de vigas ( $C_L$ ); por forma ( $C_F$ ); por redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$ ); por estabilidade de colunas ( $C_p$ ) e; por cortante ( $C_c$ ). A norma peruana NTE.100, por sua vez, adota apenas três coeficientes de modificação para o cálculo das tensões admissíveis, o  $C_D$ , o  $C_L$  e o  $C_r$ , sendo que os valores tabelados para o  $C_L$  são os mesmos definidos para as normas da Colômbia (NSR-10) e

do Equador (NEC *GaK*). Já a norma brasileira NBR-16282 utiliza a nomenclatura  $k_{mod}$  para a definição de seus coeficientes de modificação da resistência, sendo eles: por tipo de carregamento ( $k_{mod,1}$ ); por umidade relativa do ambiente ( $k_{mod,2}$ ); pela qualidade do colmo ( $k_{mod,3}$ ) e; por estabilidade lateral de vigas ( $k_{mod,4}$ ), sendo que este último coeficiente, análogo ao  $C_L$ , têm os mesmos valores tabelados definidos para as normas da Colômbia (NSR-10), do Equador (NEC *GaK*) e do Peru (NTE.100). A Tabela 12, a seguir, linka os coeficientes de modificação adotados pelas quatro normativas latinoamericanas de estruturas em bambu (NSR-10, NTE.100, NEC *GaK*, e NBR-16828).

Tabela 12 – Coeficientes de modificação respectivos às normativas NSR-10, NEC *GaK*, NTE.100 e NBR-16828

Coeficientes de modificação	Nomenclaturas conforme as normativas e métodos de cada país			
	Colômbia NSR-10 (Método das tensões admissíveis)	Peru NTE.100 (Método das tensões admissíveis)	Equador NEC <i>GaK</i> (Método das tensões admissíveis)	Brasil NBR-16828 (Método dos estados limites)
Tipo de carregamento	$C_D$	$C_D$	$C_D$	$k_{mod,1}$
Umidade relativa do ambiente	$C_m$	-	$C_m$	$k_{mod,2}$
Qualidade do colmo	-	-	-	$k_{mod,3}$
Temperatura	$C_t$	-	$C_t$	-
Estabilidade lateral de vigas	$C_L$	$C_L$	$C_L$	$k_{mod,4}$
Forma	$C_F$	-	$C_F$	-
Redistribuição de cargas e ação conjunta	$C_r$	$C_r$	$C_r$	-
Estabilidade de colunas	$C_p$	-	$C_p$	-
Cortante	$C_c$	-	$C_c$	-

Parte dos coeficientes de modificação aqui compilados podem ser encontrados no APÊNDICE B deste trabalho.

Fonte: compilado pelo autor.

Uma vez definidos os coeficientes, segue-se para o cálculo das propriedades mecânicas. Por diferirem entre si, a Tabela 13 reúne as informações sobre a determinação das propriedades mecânicas conforme o método e a nacionalidade da norma.

Tabela 13 – Determinação das propriedades mecânicas de cálculo.

<b>Cálculo das propriedades mecânicas conforme o método de cálculo e a nacionalidade da norma (MPa)</b>			
<b>Colômbia</b> <b>NSR-10</b> <b>(ICONTEC 2010)</b> (Método das tensões admissíveis)	<b>Peru</b> <b>NTE.100</b> <b>(ICG, 2012)</b> (Método das tensões admissíveis)	<b>Equador</b> <b>NEC GaK</b> <b>(INEN, 2016)</b> (Método das tensões admissíveis)	<b>Brasil</b> <b>NBR-16828</b> <b>(ABNT, 2020a)</b> (Método dos estados limites)
$f_i' = f_i \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_L \cdot C_F \cdot C_r \cdot C_p \cdot C_c$	$f_i' = f_i \cdot C_D \cdot C_L \cdot C_r$	$f_i' = f_i \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_L \cdot C_F \cdot C_r \cdot C_p \cdot C_c$	$f_d = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \cdot k_{mod,4} \cdot \frac{f_k}{\gamma_m}$

onde,

$f_i'$  = esforço admissível modificado conforme o tipo de solicitação  $i$ ;

$f_d$  = valor de cálculo das propriedades mecânicas;

$f_k$  = valor característico de propriedade mecânica;

$\gamma_m$  = coeficiente de minoração das resistências características do bambu (APÊNDICE B).

Fonte: compilado pelo autor.

## 6.4 DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Nesta seção serão apresentados os princípios para a verificação da segurança dos elementos estruturais quanto à resistência mecânica, à deflexão e à estabilidade a partir dos princípios propostos pelas normas da NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR16828-1. Apresentar-se-ão os princípios para a verificação da resistência à flexão, cisalhamento, compressão perpendicular às fibras (esmagamento), tração, compressão paralela às fibras, flexo-compressão e flexo-tração. A verificação dos deslocamentos máximos será apresentada para vigas submetidas à tensão de flexão. Os desencadeamentos de cálculo referentes a estabilidade lateral de elementos simples e compostos serão apresentados para elementos submetidos à tensão de flexão e à tensão de compressão.

### 6.4.1 Verificação da segurança à flexão

O dimensionamento de elementos submetidos à flexão apresenta princípios similares para as 4 normas (NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR 16828-1), porém as normas NSR-10, NTE.100 e NEC *GaK* consideram a resistência à flexão tanto para elementos estruturais com um único

colmo quanto para elementos estruturais compostos. Enquanto a norma brasileira NBR 16828-1 considera a resistência à flexão apenas para elementos estruturais com um único colmo, julgando os elementos compostos quanto à compressão paralela às fibras do bambu.

A diferenciação por parte da norma NBR 16828-1 quanto aos elementos simples ou compostos acontece, pois, a mesma considera os diferentes tipos de falha que podem ocorrer. Sendo que no caso de vigas compostas, o estado limite último que guiará a verificação de segurança é ditado pela zona comprimida da viga devido à instabilidade lateral da peça composta quanto submetida à flexão.

Ao utilizar seções compostas deve-se levar em conta a redução da capacidade de carga na flexão devido à instabilidade lateral por flambagem da peça, uma vez que a zona comprimida da viga se comporta como uma coluna (ICONTEC, 2010; INEN, 2016; ABNT, 2020a). Para tanto, as normativas da Colômbia NSR-10 (ICONTEC, 2010), do Peru NTE.100 (ICG, 2012) e do Equador NEC *GaK* (INEN, 2016) adotam o coeficiente de modificação por estabilidade lateral ( $C_L$ ) para reduzir o esforço admissível à flexão. Já para a norma brasileira (ABNT, 2020a), ao se tratar de vigas compostas, o coeficiente de modificação por estabilidade lateral ( $k_{mod4}$ ) é introduzido na resistência à compressão paralela às fibras.

A Tabela 16 resume o critério de dimensionamento à flexão conforme as normas latinoamericanas.

Tabela 14 – Critério de dimensionamento à flexão de elementos em bambu.

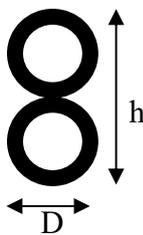
	<b>Colômbia</b> <b>NSR-10</b> <b>(ICONTEC</b> <b>2010)</b>	<b>Peru</b> <b>NTC.100</b> <b>(ICG,</b> <b>2012)</b>	<b>Equador</b> <b>NEC GaK</b> <b>(INEN,</b> <b>2016)</b>	<b>Brasil</b> <b>NBR-16828</b> <b>(ABNT, 2020a)</b>
	Método das tensões admissíveis			Método dos estados limites
<b>Vigas simples</b>	$f_b = \frac{M}{S} \leq F'_b$ <p>onde:  <math>f_b</math> = tensão atuante à flexão (MPa);  <math>F'_b</math> = tensão admissível e modificada à flexão (MPa);  <math>M</math> = momento atuante sobre o elemento (N.mm);  <math>S</math> = módulo da seção (mm<sup>3</sup>). <b>Item 6.1</b></p>			$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W} \leq f_{M,d}$ <p>onde:  <math>\sigma_{cd}</math> = tensão normal de compressão na seção (MPa);  <math>f_{M,d}</math> = resistência de cálculo de momento (MPa);  <math>M_d</math> = momento atuante sobre o elemento (N.mm);  <math>W</math> = momento resistente da seção (mm<sup>3</sup>). <b>Item 6.1</b>  sendo,  <math>f_{M,d} = k_{mod} \cdot f_{M,k} / \gamma_m</math>.</p>
<b>Vigas compostas</b>	$f_b = \frac{M}{S} \leq F'_b$ <p>onde:  <math>f_b</math> = tensão atuante à flexão (MPa);  <math>F'_b</math> = tensão admissível e modificada à flexão (MPa);  <math>M</math> = momento atuante sobre o elemento (N.mm);  <math>S</math> = módulo da seção (mm<sup>3</sup>). <b>Item 6.1</b></p>			$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W} \leq f_{c0,d}$ <p>onde:  <math>\sigma_{cd}</math> = tensão normal de compressão na seção (MPa);  <math>M_d</math> = momento atuante sobre o elemento (N.mm);  <math>f_{c0,d}</math> = resistência de cálculo à compressão paralela às fibras (MPa);  <math>W</math> = momento resistente da seção (mm<sup>3</sup>). <b>Item 6.1</b>  sendo,  <math>f_{c0,d} = k_{mod} \cdot f_{c0,k} / \gamma_m</math>.</p>

Fonte: compilado pelo autor.

Nota-se, por meio da Tabela 16, mais uma diferenciação entre as 4 normas. Segundo a norma brasileira NBR-16828, a segurança quanto à resistência à flexão é regida pela tensão normal de compressão ( $\sigma_{cd}$ ), enquanto para as demais normativas latinoamericanas (NSR-10, NTE.100 e NEC GaK), tal segurança é regida pela tensão atuante de flexão ( $f_b$ ).

Para as quatro normas analisadas (NSR-10, NTE.100, NEC GaK e NBR 16828-1), o valor do coeficiente de modificação por estabilidade lateral ( $C_L$  ou  $k_{mod4}$ ) possui os mesmos valores e varia conforme a relação entre base e altura da peça (Tabela 17).

Tabela 15 – Valor do coeficiente de modificação por estabilidade lateral ( $C_L$  ou  $k_{mod4}$ ).

<b>Conforme as normativas da Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010), do Peru NTE.100 (ICG, 2012), do Equador NEC GaK (INEN, 2016) e do Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)</b>		
Representação	$h/D$	$C_L$ ou $k_{mod4}$
	1	1,00
	2	0,98
	3	0,95
	4	0,91
	5	0,87

Fonte: compilado pelo autor.

As três normativas latinoamericanas de estruturas em bambu (NSR-10, NTE.100, NEC GaK e NBR-16828) recomendam a utilização de contenções laterais para vigas compostas por mais de dois colmos no sentido da altura da peça, conforme a Tabela 18.

Tabela 16 – Recomendações para proporcionar maior estabilidade lateral às peças compostas.

<b>Colômbia NSR-10 (ICONTEC, 2010); Peru NTE.100 (ICG, 2012); Equador NEC GaK (INEN, 2016) e; Brasil NBR-16828(ABNT, 2020a).</b>	
$h/D = 2$	não há necessidade de suporte lateral
$h/D = 3$	restringir o deslocamento lateral dos apoios;
$h/D = 4$	restringir o deslocamento lateral dos apoios e do bordo comprimido
$h/D = 5$	restringir o deslocamento lateral dos apoios e continuação do bordo comprimido

Fonte: compilado pelo autor.

Ao realizar o dimensionamento de elementos estruturais de bambu submetidos à flexão, deve-se verificar o desencadeamento de seus efeitos, que incluem: a deflexão (deslocamento); a estabilidade lateral em vigas compostas; o efeito cortante paralelo às fibras (cisalhamento) e; o efeito de esmagamento (compressão perpendicular às fibras) nos pontos de apoio. Assim sendo, cada um destes critérios será analisado especificamente nas próximas seções deste trabalho.

### 6.4.2 Verificação do deslocamento máximo

Para as normas latino hispânicas NSR-10, NTE.100 e NEC *GaK*, o cálculo dos elementos submetidos à flexão é determinado pelas deflexões admissíveis e para a norma brasileira NBR 16828-1, pelo estado limite de serviço por deflexão excessiva em função do tipo de ação considerada (cargas acidentais de edifícios, vento e temperatura), do tipo de construção analisada e respeitando a boa utilização funcional da estrutura.

Primeiramente, para determinar o vão teórico (L) de vigas, deve-se identificar o tipo do apoio das mesmas, se são vigas contínuas, com apoio simples ou em balanço. Os detalhes sobre como ela deve ser determinada são apresentados na Tabela 15.

Tabela 17 – Valores descritivos do vão teórico (L).

	<b>Colômbia</b> <b>NSR-10</b> <b>(ICONTEC 2010)</b>	<b>Peru</b> <b>NTE.100</b> <b>(ICG, 2012)</b>	<b>Equador</b> <b>NEC <i>GaK</i></b> <b>(INEN, 2016)</b>	<b>Brasil</b> <b>NBR-16828</b> <b>(ABNT, 2020a)</b>
<b>Vigas contínuas</b>	Distância entre os eixos de apoio	Distância entre os eixos de apoio	Distância entre os eixos de apoio	Distância entre os eixos de apoio
<b>Vigas com apoio simples</b>	Distância entre os eixos de apoio acrescido da metade da distância entre cada apoio e sua extremidade livre	Distância entre os eixos de apoio	Distância entre os eixos de apoio acrescido da metade da distância entre cada apoio e sua extremidade livre	Distância entre os eixos de apoio
<b>Vigas em balanço</b>	Distância entre os eixos de apoio acrescido da metade da distância entre cada apoio e sua extremidade livre	Distância entre o eixo de apoio e a extremidade livre	Distância entre os eixos de apoio acrescido da metade da distância entre cada apoio e sua extremidade livre	Distância entre o eixo de apoio e a extremidade livre acrescido do valor equivalente à altura da viga (h)

Fonte: compilado pelo autor.

Uma vez determinado o vão teórico, passa-se ao cálculo dos deslocamentos máximos (flecha). Para tanto, foram compilados os dados respectivos às quatro normativas latinoamericanas de estruturas em bambu e representados na Tabela 14 a seguir.

Tabela 18 – Deslocamentos máximos em função do vão teórico e das condições de serviço.

<b>Deslocamentos máximos (flecha) conforme o método de cálculo, a nacionalidade da norma, o tipo de carga e as condições de serviço.</b>							
<b>País e método utilizado</b>	<b>Colômbia e Equador - Método das tensões admissíveis</b>			<b>Peru - Método das tensões admissíveis</b>		<b>Brasil - Método dos estados limites)</b>	
<b>Tipo de carga</b>	Cargas vivas	Vento ou Granizo	Cargas Totais	Cargas permanentes e sobrecargas de serviço	Sobrecarga de serviço	Todos os tipos	
<b>Condições de serviço</b>	Teto com forro de gesso	L/360	L/360	L/240	L/300	L/350 ou 13 mm	
	Teto sem forro de gesso	L/240	L/240	L/180	L/250		
	Coberturas planas	-	-	L/300	-		
	Coberturas industriais	-	-	L/200	L/200		
	Coberturas inclinadas	-	-	-	L/200		
	Elementos da estrutura do piso	L/360	-	L/240	-	-	L/300
	Elementos de pisos rígidos (concretados)	-	-	L/360	-	-	
	Muros externos com acabamentos frágeis	-	L/240	-	-	-	
	Muros externos com acabamentos flexíveis	-	L/120	-	-	-	

onde,

L = vão teórico das vigas (Tabela 15).

Fonte: compilado e adaptado pelo autor.

As normativas da Colômbia (ICONTEC, 2010) e do Equador (INEN, 2016) destacam que o *Guadua angustifolia* Kunth (*GaK*), por apresentar uma relação MOR/MOE<sup>2</sup> muito alta e caracterizar-se como um material muito flexível, a análise do elemento de bambu submetido à flexão será ditada, na maioria das vezes, pelo controle da deflexão admissível. De qualquer maneira, ambas normativas recomendam comprovar a resistência à flexão, cisalhamento e esmagamento para todos os casos.

<sup>2</sup> MOR/MOE – Relação entre o Módulo de Ruptura (MOR) e o Módulo de Elasticidade (MOE)

### 6.4.3 Verificação da resistência ao cisalhamento

Segundo as normas colombiana NSR-10, peruana NTE.100 e equatoriana NEC *GaK*, os esforços máximos de corte serão calculados a uma distância do apoio igual à altura (*h*) da peça, com exceção para as vigas em balanço, as quais a tensão máxima será calculado sobre o próprio apoio (ICONTEC, 2010, ICG, 2012, INEN, 2016).

Segundo a norma brasileira NBR 16828-1, as tensões de corte em vigas são normalmente muito pequenas. Porém, a norma recomenda que a tensão de cisalhamento na linha neutra e nas proximidades do apoio deve ser verificada para os casos em que o comprimento da viga seja menor que 25 vezes o diâmetro do colmo, ou quando houver carga concentrada aplicada no mesmo (ABNT, 2020a).

A norma brasileira NBR 16828-1 estabelece que a segurança ao cisalhamento é satisfeita quando a tensão cisalhante de cálculo ( $\tau_d$ ) é menor ou igual ao valor de cálculo da resistência ao cisalhamento ( $f_{v,0k}$ ). Já para as normas latinoamericanas que utilizam o método dos esforços admissíveis (NSR-10, NTE.100 e NEC *GaK*), a verificação de segurança quanto ao cisalhamento é satisfeita quando a tensão cisalhante paralela às fibras ( $f_v$ ), em qualquer seção, é menor ou igual ao valor da tensão cisalhante admissível, paralela às fibras modificado ( $F'_v$ ). A Tabela 19 sintetiza os critérios de dimensionamento ao cisalhamento na flexão.

Tabela 19 – Critérios de dimensionamento ao cisalhamento na flexão.

Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru NTE.100 (ICG, 2012)	Equador NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)	Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)
$f_v = \frac{2V}{3A} \left( \frac{3D^2 - 4Dt + 4t^2}{D^2 - 2Dt + 2t^2} \right) \leq F'_v$ <p>onde,  <math>f_v</math> = tensão atuante de cisalhamento paralela às fibras (MPa);  <math>V</math> = força cortante (N)  <math>A</math> = área da seção transversal (mm<sup>2</sup>)  <math>F'_v</math> = tensão admissível e modificada ao cisalhamento paralela às fibras (MPa);</p>			$\tau_d = \frac{2V_d}{3A} \left( \frac{3D^2 - 6Dt + 4t^2}{D^2 - 2Dt + 2t^2} \right) \leq f_{v0,d}$ <p>onde,  <math>\tau_d</math> = tensão de corte de cálculo (MPa);  <math>V_d</math> = esforço cortante de cálculo (N);  <math>A</math> = área da seção transversal (mm<sup>2</sup>)  <math>f_{v0,d}</math> = valor de cálculo da resistência ao cisalhamento (MPa);  sendo,  <math>f_{v0,d} = k_{mod} \cdot f_{v0,d} / \gamma_m</math>.</p>

Fonte: compilado pelo autor.

#### 6.4.4 Verificação da resistência ao esmagamento perpendicular às fibras

O último desencadeamento dos efeitos da flexão a ser analisado é o efeito de esmagamento do entrenó causado pela força de compressão perpendicular às fibras do bambu, devendo ser verificado especialmente nos apoios e demais locais que haja concentração de carga em áreas pequenas (ICONTEC, 2010; ICG, 2012 e; INEN, 2016).

AS normas da Colômbia NSR-10, do Peru NTE.100 e do Equador NEC *GaK* definem que a verificação de segurança ao esmagamento das paredes do colmo é satisfeita quando a tensão de compressão perpendicular às fibras atuante ( $f_p$ ) é menor ou igual que a tensão admissível perpendicular modificado ( $F'_p$ ). Já para a norma brasileira NBR-16828, a segurança é satisfeita quando a força de cálculo obtida a partir da combinação normal de ações ( $F_d$ ) é menor ou igual à uma dada fórmula. A Tabela 20, sumariza a verificação ao esmagamento do entrenó conforme o método de cálculo utilizado e a nacionalidade da norma. As fórmulas apresentadas são praticamente iguais, salvo a apresentação da equação e o método de cálculo utilizado de maneira diferente pelas normas.

Tabela 20 – Critérios de dimensionamento ao esmagamento do entrenó do bambu.

Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru NTE.100 (ICG, 2012)	Equador NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)	Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)
$f_p = \frac{3RD}{2t^2 \cdot L} \leq F'_p$ <p>onde,  <math>f_p</math> = tensão atuante de compressão perpendicular às fibras (MPa);  <math>R</math> = força aplicada no sentido perpendicular às fibras (N);  <math>L</math> = comprimento de contato da força aplicada com o colmo de bambu;  <math>F'_p</math> = tensão admissível e modificada de compressão perpendicular às fibras (MPa).</p>		$F_d \leq \frac{2 \cdot f_{c90,d} \cdot t^2 \cdot a}{3D}$ <p>onde,  <math>F_d</math> = força concentrada de cálculo aplicada (MPa);  <math>a</math> = comprimento de contato da força aplicada com o colmo de bambu;  <math>f_{c90,d}</math> = resistência de cálculo à compressão perpendicular às fibras (MPa).  sendo,  <math>f_{c90,d} = k_{mod} \cdot f_{c,90k} / \gamma_m</math>.</p>	

Fonte: compilado pelo autor.

Segundo as normas colombiana NSR-10 e equatoriana NEC *GaK*, para garantir que os apoios do bambu submetido à flexão não falhem por esmagamento e/ou pela ação cortante paralela às fibras, a carga deve ser aplicada sobre o nó da peça ou, caso não seja possível, o entrenó dos mesmos deve ser preenchido com argamassa de cimento (ICONTEC, 2010; INEN, 2016). Contudo a norma peruana NTE.100, além do preenchimento com argamassa de cimento, permite a utilização de tacos de madeira ou outro material que garanta uma rigidez similar (ICG, 2012). Já para a norma brasileira NBR-16828, o preenchimento do entrenó pode ser realizado com argamassa de cimento, resina expansiva de alta densidade ou material de resistência equivalente (ABNT, 2020a). Caso esta providência não seja tomada, as normativas estabelecem coeficientes de redução conforme a Tabela 21.

Tabela 21 – Coeficiente de redução a ser adotado caso o preenchimento do entrenó sobrecarregado não seja realizado

Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru NTE.100 (ICG, 2012)	Equador NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)	Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)
$F'_p = \frac{F'_p}{4}$			$\gamma_m = 4$

Fonte: compilado pelo autor.

#### 6.4.5 Verificação da segurança à tração

Os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de elementos estruturais de bambu submetidos à tração é o mesmo para as normas da Colômbia (NSR-10), Peru (NTE.100) e Equador (NEC *GaK*). Estas três normativas definem que, para qualquer sessão de *Guadua angustifolia* Kunth roliço, a tensão atuante à tração não pode ser maior que o esforço admissível modificado à tração, de acordo com Equação 17.

$$f_t = \frac{T}{A_n} \leq F'_t \quad (17)$$

onde,

$f_t$  = tensão atuante à tração (MPa)

$T$  = força axial de tensão aplicada (N)

$F'_t$  = tensão admissível e modificada à tensão (MPa)

$A_n$  = área da seção transversal (mm<sup>2</sup>)

A normativa brasileira NBR-16828 não apresenta seção de dimensionamento quanto à tração pura, no entanto possui o dimensionamento de peças submetidas à flexo-tração, a qual é apresentada no **item 6.4.8**.

#### 6.4.6 Verificação da segurança à compressão axial

Para realizar o dimensionamento de elementos estruturais de bambu submetidos à compressão paralela às fibras, deve-se ter em conta que o comprimento de flambagem da peça é função do tipo de vinculação da mesma, de acordo com a Equação 18 e Tabela 22.

$$L_0 = l \cdot k \quad (18)$$

onde,

$L_0$  = comprimento de flambagem;

$l$  = comprimento da peça;

$k$  = coeficiente de comprimento efetivo (Tabela 22)

Tabela 22 – Coeficiente de comprimento efetivo conforme o tipo de vinculação.

Tipo de vinculação	Coeficiente de comprimento de flambagem (k)			
	Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010)	Peru NTE.100 (ICG, 2012)	Equador NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)	Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)
Articulado - articulado	1,0	1,0	1,0	1,0
Articulado - livre	2,1	2,0	2,1	2,0

Fonte: compilado pelo autor.

Além dos coeficientes apresentados na Tabela 22, a norma equatoriana (INEN, 2016) disponibiliza uma tabela adicional para diferentes condições de vinculação (APÊNDICE C).

Segundo a norma brasileira NBR 16828-1 (ABNT, 2020a), os pilares de bambu são considerados articulados nas extremidades.

O dimensionamento de elementos submetidos à compressão axial é realizado em função da sua esbeltez ( $\lambda$ ), os quais podem ser classificados em curtos, médios e esbeltos, conforme a Tabela 23. Ressaltando que, para nenhuma das quatro normas analisadas, não são permitidos pilares com esbeltez superior à 150.

Tabela 23 – Classificação dos elementos comprimidos axialmente segundo à esbeltez.

<b>Tipo de elementos comprimidos axialmente</b>	<b>Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010)</b>	<b>Peru NTE.100 (ICG, 2012)</b>	<b>Equador NEC <i>GaK</i> (INEN, 2016)</b>	<b>Brasil NBR 16828-1 (ABNT, 2020a)</b>
<b>Curto</b>	$\lambda < 30$			$\lambda < 30$
<b>Médio</b>	$30 < \lambda < C_k$			$30 < \lambda < 70$
<b>Esbelto</b>	$C_k < \lambda < 150$			$70 < \lambda < 150$
Sendo que, $C_k = 2.565\sqrt{E_{0.05}/F'_c}$ onde, $F'_c$ = tensão admissível e modificada à compressão (MPa); $E_{0.05}$ = módulo de elasticidade para o percentil de 5% de probabilidade de falha (MPa).				

Fonte: compilado pelo autor.

O cálculo para o dimensionamento de elementos comprimidos axialmente se diferencia em três, curto, médio e esbelto. Nota-se que as normas, colombiana NSR-10, peruana NTE.100 e do equatoriana NEC *GaK*, utilizam uma constante  $C_k$  para delimitar a esbeltez entre elementos médios e esbeltos, enquanto que a norma brasileira NBR 16828 marca o mesmo limite com o valor fixo de 70.

A Tabela 24 apresenta o cálculo para a verificação da segurança à compressão axial conforme as normativas NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR-16828, estabelecendo fórmulas específicas para cada tipo de elemento comprimido axialmente (curto, médio e esbelto).

Tabela 24 – Resumo de cálculo para a verificação da segurança à compressão axial para cada tipo de elemento.

Tipo do elemento comprimido	Fórmulas para o dimensionamento à compressão axial conforme as normativas de cada país	
	Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010), Peru NTE.100 (ICG,2012) e Equador NEC GaK (INEN, 2016)	Brasil NBR-16828 (ABNT, 2020a)
Curto	$f_c = \frac{N}{A_n} \leq F'_c$ <p>onde,  <math>f_c</math> = tensão atuante de compressão paralela às fibras (MPa);  <math>N</math> = força atuante de compressão paralela às fibras (N);  <math>A_n</math> = Área da sessão transversal (mm<sup>2</sup>);  <math>F'_c</math> = tensão admissível e modificada de compressão paralela às fibras (MPa).</p>	$\sigma_{Nd} = \frac{N_d}{A} \leq f_{co,d}$ <p>onde,  <math>\sigma_{Nd}</math> = tensão de compressão devido ao esforço normal de cálculo (MPa);  <math>N_d</math> = esforço normal de cálculo (N).  <math>A_n</math> = Área da sessão transversal (mm<sup>2</sup>);</p>
Médio	$f_c = \frac{N}{A_n \left[ 1 - \frac{2}{5} \left( \frac{\lambda}{C_K} \right)^3 \right]} \leq F'_c$ <p>onde,  <math>\lambda</math> = esbeltez;  <math>C_K</math> = esbeltez que marca o limite entre elementos médios e esbeltos.</p>	$\sigma_{Nd} + \sigma_{Md} \leq \sigma_{fl}$ <p>onde,  <math>\sigma_{Nd} = N_d/A</math>;  <math>\sigma_{Md} = M_d/W</math> = tensão normal de compressão devido ao momento fletor de cálculo;  <math>M_d = N_d \cdot e / (1 - N_d/F_{fl})</math> = momento de cálculo a ser considerado;  <math>e</math> = excentricidade total*;  <math>F_{fl} = \sigma_{fl} \cdot A</math> = força-limite a ser considerada, levando em conta a flambagem e o esmagamento da parede do bambu;</p>
Esbelto	<p><b>NSR-10 e NEC GaK</b></p> $f_c = 3,3 \frac{E_{0,05}}{\lambda^2} \leq F'_c$	<p><b>NTE.100</b></p> $\frac{\pi \cdot E \cdot A}{2,5 \cdot \lambda^2} \leq F'_c$ <p><math>\sigma_{fl}</math> = tensão-limite a ser considerada, correspondendo ao menor valor entre <math>F_E/A</math> e <math>f_{co,d}</math>;  <math>F_E = (\pi^2 \cdot E_B \cdot I) / L_0^2</math> = força de Euler;  <math>E_B = E_{C0}</math> = módulo de elasticidade do bambu em compressão paralela às fibras.</p>

\* O cálculo da excentricidade total varia conforme o tipo de elemento comprimido (médio ou esbelto), considerando a fluência do bambu apenas para pilares do tipo esbelto.

Fonte: compilado pelo autor.

### 6.4.7 Verificação da segurança de elementos à flexo-compressão

Segundo as normativas da Colômbia NSR-10 (ICONTEC 2010), Peru NTE.100 (ICG,2012) e Equador NEC *GaK* (INEN, 2016), os elementos estruturais em bambu submetidos à flexo-compressão devem ser dimensionados conforme a seguinte equação:

$$\frac{f_c}{F'_c} + \frac{k_m \cdot f_b}{F'_b} \leq 1 \quad (20)$$

onde,

$f_c$  = tensão atuante de compressão paralela às fibras (MPa);

$F'_c$  = tensão admissível e modificada à compressão paralela às fibras (MPa);

$f_b$  = tensão atuante de flexão (MPa);

$F'_b$  = tensão admissível e modificada à flexão (MPa);

$K_m$  = coeficiente de momento,

sendo,

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5(N_a/N_{cr})} \quad (21)$$

onde,

$N_a$  = carga atuante de compressão (N);

$N_{cr}$  = carga crítica de Euler ou força de Euler (MPa);

sendo,

$$N_{cr} = (\pi^2 \cdot E_{0,05} \cdot I) / L_0^2 \quad (22)$$

Já para a norma brasileira NBR-16828-1 (ABNT, 2020a), a flexo-compressão está presente no dimensionamento de elementos comprimidos médios e esbeltos (Tabela 22). Seu cálculo depende da tensão de compressão devida ao esforço normal de cálculo ( $\sigma_{Nd}$ ) e da tensão normal de compressão devida ao momento fletor de cálculo ( $\sigma_{Md}$ ). O fator diferenciador entre o dimensionamento de elementos comprimidos classificados como médios e/ou esbeltos está no cálculo de sua excentricidade total, a qual é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Cálculo da excentricidade total segundo a norma brasileira NBR-16828.

Tipo de pilar	Excentricidade total
<b>Médio</b>	$e = e_i + e_a$ <p>onde,</p> $e_i = M_{1d}/N_d \geq D/20 = \text{excentricidade inicial};$ $e_a = L/100 = \text{excentricidade acidental}$ <p>onde,</p> $M_{1d} = \text{momento de primeira ordem ou momento solicitante de cálculo, se existir}$
<b>Esbelto</b>	$e = e_i + e_a + e_c$ <p>onde,</p> $e_c = e_n(2,718^\alpha - 1) = \text{excentricidade devida à fluência do bambu};$ <p>sendo,</p> $e_n = \text{maior valor entre } e_i \text{ e } e_a;$ $\alpha = \frac{\varphi[N_{g,k} + (\Psi_1 + \Psi_2) \cdot N_{q,k}]}{F_E - [N_{g,k} + (\Psi_1 + \Psi_2) \cdot N_{q,k}]}$ <p>sendo,</p> $(\Psi_1 + \Psi_2) \leq 1$ <p>onde,</p> $\Psi_1 = \text{coeficiente da ABNT NBR8681 correspondente à representação frequente de uma ação, podendo ser simplificadaamente tomado igual a } 0,5;$ $\Psi_2 = \text{coeficiente da ABNT NBR8681 correspondente à representação quase permanente de uma ação, podendo ser simplificadaamente tomado igual a } 0,4;$ $\varphi = \text{coeficiente de fluência do bambu com valor igual a } 0,8;$ $N_{g,k} = \text{tensão normal devido às ações permanentes com seu valor característico};$ $N_{q,k} = \text{tensão normal devido às ações acidentais com seu valor característico}.$

Nota: caso o pilar seja rotulado nas extremidades,  $M_{1d} = 0$

Fonte: compilado pelo autor da norma NBR-16828-1 (ABNT, 2020a).

#### 6.4.8 Verificação da segurança de elementos à flexo-tração

Segundo as normativas da Colômbia (ICONTEC 2010), Peru (ICG,2012) e Equador (INEN, 2016), os elementos estruturais em bambu submetidos à ação conjunta de tração e flexão devem ser dimensionados conforme a Equação 23.

$$\frac{f_t}{F'_t} + \frac{f_b}{F'_b} \leq 1 \quad (23)$$

onde,

$f_t$  = tensão atuante de tração (MPa);

$F'_t$  = tensão admissível e modificada de tração (MPa);

$f_b$  = tensão atuante de flexão (MPa);

$F'_b$  = tensão admissível e modificada de flexão (MPa).

## 7 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi realizada uma revisão extensiva da literatura existente sobre o bambu como material de construção, sobre as técnicas construtivas e o dimensionamento de elementos estruturais construídos com esse material. Isso permitiu a compilação dessas informações em um único documento, apresentando o potencial do bambu como material construtivo, as propriedades físico-mecânicas de várias espécies de uso estrutural, a ilustração de elementos e sistemas construtivos por meio de linguagem visual padronizada e os princípios de verificação de segurança propostos pelas normativas NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR 16828-1.

Quanto aos processos de beneficiamento dos colmos de bambu para uso estrutural, conclui-se que: o tratamento eficaz mais prático, simples, de baixo custo e com baixa toxicidade é o de imersão total em solução de sais de boro e; a secagem é um processo complementar ao tratamento e deve ser feito antes da sua utilização na construção. Recomenda-se, como sugestão para trabalhos futuros, a realização de estudos sobre a Retenção Equivalente de Ácido Bórico (EAB) para as diferentes modalidades de tratamento.

Através da análise comparativa entre as propriedades físicas e mecânicas dos bambus, conclui-se que tais propriedades devem ser determinadas através de métodos cada vez mais padronizados para melhor interpretação dos resultados de cada espécie. Cabendo aqui destacar que, mesmo com a atualização, em 2019, da normativa internacional ISO 22157, ainda não existe um método padronizado para determinação da resistência ao esmagamento do colmo.

No que se diz respeito aos elementos estruturais e sistemas construtivos nos quais o bambu é o protagonista, conclui-se que a maior dificuldade para o uso do material na construção está diretamente relacionada a transmissão dos esforços nos pontos de conexão, sugerindo, portanto, o desenvolvimento de pesquisas específicas sobre cada tipo de elemento de ligação. Assim como o estudo comparado entre os diferentes métodos de arqueamento de colmos

A partir do estudo comparativo entre as normativas NSR-10, NTE.100, NEC *GaK* e NBR 16828-1, conclui-se que: as normativas NSR-10 e NTE.100 possibilitam a má interpretação quanto ao cálculo do momento resistente; a solidariedade entre peças compostas e os possíveis elementos de ligação devem ser objeto de estudo para futuras pesquisas experimentais; apesar de recente, a norma brasileira representa grande passo para o desenvolvimento da cadeia produtiva do material no país.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (a). **NBR 16828-1**: Estruturas de bambu – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, p. 31. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (b). **NBR 16828-2**: Estruturas de bambu – Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu. Rio de Janeiro, p. 17. 2020
- BAHTIAR E. T., NUGROHO N., CAROLINA A., MAULANA A. C. Measuring Carbon Dioxide Sink of Betung Bamboo (*Dendrocallamus asper* (Schult f.) Backer ex Heyne) by Sinusoidal Curves Fitting on Its Daily Photosynthesis Light Response. **Journal of Agricultural Science and Technology**. V. 2, p. 780-788, 2012.
- BALLESTÉ, J. F. **Desempenho construtivo de estruturas com colmos de bambu**. 2017. 218f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 6874-2008**: Method of tests for round bamboos. BIS: New Delhi, India, 2008.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **National Building Code of India**. Section 3, Timber and Bamboo: 3B. BIS: New Delhi, India, 2010.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 15912-2012**: Structural design using bamboo – code of practice. BIS: New Delhi, India, 2012.
- CALDEIRA, F. Boron in Wood Preservation: a review in its physico-chemical aspects. **Silva lusitana**, n. 18, p 179-196, 2010.
- CLARK, L.G.; LONDOÑO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo Taxonomy and Habitat. In: LIESE, W. & KOHL, M. **Bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer, 2015. p. 1-30.
- CRUZ, G. **La guadua: nuestro bambú**. Quindío, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Quindío: Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua, 1994.
- CORREAL, J.; ARBELÁEZ, J. Influence of angle and height position of colombian guadua-bamboo mechanical properties. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, n. 12, p 105-113, 2010
- CUSACK, V.; STEWARD, D. **Bamboo World: Clumping Bamboos and how to use them**. Kenthurst, Australia: Kangaroo Press, 1999, 160p
- DA SILVA RIBEIRO, L. H. M.; DE AGUIAR, L. M.; DE SOUZA NOGUEIRA, Ewerton Augusto; DIAS, José Felipe; BEIJO, Luiz Alberto. Influence of section and moisture content on the tensile strength parallel to fibers of bamboo culms woody material. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 49, 2019. DOI: 10.1590/1983-40632019v49i53562.

ELLINGWOOD, B. R. Probability-based design: past accomplishments and future challenges. **Structural safety**, n. 13, p 159-176, 1994.

GARLAND, L. **Vertical Soak Diffusion for bamboo preservation**. Indonesia, Bali: Environmental bamboo foundation, 2005.

GATÓO, A.; SHARMA, B.; BOOK, M.; MULLIGAN, H.; RAMAGE, M. H. Sustainable structures: bamboo standards and Building codes. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability**, v. 167, p. 189-196, 2014.

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...** México: CIB/RILEM, 1989. p. 526-536.

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**, v. 9, n. 1, p. 107-114, 2005. DOI: 10.1590/s1415-43662005000100016.

GNANAHARAN, R.; JANSSEN J. J. A. **Bending Strength of Bamboo**. Comparison of different testing procedures with a view to standardization. Peechi: Kerala Forest Research Institute and International Development Research Centre; New Delhi, 1994.

GRECO, T. M.; CROMBERG, M. **Bambu: cultivo e manejo**. 1ª ed. Florianópolis: Isular, 2011

GRECO, T. M.; PINTO, M. M.; TOMBOLATO, A. F. C.; XIA, N. Diversity of Bamboo in Brazil. **Journal of Tropical and Subtropical Botany**, v. 23, Ed. 1, p. 1-16, 2015.

HABIBI, M. K.; LU, Y. Crack propagation in bamboo's hierarchical cellular structure. **Scientific Reports**, v. 4, n. 5598, p. 1-7, 2014.

HIDALGO-LÓPEZ, O. **Manual de construcción con bambú**. Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; Centro de Investigación de Bambú y Madera - CIBAM, 1981.

HIDALGO-LÓPEZ, O. **Bamboo the gift of the gods**. Bogota, Colombia: D'Vinni Ltda, 2003.

INTERNATIONAL BAMBOO AND RATTAN ORGANISATION. **Manual for Sustainable Management of Clumping Bamboo Forest**. INBAR: Beijing, China, 2019

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA. **Reglamento Nacional de Edificaciones**, Section III. 2 Code E100 – Diseño y construcción com bambú. ICG: Lima, Peru, 2012

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **Norma Técnica Colombiana 5525**: Métodos de Ensayo para Determinar las Propiedades Físicas y Mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth. ICONTEC: Bogotá, Colombia, 2007

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **Norma Técnica Colombiana 5301**: Preservación y Secado del Culmo de *Guadua angustifolia* Kunth, ICONTEC: Bogotá, Colombia, 2007

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **Capítulo G.12**: Estructuras de guadua. Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente. ICONTEC: Bogotá, Colombia 2010.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **Norma Técnica Colombiana 5407**: Uniones de estructuras com *Guadua angustifolia* Kunth. ICONTEC: Bogotá, Colombia, 2018.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. **Guía de práctica 42**: Bambú Caña Guadua. INEN: Quito, Ecuador, 1976.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. **Norma Ecuatoriana de la Construcción**. Estructuras de Guadua (*GaK*). INEN: Quito, Ecuador, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary. In: **Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>> Acesso em: 05 abr. 2021. 2014

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22156:2004 (E)**: Bamboo – structural design. ISO: Geneva, Switzerland, 2004a

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22157-1:2004 (E)**: Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 1: requirements. ISO: Geneva, Switzerland, 2004b

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22157-2:2004 (E)**: Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 2: laboratory manual. ISO: Geneva, Switzerland, 2004c

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2018**. Rio de Janeiro, v.28, p.1-4, 2020. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic\\_2018\\_v28\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2018_v28_informativo.pdf)> Acesso em: 30 jul. 2020.

JANSSEN, J. J. A. **Bamboo in building structures**. Technische Hogeschool Eindhoven, Netherlands, 1981. DOI: 10.6100/IR11834

JANSSEN, Jules J. A. **The Mechanical Properties of Bamboo**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. v. 37 DOI: 10.1007/978-94-011-3236-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-3236-7>.

JANSSEN, J. J. A. **Designing and Building with Bamboo**. International Network for Bamboo and Rattan, technical report no. 20. Technical University of Eindhoven: Eindhoven, Netherlands, 2000.

JANSSEN, J. J. A. International standards for bamboo as a structural material. **Structural Engineering International**, n 15, p. 48-49, 2005

JARAMILLO BENAVIDES, A. S. **Manifestações patológicas e decisões projetuais que incidem na durabilidade do bambu em edificações no sul do Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa em Arquitetura e Urbanismo. 282p. Tese de Doutorado, 2019.

JARAMILLO, S. V. La Guadua en los grandes proyectos de inversion. *In*: CONGRESSO MUNDIAL DE BAMBU/GUADUA, 1., 1992, Pereira. **Anais...** Pereira, 1992.

JUDZIEWICZ, E. J.; CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; STERN, M. J. **American bamboos**. Washington: Smithsonian Institution, 1999. 392 p.

KAMINSKI, S.; LAWRENCE, A.; TRUJILLO, D.; KING, C. Structural use of bamboo, Part 2: Durability and preservation. **The Structural Engineer**, v. 94, n 10, p. 38-43, 2016.

KLEINE, H. J. **Bambu: Tecnologia da Durabilidade**. Florianópolis: Oré Brasil; BambuSC; UFSC e; GIEM, 2010. 65 p.

LIESE, W., KUMAR, S. **Bamboo preservation compendium**. India: Centre for Indian Bamboo Resource and Technology, 2003. 231 p.

LIESE, W. A preservação do colmo de bambu com relação à sua estrutura. Tradução por Antonio L. Beraldo. *In*: SIMPOSIO INTERNACIONAL GUADUA, 2004, Pereira, Colômbia. **Simpósio...** Pereira, Colômbia: 2004.

LIESE, W., TANG, T. K. H. Properties of the bamboo culm. *In*: LIESE, W.; KOHL, M. **Bamboo: The plant and its uses**. Switzerland: Springer, 2015. p. 227-256

LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. *In*: Liese, W. **Bamboos: biology, silvics, properties, utilization**. Hamburg: GTZ, 1985. p. 196-208

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: INBAR; Technical report n. 18, 1998. 208p.

LIMA, D.N.; AFONSO, D.G.; PONTES, S.M.A. Análise comparativa da estabilidade dimensional de 02 espécies de bambu ocorrentes na Amazônia Ocidental. *In*: CONGRESSO PARANAENSE, 4., 2012, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal de Curitiba; 2012.

LO, T. Y.; CUI, H. Z.; LEUNG, H. C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. **Materials letters**, v. 58, n 21, p. 2595-2598, 2004.

MCCLURE, F. A. **Bamboo as a building material**. Washington, D.C: Peace Corps, 1981. 52p.

- MCCLURE, F. A., **The Bamboos**. Washington: Smithsonian Institution, 1993. 368p.
- MINKE, Gernot. **Building with bamboo: design and technology of a sustainable architecture**. Basel: Walter de Gruyter Incorporated, 2012. 159 p.
- MOGNON, F. **Avaliação Comportamental do Crescimento, Biomassa e Estoque de Carbono em Espécies de Bambu**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. 81 p. Tese de Doutorado, 2015.
- MONTOYA ARANGO, J. S/N. *In*: SIMPOSIO INTERNACIONAL DEL BAMBÚ Y LA GUADUA, 6., 2019, Quito, Ecuador. **Symposium...** Quito, Ecuador: 6SIBGUADUA, 2019.
- MONTOYA ARANGO, J. A. Evaluación de métodos para la preservación de la *Guadua angustifolia kunth*. **Scientia et technica**, n 38, p. 443-448, 2008.
- MONTOYA ARANGO, J. A; HINCAPIÉ, C. A. O. **Fundamentos práticos del secado de guadua - bambú**. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- Morita BS, Barbosa JC, Fonseca KAV, Caraschi JC, Akira MI. Estabilidade dimensional e coeficiente anisotrópico do bambu *Dendrocalamus giganteus* para aplicação na indústria moveleira. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA; 2010.
- NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**, 2015. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em: 27 ago. 2020.
- OLIVEIRA, F. H. de; AMICO, S. C.; RICA, Costa. Use of Bamboo Culms in Bicycle Frame Construction. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 7., 2010, [s.l.]. **Symposium...** [s.l.], 2010.
- OSTAPIV, F. **Resistência mecânica do material compósito: madeira de eucalipto-lâmina de bambu**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- OYAGUE, T. C. **Manual de Construcción de Estructuras con Bambú**. Lima, Peru: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO, 2014.
- PRC. **MoC. JG/T 199**: Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building. PRC MoC, Beijing, China, 2007.
- PEREIRA, M. A. R. **Projeto Bambu: Introdução de Espécies, Manejo, Caracterização e Aplicações**. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. 210 p. Tese. Bauru, 2012.
- PEREIRA, M. A. R, BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2016. 350p

PINZON, T. M. Evaluacion y ajuste del proceso de preservación de guadua por inmersión com sales de boro. **Scientia et Technica**, n. 32, p. 457-462, 2006.

PROJETO BAMBU. Laboratório de Experimentação com Bambu da UNESP- BAURU. **Espécies de Bambu**. [s.d.]. Disponível em: <https://bambu-unesp-bauru.github.io/especies>. Acesso em: 21 maio. 2021.

RICHARD, M., HARRIES, K. On inherent bending in tension tests of bamboo. **Wood Science and Technology**, n. 49, p. 99-119, 2015.

RODRIGUEZ, C.; MORALES, E. **El bambú como material estructural: Análisis de um caso práctico**, 2008. Disponível em: <<https://dugi-doc.udg.edu/handle/10256/1128?show=full>> Acesso em: 15 set. 2020

RUSCH, F.; HILLIG, E.; CEOLIN, G. B. Anatomia de hastes adultas de bambu: uma revisão. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, Embrapa Florestas, v. 38, 2018. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1530>. Acesso em: 24 fev. 2021.

SAKARAY, H.; TOGATI, N. V.; VAMSI, K; REDDY, I. V. R. Investigation on properties of bamboo as reinforcing material in concrete. **International Journal of Engineering Research and Applications**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 77–83, 2012.

STAMM, J. La evolución de los métodos constructivos en bambú. *In*: SEGUNDO CONGRESO MEXICANO DEL BAMBÚ, 2008, Puebla, México. **Congreso...** Puebla, México: 2008.

TRAN, V. H. **Growth and quality of indigenous bamboo species in the mountainous regions of Vietnam.pdf**. 2010. Georg-August-Universitat Gottingen, Germany, 2010.

TRUJILLO, D.; LÓPEZ, L. F. Bamboo material characterisation. *In*: HARRIES K. A. & SHARMA, B. **Nonconventional and Vernacular Construction Materials**. Elsevier, 2016, cap 13, p. 365-392

UBIDIA, J. M. **Usos tradicionales y actuales del bambú em América Latina**, com ênfasis em Colombia y Ecuador. Centro de Investigaciones Territoriales del Ecuador, Quito, Ecuador, 2001.

UBIDIA, J. M. Construir com Bambú (caña guayaquill): manual de construcción. **International Network for Bamboo and Rattan**, 3<sup>ed</sup>. Peru, 2015.

VITOR, A. O.; LIBRELOTTO, L. I.; FERROLI, P. C. M.. Cadeia Produtiva do Bambu. *In*: LIBRELOTTO, Lisiane Ilha; OSTAPIV, Fabiano (org.). **Bambu, Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Florianópolis: Repositório UFSC, 2019. p. 81–114.

**APÊNDICE A – Levantamento de dados: espécies de bambu comercializadas no Brasil**

Tabela 26 – Levantamento de dados\*: espécies de bambu comercializadas nas regiões Sul e, Sudeste do Brasil.

Local		Espécie de bambus (informações sobre o tratamento)	
		tratado	in natura
Rio Grande do Sul	Planalto - RS	<i>P. edulis</i> (imersão em octaborato de sódio)	
	São Sebastião do Caí - RS	<i>D. asper</i> , <i>B. oldhamii</i>	<i>D. asper</i> , <i>B. oldhamii</i>
	Ronda Alta - RS	<i>P. edulis</i>	<i>P. edulis</i>
	Bom Retiro do Sul - RS	<i>P. aurea</i>	<i>P. aurea</i>
Santa Catarina	Santa Rosa de Lima - SC		<i>D. latiflorus</i> , <i>B. oldhamii</i>
	Garopaba - SC	<i>G. angustifolia</i> , <i>D. asper</i> , <i>P. edulis</i> (tratado em autoclave com CCA)	
	Taquaras - SC	<i>D. latiflorus</i> , <i>D. asper</i> , <i>B. oldhamii</i> , <i>B. tuldoides</i> , <i>G. chacoensis</i> , <i>P. bambusoides</i> , <i>P. nigra</i> (difusão vertical com octaborato)	<i>D. latiflorus</i> , <i>D. asper</i> , <i>D. strictus</i> , <i>B. oldhamii</i> , <i>B. tuldoides</i> , <i>B. textilis</i> , <i>B. multiplex</i> , <i>G. chacoensis</i> , <i>P. bambusoides</i> , <i>P. nigra</i>
	Tijucas - SC		<i>D. latiflorus</i> , <i>D. asper</i> , <i>B. oldhamii</i> , <i>G. chacoensis</i>
	Florianópolis - SC	<i>D. asper</i> , <i>P. aurea</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i>	<i>B. tuldoides</i>
	Rio Negrinho - SC	<i>P. aurea</i> , <i>P. edulis</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i> e <i>P. bambusoides</i>	<i>P. aurea</i> , <i>P. edulis</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i> e <i>P. bambusoides</i>
Paraná	Curitiba - PR	<i>G. angustifolia</i> , <i>D. asper</i> , <i>P. pubescens</i> , <i>B. oldhamii</i>	<i>G. angustifolia</i> , <i>D. asper</i> , <i>P. pubescens</i> , <i>B. oldhamii</i>
	Wenceslau Braz - PR	<i>D. asper</i> , <i>P. edulis</i> , <i>P. aurea</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i>	
	Campina Grande do Sul - PR	<i>P. edulis</i> , <i>P. aurea</i> (imersão em octaborato e sulfato de cobre)	
	Campo Largo - PR	<i>D. asper</i> , <i>P. edulis</i> (imersão em pentaborato e sulfato de cobre)	<i>D. asper</i> , <i>P. edulis</i>
São Paulo	Registro - SP	<i>P. edulis</i> , <i>P. aurea</i> , <i>P. bambusoide</i> , <i>D. asper</i>	
	Tapiraí - SP	<i>P. aurea</i> (vapor), <i>Hatiku</i> , <i>Mosso</i> e <i>Asper</i> (imersão em octaborato)	<i>P. aurea</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i> , <i>P. edulis</i> , <i>D. asper</i>
	Falcão Cunha - SP	<i>P. aurea</i> , <i>P. nigra</i> var. <i>henonis</i> , <i>P. edulis</i> , <i>B. metake</i> , <i>B. tuldoides</i> , <i>D. asper</i>	

São Paulo	Santo Amaro - SP	<i>P. aurea, P. edulis, P. Nigra, D. asper</i> (cozido no vapor)	<i>P. aurea, P. edulis, P. Nigra, D. asper</i>
	Ibiúna - SP	<i>D. asper, P. edulis</i> (imersão em octaborato) <i>P. aurea</i> (vapor)	
	São Paulo - SP	<i>P. aurea</i> (vapor)	<i>P. aurea</i>
	São Paulo - SP	<i>P. aurea e P. edulis</i> (imersão em octaborato por 1 dia na água quente)	
	Bertioga - SP	<i>P. aurea, P. edulis, D. asper</i>	
	Cananéia - SP	<i>P. Edulis</i> (imersão em octaborato à 60º por 5 horas)	
	Araçariguama - SP		<i>P. edulis</i>
	Mogi da Cruzes - SP	<i>P. nigra var. henonis</i>	
	São Sebastião - SP	<i>P. edulis</i>	<i>P. edulis</i>
	Caçapava - SP	<i>D. asper, P. edulis, P. aurea</i>	
	Ubatuba - SP	<i>D. asper, B. vulgaris e B. tuldoides</i>	<i>D. asper, B. vulgaris e B. tuldoides</i>
	São Paulo - SP	<i>P. aurea, P. edulis, P. nigra var. henonis, D. asper</i>	<i>P. aurea, P. edulis, P. nigra var. henonis, D. asper</i>
	Ubatuba - SP		<i>D. asper e G. angustifolia</i>
	Bananal - SP		<i>P. aurea</i>
Campinas - SP	<i>P. edulis, P. aurea, P. nigra var. henonis, D. asper, D. latiflorus, B. oldhamii, G. angustifolia, G. chacoensis</i> (imersão em octaborato)	<i>P. edulis, P. aurea, P. nigra var. henonis, D. asper, D. latiflorus, B. oldhamii, G. angustifolia, G. chacoensis</i>	
Rio de Janeiro	Angra dos Reis - RJ	<i>Guadua, D. asper, D. Oldhamii</i> (imersão em octaborato)	
	Rio Bonito - RJ	<i>P. aurea</i>	<i>P. aurea</i>
	Cachoeiras de Macacu - RJ	<i>G. angustifolia, P. edulis</i>	<i>G. angustifolia, P. edulis</i>
	Bom Jardim - RJ	<i>D. asper</i>	<i>D. asper, G. angustifolia, P. aurea</i>

\* Levantamento de dados realizado a partir do mapa "Bamuzeiros do Brasil", criado por Bruno Imbroisi na plataforma *Google My Maps* (<https://www.bamuzeirosdobrasil.com.br>)

## APÊNDICE B – Coeficientes de modificação

A seguir serão apresentadas tabelas contendo os coeficientes de modificação para cálculo das propriedades mecânicas conforme o tipo de carregamento ( $C_D$  – Tabela 27), a umidade relativa do ar ( $C_m$  – Tabela 28), a temperatura ( $C_t$  – Tabela 29), a redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$  – Tabela 30) e a ação cortante ( $C_c$  – Tabela 31), segundo as normativas NSR-10 da Colômbia (ICONTEC, 2010) e NEC *GaK* do Equador (INEN, 2016). Não foram encontradas, em ambas normativas, os coeficientes de modificação conforme a forma ( $C_F$ ) e a estabilidade de colunas ( $C_P$ ).

Tabela 27 – Coeficientes de modificação por tipo de carregamento ( $C_D$ )

Tipo de carregamento	Flexão	Tração	Compressão //	Compressão $\perp$	Corte	Carga de projeto
Permanente	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	Morta
Dez anos	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	Viva
Dois meses	1,15	1,15	1,15	0,90	1,15	Construção
Sete dias	1,25	1,25	1,25	0,90	1,25	
Dez minutos	1,60	1,60	1,60	0,90	1,60	Vento e sismo
Impacto	2,00	2,00	2,00	0,90	2,00	Impacto

Fonte: ICONTEC (2010) e INEN (2016).

Tabela 28 – Coeficientes de modificação por umidade relativa do ambiente ( $C_m$ )

Esforços		CH $\leq$ 12%	CH = 13%	CH = 14%	CH = 15%	CH = 16%	CH = 17%	CH = 18%	CH $\geq$ 19%
Flexão	$F_b$	1,00	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,70
Tração	$F_t$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
Compressão //	$F_c$	1,00	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,70
Compressão $\perp$	$F_p$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
Corte	$F$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
Módulo de elasticidade	$E_{0,5}$	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,94	0,91	0,90
	$E_{0,05}$								
	$E_{min}$								

Fonte: ICONTEC (2010) e INEN (2016).

Tabela 29 – Coeficientes de modificação por temperatura ( $C_t$ )

Esforços		Condições de serviço	$(C_t)$		
			$T \leq 37 \text{ }^\circ\text{C}$	$37 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 52 \text{ }^\circ\text{C}$	$52 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 65 \text{ }^\circ\text{C}$
Flexão	$F_b$	Úmido	1,00	0,60	0,40
		Seco		0,85	0,60
Tração	$F_t$	Úmido		0,85	0,80
		Seco		0,90	0,80
Compressão //	$F_c$	Úmido		0,65	0,40
		Seco		0,80	0,60
Compressão $\perp$	$F_p$	Úmido		0,80	0,50
		Seco		0,90	0,70
Corte	$F$	Úmido		0,65	0,40
		Seco		0,80	0,60
Módulo de elasticidade	$E$	Úmido		0,80	0,80
		Seco		0,90	0,80

Fonte: ICONTEC (2010) e INEN (2016).

Tabela 30 – Coeficiente de modificação por redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$ )

Número de elementos de bambu em peças compostas	$(C_r)$
$\leq 3$	1,00
$\geq 4$	1,10*

\* Sempre e quando a separação entre os elementos não seja superior a 0,60 m.

Fonte: adaptado de ICONTEC (2010) e INEN (2016).

Tabela 31 – Coeficiente de modificação por efeito cortante ( $C_c$ )

Comprimento da peça dividido pelo diâmetro ( $l/D_c$ )	$(C_c)$
5	0,70
7	0,75
9	0,81
11	0,86
13	0,91
15	0,93

Fonte: ICONTEC (2010) e INEN (2016).

A seguir serão apresentadas tabelas contendo os coeficientes de modificação para cálculo das propriedades mecânicas conforme o tipo de carregamento ( $C_D$  – Tabela 32) e a redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$  – Tabela 33), segundo a normativa NTE.100 do Peru (ICG, 2012):

Tabela 32 – Coeficientes de modificação por tipo de carregamento ( $C_D$ )

Tipo de carregamento	Flexão, Tração, Compressão //, Compressão $\perp$ , Corte
Permanente	0,90
Viva	1,00

Fonte: adaptado de ICG (2012).

Tabela 33 – Coeficiente de modificação por redistribuição de cargas e ação conjunta ( $C_r$ )

Número de elementos de bambu em peças compostas	( $C_r$ )
= 1	1,00
$\geq 2$	1,10*

\* Sempre e quando for garantida a ação conjunta dos elementos e quando a separação entre os elementos não seja superior a 0,60 m.

Fonte: adaptado de ICG (2012).

A seguir serão apresentadas tabelas contendo os coeficientes de modificação para cálculo das propriedades mecânicas conforme o tipo de carregamento ( $k_{mod,1}$  – Tabela 34), a umidade relativa do ar ( $k_{mod,2}$  – Tabela 35) e a qualidade do colmo ( $k_{mod,3}$  – Tabela 36) segundo a normativa NBR 16828-1 do Brasil (ABNT, 2020a):

Tabela 34 – Coeficiente de modificação conforme o tipo de carregamento ( $k_{mod,1}$ )

Tipo de carregamento	$K_{mod,1}$
Permanente	0,7
Longa duração (mais de seis meses)	0,8
Média duração (uma semana a seis meses)	0,9
Curta duração (até uma semana)	1,0
Instantânea	1,1

Fonte: ABNT (2020a).

Tabela 35 – Coeficiente de modificação conforme a umidade relativa do ambiente ( $k_{mod,2}$ )

Condição ambiental	$K_{mod,2}$
UR < 75 %	1,0
75 % < UR < 85 %	0,8
Bambu saturado	0,6

Fonte: ABNT (2020a).

Tabela 36 – Coeficiente de modificação conforme a qualidade do colmo ( $k_{mod,3}$ )

Qualidade do colmo	$K_{mod,3}$
Colmos secos em boas condições, preferencialmente de plantações manejadas e sem controle de qualidade	0,8
Colmos secos em boas condições, de plantações manejadas e com controle de qualidade	1,0

Fonte: adaptado de ABNT (2020a).

A seguir será apresentada a tabela para obtenção do coeficiente de minoração das resistências características do bambu para dimensionamento nos estados-limite últimos ( $\gamma_m$  – Tabela 37), segundo a normativa NBR 16828-1 do Brasil (ABNT, 2020a):

Tabela 37 – Coeficientes de minoração das resistências características do bambu,  $\gamma_m$ 

Propriedade	$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$	$f_{v,0k}$	$f_{c90,k}$	$f_{M,k}$
$\gamma_m$	2,0	1,8	2,0	2,0	1,8
NOTA	Para verificação nos estados-limite de serviço, $\gamma_m = 1$ .				

Fonte: ABNT (2020a).

## APÊNDICE C – Coeficiente de comprimento de flambagem para diferentes tipos de vinculação

A seguir será apresentada a tabela adicional, contida na norma equatoriana NEC *GaK* (INEN, 2016), para determinação do coeficiente de comprimento de flambagem ( $k$ ) para diferentes tipos de vinculação ao elemento submetido à compressão axial.

Tabela 38 – Coeficientes de comprimento de flambagem para diferentes tipos de vinculação.

Condición de los apoyos	Gráficos	$k_{e1}$	$k_{e2}$
Empotrados en ambos extremos  ①		0.50	0.65
Impedido de desplazarse en ambos extremos y uno de ellos impedido de rotar  ②		0.70	0.85
Articulado en ambos extremos  ③		1.00	1.00
Empotrado en un extremo y el otro impedido de rotar pero libre de desplazamiento  ④		1.00	1.20
Empotrado en un extremo y el otro parcialmente libre de rotar y libre de desplazamiento  ⑤		1.50	1.50
Articulado en un extremo y el otro impedido de rotar pero libre de desplazamiento  ⑥		2.00	2.40
Empotrado en un extremo y el otro libre de rotar y libre de desplazamiento  ⑦		2.00	2.10

Fonte: INEN, 2016.