

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA FÉ ALVES

**BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL, CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA
GLOBAL E UMA REVISÃO SOBRE O *CROSS-LAMINATED BAMBOO (CLB)***

SÃO CARLOS
2025

LARISSA FÉ ALVES

**BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL, CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA
GLOBAL E UMA REVISÃO SOBRE O *CROSS-LAMINATED BAMBOO (CLB)***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Luis
Christoforo
Coorientador: Prof. Dr. Victor De
Araujo

Área de concentração: Estruturas e
Geotecnia

SÃO CARLOS

2025

Alves, Larissa Fé

Bambu Engenheirado Estrutural, Caracterização da
Indústria Global e uma Revisão sobre o Cross-Laminated
Bamboo (CLB) / Larissa Fé Alves -- 2025.
411 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): André Luis Christoforo
Banca Examinadora: Sérgio Augusto Mello da Silva,
Maristela Gava
Bibliografia

1. Caracterização da Indústria de Bambu Engenheirado
Estrutural. 2. Cross-Laminated Bamboo (CLB). 3. Cross-
Laminated Bamboo and Timber (CLBT). I. Alves, Larissa
Fé. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Larissa Fé Alves, realizada em 19/02/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (UNESP)

Profa. Dra. Maristela Gava (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Àqueles que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada, expresso aqui minha mais profunda gratidão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luis Christoforo, cuja dedicação ao ensino e ao avanço do conhecimento é verdadeiramente inspiradora. Agradeço por sua orientação técnica, paciência e comprometimento, que foram indispensáveis para a realização deste trabalho. Sua paixão pela pesquisa e sua incansável preocupação em retribuir à sociedade por meio de suas contribuições acadêmicas refletem um exemplo notável de compromisso com o progresso científico.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Victor De Araújo, pela atenção e valiosas contribuições que enriqueceram esta pesquisa, e por estar sempre disponível para esclarecer dúvidas e oferecer suporte.

Aos membros da banca avaliadora, Profa. Dra. Maristela Gava e Prof. Dr. Sérgio Augusto, pela leitura atenta e pelas sugestões construtivas que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e pela força que me impulsiona a nunca desistir dos meus sonhos.

À memória da minha querida avó Iraci, que, mesmo ausente, permanece viva em meu coração, como fonte de inspiração e afeto.

Aos meus colegas de curso, especialmente Poliana, Pedro, Guilherme, Isabela e Fabrício, que compartilharam comigo momentos desafiadores e também as alegrias dessa jornada. Agradeço a todos os colegas que, de alguma forma, foram prestativos e me ajudaram a trilhar esse caminho.

À minha amiga Luciana, que, enquanto trilha sua própria jornada no mestrado em Direito, esteve ao meu lado para ouvir, apoiar e me oferecer palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de pesquisa.

A cada um de vocês, meu sincero reconhecimento e gratidão por fazerem parte desta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

O bambu engenheirado surge como uma solução sustentável e viável na construção civil, superando limitações de variabilidade natural e falta de padronização ao oferecer compósitos com desempenho físico e mecânico consistente. Este estudo teve como objetivo geral caracterizar a indústria global de produtos de bambu engenheirado (PBE's) estruturais, visando promover seu uso em soluções construtivas industrializadas. Os objetivos específicos incluíram a identificação e classificação de empresas produtoras de PBE's com base em produtos comercializados, localização geográfica, espécies de bambu utilizadas, tipos de adesivos e preservantes, aplicações, certificações e nível de produção. Para os sistemas *cross-laminated bamboo* (CLB) e *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT), o estudo revisou o estado da arte, abordando processos de fabricação, normas aplicáveis, metodologias experimentais, analíticas e numéricas, propriedades mecânicas, espécies de bambu empregadas, aplicações e desafios para produção em escala e uso estrutural. A metodologia consistiu em uma revisão sistemática da literatura em bases como Scopus e Web of Science, além de um levantamento setorial para a caracterização das empresas do setor. A revisão sistemática acerca da indústria evidenciou que, apesar do crescente interesse acadêmico e industrial, a falta de estudos abrangentes sobre produção e consumo dificulta estratégias para expansão em larga escala. A integração entre pesquisa e mercado, aliada ao desenvolvimento de normas e políticas públicas, é essencial para consolidar o bambu engenheirado como uma alternativa sustentável na construção civil. A caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural revelou sua concentração na China, avanços tecnológicos e diversidade de produtos, como o *bamboo scrimber* e o LBL, além de ampla aplicabilidade em componentes estruturais. Entretanto, a falta de padronização nos processos, transparência nas informações técnicas, e dados detalhados sobre projetos e mercado global limita sua aceitação em larga escala. O setor apresenta potencial para sistemas híbridos, estruturas modulares e edificações de grande porte, mas requer maior normatização, divulgação técnica e investimentos em pesquisa para consolidar o bambu engenheirado como alternativa sustentável e competitiva na construção civil. A revisão sobre o CLB evidenciou avanços significativos no campo, com destaque para metodologias experimentais predominantes que validam suas propriedades estruturais e mecânicas, como flexão, compressão e cisalhamento transversal. Métodos numéricos e analíticos complementam os estudos, ampliando a compreensão do comportamento do CLB sob condições complexas. O material demonstra desempenho superior ao CLT em diversas propriedades, destacando-se como uma alternativa sustentável e eficiente para paredes, pisos e vigas em construções resilientes e energeticamente eficientes. No entanto, desafios relacionados à padronização, durabilidade e validação em condições extremas ainda precisam ser superados para consolidar sua aplicação em larga escala. A revisão sobre o CLBT evidenciou o crescimento do interesse acadêmico pelo tema, com predominância de estudos experimentais focados em propriedades mecânicas e estruturais, como compressão, flexão e cisalhamento. Abordagens analíticas e numéricas complementam a modelagem e simulação do material, enquanto processos de fabricação destacam o uso de *bamboo scrimber*, espécies de madeira como Spruce-Pine-Fir, e adesivos como poliuretano (PUR) e fenol-resorcinol formaldeído (PRF). O CLBT apresentou desempenho superior ao CLT em resistência à compressão e cisalhamento, sendo aplicado em pisos, paredes e vigas, mas ainda enfrenta desafios de padronização, validação em condições extremas e otimização de processos. Em resumo, este estudo contribuiu para a ampliação do conhecimento técnico e estratégico sobre a indústria global de produtos de bambu engenheirado estrutural, proporcionando subsídios para a padronização de processos, desenvolvimento de normas e integração entre pesquisa e mercado. Ao revisar e caracterizar de forma abrangente

os aspectos produtivos, tecnológicos e aplicativos do CLB e CLBT, a pesquisa oferece uma base sólida para impulsionar a adoção desses materiais como alternativas sustentáveis e de alto desempenho na construção civil.

Palavras-chave: bambu engenheirado; estruturas; indústria do bambu; construção civil; caracterização da indústria; normatização; *cross-laminated bamboo* (CLB); *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT); propriedades mecânicas; desempenho estrutural.

ABSTRACT

Engineered bamboo emerges as a sustainable and viable solution in civil construction, overcoming limitations of natural variability and lack of standardization by offering composites with consistent physical and mechanical performance. This study aimed to characterize the global industry of structural engineered bamboo products (EBPs) to promote their use in industrialized construction solutions. The specific objectives included identifying and classifying EBP manufacturers based on marketed products, geographical location, bamboo species used, types of adhesives and preservatives, applications, certifications, and production levels. For cross-laminated bamboo (CLB) and cross-laminated bamboo and timber (CLBT) systems, the study reviewed the state of the art, addressing manufacturing processes, applicable standards, experimental, analytical, and numerical methodologies, mechanical properties, bamboo species employed, applications, and challenges related to large-scale production and structural use. The methodology consisted of a systematic literature review on databases such as Scopus and Web of Science, as well as a sectoral survey to characterize companies in the field. The systematic review of the industry revealed that, despite the growing academic and industrial interest, the lack of comprehensive studies on production and consumption hinders strategies for large-scale expansion. The integration between research and market, coupled with the development of standards and public policies, is essential to establish engineered bamboo as a sustainable alternative in civil construction. The characterization of the engineered bamboo structural industry revealed its concentration in China, technological advances, and product diversity, such as bamboo scrimber and laminated bamboo lumber, along with broad applicability in structural components. However, the lack of process standardization, transparency in technical information, and detailed data on projects and the global market limits its large-scale acceptance. The sector holds potential for hybrid systems, modular structures, and large-scale buildings but requires greater standardization, technical dissemination, and research investments to consolidate engineered bamboo as a sustainable and competitive alternative in civil construction. The review on CLB highlighted significant advancements in the field, emphasizing predominant experimental methodologies that validate its structural and mechanical properties, such as bending, compression, and shear. Numerical and analytical methods complement the studies, enhancing the understanding of CLB behavior under complex conditions. The material demonstrates superior performance compared to CLT in several properties, standing out as a sustainable and efficient alternative for walls, floors, and beams in resilient and energy-efficient constructions. However, challenges related to standardization, durability, and validation under extreme conditions still need to be addressed to consolidate its large-scale application. The review on CLBT evidenced growing academic interest in the topic, with a predominance of experimental studies focusing on mechanical and structural properties, such as compression, bending, and shear. Analytical and numerical approaches complement the modeling and simulation of the material, while manufacturing processes highlight the use of bamboo scrimber, wood species such as Spruce-Pine-Fir, and adhesives like polyurethane (PUR) and phenol-resorcinol formaldehyde (PRF). CLBT demonstrated superior performance compared to CLT in compression and shear strength, being applied in floors, walls, and beams, though it still faces challenges of standardization, validation under extreme conditions, and process optimization. In summary, this study contributed to the expansion of technical and strategic knowledge about the global industry of structural engineered bamboo products, providing support for process standardization, the development of standards, and integration between research and market. By comprehensively reviewing and characterizing the productive, technological, and application aspects of CLB

and CLBT, the research offers a solid foundation to drive the adoption of these materials as sustainable and high-performance alternatives in civil construction.

Key words: *Engineered bamboo; structures; bamboo industry; civil construction; industry characterization; standardization; cross-laminated bamboo (CLB); cross-laminated bamboo and timber (CLBT); mechanical properties; structural performance.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – A) ESTRUTURAS DE COLMO DE BAMBU EM PONTES; B) CASA DE BAMBU NA COLÔMBIA.....	21
FIGURA 2 – VIGAS DE BAMBU ENGENHEIRADO PELA MOSO INTERNACIONAL	22
FIGURA 3 – PARTES DO BAMBU	36
FIGURA 4 – A) ESCOLA EM BALI, INDONÉSIA; B) CATEDRAL TEMPORÁRIA EM PEREIRA, COLÔMBIA.....	41
FIGURA 5 – A) ESTRUTURA DE BAMBU ENGENHEIRADO NA EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE HORTICULTURA DE PEQUIM DE 2019; B) EDIFÍCIO DE BAMBU ENGENHEIRADO DE TRÊS PAVIMENTOS EM NANJING, CHINA.....	41
FIGURA 6 – COLMOS DE BAMBU DE DIFERENTES DIMENSÕES	43
FIGURA 7 – A) <i>GLUBAM</i> , B) LBL E C) BSC	46
FIGURA 8 – “TANGSHAN MINE CAMP VISITOR CENTRE”, CHINA	46
FIGURA 9 – EDIFÍCIO COM ESTRUTURA DE BSC, CHINA.....	47
FIGURA 10 - CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO DE DOIS ANDARES COM LBL NA CHINA	47
FIGURA 11 - EDIFÍCIO DE BAMBU RESISTENTE A TERREMOTOS NA UNIVERSIDADE FLORESTAL DE NANJING.....	48
FIGURA 12 - EDIFÍCIO DE BAMBU ENGENHEIRADO DE VÁRIOS ANDARES, NINGHAI, CHINA	48
FIGURA 13 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO BAMBU LAMINADO	58
FIGURA 14 – MODOS DE FALHA DO LBL SOB TRAÇÃO PARALELA À FIBRA.....	60
FIGURA 15 - MODOS DE FALHA DO LBL SOB TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS	61
FIGURA 16 – MODOS DE FALHA DO LBL SOB COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	62
FIGURA 17 - MODOS DE FALHA DO LBL SOB COMPRESSÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS	63
FIGURA 18 – MODOS DE FALHA DO LBL SOB FLEXÃO.....	64
FIGURA 19 – MODOS DE FALHA DO LBL SOB CISALHAMENTO	65
FIGURA 20 – A) MODELO TRILINEAR DO LBL SOB COMPRESSÃO; B) MODELO POLINOMIAL DO LBL SOB COMPRESSÃO	66
FIGURA 21 - MODELO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO BAMBU LAMINADO SOB FLEXÃO	67
FIGURA 22 – A) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO NO ESTADO DE FALHA FINAL; B) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO NO ESTADO DE FALHA FINAL PARA O MODO III	68
FIGURA 23 – NOVO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO <i>GLUBAM</i>	71
FIGURA 24 - DEFINIÇÃO DE SISTEMA DE COORDENADAS	71
FIGURA 25 – MODOS DE FALHA TÍPICOS NA COMPRESSÃO NA DIREÇÃO PRINCIPAL (A E B) E TRANSVERSAL (C E D).....	72
FIGURA 26 – MODOS DE FALHA DO <i>GLUBAM</i> EM TRAÇÃO NA DIREÇÃO PRINCIPAL (A) E TRANSVERSAL (B).....	73
FIGURA 27 – MODOS DE FALHA DO <i>GLUBAM</i> SOB CISALHAMENTO	74
FIGURA 28 – MODOS DE FALHA DE VIGAS <i>GLUBAM</i> COM TIRAS GROSSAS (A) E FINAS (B E C)...	75
FIGURA 29 – A) MODELO SIMPLIFICADO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO <i>GLUBAM</i> ; B) RELAÇÕES TENSÃO-DEFORMAÇÃO AXIAL LINEAR PARA DOIS TIPOS DE <i>GLUBAM</i>	76
FIGURA 30 – MODELO TENSÃO-DEFORMAÇÃO REFINADO PARA <i>GLUBAM</i> SOB COMPRESSÃO ..	76
FIGURA 31 - PROCESSO GERAL DE FABRICAÇÃO DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i>	77
FIGURA 32 - TIPOS DE FALHA DE AMOSTRAS DE COMPRESSÃO PARALELAS À FIBRA: A) FALHA DIAGONAL; B) FALHA FINAL; C) FALHA TIPO Y.....	79
FIGURA 33 - MODOS DE FALHA DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i> SOB COMPRESSÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS.....	79

FIGURA 34 – MODOS DE FALHA TÍPICOS SOB TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i>	80
FIGURA 35 - MODOS DE FALHA DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i> SOB TRAÇÃO PERPENDICULAR À FIBRA	81
FIGURA 36 - MODOS DE FALHA DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i> SOB CISALHAMENTO	81
FIGURA 37 - MODOS DE FALHA TÍPICOS PARA AMOSTRAS DE FLEXÃO DO <i>BAMBOO SCRIMBER</i>	82
FIGURA 38 - RELAÇÕES TENSÃO-DEFORMAÇÃO UNIAXIAIS	82
FIGURA 39 - DIAGRAMAS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO AO LONGO DA SEÇÃO DE MOMENTO... 83	
FIGURA 40 – PRINCIPAIS EXPORTADORES DE PRODUTOS DE BAMBU EM 2019	95
FIGURA 41 – A) CONFIGURAÇÃO DO PAINEL CLT; B) EXEMPLOS DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DE PAINÉIS CLT	98
FIGURA 42 – A) TESTE DE TRAÇÃO; B) TESTE DE COMPRESSÃO; C) EXPERIMENTO DE CISALHAMENTO PLANO; D) TESTE DE FLEXÃO DE CURTO VÃO	101
FIGURA 43 – MODELO PARA CONDUÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA – RBS ROADMAP	107
FIGURA 44 – FLUXOGRAMA DO DELINEAMENTO DA PESQUISA	113
FIGURA 45 - FLUXOGRAMA PRISMA DA REVISÃO SISTEMA DA LITERATURA	132
FIGURA 46 - VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR ANO	133
FIGURA 47 – VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR AUTOR	134
FIGURA 48 – VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR PAÍS	135
FIGURA 49 – INSTITUIÇÕES E CENTROS DE PESQUISA POR VOLUME DE PUBLICAÇÕES	136
FIGURA 50 – DISTRIBUIÇÃO DAS PUBLICAÇÕES QUANTO À METODOLOGIA ADOTADA, TIPOS DE ELEMENTO E FOCO PRINCIPAL	139
FIGURA 51 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DAS EMPRESAS DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	168
FIGURA 52 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DE SEDES REGIONAIS DAS EMPRESAS DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL PROSPECTADAS	169
FIGURA 53 – GRÁFICO DO ANO DE FUNDAÇÃO DAS EMPRESAS DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	170
FIGURA 54 – GRÁFICO DOS IDIOMAS DISPONÍVEIS NOS <i>WEBSITES</i> OFICIAIS DAS EMPRESAS PROSPECTADAS	171
FIGURA 55 – GRÁFICO DOS CANAIS DE COMUNICAÇÃO COM O CLIENTE	173
FIGURA 56 – GRÁFICO DAS REDES SOCIAIS ESPECIFICADAS NOS <i>WEBSITES</i> OFICIAIS.....	174
FIGURA 57 – INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS NOS <i>WEBSITES</i> OFICIAIS DAS EMPRESAS	175
FIGURA 58 – PRODUTOS DE BAMBU ENGENHEIRADO DA INDOBAMBOO	188
FIGURA 59 – ALTPLUS LVB™.....	190
FIGURA 60 – BAMBOO STEEL®.....	191
FIGURA 61 – RLB (RADIAL LAMINATED BAMBOO) RADLAM®.....	193
FIGURA 62 – SEB + WELDED STEEL WEB AND BEARING PLATE.....	195
FIGURA 63 – <i>BAMBOO GLUED TIMBER</i> DA HUNAN TAOHUAJIANG	197
FIGURA 64 – A) PAVILHÃO DE BAMBU TRATADO CONTRA CORROSÃO (防腐竹木凉亭), B) PAVILHÃO DE LAZER EM BAMBU LAMINADO PESADO (重竹木休闲凉亭)	197
FIGURA 65 – APLICAÇÕES DE MATERIAIS DE ESTRUTURAIS DE BAMBU ENGENHEIRADO DISPONÍVEIS NO <i>WEBSITE</i> DA FEIYU	198
FIGURA 66 – VIGAS ESTRUTURAIS DE BAMBU APRESENTADAS NO <i>WEBSITE</i> DA ASIA BAMBOO	199
FIGURA 67 – PRODUTOS DE BAMBU DISPONÍVEIS DO <i>WEBSITE</i> DA BAMBUFY	201
FIGURA 68 - INTEGRATED BAMBOO STRUCTURAL MATERIALS	202

FIGURA 69 – VIGAS DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	204
FIGURA 70 – A) BAMBOO BEAMS LUMBER; B) HIGH GRADE STRAND WOVEN LUMBERS	205
FIGURA 71 – A) <i>STRUCTURAL BAMBOO BEAMS AND COLUMNS</i> ; B) <i>LARGE SIZE SOLID BAMBOO BEAMS</i>	206
FIGURA 72 – ESTRUTURAS CONSTRUÍDA COM MADEIRA DE BAMBU.....	208
FIGURA 73 – ESTRUTURA E MEMBROS DE BAMBU ENGENHEIRADO APRESENTADOS NO <i>WEBSITE</i> DA SUNZO BAMBOO	209
FIGURA 74 – <i>CRUSHED BAMBOO BEAMS</i>	211
FIGURA 75 – A) PAVILHÃO-3 ZD-ZG-LT003; B) LOUNGE DE GOLFE.....	212
FIGURA 76 – SALA DE EQUIPAMENTOS GRANDE; SALA DE EQUIPAMENTOS PEQUENA	212
FIGURA 77 - CASA DE BAMBU TÉRREA DE 35 METROS QUADRADOS.....	212
FIGURA 78 – A) VILLA DE BAMBU DE TRÊS ANDARES COM 700 METROS QUADRADOS; B) VILLA DE BAMBU DE DOIS ANDARES COM 250 METROS QUADRADOS.....	213
FIGURA 79 – BVL™	214
FIGURA 80 – A) EQUIPAMENTO PARA DIVISÃO DE TIRAS DE BAMBU, B) TRANSPORTE DE TIRAS DE BAMBU, C) LINHA DE PRODUÇÃO DE CHIPS DE BAMBU, E D) ARMAZENAMENTO DE MATERIAIS	215
FIGURA 81 - RENÜTEQ COLUMBIA SA - SECAGEM DE COLMOS	216
FIGURA 82 – A) PANORAMA DA FÁBRICA; B) LINHA DE PRODUÇÃO DE TERMOFORMAGEM; C) EQUIPAMENTO DE TERMOFORMAGEM E D) OFICINA DE ACABAMENTO	220
FIGURA 83 – FÁBRICA DA RENÜTEQ.....	220
FIGURA 84 – A) BASE DE PRODUÇÃO DE TAOHUAIJIANG; B) BASE DE PRODUÇÃO DE FUJIAN WUPING	221
FIGURA 85 – INSTALAÇÕES DA FÁBRICA	222
FIGURA 86 – PANORAMA DA FÁBRICA DA GREEZU	223
FIGURA 87 – PANORAMA DA FÁBRICA DA BWG MAI CHAU JOINT STOCK COMPANY	223
FIGURA 88 – PANORAMA DA FÁBRICA DA SUNZO BAMBOO	224
FIGURA 89 – A) PLANO GERAL ILUSTRATIVO DO PROJETO DA FÁBRICA, B) GALPÕES DE PRODUÇÃO	225
FIGURA 90 – PROJETO SICHUAN YA'AN MENGDI MOUNTAIN BLOSSOM BOUTIQUE RESORT.....	226
FIGURA 91 – SDW RESORT	226
FIGURA 92 – PROJETO IDEAL HOME OF THE FUTURE	227
FIGURA 93 - ALTPLUS® PROJETO RENDER CHEETAH BUNKIE	228
FIGURA 94 – MUSEU DE ZHAOJUN.....	228
FIGURA 95 - PAVILHÃO DANJING	229
FIGURA 96 – CENTRO COMUNITÁRIO DE INOVAÇÃO EM BAMBU	230
FIGURA 97 – SALÃO DE PALESTRAS DO TEMPLO BAOGUO NO CONDADO DE LEZHI, SICHUAN.....	230
FIGURA 98 – VILA ANTIGA DE XINGFU	231
FIGURA 99 – CASA DE TELHAS E A CASA DE WAFFLE	231
FIGURA 100 – GALERIA DO HOTEL JINNIU	232
FIGURA 101 - VANKE PURPLE COUNTY.....	232
FIGURA 102 – ACADEMIA SHUANGXI	233
FIGURA 103 – PÁTIO Nº 37 DE LUANQING HUTONG, PEQUIM	234
FIGURA 104 – JOVEM ALBERGUE NIU BEI SHAN ESTÁ LOCALIZADO EM SICHUAN	234
FIGURA 105 - CORREDOR FLORESTAL, UNIVERSIDADE DE SILVICULTURA DE PEQUIM.....	235
FIGURA 106 – ESTRUTURA PAISAGÍSTICA EM FORMA DE GUARDA-CHUVA	235
FIGURA 107 – ESTAÇÃO PRÉ-FABRICADA DE BAMBOO STEEL®.....	236

FIGURA 108 – PROJETO RENDER DA ESTRUTURA DE USO MISTO DE QUATRO ANDARES	237
FIGURA 109 – MISSOURI PRIMARY CARE ASSOCIATION (MPCA) E MISSOURI BEHAVIORAL HEALTH COUNCIL (MBHC).....	237
FIGURA 110 – A ESTRUTURA DE CARREGAMENTO SOLAR RENÚTEQ - SOLIS.....	238
FIGURA 111 – THE FARM PAVILION	239
FIGURA 112 – EDIFÍCIO DE TRÊS PAVIMENTOS DA HUNAN TAOHUAJIANG	239
FIGURA 113 – EDIFÍCIO ZHUANGYUAN.....	240
FIGURA 114 – TAOHUAJIANG BAMBOO SEA E BAMBOO FOREST SECRET HOTEL.....	241
FIGURA 115 – ENTRADA PARA UM JARDIM DE INFÂNCIA EM XANGAI.....	241
FIGURA 116 – ZIDONG CREATIVE PARK (紫东创意园).....	242
FIGURA 117 – FEIZI VILLAGE URBAN (妃子村都市田园花房).....	242
FIGURA 118 – LIXIANG BATTALION HEADQUARTERS (李巷大队部)	242
FIGURA 119 – LIJIASHAN VILLAGE ACTIVITY CENTER (里佳山村民活动中心).....	243
FIGURA 120 – CHINA NEW FOURTH ARMY HISTORY RESEARCH MUSEUM (中国新四军历史研 究馆).....	243
FIGURA 121 – LIJIASHAN RONGMAJIAN VILLAGE RECONSTRUCTION (里佳山戎马间乡村改造) .	243
FIGURA 122 – BAMBOO HOUSE, SAUDI ARABIA	244
FIGURA 123 – NANJING HONGLI LANE	244
FIGURA 124 – ABRIGOS DE ÔNIBUS DE BAMBU	245
FIGURA 125 – CONSTRUÇÃO DO EDIFÍCIO DA GREEZU	245
FIGURA 126 – ZHENGZHOU PROMARKET COMMUNITY COMMERCIAL COMPLEX	246
FIGURA 127 – NOVO PROJETO COM LAMBOO® STRUCTURE™	246
FIGURA 128 - RESIDÊNCIA DONNER/MILLER.....	247
FIGURA 129 - JINGSHAN FLOWER SEA BAMBOO BUILDING	247
FIGURA 130 - XIXI IMPRESSION CITY ROOFTOP COMMERCIAL STREET	248
FIGURA 131 - BAMBOO BUILDING	248
FIGURA 132 - RENOVATION OF HANGZHOU GONGCHENQIAO HISTORIC DISTRICT	248
FIGURA 133 - QINGTIAN QIANXIA LAKE PROJECT	249
FIGURA 134 - TOILET REVOLUTION IN YUNXI TOWNSHIP, QUZHOU	249
FIGURA 135 – DALIAN GULIAN WETLAND PARK	250
FIGURA 136 – JIANGXI BAMBOO SCI-TECH MUSEUM.....	250
FIGURA 137 – HUANGGANG HONGHUA ZEN TEMPLE	251
FIGURA 138 – SUZHOU CHUIHONG SMALL BUILDING	251
FIGURA 139 - FLUXOGRAMA PRISMA DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CLB	274
FIGURA 140 - VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR ANO E BASE DE DADOS.....	275
FIGURA 141 – VOLUME DE CONTRIBUIÇÕES POR AUTOR.....	276
FIGURA 142 – INSTITUIÇÕES E CENTROS DE PESQUISA ATUANTES NAS PUBLICAÇÕES	278
FIGURA 143 – VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR PAÍS	278
FIGURA 144 – DISTRIBUIÇÃO DO VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR METODOLOGIAS, PROPRIEDADES INVESTIGADAS E TIPOS DE ELEMENTOS ESTUDADOS EM CLB	280
FIGURA 145 – FLUXOGRAMA PRISMA DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O CLBT.....	328
FIGURA 146 – VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR ANO POR BASE DE DADOS E NO TOTAL.....	329
FIGURA 147 – DISTRIBUIÇÃO DE AUTORES POR VOLUME DE PUBLICAÇÕES	330
FIGURA 148 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAÍSES POR VOLUME DE PUBLICAÇÕES.....	331
FIGURA 149 – INSTITUIÇÕES E CENTROS DE PESQUISA POR VOLUME DE PUBLICAÇÕES	332

FIGURA 150 – DISTRIBUIÇÃO DO VOLUME DE PUBLICAÇÕES POR METODOLOGIAS, PROPRIEDADES INVESTIGADAS E TIPOS DE ELEMENTOS ESTUDADOS EM CLB	335
FIGURA 151 –RELAÇÕES TENSÃO-DEFORMAÇÃO PREVISTAS PELO MODELO DE RICHARD- ABBOTT: (A) TIPO DE ENDURECIMENTO POR DEFORMAÇÃO E (B) TIPO DE AMOLECIMENTO POR DEFORMAÇÃO.	355
FIGURA 152 – A ESTRUTURA DE CAMADAS DO BMCP	363

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUMAS ESPÉCIES DE BAMBU	40
TABELA 2 – TIPOS DE ADESIVOS E TAXA DE ESPALHAMENTO UTILIZADA EM PBE’S	51
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU ENGENHEIRADO SOB TRAÇÃO	53
TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU ENGENHEIRADO SOB COMPRESSÃO	54
TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU ENGENHEIRADO SOB CISALHAMENTO ...	55
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU ENGENHEIRADO SOB FLEXÃO	56
TABELA 7 – CÓDIGOS HS PARA PRODUTOS DE BAMBU E SUA PARTICIPAÇÃO NAS EXPORTAÇÕES GLOBAIS EM 2019	95
TABELA 8 – PRINCIPAIS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS CLT COMERCIAIS	102
TABELA 9 – RESULTADOS DAS <i>STRINGS</i> DE BUSCA EM CADA BASE DE DADOS	131
TABELA 10 – PALAVRAS-CHAVES COM MAIOR NÚMERO DE OCORRÊNCIAS	137
TABELA 11 – PRODUTOS DE BAMBU ENGENHEIRADO, ESPÉCIES E ASPECTOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	153
TABELA 12 – SÍNTESE DOS TESTES EXPERIMENTAIS E NORMAS APLICADAS	159
TABELA 13 – INFORMAÇÕES ACERCA DAS INSTALAÇÕES DAS FÁBRICAS	257
TABELA 14 – CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE SEB.....	267
TABELA 15 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DISPONÍVEIS NOS <i>WEBSITES</i>	271
TABELA 16 – RESULTADOS DA <i>STRING</i> DE BUSCA PARA O CLB.....	273
TABELA 17 – PALAVRAS CHAVES DAS PUBLICAÇÕES REVISADAS	283
TABELA 18 – PROPRIEDADES DE FLEXÃO DO CLB	284
TABELA 19 – PROPRIEDADES DE COMPRESSÃO E TRAÇÃO DO CLB.....	285
TABELA 20 – PROPRIEDADES DE CISALHAMENTO DO CLB.....	286
TABELA 21 – SÍNTESE DOS TESTES EXPERIMENTAIS REALIZADOS PELOS ESTUDOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	302
TABELA 22 – SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DE MODELOS NUMÉRICOS DO CLB	317
TABELA 23 – DADOS CARACTERÍSTICOS ACERCA DO CLB E SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO	321
TABELA 24 – RESULTADOS DA <i>STRING</i> DE BUSCA PARA O CLBT	327
TABELA 25 – PALAVRAS-CHAVE DAS PUBLICAÇÕES REVISADAS.....	333
TABELA 26 – PROPRIEDADES DE FLEXÃO DO CLBT	336
TABELA 27 – PROPRIEDADES DE COMPRESSÃO DO CLBT	338
TABELA 28 – PROPRIEDADES DE CISALHAMENTO DO CLBT	340
TABELA 29 – METODOLOGIA EXPERIMENTAIS EMPREGADAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CLBT	352
TABELA 30 – CARACTERÍSTICAS E DIMENSÕES DOS CLB E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	365

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ESPÉCIES COMUNS DE BAMBU PARA CONSTRUÇÃO E SUA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA	39
QUADRO 2 - NORMAS E CÓDIGOS DE BAMBU EXISTENTES	85
QUADRO 3 - <i>STRINGS</i> DE BUSCA DA RSL	114
QUADRO 4 - CRITÉRIOS DE INCLUSÃO.....	115
QUADRO 5 - CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO.....	116
QUADRO 6 - CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DAS PUBLICAÇÕES FILTRADAS	117
QUADRO 7 - CAMPOS DE CRITÉRIOS DE EXTRAÇÃO DOS DADOS DAS PUBLICAÇÕES	117
QUADRO 8 - PALAVRAS-CHAVE A SEREM UTILIZADAS PARA BUSCA DE PRODUTORES DE BAMBU ENGENHEIRADO.....	119
QUADRO 9 – PLATAFORMAS B2B PROSPECTADAS	120
QUADRO 10 – TERMOS DE BUSCA EM CHINÊS	121
QUADRO 11 – <i>STRINGS</i> DE BUSCA PARA PROSPECÇÃO DE EMPRESAS EM PUBLICAÇÕES NA BASE DE DADOS SCOPUS E WEB OF SCIENCE	122
QUADRO 12 - QUESTÕES E ASPECTOS PRIMÁRIOS EM AVALIAÇÃO NESTA <i>SURVEY</i>	123
QUADRO 13 – <i>STRINGS</i> DE BUSCA DA RSL.....	124
QUADRO 14 – CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	125
QUADRO 15 - CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO.....	125
QUADRO 16 - CRITÉRIOS DE QUALIDADE	125
QUADRO 17 - CAMPOS DE CRITÉRIO DE EXTRAÇÃO	125
QUADRO 18 – <i>STRINGS</i> DE BUSCA DA RSL.....	127
QUADRO 19 - CRITÉRIOS DE INCLUSÃO.....	127
QUADRO 20 - CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO.....	127
QUADRO 21 - CRITÉRIOS DE QUALIDADE	128
QUADRO 22 - CAMPOS DE CRITÉRIO DE EXTRAÇÃO.....	128
QUADRO 23 – SERVIÇOS REALIZADOS PELAS EMPRESAS	256
QUADRO 24 – NORMAS E CERTIFICAÇÕES IDENTIFICADAS NOS <i>WEBSITES</i>	259
QUADRO 25 – APLICAÇÕES E PROJETOS REAIS DOS PRODUTOS DE SEB	261
QUADRO 26 – ESPÉCIES DE BAMBU E ETAPAS DE FABRICAÇÃO DOS PRODUTOS SEB.....	264

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	JUSTIFICATIVA	28
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA OU QUESTÃO DE PESQUISA	30
1.3	OBJETIVOS	30
1.3.1	Geral.....	30
1.3.2	Específicos	30
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	31
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
2.1	BAMBU A PLANTA.....	35
2.1.1	O bambu.....	35
2.1.2	Anatomia do bambu	36
2.1.3	Desenvolvimento do bambu.....	37
2.2	O BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL	39
2.2.1	Os usos do bambu	39
2.3	POLÍTICAS DE INCENTIVO AO BAMBU NO BRASIL	42
2.4	BAMBU ENGENHEIRADO	43
2.4.1	Aspectos gerais.....	43
2.4.2	Durabilidade e tratamentos	48
2.4.3	Adesivos.....	50
2.4.4	Conexões	51
2.4.5	Propriedades físicas e mecânicas	52
2.4.6	<i>Laminated bamboo lumber (LBL)</i>	57
2.4.6.1	Propriedades físicas e mecânicas do LBL	59
2.4.6.2	Relações constitutivas do LBL	65
2.4.7	<i>Glued laminated bamboo (Glubam)</i>	70
2.4.7.1	Propriedades físicas e mecânicas do <i>glubam</i>	71
2.4.7.2	Relações Constitutivas do <i>glubam</i>	75
2.4.8	<i>Bamboo scrimber</i>	77
2.4.8.1	Propriedades físicas e mecânicas do <i>bamboo scrimber</i>	78
2.4.8.2	Relações constitutivas do <i>bamboo scrimber</i>	82
2.5	PADRÕES E CÓDIGOS DE BAMBU.....	84

2.6	ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE	89
2.7	A INDÚSTRIA DO BAMBU	92
2.7.1	A indústria do bambu ao redor do mundo.....	92
2.7.2	Mercado internacional.....	94
2.8	CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT): ASPECTOS GERAIS	96
2.8.1	<i>Cross-laminated timber</i> (CLT)	97
2.8.2	Propriedades físicas e mecânicas do CLT.....	100
2.9	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	106
2.10	MÉTODO DE PESQUISA SURVEY.....	107
2.11	CONSIDERAÇÕES ACERCA DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	109
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	112
3.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E SURVEY EMPRESARIAL	112
3.1.1	Delineamento da Pesquisa.....	112
3.1.2	Revisão Sistemática da Literatura: Indústria de Bambu Engenheirado Estrutural ...	113
3.1.3	<i>Survey</i> Empresarial.....	118
3.2	REVISÃO SISTEMÁTICA: <i>CROSS-LAMINATED BAMBOO</i> (CLB).....	124
3.3	REVISÃO SISTEMÁTICA: <i>CROSS-LAMINATED BAMBOO AND TIMBER</i> (CLBT)	126
4	RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	131
4.1	CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS	131
4.2	PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS	142
4.2.1	Amostras de bambu engenheirado em escala reduzida.....	142
4.2.2	Paredes de bambu engenheirado	147
4.2.3	Vigas de bambu engenheirado	148
4.2.4	Colunas de bambu engenheirado	148
4.2.5	Desempenho de conexões de bambu engenheirado	149
4.2.6	Treliças de bambu engenheirado.....	151
4.2.7	Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) de produtos de bambu engenheirado	152
4.3	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	152
4.4	METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS E NORMAS	158
4.5	APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DOS PRODUTOS DE BAMBU ENGENHEIRADO.....	162
5	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	165

5.1	LIMITAÇÕES OBSERVADAS NA PROSPECÇÃO DE EMPRESAS.....	165
5.2	ASPECTOS GERAIS ACERCA DAS EMPRESAS E <i>WEBSITES</i>	166
5.3	DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS	176
5.3.1	altPlus.....	176
5.3.2	Bamboo Era.....	176
5.3.3	ReNüTeq	177
5.3.4	Taohuajiang Bamboo	178
5.3.5	Bamboo International.....	179
5.3.6	Feiyu Bamboo	180
5.3.7	ASIA Bamboo	180
5.3.8	Bambufy	180
5.3.9	Jianzhu Green.....	181
5.3.10	Greezu	181
5.3.11	BWG	182
5.3.12	Exterior Bamboo	183
5.3.13	Anos Bamboo.....	183
5.3.14	Sunzo Bamboo	184
5.3.15	Lamboo	184
5.3.16	Guadua Bamboo.....	185
5.3.17	Run Zhun.....	185
5.3.18	Dasso	186
5.3.19	PT Indobamboo Lestari.....	187
5.3.20	Widuz	189
5.4	PRODUTOS E APLICAÇÕES	189
5.4.1	altPlus.....	189
5.4.2	Bamboo Era.....	191
5.4.3	ReNüTeq	192
5.4.4	Taohuajiang Bamboo	195
5.4.5	Bamboo International.....	198
5.4.6	Feiyu Bamboo	198
5.4.7	ASIA Bamboo	199
5.4.8	Bambufy	200
5.4.9	Jianzhu Green.....	202
5.4.10	Greezu	203

5.4.11	BWG	204
5.4.12	Exterior Bamboo	205
5.4.13	Anos Bamboo.....	207
5.4.14	Sunzo Bamboo	208
5.4.15	Lamboo	209
5.4.16	Guadua Bamboo.....	210
5.4.17	Run Zhun.....	211
5.4.18	Dasso	213
5.4.19	Widuz	213
5.5	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	214
5.5.1	altPlus.....	214
5.5.2	Bamboo Era.....	215
5.5.3	ReNüTeq	216
5.5.4	Taohuajiang Bamboo	216
5.5.5	ASIA Bamboo	217
5.5.6	Guadua Bamboo.....	218
5.6	FÁBRICAS E EQUIPAMENTOS	218
5.6.1	altPlus.....	218
5.6.2	Bamboo Era.....	219
5.6.3	ReNüTeq	220
5.6.4	Taohuajiang Bamboo	221
5.6.5	Greezu	222
5.6.6	BWG	223
5.6.7	Anos Bamboo.....	223
5.6.8	Sunzo Bamboo	224
5.6.9	Run Zhun.....	224
5.7	PROJETOS REAIS	225
5.7.1	altPlus.....	225
5.7.2	Bamboo Era.....	228
5.7.3	ReNüTeq	236
5.7.4	Taohuajiang Bamboo	239
5.7.5	Bamboo International.....	241
5.7.6	Jianzhu Green.....	241
5.7.7	Greezu	243

5.7.8	Sunzo Bamboo	245
5.7.9	Lamboo	246
5.7.10	Run Zhu.....	247
5.7.11	Dasso	249
5.8	NORMAS E CERTIFICAÇÕES.....	251
5.9	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	255
6	RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CROSS-LAMINATED BAMBOO (CLB).....	273
6.1	CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS	273
6.2	PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS	287
6.2.1	Amostras de CLB em escala reduzida	287
6.2.1.1	Desempenho do CLB sob compressão	287
6.2.1.2	Desempenho do CLB sob tração	288
6.2.1.3	Desempenho do CLB sob flexão	289
6.2.1.4	Desempenho do CLB sob cisalhamento	290
6.2.1.5	Desempenho do CLB em relação a fratura.....	293
6.2.1.6	Desempenho térmico do CLB	293
6.2.1.7	Desempenho do CLB sob explosões	294
6.2.2	Painéis de CLB.....	295
6.2.2.1	Desempenho à flexão dos painéis de CLB	295
6.2.2.2	Desempenho ao fogo dos painéis de CLB.....	296
6.2.3	Paredes oscilantes de CLB (rocking walls).....	297
6.3	METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DO CLB.....	302
6.4	METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA AVALIAR O CLB	305
6.4.1	Modelo analítico considerando as características dos estados limites	311
6.4.2	Procedimento de projeto para parede de balanço CLB	313
6.5	METODOLOGIAS NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLB	314
6.6	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO CLB	319
6.7	APLICAÇÕES DO CLB	323
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CROSS-LAMINATED BAMBOO AND TIMBER (CLBT)	327
7.1	CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS	327
7.2	PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS	341
7.2.1	Amostras de CLBT em escala reduzida	341
7.2.1.1	Desempenho do CLBT ao cisalhamento	341

7.2.1.2	Desempenho do CLBT à compressão	343
7.2.1.3	Desempenho do CLBT à flexão	344
7.2.2	Vigas de CLBT	345
7.2.3	Colunas de CLBT.....	349
7.2.4	Paredes de CLBT	350
7.2.4.1	Desempenho do CLBT sob compressão.....	350
7.2.4.2	Desempenho térmico do CLBT	350
7.3	METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT	351
7.4	METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT	354
7.5	METODOLOGIAS NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT	360
7.6	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO CLBT.....	362
7.7	APLICAÇÕES DO CLBT	366
8	CONCLUSÕES DA PESQUISA	369
8.1	CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E DA CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL	369
8.1.1	Conclusões da revisão sistemática da literatura da indústria de bambu engenhierado estrutural	369
8.1.2	Conclusões da caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural.....	370
8.2	CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CLB	375
8.3	CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CLBT	379
	REFERÊNCIAS	385

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por significativos impactos ambientais, decorrentes da extração de recursos naturais, da produção de materiais de construção, da execução das obras e da destinação dos resíduos (Nunes; Sobrinho Júnior; Pastor, 2021). A indústria da construção, considerando os setores de construção e fabricação de materiais, é responsável por cerca de 37% das emissões globais de carbono, desempenhando um papel crucial no combate à crise climática e na descarbonização da economia global (UN Environment Program, 2022). A fim de reverter a problemática advinda da sua atividade, o setor tem buscado a substituição de materiais convencionais e de alto impacto ambiental por materiais sustentáveis. Nesse contexto, o bambu surge como um material de construção alternativo em substituição ao uso do aço e do concreto (Nunes; Sobrinho Júnior; Pastor, 2021).

Os materiais de bambu, assim como os de madeira, são ecologicamente corretos e apresentam baixos níveis de emissão de carbono (De Araujo *et al.*, 2023). O uso do bambu como material estrutural básico apresenta méritos evidentes. O bambu é um recurso natural amplamente disponível em várias regiões do mundo (FAO, 2020). Trata-se de uma gramínea gigante que cresce mais rapidamente do que a maioria das árvores. Com um ciclo de crescimento de aproximadamente quatro anos, o bambu pode ser cortado e regenerado. O bambu possui boas propriedades mecânicas e é facilmente processável. Além disso, o processamento e fabricação do bambu não causam impactos ambientais significativos. Basicamente, pode ser processado sem poluição, atendendo aos requisitos do desenvolvimento sustentável (Xiao, 2022). Exemplos de estruturas de colmo do bambu são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – a) Estruturas de colmo de bambu em pontes; b) Casa de bambu na Colômbia



Fonte: a) Amede *et al.* (2021); b) Zhaohua e Wei (2018).

Há muitas regiões de cultivo de bambu no mundo onde o uso desse material na construção de edifícios e pontes é amplamente difundido e praticado há séculos (Hong *et al.*, 2020; Wu; Xiao, 2018). No entanto, até meados do século passado, a construção com bambu era predominantemente limitada ao uso do colmo do bambu, ou bambu roliço. Os colmos redondos apresentam certas limitações em termos de eficiência na produção manufatureira, devido às irregularidades em suas seções transversais e ao longo de seu comprimento. As seções podem não ser uniformes, podendo não ser perfeitamente redondas, e seu diâmetro varia ao longo do colmo (Xiao; Shan; Li, 2020).

Como uma alternativa para superar as limitações apresentadas pela construção com bambu roliço, processos de fabricação industrializados foram desenvolvidos para produção de produtos de bambu engenheirado (PBE's) (Chen *et al.*, 2014; Huang; Ji; Yu, 2019; Xiao, 2019; Xing *et al.*, 2018). Esses novos materiais possuem formas regulares, podem ser projetados e dimensionados com precisão para aplicações na construção, assemelhando-se a outros materiais industrializados modernos, como a madeira engenheirada (madeira lamelada colada, madeira lamelada colada cruzada, etc.) (Xiao; Shan; Li, 2020). Produtos de bambu engenheirado são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Vigas de bambu engenheirado pela MOSO Internacional



Fonte: Van Der Lugt e Nicholson (2023).

Esses produtos estão ganhando popularidade crescente como opção de material estrutural principal em edifícios de médio e grande porte. Os elementos estruturais de bambu projetado destacam-se por sua relação elevada entre resistência e peso, além de possuírem um apelo estético notável (Mahdavi *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2015). Além disso, eles superam as limitações associadas ao uso do material natural, como a variabilidade e as dificuldades nas conexões (Ni *et al.*, 2016; Wang; Xiao; Li, 2017).

Nos últimos anos, vários PBE's foram desenvolvidos e estão disponíveis no mercado para aplicações construtivas. O termo “produtos de bambu engenheirado” abrange uma ampla gama de produtos derivados de bambu (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017). Conforme, Xiao (2022), de modo geral, os PBE's são categorizados em dois tipos de produtos: o bambu laminado e o bambu densificado, ou *bamboo scrimber*. Por sua vez, segundo Liu *et al.* (2016), os produtos de bambu podem ser subdivididos em três categorias principais: bambu laminado, bambu reconstituído e painéis de bambu. No entanto, apesar dessa classificação ampla, há uma infinidade de variações na fabricação dos produtos dentro dessas categorias (Sharma; Van Der Vegte, 2020).

A característica básica de essencialmente todos os PBE's é a integração de unidades menores, como lamelas, tiras, fios e partículas, que são posteriormente processadas ligando ou fixando as unidades junto com adesivos, plásticos ou outros métodos de fixação para formar um material compósito com propriedades uniformes (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017; Xiao, 2022). Embora o processo de fabricação dependa do tipo específico de bambu engenheirado fabricado, as etapas comuns de processamento para a maioria dos produtos consistem em divisão, colagem e prensagem e pós-processamento (por exemplo, aquecimento ou corte) (Sun; He; Li, 2020).

O bambu laminado pode ser considerado uma terminologia geral para produtos de bambu processados com laminação adesiva (Xiao; Shan; Li, 2020), semelhante à madeira lamelada colada (MLC). Muitos dos produtos desta categoria não foram originalmente destinados à construção como elemento estrutural, sendo utilizados principalmente para móveis, pisos ou fôrmas de concreto, etc. (Xiao, 2022). Por outro lado, o *bamboo scrimber* é fabricado a partir de folhas ou feixes de bambu, que são impregnados com resina, comprimidos em uma fôrma de seção retangular e, então, curado (Sharma; Van Der Vegte, 2020). A maior resistência e o módulo relativamente elevado dos produtos finais são aparentemente favorecidos para aplicações em estruturas (Xiao, 2022).

Os principais produtos utilizados na construção são: *laminated bamboo lumber* (LBL) (Kumar; Mandal, 2022), *bamboo scrimber* (BSC) ou *parallel strand bamboo* (PSB) (Huang; Ji; Yu, 2019), *glued laminated bamboo* (Glulam) (Xiao *et al.*, 2008), *plybamboo* (Xiao; Shan; Li, 2020), *bamboo oriented strand board* (Bamboo OSB) (Habibi; Obonyo; Memari, 2023) e, mais recentemente, foi desenvolvido o *cross-laminated bamboo* (CLB) (Archila; Zea-Escamilla; Harries, 2023).

Os materiais de bambu engenheirado, como o bambu laminado ou o *bamboo scrimber*, demonstram propriedades, como resistência e a rigidez, comparáveis ou até mesmo superiores às da madeira e da madeira engenheirada, destacando-se pelo seu amplo potencial como componentes estruturais em edifícios (Mahdavi *et al.*, 2011; Sharma; Van Der Vegte, 2020; Sun; He; Li, 2020). Com o crescente interesse em produtos de construção sustentáveis, a fabricação comercial de produtos de bambu projetados se expandiu, porém, concentrando-se principalmente em aplicações decorativas e de superfície, como pisos e revestimentos de paredes (Liu *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2014). Recentemente, a fabricação evoluiu para incluir materiais estruturais, com pesquisas explorando globalmente o design e o desempenho de materiais de bambu engenheirado (Sharma; Van Der Vegte, 2020).

Dentre os PBE's, o LBL, o *glubam* e o BSC são atualmente os três produtos comumente utilizados em aplicações estruturais. Esses produtos são fabricados principalmente na China e usados para a construção de edifícios ou pontes (Sun; He; Li, 2020).

O CLB, desenvolvido recentemente, é um produto de bambu produzido a partir de uma laminação bidirecional de tiras de bambu, *bamboo scrimber* ou outros produtos de bambu engenheirado para formar estruturas robustas (Lv *et al.*, 2021; Wu, Yao *et al.*, 2023). Esse novo material foi inspirado pelo grande sucesso e crescente desenvolvimento do *cross-laminated timber* (CLT), um produto de madeira inovador adequado para edifícios médios e altos (Ding; Lv, 2020). A laminação cruzada oferece resistência sob cargas dentro e fora do plano, tornando-o uma aplicação viável para paredes e pisos (Brandner *et al.*, 2016). O CLB possui a mesma estrutura que o CLT e alguma semelhança no desempenho, apresentando vantagens, tais como propriedades mecânicas semelhantes em direções ortogonais, elevada resistência e rigidez no plano e alto nível de pré-fabricação (Ding; Lv, 2020).

Inspirado pelo recente desenvolvimento do CLT, têm emergido estudos sobre um material híbrido composto por bambu e madeira, denominado *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT). O CLBT é produzido pela colagem sob pressão de camadas de painéis de *glubam*, *bamboo scrimber* ou outros tipos de bambu engenheirado, combinados com elementos de madeira serrada (Xiao; Shan; Li, 2020). O CLBT é destinado principalmente para uso em lajes e painéis de parede em edificações (Xiao; Cai; Dong, 2021). O principal objetivo do desenvolvimento do CLBT é oferecer uma alternativa ao CLT em estruturas reais, assegurando desempenho equivalente, promovendo o uso engenheirado de materiais à base de bambu e reduzindo a demanda por madeira serrada de alta qualidade (Wen; Xiao, 2023).

Sendo um novo material para a construção moderna, o bambu e os PBE's não estão totalmente especificados para utilização estrutural, havendo apenas um número limitado de documentos técnicos disponíveis para testes, diretrizes de referência para projeto, fabricação e construção (Amede *et al.*, 2021; Gatóo *et al.*, 2014).

O bambu tem uma aplicação longa e bem estabelecida como material de construção alternativo e sustentável, embora seu uso como elemento estrutural seja restrito. Isto se deve principalmente à ausência de normas de projeto e códigos de prática suficientes para oferecer uma diretriz completa e detalhada (Amede *et al.*, 2021). Assim, a falta de códigos e normas, aliada ao fato de diferentes países possuírem políticas distintas para novos materiais estruturais, limita o desenvolvimento da utilização dos PBE's e sua expansão no mercado (Liu *et al.*, 2020; Xing *et al.*, 2018).

O processo de fabricação da maioria dos produtos de bambu engenheirado surgiram com base nos métodos e tecnologias utilizados na fabricação de produtos de madeira engenheirada (Liu *et al.*, 2016; Sun; He; Li, 2020). Como a semelhança do material e o uso pretendido do bambu engenheirado estão na mesma área de construção da madeira, normas e especificações para projeto, fabricação e construção de madeira podem ser – e estão sendo atualmente – seguidos com as modificações necessárias (Xiao, 2022). Assim, diversos estudos sobre as propriedades físicas e mecânicas do bambu engenheirado têm sido desenvolvidos com base em normas para madeira e madeira engenheirada (Chen *et al.*, 2020; Li, Haitao *et al.*, 2019; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015; Sinha; Way; Mlasko, 2014; Takeuchi; Estrada; Linero, 2018). Em contrapartida, uma vez que os estudos adotam metodologias diversas, comparar os resultados dos testes representa um desafio, pois o protocolo de teste obedece a critérios diferentes (Amede *et al.*, 2021).

Os PBE's estão sendo pesquisados e desenvolvidos globalmente com diversos métodos e tecnologias de fabricação. A falta de padronização na indústria também cria variabilidade no processo de produção e, portanto, nos próprios materiais (Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). Além disso, devido à falta de normas ou especificações uniformes da indústria para o bambu projetado, as abordagens e os resultados da pesquisa que se concentraram nas propriedades mecânicas não são comparáveis. A falta de conclusões unificadas gera incerteza quanto ao desempenho do bambu engenheirado, dificultando sua aplicação como elemento estrutural (Xiao, 2022).

A importância atual do bambu para as regiões asiáticas e latino-americanas foi evidenciada pela publicação de normas nacionais para regular e orientar os usos estruturais do

bambu na Colômbia, Equador, Peru, China e Índia (Gatão *et al.*, 2014). Recentemente, o Brasil se juntou a esse seleto grupo ao estabelecer dois códigos para construções com colmo de bambu, especificamente sobre o projeto de estruturas e a determinação de propriedades para usos estruturais (Amede *et al.*, 2021). A Etiópia, o Nepal e a Uganda também instituíram normas semelhantes (Kewei *et al.*, 2022).

Contudo, a grande maioria dessas normas e códigos são direcionados para estruturas de bambu roliço, existindo apenas algumas normas referentes a produtos de bambu engenheirado. A ASTM D5456 (ASTM, 2013), por exemplo, foi a primeira norma a reconhecer o bambu folheado laminado como um produto estrutural e fornece orientação sobre padrões de fabricação e métodos de teste (Gatão *et al.*, 2014). Somente em 2022, foi publicada a primeira norma internacional sobre bambu engenheirado para uso estrutural, ISO 23478 (ISO, 2022). Este documento contém um conjunto de métodos para testar as propriedades mecânicas de produtos de bambu laminado e *bamboo scrimber*. No ano seguinte, uma nova norma internacional para bambu engenheirado foi publicada, conhecida como ISO 5257 (ISO, 2023), fornecendo um método de teste alternativo à ISO 23478.

O bambu é um dos materiais de construção mais complexos, pois, além de ser anisotrópico, apresenta propriedades diferentes da raiz ao topo, bem como da camada interna à externa (Liu *et al.*, 2020). Além disso, fatores como a localização geográfica, a idade do colmo e o período de colheita exercem influência sobre as propriedades do bambu (Hidalgo-López, 2003; Silva *et al.*, 2023), refletindo nas propriedades dos produtos engenheirados.

Os métodos de produção comercial global de produtos de bambu engenheirado são diversos, com variação nas espécies de bambu, tipo e tamanho do material natural, resinas e adesivos utilizados e métodos de processamento (Liu *et al.*, 2016; Mahdavi *et al.*, 2011). Os PBE's e as propriedades mecânicas variam dependendo do tipo de produto e dos métodos de fabricação. A variação nos métodos de fabricação resulta em uma variedade de densidades de produto, no entanto, relativamente pouca variação nas propriedades mecânicas é observada (Chen *et al.*, 2014; Ni *et al.*, 2016; Shah; Sharma; Ramage, 2018; Sharma; Van Der Vegte, 2020).

Estudar e definir as propriedades dos materiais é a questão mais básica da engenharia estrutural. A falta de uma caracterização completa das propriedades físicas e mecânicas de tais produtos limita o seu uso na construção e em aplicações estruturais (Correal *et al.*, 2014). Portanto, a caracterização das propriedades é necessária para ganhar confiança no material, desenvolver valores característicos, avaliar o desempenho do material e a viabilidade de seu

uso em aplicações estruturais (Sinha; Way; Mlasko, 2014). Além disso, para serem incluídos nas normas de projeto, são necessários valores característicos baseados em métodos de ensaio experimentais, o que requer testes extensivos (Sharma *et al.*, 2017).

Os modelos constitutivos têm a função de reproduzir, interpretar e prever o comportamento tensão-deformação de um determinado material. O modelo constitutivo é a teoria fundamental para o estudo posterior das propriedades mecânicas (Li *et al.*, 2020). Além disso, desempenham um papel importante na análise e projeto estrutural (Huang *et al.*, 2015). Portanto, compreender bem as relações tensão-deformação e os mecanismos de falha é também fundamental para aplicar o bambu engenheirado como elemento estrutural.

Vários métodos são adotados para determinação das propriedades de materiais. Alguns desses métodos são de natureza experimental, enquanto outros são analíticos. Uma desvantagem da abordagem experimental é que cada vez que a disposição, o tipo de material ou qualquer um dos parâmetros de fabricação mudam, mais testes são necessários para avaliar as propriedades desses produtos. Por outro lado, uma abordagem analítica, uma vez verificada com dados de teste, pode oferecer uma alternativa mais geral e menos dispendiosa.

Além disso, o estudo das propriedades e comportamento do material pode ser realizado por meio de ferramentas computacionais. A simulação numérica tem sido amplamente utilizada (Han *et al.*, 2023; Hong *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2024), pois oferece uma maneira eficiente e precisa de entender o comportamento do bambu engenheirado sem a necessidade de testes experimentais extensivos. Contudo, para prever o comportamento ou características de um material é necessário incorporar as propriedades exigidas do material, bem como definir as condições de contorno necessárias para o mesmo (Kumar; Mishra; Kumar, 2023).

A compreensão científica do bambu engenheirado para aplicações estruturais é significativamente inferior aos materiais de construção convencionais, como madeira, concreto e aço (Liu *et al.*, 2020). Dessa forma, a investigação acadêmica deve ter como objetivo informar o processo, a partir da experimentação e da análise, a partir do qual a indústria e os decisores políticos podem trabalhar no sentido de criar as bases para a padronização (Gatão *et al.*, 2014). Portanto, é necessária uma colaboração abrangente que envolva não apenas o setor privado, mas também pesquisadores, arquitetos, engenheiros, designers, desenvolvedores e formuladores de políticas (Liu *et al.*, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

Há um crescente interesse no uso do bambu na construção, impulsionado pela busca por soluções que reduzam o impacto ambiental e promovam a incorporação de energia proveniente do ambiente construído (Silva *et al.*, 2023). Atualmente, mais de 50 países utilizam o bambu como material de construção. No entanto, o uso do bambu difere de país para país (Liu *et al.*, 2020).

O bambu tem o potencial de se tornar um dos principais fornecedores da indústria de bioprodutos, em paralelo com a silvicultura. Diante desse cenário, surge uma oportunidade real para a utilização de produtos de bambu na construção civil, uma vez que esse recurso biológico oferece benefícios tanto em termos estruturais quanto ambientais (De Araujo *et al.*, 2023).

O bambu é um material rapidamente renovável disponível globalmente e comparável em resistência aos materiais estruturais modernos (Sharma *et al.*, 2014). Em todo o mundo existem exemplos de PBE's em aplicações decorativas e de superfície, no entanto, as aplicações estruturais estão em estágio inicial (Sharma; Van Der Vegte, 2020), como pequenas instalações de transporte ou edificações de um a três andares (Liu *et al.*, 2020). Além disso, os elementos estruturais de bambu engenheirado podem ser projetados e produzidos em formas modulares para diferentes dimensões de edifícios, pontes e outras instalações de engenharia (Xiao, 2022).

A China é atualmente o maior exportador mundial de bambu engenheirado, respondendo por mais da metade do comércio global (INBAR, 2021a). Os PBE'S são fabricados principalmente em regiões onde o bambu é um recurso natural disponível localmente, incluindo América do Sul, África e Sudeste Asiático (Sun; He; Li, 2020).

Com o aumento da pesquisa e desenvolvimento, o bambu engenheirado pode servir como uma alternativa competitiva e sustentável aos materiais estruturais convencionais (Sharma; Van Der Vegte, 2020). O bambu engenheirado possui diversas vantagens sobre outros materiais e oferece não só resistência, mas também valor estético (Sharma *et al.*, 2014). Atualmente, o custo dos produtos de bambu engenheirado não é competitivo em comparação com a madeira engenheirada. Portanto, torna-se fundamental conduzir pesquisas relevantes sobre equipamentos e processos de fabricação, visando impulsionar o aprimoramento e a eficiência na produção (Kewei *et al.*, 2022).

Alguns países, como a China, os EUA e vários países europeus estão interessados em promover o uso estrutural de bambu engenheirado em edifícios. Portanto, o uso estrutural de bambu engenheirado é uma tendência inevitável no futuro (Liu *et al.*, 2020).

No entanto, apesar do interesse crescente nesse setor, ainda há pouco conhecimento sobre as características da indústria global de bambu engenheirado estrutural. A falta de informações detalhadas sobre a produção, distribuição, consumo e tendências de mercado desse material dificulta o desenvolvimento de estratégias eficazes para impulsionar sua adoção em larga escala. Portanto, é fundamental realizar uma pesquisa sistemática para caracterizar a indústria global de bambu engenheirado para construção civil, visando promover o seu desenvolvimento, aprimoramento e adoção em escala mundial, impulsionando assim a construção sustentável e contribuindo para a redução de impactos ambientais.

Dentro da academia, o estudo do bambu engenheirado está crescendo rapidamente e se tornando um campo de pesquisa próprio, com ênfase na caracterização do material, propriedades mecânicas e desempenho estrutural (Dauletбек *et al.*, 2021; Huang; Ji; Yu, 2019; Sharma *et al.*, 2014; Zhang; Wang; Ren, 2014). A indústria está acompanhando esta nova tendência com o desenvolvimento de novos tipos de produtos de bambu para expandir o uso atual de superfícies para estruturas (Gatóo *et al.*, 2014). O bambu engenheirado tem potencial para ser um produto competitivo no mercado. Embora os estudos demonstrem esse potencial em relação ao desempenho estrutural, são necessárias mais pesquisas para caracterizar e padronizar completamente os produtos e desenvolver alternativas viáveis aos produtos de madeira (Sharma *et al.*, 2014).

Atualmente, as estruturas de bambu são normalmente construídas em edifícios de pequenos vãos e de até três pavimentos. Contudo, as excelentes propriedades mecânicas do bambu, como sua alta resistência à tração e compressão, ainda não são totalmente aproveitadas. Nesse cenário, pesquisas sobre materiais inovadores como o *cross-laminated bamboo* (CLB) e o *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT), podem ampliar a variedade de cenários de utilização do bambu em edifícios de grande vão e arranha-céus.

Portanto, a fim de ampliar a gama de aplicações estruturais dos produtos de bambu engenheirado, é necessário compreender o estado da arte do CLB e do CLBT. Com foco principalmente em termos de processo de fabricação, propriedades físicas e mecânicas, modelos constitutivos e casos de aplicação estrutural, a fim de fornecer informações de referência diretas e úteis para pesquisadores estruturais ou projetistas. Estabelecendo assim, um banco de dados sobre as propriedades físicas e mecânicas, uma vez que a falta de dados inibe a ampla utilização e industrialização em larga escala. Os resultados aqui apresentados também podem ser utilizados como base para futuras simulações numéricas e aplicações de métodos de elementos finitos. E assim, possibilitar que mais especialistas conheçam o estado atual da investigação

nesta área, em um esforço para incentivar mais pesquisas e desenvolvimento deste material sustentável.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA OU QUESTÃO DE PESQUISA

Qual é o panorama atual da indústria global de bambu engenheirado estrutural em termos de abrangência geográfica, nível de industrialização, atividades desenvolvidas, tipos de produtos, processos de fabricação, normas e códigos adotados, aplicações, entre outros aspectos relevantes?

Qual o estado da arte do *cross-laminated bamboo* (CLB) em termos de desempenho estrutural, normas adotadas, metodologias experimentais, analíticas e numéricas, métodos de fabricação, aplicações estruturais e potencial para aplicação em edifícios de média e alta altura?

Qual o estado da arte do *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT) em termos de desempenho estrutural, normas adotadas, metodologias experimentais, analíticas e numéricas, métodos de fabricação, aplicações estruturais e potencial para aplicação em edifícios de média e alta altura?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma caracterização da indústria global de produtos de bambu engenheirado estrutural a fim de impulsionar o seu uso em soluções construtivas industrializadas, envolvendo os fatores e características de sua atual situação, manufatura e produtos.

1.3.2 Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa envolvem:

- a) identificar e listar as empresas produtoras ativas dedicadas à manufatura desses produtos;
- b) classificar as empresas identificadas em diferentes perspectivas, referentes aos seus tipos de produto, localização, entre outros aspectos gerais;
- c) identificar e abordar cada produto engenheirado de bambu comercialmente disponível;

- d) identificar a matéria-prima utilizada na fabricação dos produtos engenheirados e demais aspectos da fabricação (espécies de bambu e tipos de adesivos e preservantes);
- e) identificar as aplicações dos produtos engenheirados de bambu (elemento estrutural, tipo de construção) e tendências futuras de aplicação na construção;
- f) identificar se existem certificações para esses produtos e quais são essas certificações;
- g) identificar os processos de fabricação do CLB, as espécies de bambu, os tipos de produtos de bambu engenheirado, adesivos e demais aspectos relacionados à fabricação;
- h) identificar quais as normas utilizadas para a fabricação e caracterização das propriedades do CLB;
- i) elencar as propriedades mecânicas, metodologias experimentais, analíticas e numéricas, modos de falha e os modelos constitutivos que descrevem o comportamento do CLB;
- j) identificar as aplicações do CLB;
- k) identificar os processos de fabricação do CLBT, as espécies de bambu, os tipos de produtos de bambu engenheirado, adesivos e demais aspectos relacionados à fabricação;
- l) identificar quais as normas utilizadas para a fabricação e caracterização das propriedades do CLBT;
- m) elencar as propriedades mecânicas, metodologias experimentais, analíticas e numéricas, modos de falha e os modelos constitutivos que descrevem o comportamento do CLBT;
- n) identificar as aplicações do CLBT.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Esta pesquisa tem como objetivo caracterizar a indústria global de produtos de bambu engenheirado, com foco específico em elementos estruturais para a construção civil. No entanto, é importante ressaltar algumas delimitações que orientaram o escopo e a abrangência deste estudo.

O estudo se concentra em uma análise da indústria de PBE's em âmbito global. Foram considerados diferentes países e regiões que apresentem relevância na produção,

comercialização e uso desses produtos. O principal objetivo é caracterizar os produtos engenheirados de bambu disponíveis no mercado, utilizados especificamente na construção civil. Foram considerados aspectos como suas propriedades físicas, mecânicas, durabilidade, desempenho estrutural, requisitos normativos e técnicas de fabricação. É importante destacar que este estudo não abrangerá aspectos relacionados a outras aplicações do bambu, como mobiliário, revestimentos de piso, parede ou teto, artesanato, papel, energia, entre outros. Além disso, embora seja considerada a perspectiva global, o estudo não pretende abranger todas as regiões e países do mundo, mas sim fornecer uma visão ampla e representativa da indústria de produtos de bambu engenheirado para construção.

Esta pesquisa também se concentrará em realizar uma revisão abrangente do estado atual do *cross-laminated bamboo* (CLB) e do *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT), considerando seu potencial de aplicação estrutural à luz do *cross-laminated timber* (CLT). Foram explorados diversos aspectos, incluindo propriedades físicas e mecânicas, métodos de fabricação, normas e códigos existentes, procedimentos de ensaio para caracterização e avaliação do desempenho estrutural, modelos constitutivos já existentes e as possíveis aplicações desse novo material.

Essas delimitações são fundamentais para direcionar e focar o estudo, garantindo sua viabilidade e a obtenção de resultados significativos no contexto da caracterização da indústria global de produtos engenheirados de bambu.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa é composta por mais 7 capítulos, além deste capítulo introdutório.

No capítulo 2 é apresentada a Fundamentação Teórica com os principais conceitos, teorias e estudos relacionados ao tema da pesquisa mediante uma revisão da literatura aborda os trabalhos relevantes e estabelece a base teórica necessária para embasar o estudo.

No capítulo 3 é apresentado o Método de Pesquisa com os detalhes sobre a abordagem metodológica adotada na pesquisa, a descrição dos métodos de coleta de dados, as técnicas de análise e os procedimentos utilizados.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir da revisão sistemática da literatura, direcionada à indústria de produtos estruturais de bambu engenheirado. Este capítulo inclui uma análise bibliométrica detalhada dos documentos selecionados e uma síntese das informações coletadas, oferecendo uma visão ampla sobre o estágio atual das pesquisas e do desenvolvimento tecnológico nessa área.

No capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões relacionados à caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural, abrangendo aspectos gerais das empresas analisadas, os produtos comercializados e suas respectivas aplicações.

No capítulo 6, são apresentados os resultados da revisão sistemática da literatura sobre CLB, abrangendo a análise bibliométrica dos documentos selecionados e a síntese das informações coletadas.

No capítulo 7, são apresentados os resultados da revisão sistemática da literatura sobre o CLBT. A abordagem inclui a análise bibliométrica dos documentos selecionados e a síntese das informações obtidas, com o intuito de oferecer uma visão ampla sobre o estágio atual da pesquisa e do desenvolvimento na área.

No capítulo 8, são apresentadas as principais conclusões desta pesquisa, estruturadas em três tópicos principais para garantir uma compreensão mais clara: “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura e da Caracterização da Indústria de Bambu Engenheirado Estrutural”, “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura sobre CLB” e “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura sobre CLBT”. Essa organização tem como objetivo assegurar maior clareza e coerência na exposição dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo de Fundamentação Teórica, são apresentados os principais conceitos, características, propriedades do bambu, assim como os aspectos relacionados a sua utilização na construção civil. São abordados aspectos como as propriedades físicas e mecânicas do bambu, os métodos de processamento e fabricação de produtos engenheirados, bem como algumas normas e regulamentações pertinentes a esse setor e aspectos gerais da indústria do bambu. Além disso, são discutidos os aspectos de sustentabilidade associados ao bambu, assim como os métodos de pesquisa adotados para a condução do presente estudo.

Dessa forma, este capítulo de Fundamentação Teórica fornece um embasamento teórico e atualizado sobre o tema, contribuindo para o desenvolvimento de um estudo consistente e direcionado à caracterização da indústria global de produtos engenheirados de bambu, e, conseqüentemente, para o avanço das soluções construtivas industrializadas sustentáveis e inovadoras.

2.1 BAMBU A PLANTA

2.1.1 O bambu

O bambu é uma gramínea monocotiledônea, pertencente às angiospermas e pertence à família *graminae*, subfamília *bambusoideae* (Hidalgo-Lopéz, 2003). Os bambus são atualmente classificados em três tribos, *Arundinarieae*, *Bambuseae* e *Olyreae*. No Brasil, são encontradas representações das tribos *Olyreae* e *Bambuseae*. A tribo *Arundinarieae* abrange os bambus lenhosos temperados. Enquanto a *Bambuseae* engloba os bambus lenhosos tropicais e, a *Olyreae*, os bambus herbáceos (Greco *et al.*, 2022). Os bambus herbáceos são valorizados como plantas ornamentais devido ao seu porte menor, enquanto os bambus lenhosos se assemelham morfológicamente a árvores, apresentando raízes, colmos, galhos e folhas, e alcançando alturas notáveis (De Araujo *et al.*, 2023).

O bambu pode se diferenciar em mais de 1600 espécies de bambus herbáceos e lenhosos (Vorontsova *et al.*, 2016), e mais de 75 gêneros, que se distribuem naturalmente dos trópicos às regiões temperadas, mas com maior ocorrência nas zonas quentes e com chuvas abundantes das regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul (Marçal, 2018).

Conforme relatório da Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) (FAO, 2020), aproximadamente 35 milhões de hectares de florestas em todo o mundo são cobertos por

bambu. Mais de 60% dessas áreas estão concentradas no Brasil, Índia e China, embora o bambu seja abundante em outros continentes, como África, América Latina e Ásia.

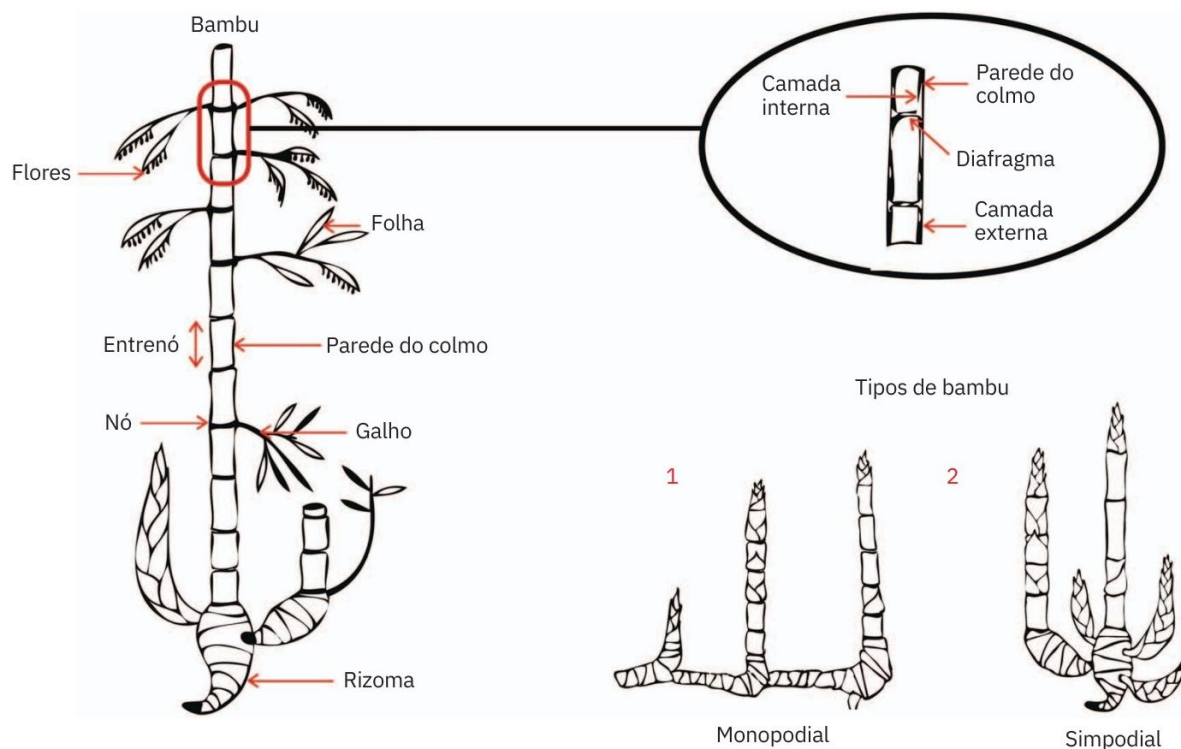
A distribuição natural dos bambus abrange todos os continentes, exceto a Europa. A maior proporção de espécies, representando 67%, é encontrada na Ásia e Oceania, seguida pelas Américas com 30%, e a África com apenas 3% das espécies de bambu (Hidalgo-López, 2003).

2.1.2 Anatomia do bambu

O bambu pode ser dividido em raiz, caule, folhas e inflorescências. O caule pode ser dividido em rizoma, que é a porção subterrânea, e pode apresentar dois padrões de crescimento: paquimorfo, caracterizado pelo crescimento simpodial, ou leptomorfo, caracterizado pelo crescimento monopodial. Há também rizomas que exibem ambos os padrões de ramificação, sendo chamados de anfipodiais (Liese, 1998).

No caso do bambu simpodial, os colmos se desenvolvem em proximidade uns dos outros, formando uma densa touceira. Já o bambu monopodial, aparenta ser composto por colmos individuais, embora cada colmo seja parte de um extenso sistema radicular no qual brotos individuais crescem (Sharma *et al.*, 2014), como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Partes do bambu



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

O colmo, parte aérea do bambu, é caracterizado por sua oca estrutura. Composto por uma sequência de entrenós, o colmo apresenta um ou mais nós onde as folhas e os ramos se originam. O diâmetro do colmo segue uma tendência decrescente, sendo maior na base e diminuindo à medida que se eleva em altura, ou seja, o bambu não apresenta crescimento radial, o colmo já surge com seu diâmetro máximo na base (Liese, 1998).

Os colmos exibem uma ampla variação de diâmetro, que pode variar de alguns milímetros a dezenas de centímetros, podendo ser cilíndricos ou ligeiramente achatados. O comprimento relativo dos entrenós e a morfologia da região nodal também são variáveis (Filgueiras; Viana, 2017). A anatomia do colmo de bambu apresenta a maioria das células alinhadas longitudinalmente, seguindo o eixo de crescimento, enquanto as interconexões transversais são encontradas apenas nos nós. Essa região nodal é denominada diafragma (Liese, 1998).

O tecido do colmo de bambu é composto por três principais componentes: células de parênquima (50%), feixes vasculares (10%) e feixes de fibras (40%) (Liese; Thang, 2015). Cada um desempenha uma função específica: o tecido parenquimatoso envolve as fibras e os vasos, sendo mais denso na parede interna e responsável pelo armazenamento de nutrientes e água. Os feixes vasculares atuam como tecidos condutores, enquanto as fibras conferem resistência mecânica ao colmo, protegendo os feixes vasculares e concentrando-se mais na parte externa e superior (Hidalgo-López, 2003).

Os principais constituintes do tecido do colmo são celulose, hemiceluloses e lignina; os constituintes menores consistem em vários polissacarídeos solúveis, proteínas, resinas, taninos, ceras e uma pequena quantidade de cinzas (Liese; Thang, 2015). A celulose e a hemicelulose desempenham uma função estrutural, enquanto a lignina atua como um aglutinante nas conexões celulares que conferem a estrutura (Benavides, 2012).

O bambu é um material compósito, constituído por fibras de celulose longas e alinhadas imersas em uma matriz de lignina. A distribuição das fibras ao longo da espessura da parede do colmo varia. Em função dessas características, o bambu é classificado como um material com classificação funcional (Ghavami, 2020).

2.1.3 Desenvolvimento do bambu

O bambu é uma planta de crescimento acelerado, podendo atingir sua altura máxima de até 40 metros ou mais em espécies gigantes em um período relativamente curto, variando de 3 a 6 meses (Hidalgo-López, 2013). Após esse período inicial de rápido crescimento, o colmo

do bambu passa por um processo de consolidação dos tecidos, caracterizado pelo espessamento celular secundário. Durante esse processo, ocorre a deposição de lignina, uma substância que confere rigidez e resistência estrutural, nas camadas adicionais da parede celular, pelo fenômeno conhecido como lignificação ou polilamelação. A lignificação das células de fibra presente no colmo do bambu tem como consequência o aumento da densidade do material, contribuindo para sua durabilidade e estabilidade. A planta atinge a maturidade em 3 a 5 anos e o que se segue é um processo natural de decomposição (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

O crescimento do bambu é especialmente otimizado em climas quentes temperados e tropicais, podendo atingir até 0,08 m por dia nessas condições. Apesar disso, o bambu demonstra capacidade de cultivo em ambientes desfavoráveis, incluindo regiões de clima desértico ou montanhoso (Medeiros *et al.*, 2013).

O bambu apresenta diferentes usos ao longo de seu ciclo de crescimento. Os brotos, com 30 dias de idade, são utilizados como alimento. Entre os 6 e 12 meses, são ideais para a confecção de cestas e outros produtos tecidos. Aos 2 anos, os colmos podem ser divididos em tiras ou transformados em esteiras. A partir dos 3 anos até os 6, algumas espécies podem ser empregadas na construção (Benavides, 2012).

Em relação às propriedades físicas e mecânicas, é observado que o bambu atinge sua resistência máxima após cerca de três anos de crescimento. Devido à sua estrutura tubular de fibras longitudinais e baixa densidade, o bambu possui características notáveis, como leveza, flexibilidade e alta resistência, especialmente em situações de tração (Noia, 2012).

Alguns bambus são conhecidos como bambu gigante devido ao seu tamanho e altura. Entre essas variedades estão o bambu Mossô e o bambu Guadua. Amplamente distribuída no leste da Ásia, o bambu Mossô, cujo nome científico é *Phyllostachys edulis*, é uma espécie nativa da China. Trata-se de um bambu arbóreo perenifólio, caracterizado por seu crescimento uniaxial. O Mossô apresenta colmos de grande porte, podendo atingir mais de 20 metros de altura e um diâmetro de até 20 centímetros (Xiao, 2022).

Cerca de 5% das espécies de bambus lenhosos pertencem ao gênero *Guadua*, destacando-se na América devido ao seu grande porte e a possibilidade de usá-los na construção e por seu potencial industrial (Hidalgo-López, 2003), podendo alcançar alturas em torno de 30 metros, enquanto seu diâmetro pode atingir cerca de 15 centímetros (Filgueiras; Viana, 2017).

2.2 O BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 Os usos do bambu

Ao longo de milênios, o bambu tem sido empregado como um material de construção de longa data, presente desde tempos ancestrais (Hong *et al.*, 2020). Os colmos de bambu têm sido utilizados para a construção de todos os tipos de estruturas e componentes estruturais, tais como casas, treliças de telhado, revestimento de paredes, colunas, andaimes, pisos, tetos, paredes, janelas, portas, cercas, vigas e terças (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017; Liese; Welling; Tang, 2017). Algumas das espécies utilizadas na construção se encontram especificadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Espécies comuns de bambu para construção e sua distribuição geográfica

Ásia-Pacífico	<i>Bambusa balcooa</i> , <i>Bambusa bambos</i> , <i>Bambusa nutans</i> , <i>Bambusa pallida</i> , <i>Bambusa pervariabilis</i> , <i>Bambusa polymorpha</i> , <i>Bambusa tulda</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Bambusa blumeana</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Dendrocalamus giganteus</i> , <i>Dendrocalamus hamiltonii</i> , <i>Dendrocalamus strictus</i> , <i>Melocanna baccifera</i> , <i>Gigantochloa apus</i> , <i>Gigantochloa atrovioleacea</i> , <i>Gigantochloa atter</i> , <i>Gigantochloa macrostachya</i> , <i>Phyllostachys edulis</i>
América	<i>Guadua angustifolia</i> , <i>Guadua aculeata</i> , <i>Guadua amplexifolia</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Phyllostachys aurea</i> , <i>Otatea acuminata</i> , <i>Bambusa oldhamii</i> , <i>Bambusa vulgaris</i>
África	<i>Oldeania alpina</i> , <i>Oxytenanthera abyssinica</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Dendrocalamus giganteus</i>

Fonte: Kewei *et al.* (2022).

O *Guadua Angustifolia*, uma espécie endêmica da América do Sul, destaca-se dentro do gênero *Guadua*. Sua importância na economia de países como Colômbia e Equador é notável, devido aos diversos usos que oferece, com destaque para a construção. Essa espécie apresenta propriedades mecânicas superiores e uma notável durabilidade de seus colmos (Benevides, 2012).

Já o bambu monopodial *Phyllostachys pubescens* (Mossô), endêmico da Ásia, é mais adequado para acabamentos suaves em pisos de madeira, móveis e fins decorativos (Zea Escamilla *et al.*, 2019). A construção de colmo completo de bambu não é amplamente difundida globalmente, sendo predominantemente utilizada em práticas tradicionais de construção de bambu encontradas em regiões da Ásia, América Latina e África Oriental (Sharma *et al.*, 2017). Algumas propriedades mecânicas de determinadas espécies de bambu estão listadas na Tabela 1.

Existem diferentes classificações para os usos do bambu, levando em consideração o grau de transformação da matéria-prima e o processo de fabricação. O bambu não processado

é comumente utilizado em aplicações de baixo valor e curto prazo, como abrigos temporários, andaimes, artesanato e alimentos. O bambu moderadamente processado é preservado e seco para ser utilizado na construção tradicional em países onde as práticas construtivas com bambu são regulamentadas (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de algumas espécies de bambu

Espécies de bambu	R _{CS} (MPa)	R _T (MPa)	E _T (MPa)	R _C (MPa)	E _C (MPa)	R _F (MPa)	E _F (MPa)	RF
<i>Dendrocalamus asper</i>	9.20	226.20		45.77		152.70	13627.50	
<i>Gigantochloa scortechinii</i>	7.09	160.94	11210.50	49.40	2781.20	131.70	14199.10	1
<i>Gigantochloa levis</i>	8.31	159.14	3976.00	64.27		128.70		
<i>Phyllostachys edulis</i>	19.10	163.20		53.10		37.60	14800.00	2
<i>Guadua angustifolia</i>	6.71	107.32		44.02		69.16		3

Legenda: RF – Referências, R_{CS} – Resistência ao cisalhamento, R_T – Resistência à tração, E_T – Módulo de elasticidade de tração, R_C – Resistência à compressão, E_C – Módulo de elasticidade de compressão, R_F – Resistência à flexão, E_F – Módulo de elasticidade de flexão, 1 – Bahrin (2023), 2 – Shan *et al.* (2023a), 3 – Padilla *et al.* (2024).

Fonte: Autora (2024).

A durabilidade dos materiais naturais na construção civil é uma preocupação central. No caso do bambu, sua vida útil sem tratamento e em contato com o solo varia de um a três anos, de quatro a cinco anos em condições protegidas e mais de 15 anos em condições favoráveis (Silva *et al.*, 2023).

Para aumentar a durabilidade, produtos químicos como boro, bórax e ácido bórico são utilizados como preservativos em projetos de construção em larga escala (Silva *et al.*, 2023). O tratamento químico do bambu tem mostrado efetividade, garantindo uma durabilidade de até 40 anos (Yadav; Mathur, 2021).

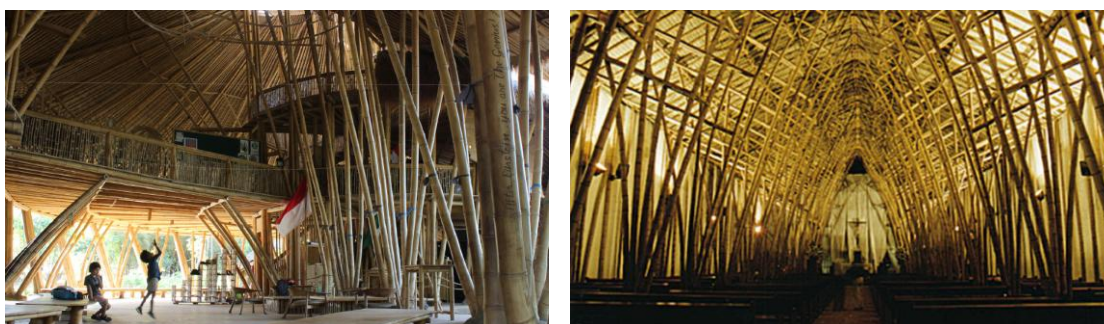
Normalmente, os tratamentos podem ser conduzidos por técnicas como imersão em tanque aberto, método modificado de Boucherie e tratamento sob pressão para proteção contra ataque biológico. No caso da imersão em tanque aberto, o colmo do bambu é submerso em uma solução conservante à base de água por vários dias, permitindo uma penetração gradual no material (Correal, 2020).

Segundo Xiao (2022), as aplicações estruturais do bambu podem ser classificadas nas seguintes categorias: construção de colmo de bambu roliço; bambu como reforço em combinação com outros materiais, como concreto e argila; e compostos de bambu engenheirado. O autor frisa que qualquer estrutura de bambu projetada e construída com base em conceitos modernos de engenharia, processos e metodologias deve ser considerada como tal. No entanto, o autor adota a nomenclatura acima para enfatizar o processo aprimorado de engenharia em produtos de bambu engenheirado.

Os colmos de bambu apresentam diversas características positivas, incluindo a eficiência no aproveitamento da matéria-prima em estruturas tubulares, sua extrema flexibilidade combinada com alta resistência, a capacidade de permeabilidade axial para uma eficiente impregnação de conservantes e a baixa permeabilidade radial na camada protetora (Liese; Welling; Tang, 2015).

No entanto, o uso crescente de bambu no projeto e engenharia de estruturas convencionais é limitado devido a alguns fatores. Um desses fatores é a variação natural da geometria e das propriedades do próprio material, entre espécies e dentro de uma espécie, e dentro de um único colmo. Além disso, a forma redonda ou elíptica dificulta a realização de juntas e conexões (Wang; Xiao; Li, 2017). Para superar essas limitações, o desenvolvimento de produtos de bambu engenheirado é cada vez mais explorado para fins de construção (Sharma *et al.*, 2017). Exemplos de aplicações construtivas são mostrados na Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 – a) Escola em Bali, Indonésia; b) Catedral temporária em Pereira, Colômbia



(a)

(b)

Fonte: a) INBAR, (2021b); b) Liese, Welling e Tang (2017).

Figura 5 – a) Estrutura de bambu engenheirado na Exposição Internacional de Horticultura de Pequim de 2019; b) Edifício de bambu engenheirado de três pavimentos em Nanjing, China



(a)

(b)

Fonte: a) Hong *et al.* (2020); b) Liu *et al.* (2020).

No passado, o bambu era amplamente utilizado na construção devido à sua resistência relativamente alta e notável flexibilidade. Nos dias atuais, além disso, a textura natural e as características ambientais de baixo carbono são atrativos a utilização do bambu como material de construção (Hong *et al.*, 2020). Com o progresso da economia global, avanços científicos e tecnológicos, e a implementação de políticas nacionais, as estruturas de bambu têm o potencial de coexistir de forma sustentável com o ambiente ao longo de seu ciclo de vida, representando uma direção promissora para o desenvolvimento futuro (Amede *et al.*, 2021; Kewei *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2020).

2.3 POLÍTICAS DE INCENTIVO AO BAMBU NO BRASIL

A Lei nº 12.484, de 8 de setembro de 2011, institui a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB), com o objetivo de promover o desenvolvimento da cultura do bambu no Brasil por meio de ações governamentais e empreendimentos privados. Os incentivos previstos destinam-se ao manejo sustentável das formações nativas e ao cultivo de bambu para a produção de colmos, extração de brotos, obtenção de serviços ambientais e valorização desse recurso como instrumento de desenvolvimento socioeconômico regional.

As diretrizes da PNMCB incluem a valorização do bambu como produto agro-silvo-cultural, o desenvolvimento tecnológico de seu manejo e cultivo, e a criação de polos de beneficiamento, especialmente em regiões com maior ocorrência natural do vegetal e em áreas de produção agrícola familiar. Os instrumentos da política abrangem crédito rural com condições favorecidas, assistência técnica durante o ciclo produtivo e certificação de origem e qualidade dos produtos destinados à comercialização.

A implementação da PNMCB compete aos órgãos competentes, que devem incentivar a pesquisa, orientar o cultivo para produção e extração de brotos, apoiar a agricultura familiar, estabelecer parcerias com entidades públicas e privadas, estimular o comércio interno e externo de bambu e seus derivados, e promover o intercâmbio com instituições nacionais e internacionais.

2.4 BAMBU ENGENHEIRADO

2.4.1 Aspectos gerais

Por meio de um intenso processamento, é possível projetar o bambu para se transformar em produtos com propriedades mecânicas, físicas e estéticas aprimoradas e/ou padronizadas (Sharma *et al.*, 2014). Essa transformação dos colmos naturalmente variáveis do bambu em produtos engenheirados com formas retangulares e propriedades previsíveis facilita seu uso na construção (Sharma *et al.*, 2015). No entanto, os produtos de bambu engenheirado, em geral, ainda são escassos devido ao rigoroso processo de produção necessário (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

Ao projetar produtos de bambu, uma das principais vantagens é a possibilidade de criar seções padronizadas para membros e conexões, reduzindo assim a variabilidade presente em cada membro individual (Sharma *et al.*, 2017). Durante a fabricação, alguns defeitos como nós, são removidos ou distribuídos aleatoriamente, proporcionando vantagens como maior estabilidade dimensional, propriedades mecânicas mais homogêneas e melhor durabilidade (Sun; He; Li, 2020). Exemplos de um lote de colmos de bambu de diferentes tamanhos é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Colmos de bambu de diferentes dimensões



(a)

(b)

Fonte: a) Xiao (2022); b) Zhaohua e Wei (2018).

Embora o bambu, em sua forma natural, seja um material leve e apresente resistência comparável ao aço em tração e ao concreto em compressão, sua aceitação é limitada devido à variação na seção transversal e nas propriedades mecânicas (Sharma *et al.*, 2014). Portanto, ao utilizar produtos de bambu engenheirado, é possível superar essas limitações e obter maior uniformidade e previsibilidade em relação às características estruturais do material (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013).

A espécie mais utilizada na fabricação de bambu engenheirado é o *Phyllosmchys pubescens*, conhecido como bambu mossô (Zea Escamilla *et al.*, 2019), e a segunda é o *Guadua angustifolia Kunth*, que cresce principalmente em alguns países da América Central e do Sul (Chen *et al.*, 2020).

A fabricação dos produtos de bambu engenheirado é baseada nos métodos e tecnologias utilizados na produção de madeira engenheirada (Liu *et al.*, 2016). Embora o processo de fabricação possa variar de acordo com o tipo específico de bambu engenheirado, as etapas comuns para a maioria desses produtos incluem divisão, colagem e prensagem, e pós-processamento (Sun; He; Li, 2020).

Na etapa de divisão, os colmos de bambu são partidos em meio colmo, fios ou tiras (Sun; He; Li, 2020). Utilizando métodos de tratamento químico ou térmico, os materiais são tratados para obter uma preferência de cor, bem como para aumentar a durabilidade. Dentre os tratamentos utilizados para o tratamento das tiras de bambu, destacam-se o branqueamento e a caramelização (Sharma; Van Der Vegte, 2020). Em seguida, na etapa de colagem e prensagem, esses fios ou tiras de bambu são colados com uma resina adesiva e prensados a frio ou a quente para formar folhas de bambu, madeira de bambu e outros materiais de bambu engenheirado. Por fim, na etapa de pós-processamento, como aquecimento ou corte, o produto de bambu engenheirado adquire uma forma regular e propriedades mais estáveis (Sun; He; Li, 2020).

Liu *et al.* (2016) classificam os PBE's em três categorias: bambu laminado, bambu densificado, ou reconstituído, e painéis de bambu. Contudo, dentro dessas três categorias há uma imensa gama de produtos de bambu engenheirado, com processos de fabricação e propriedades distintas. Por outro lado, Xiao (2022) classifica os produtos de bambu conforme dois tipos de formação pressurizada: bambu laminado e o bambu reconstituído.

O bambu laminado compreende produtos tais quais: *laminated bamboo sheets* (Liu *et al.*, 2016), *laminated bamboo lumber* (LBL) (Mahdavi *et al.*, 2011), *glued laminated bamboo* (*glubam*) (Xiao; Yang; Shan, 2013) e *plybamboo* (Xiao; Shan; Li, 2020). Novas tecnologias estão emergindo ou revitalizando tecnologias existentes para a produção de novos produtos como o *flattened bamboo* (Luan *et al.*, 2022; Xiao, 2022), o *bamboo-bundle laminated veneer lumber* (BLVL) (Zhang; Wang; Ren, 2014) e o *cross-laminated bamboo* (CLB) (Wu, Yao *et al.*, 2023).

O bambu densificado, ou reconstituído, inclui o *bamboo scrimber* (BSC) (Huang; Ji; Yu, 2019), também conhecido como *parallel strand bamboo* (PSB) (Dongsheng; Aiping;

Yuling, 2013), *strand woven bamboo* (SWB) (Zea Escamilla *et al.*, 2019), *bamboo restructured lumber*, *parallel strand woven bamboo* e *laminated bamboo bundle lumber* (Liu *et al.*, 2016).

Segundo Liu *et al.* (2016), os painéis de bambu englobam *bamboo fiberboard*, *bamboo mat board* e *bamboo oriented strand board* (bambu OSB). É relevante comentar que, segundo os autores, o produto definido como *bamboo mat board* é erroneamente denominado na indústria como *plybamboo* (bambu compensado). Embora a terminologia “*plybamboo*” seja inspirada no produto de madeira conhecido como “*plywood*”, é importante ressaltar que o produto “*plybamboo*” possui uma composição e processos de fabricação distintos. Os autores alertam sobre a adoção de terminologias que não correspondem precisamente ao processo produtivo e à composição do material, o que pode resultar em equívocos em pesquisas e aplicações práticas.

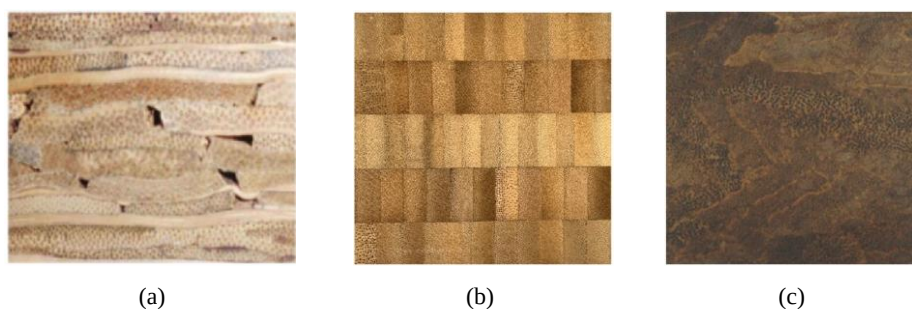
Os produtos de bambu projetados são usados em diversas aplicações, incluindo artesanato, móveis, design de interiores, pisos e aplicações estruturais e automotivas (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017). Alguns dos produtos de bambu projetados mais populares usados na construção são: pisos, superfícies arquitetônicas e decks externos (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

O *plybamboo* é aplicado principalmente como cofragens de concreto ou placas de piso para ônibus e caminhões e contêineres na China (Xiao; Shan; Li, 2020). Esse produto também apresenta uso promissor como revestimento de estruturas leves de aço, madeira e bambu (Xiao, 2022). Produtos de bambu OSB têm sido utilizados em aplicações de painéis e revestimentos. O *bamboo particleboard* é normalmente utilizado para a fabricação de móveis (Habibi; Obonyo; Memari, 2023). Sua aplicação de construção mais relevante é como base de pisos. Enquanto o *bamboo fiberboard* é usualmente empregado em revestimento interno ou armários laminados de papel melamínico (Liu *et al.*, 2016).

O bambu laminado e o *bamboo scrimber* são normalmente transformados em placas para pisos e aplicações de superfície (Sharma *et al.*, 2014). Os produtos de *bamboo scrimber* são usados principalmente como decoração externa para painéis de parede e pisos de decks (Xiao; Shan; Li, 2020). Embora também seja empregado na construção de materiais estruturais, piso de plataforma e materiais de alta qualidade, como pás de turbinas eólicas (Huang; Ji; Yu, 2019). O LBL pode ser utilizado na produção de esquadrias e elementos de marcenaria, assim como, na fabricação de elementos estruturais (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017). Além do LBL, o *glulam* também é utilizado diretamente como componente estrutural, como em treliças espaciais (Wu; Xiao, 2018), e paredes de cisalhamento (Wang; Xiao; Li, 2017).

Diversos estudos têm demonstrado o potencial de utilizar produtos de bambu engenheirado como elemento estrutural (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013; Li, Haitao *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2015; Wang; Xiao; Li, 2017). Entre os PBE's, o LBL, o *glubam* e o *bamboo scrimber*, ilustrados na Figura 7, são atualmente os três produtos comumente empregados em aplicações estruturais (Chen *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2020). Esses produtos de bambu engenheirado são fabricados principalmente na China e são usados para a construção de edifícios ou pontes (Sun; He; Li, 2020).

Figura 7 – a) *Glubam*, b) LBL e c) BSC



Fonte: Hong *et al.* (2020).

O centro de serviços turísticos Tangshan Mine Camp Visitor Centre (Figura 8) destaca a utilização de bambu *glubam*. Neste projeto, a cobertura do edifício é sustentada por sete estruturas em forma de guarda-chuva de tamanhos variados. A maior dessas estruturas possui um diâmetro de 19 metros, desempenhando um papel crucial na composição geral do projeto (INBAR, 2021b).

Figura 8 – “Tangshan Mine Camp Visitor Centre”, China



Fonte: INBAR (2021b).

Na Figura 9, são apresentados os detalhes de uma edificação de dois pavimentos construída com *bamboo scrimber* na China.

Figura 9 – Edifício com estrutura de BSC, China



Fonte: Hong *et al.* (2020).

Na Figura 10, é apresentado um edifício comercial com sistema estrutural viga-coluna de LBL. Placas e parafusos de aço foram escolhidos para as ligações estruturais. Este caso exemplifica uma aplicação interessante para edifícios de LBL e tem despertado o interesse de muitos engenheiros no campo industrial (Su *et al.*, 2021).

Figura 10 - Construção de um edifício de dois andares com LBL na China



Fonte: Su *et al.* (2021).

Na Figura 11, são apresentados os detalhes de conexões de uma edificação de dois pavimentos resistente a terremotos na Universidade Florestal de Nanjing.

Figura 11 - Edifício de bambu resistente a terremotos na Universidade Florestal de Nanjing

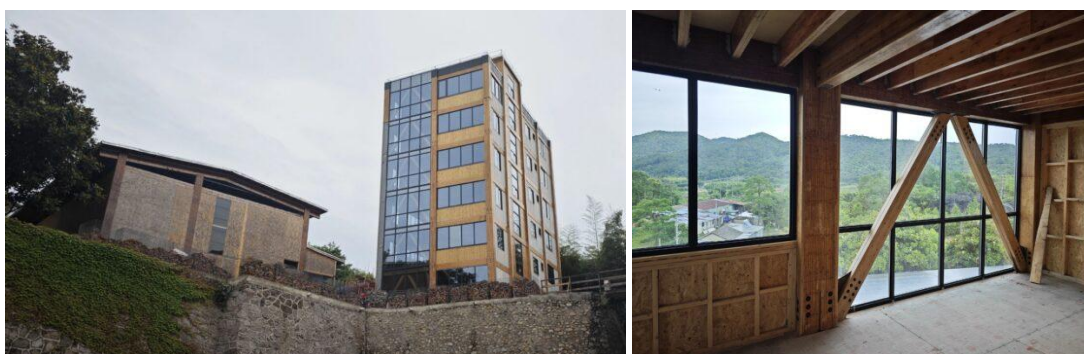


Fonte: Hong *et al.* (2020).

Em 2024, na Universidade de Zhejiang, na China, foi concluída a construção de um edifício de 6 andares composto predominantemente por bambu engenheirado (Figura 12), sendo o primeiro edifício de múltiplos pavimentos a utilizar esse material. Com uma altura total de 20.3 metros e uma área de piso de 720 metros quadrados, o edifício apresenta os dois primeiros andares em concreto, enquanto os pavimentos superiores são formados principalmente por bambu engenheirado, incluindo o *glubam* (MaterialDistrict, 2024).

A espécie de bambu utilizada na construção é o bambu mossô. Para a estrutura, foram empregadas vigas laminadas e materiais em chapas, aplicados em pilares, vigas, pisos, paredes e vigas de suporte para os pisos e o telhado. Os elementos de parede foram reforçados com aço, e outros materiais de bambu engenheirado, assim como madeira, também foram incorporados na construção (MaterialDistrict, 2024).

Figura 12 - Edifício de bambu engenheirado de vários andares, Ninghai, China



Fonte: MaterialDistrict (2024).

2.4.2 Durabilidade e tratamentos

A durabilidade é uma das principais preocupações ao utilizar materiais naturais no setor da construção. No caso do bambu, a vida útil do material não tratado e em contato com o solo varia de um a três anos, de quatro a cinco anos quando os materiais não estão expostos às intempéries, e mais de 15 anos em condições favoráveis (Silva *et al.*, 2023). As estruturas

tratadas com produtos químicos ou conservantes têm vida útil de 40 anos e se mostraram robustas o suficiente para resistir a terremotos (Yadav; Mathur, 2021).

A caramelização e o branqueamento são dois procedimentos de tratamento habitualmente utilizados na indústria de bambu engenheirado (Shah; Sharma; Ramage, 2018). A caramelização, também conhecida como vaporização, é um tratamento térmico a vapor (Sharma; Van Der Vegte, 2020). A caramelização é um processo higrótérmico que utiliza vapor úmido pressurizado, aplicado sob pressões de 0.20 a 0.25 MPa e temperaturas de 120 a 130 °C, por um período de 5 a 6 horas, resultando em uma coloração marrom-escura. Após essa etapa, o material passa por uma secagem assistida por vapor a 50–60 °C, com duração total de 240 horas (Shah; Sharma; Ramage, 2018). Esse tratamento é comumente empregado para preservar o material, degradando as hemiceluloses e amidos do tecido, além de escurecer o tecido para fins estéticos (Liu *et al.*, 2016).

O branqueamento, por sua vez, é um tratamento químico realizado por meio da imersão em um banho de peróxido de hidrogênio a temperaturas de 70–80 °C, com duração de 4 horas, resultando em uma coloração amarelo-clara. Após o tratamento, o material passa por uma secagem assistida por vapor a 50–60 °C, com duração total de 72 horas (Shah; Sharma; Ramage, 2018). Nesse processo, o peróxido de hidrogênio reduz principalmente a quantidade de compostos fenólicos e, adicionalmente, o teor de açúcar do colmo, tornando-o menos suscetível à deterioração (Liu *et al.*, 2016).

Alguns estudos têm avaliado a influência dos processos de tratamento nas propriedades de produtos de bambu engenheirado. Segundo Sharma, Gatoó e Ramage (2015), o método de processamento térmico tem efeito na resistência mecânica dos materiais, em particular o tratamento afeta o comportamento e as propriedades na flexão do bambu laminado. Shangguan *et al.* (2016) descobriram que 170 °C foi um ponto de viragem para as propriedades físicas, mecânicas e químicas do *bamboo scrimber* sob condição de tratamento térmico (Huang; Ji; Yu, 2019). Além disso, os tratamentos tendem a ter efeitos significativos na molhabilidade e no desempenho da ligação adesiva do material laminado de bambu. Para que os PBE's sejam seriamente considerados para aplicações externas na construção, é necessário realizar uma inspeção mais detalhada dos efeitos do processamento e das condições durante a vida útil nas propriedades da interface (Shah; Sharma; Ramage, 2018).

2.4.3 Adesivos

Os adesivos desempenham uma função crucial nos compósitos, sendo fundamental garantir uma penetração adequada e uma ligação eficaz entre as fibras e as lâminas (Sharma *et al.*, 2015). As variações naturais na permeabilidade, densidade e composição química do bambu apresentam desafios distintos na sua colagem com adesivos, os quais são geralmente formulados para produtos de madeira (Nkeuwa *et al.*, 2022). Se a resistência de ligação interna de qualquer produto estrutural laminado não for suficientemente forte para garantir a falha do substrato, poderá ocorrer delaminação e a capacidade estrutural global será imprevisível (Correal; Ramirez, 2010).

Diversos adesivos tem sido utilizados na fabricação de PBE's tais quais: fenol-formaldeído (PF), diisocianato de difenilmetano polimérico (pMDI), poliuretanos (PUR) e acetatos de polivinila reticulados (PVAc) (Nkeuwa *et al.*, 2022), bem como, isocianato de polímero de emulsão (EPI), melamina-uréia-formaldeído (MUF), adesivo de polímero híbrido (HPA) (Xing; Hao; Sikora, 2019), ureia-formaldeído (UF) e melamina-formaldeído (MF) (Correal; Ramirez, 2010). A grande maioria dos compósitos de bambu engenheirado ainda são feitos de resinas PF, pois são relativamente baratas, duráveis e disponíveis comercialmente (Nkeuwa *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2015). A Tabela 2 lista os tipos e taxas de espalhamento de adesivos utilizados em diferentes estudos.

A qualidade de ligação da linha de cola interlaminar do LBL foi pobre em comparação com o Fenol-resorcinol formaldeído (PRF) e o isocianato. A resistência ao cisalhamento da ligação utilizando o isocianato de polímero de emulsão foi 60% daquela do PRF. Aproximadamente metade dessas amostras falhou na linha de cola. Como resultado, este tipo de cola pode não ser adequado para laminar ripas de bambu para fazer LBL para uso estrutural (Sinha; Way; Mlasko, 2014).

A permeabilidade do bambu, as características da superfície induzidas pelo processo, propriedades adesivas e parâmetros de prensagem afetam a penetração adesiva (Nkeuwa *et al.*, 2022). Correal e Ramírez (2010) observaram que a taxa de espalhamento da cola impacta nas propriedades mecânicas e físicas do bambu laminado. Os autores estabeleceram que a taxa de espalhamento de adesivo ótima é de cerca de 150 g/m² para as faces estreitas e 300 g/m² para as faces largas. Nugroho e Ando (2001) também obtiveram a quantidade ideal de aplicação de cola para adesivos à base de resorcinol como sendo de 300 g/m².

Tabela 2 – Tipos de adesivos e taxa de espalhamento utilizada em PBE's

Estudos	PBE	Adesivo	Taxa de aplicação (g/m ²)
Nugroho e Ando (2001)	LBL	Resorcinol	300
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	Resina à base de soja; PMDI; PUR	180
Shangguan <i>et al.</i> (2016)	Scrimber	PF	15% do peso seco do <i>bamboo scrimber</i>
Sharma <i>et al.</i> (2015)	Scrimber	PF	
	LBL	Resina à base de soja; PUR	180
Zhou <i>et al.</i> (2019)	Scrimber	PF solúvel em água	
Correal <i>et al.</i> (2014)	LBL	50% UF e 50% MF	150 nas faces estreitas e 300 nas faces largas
Takeuchi <i>et al.</i> (2018)	LBL	MUF	
Chen <i>et al.</i> (2016)	BLVL	PF solúvel em água; PVA	
Sulastiningsih e Nuwarti (2009)	LBL	TRF	170
Sinha, Way e Mlasko (2014)	LBL	EPI; PRF; ISO	
Rao <i>et al.</i> (2022)	Scrimber	PF	
Zhang <i>et al.</i> (2014)	BLVL	PF	
Xing, Hao e Sikora (2019)	CLB	EPI; PVA; HPA; PUR; MUF	

Legenda: PMDI – Diisocianato de metileno polimérico; TRF – Tanino resorcinol formaldeído; PF – Fenol formaldeído; PRF – Fenol-resorcinol formaldeído; PUR – Poliuretano; ISO – Isocianato; EPI – Emulsão de isocianato de polímero; PVA – Acetato de polivinila; HPA – Adesivo de polímero híbrido; UF – Ureia-formaldeído; MF – Melamina-formaldeído; MUF – Melamina-ureia-formaldeído.

Fonte: Autora (2024).

2.4.4 Conexões

A confiabilidade das conexões é fundamental para estruturas estáveis (Dauletбек; Li; Lorenzo, 2023). Os estudos sobre o bambu engenheirado como material estrutural estão nos estágios iniciais, com uma compreensão limitada sobre o desempenho de suas conexões (Xiao, 2022). A pesquisa na área de conexões de bambu engenheirado pode ser dividida em juntas aparafusadas, juntas de encaixe, juntas de prego/parafuso e juntas de placa de treliça (Hong *et al.*, 2020).

Semelhante às ligações de madeira, a resistência de suporte das ligações do bambu laminado apresenta forte correlação com as propriedades do material, geometria dos fixadores, distâncias das extremidades e arestas, espaçamento e número de fixadores e configuração de carregamento. No entanto, as juntas do bambu laminado revelaram-se rígidas e quebradiças em comparação com as ligações de madeira (Dauletбек; Li; Lorenzo, 2023).

Componentes estruturais de *glubam*, como vigas e colunas, podem ser conectados usando detalhes de conexão semelhantes aos usados para estruturas de madeira laminada colada, normalmente, envolvendo o uso de placas e parafusos de conexão de aço (Xiao; Shan; Li, 2020).

Diversos estudos sobre conexões de bambu engenheirado têm sido conduzidas recentemente. Wang, Xiao e Li (2017) realizaram experimentos de carregamento lateral de paredes de cisalhamento de *glubam* com diferentes conexões de pregos na conexão painel-estrutura. As conexões de pregos da estrutura do painel influenciam significativamente todo o desempenho das paredes de cisalhamento até que o modo de falha dominante mude. Zhou *et al.* (2018), estudaram o impacto do diâmetro do fixador na resistência de embutimento perpendicular à fibra do *bamboo scrimber*. Foi observada certa relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do parafuso, onde um aumento no diâmetro do parafuso resulta em uma redução na resistência de embutimento. Chen *et al.*, (2022) investigaram a resistência do pino da *laminated flattend bamboo lumber* (LFBL) perpendicular à fibra. Foi demonstrado que o método de disposição dos painéis de bambu achatados afetou significativamente a resistência ao suporte do LFBL.

Pesquisadores têm considerados diversos fatores no estudo de conexões, como a resistência à flexão dos parafusos, a resistência de embutimentos, o diâmetro do parafuso, entre outros. Contudo, mais fatores de influência, como a permutação de parafusos e situações de trabalho precisam ser considerados profundamente (Hong *et al.*, 2020).

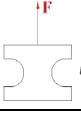
2.4.5 Propriedades físicas e mecânicas

Muitas empresas fabricam PBE's apenas com base na experiência, sem padrões gerais, o que leva a diferenças nas propriedades dos produtos de diferentes empresas e até mesmo em lotes diferentes (Hong *et al.*, 2020). As propriedades físicas e mecânicas do bambu são influenciadas pela idade de colheita, onde a idade ideal varia entre as espécies. Um fator que deve ser considerado é o teor de umidade do bambu, que afeta as propriedades a longo prazo (Silva *et al.*, 2023).

Os PBE's têm atraído muita atenção de pesquisadores nas últimas duas décadas. Seu processo de produção foi estudado, e vários programas de pesquisa também foram conduzidos para investigar suas propriedades mecânicas. As Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 apresentam as propriedades mecânicas de PBE's em diferentes estudos. Embora a pesquisa global tenha explorado o uso do bambu engenheirado em aplicações estruturais, os estudos

relatados normalmente se concentram em pequenas amostras transparentes para estabelecer propriedades mecânicas. Testes abrangentes em escala estrutural ainda não foram totalmente explorados.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do bambu engenheirado sob tração

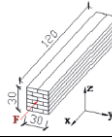
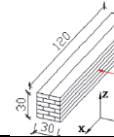
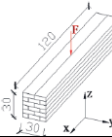
Estudos	PBE	ρ (kg/m ³)	$\sigma_{t }^x$	$E_{t }^x$	$\sigma_{t\perp}^y$	$E_{t\perp}^y$
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
						
Dongsheng <i>et al.</i> (2013)	BSC		138.00	13680.00		
Sinha <i>et al.</i> (2014)	LBL		61.00	13410.00		
Sharma <i>et al.</i> (2015)	LBL	686	90.00		2.00	
Sharma <i>et al.</i> (2015)	BSC	1163	120.00		3.00	
Li <i>et al.</i> (2018)	LBL		84.53	7007.00		
Wu e Xiao (2018)	BSC		106.70			
Correal <i>et al.</i> (2014)	LBL		143.10	18345.00	3.20	
Xiao <i>et al.</i> (2013)	Glubam	800-980	82.00	10400.00		
Xiao <i>et al.</i> (2008)	LB		20.00			
Xiao (2020)	Glubam	800-880	82.00	10400.00		2600.00
Luan <i>et al.</i> (2022)			228.82	18360.00		
Han <i>et al.</i> (2023)	BSC	940-1360	225.27	17920.00		
Han <i>et al.</i> (2023)	IBLVL	980-1300	323.35	25460.00		
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	644	124.00		3.00	
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	673	116.00		3.00	
Chen <i>et al.</i> (2020)	LBL		107.70	11143.00		
Li <i>et al.</i> (2020)	BSC	1254	156.20	15649.00	3.80	4012.00
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666	39.10	8062.00	4.20	1443.00
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666	50.00	8713.00	4.30	1346.00
Huang, Ji e Yu (2019)	BSC	720-1300	227.60-364.80			
Li <i>et al.</i> (2016a)	LBL	635	134.60	9686.00		
Ni <i>et al.</i> (2016)	LBL	600-900	37.54-58.27			
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1215	144.45	14020.00	6.70	
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1127	115.50	13220.00	5.55	
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1054	111.00	12180.00	4.18	
He <i>et al.</i> (2015)	LBL	648	66.80		5.70	
Zhang, Wang e Ren (2014)	BLVL		202.47			
Huang <i>et al.</i> (2015)	BSC	1100	118.40	10296.000	4.43	3066.00
Shangguan <i>et al.</i> (2016)	BSC	1220				
Luan <i>et al.</i> (2022)	LB	1100	228.82	18360.00		
Silva <i>et al.</i> (2023)	LBL		82.00			

Su <i>et al.</i> (2021)	LBL	622	84.50	7013.0	4.15

Legenda: LB – *Laminated bamboo*; IBLVL – *Imitation bamboo bundle laminated veneer lumber*; ρ – Densidade; $\sigma_{t||}^x$ – Tração paralela à fibra na direção x; $\sigma_{t\perp}^y$ – Tração perpendicular à fibra na direção y; $E_{t||}^x$ – Módulo de elasticidade (MOE) na tração paralela à fibra na direção x; $E_{t\perp}^y$ – MOE na tração perpendicular à fibra na direção y.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bambu engenheirado sob compressão

Estudos	PBE	ρ (kg/m ³)	$\sigma_{c }^x$	$E_{c }^x$	$\sigma_{c\perp}^y$	$E_{c\perp}^y$	$\sigma_{c\perp}^z$	$E_{c\perp}^z$
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
								
Dongsheng <i>et al.</i> (2013)	BSC		62.76	12630.00				
Sinha <i>et al.</i> (2014)	LBL		60.77				9.59	
Sharma <i>et al.</i> (2015)	LBL	686	77.00				22.00	
Sharma <i>et al.</i> (2015)	BSC	1163	86.00				37.00	
Li <i>et al.</i> (2018)	LBL		68.80	9393.00				
Wu e Xiao (2018)	<i>Glubam</i>		71.20	11000.00				
Correal <i>et al.</i> (2014)	LBL		62.00	32271.00	5.3		3.50	
Xiao <i>et al.</i> (2013)	<i>Glubam</i>	800-980	51.00					
Correal e Lopez (2008)	LBL		47.60	19140.00			5.40	
Xiao <i>et al.</i> (2008)	LB		68.00		25			
Xiao (2020)	<i>Glubam</i>	800-880	51.00					
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	644	55.00				18.00	
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	673	60.00				22.00	
Chen <i>et al.</i> (2020)	LBL		56.30	11022.00				
Li <i>et al.</i> (2020)	BSC	1254	100.90	14160.00	52.8	4313		
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666			12.1	1219	10.40	1295.00
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666	39.50	8166.00	12	1197	12.10	1206.00
Rao <i>et al.</i> (2022)	BSC	1200	120.00					
Huang, Ji e Yu (2019)	BSC	720-1300	70.50-199.30					
Li <i>et al.</i> (2016a)	LBL	635	58.70	9643.00				
Ni <i>et al.</i> (2016)	LBL	600-900	29.55-40.78					
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1215	115.70	17050.00	77.00			
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1127	113.40	15240.00	64.16			
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1054	104.71	12950.00	49.33			
He <i>et al.</i> (2015)	LBL	659.5	71.40		22.70			
Huang <i>et al.</i> (2015)	BSC	1100	65.53	11890.00			23.14	1365.00

(Silva <i>et al.</i> , 2023)	LB		51.00			
Shangguan <i>et al.</i> (2016)	BSC	1220	130.00-219.00			
Su <i>et al.</i> (2021)	LBL	622	71.60	9680.00	16.50	1867.00

Legenda: LB – *Laminated bamboo*; ρ – Densidade; $\sigma_{c\parallel}^x$ – Compressão paralela à fibra na direção x; $\sigma_{c\perp}^y$ – Compressão perpendicular à fibra na direção y; $\sigma_{c\perp}^z$ – Compressão perpendicular à fibra na direção z; $E_{c\parallel}^x$ – MOE na compressão paralela à fibra na direção x; $E_{c\perp}^y$ – MOE na compressão paralela à fibra na direção y; $E_{c\perp}^z$ – MOE na compressão paralela à fibra na direção z.

Fonte: Autora (2024).

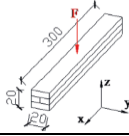
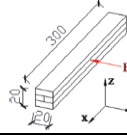
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do bambu engenheirado sob cisalhamento

Estudos	PBE	ρ (kg/m ³)	τ_{yx} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{yx} (MPa)	τ_{yx} (MPa)	τ_{yx} (MPa)	τ_{yx} (MPa)
								
Sharma <i>et al.</i> (2015)	LBL	686	16.00			16.00		
Sharma <i>et al.</i> (2015)	BSC	1163	15.00			15.00		
Takeuchi <i>et al.</i> (2018)	LBL		6.00			4.61	2.99	2.16
Wu e Xiao (2018)	<i>Glubam</i>		7.500			6.60		
Correal <i>et al.</i> (2014)	LBL		9.50					
Sinha <i>et al.</i> (2014)	LBL		15.67					
Xiao <i>et al.</i> (2013)	<i>Glubam</i>	800-980	7.20					
Xiao <i>et al.</i> (2017)	<i>Glubam</i>		14.70	16.00		4.61		3.08
Correal e Lopez (2008)	LBL		9.32					
Xiao (2020)	<i>Glubam</i>	800-880	7.20	4.60				
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	644				14.00		
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	673				17.00		
Chen <i>et al.</i> (2020)	LBL		17.50					
Li <i>et al.</i> (2020)	BSC	1254	26.70					
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666						
Sharma <i>et al.</i> (2017)	LBL	666	7.40			7.60		
Rao <i>et al.</i> (2022)	BSC	1200		25.20				
Huang, Ji e Yu (2019)	BSC	720-1300	18.90-26.20					
Ni <i>et al.</i> (2016)	LBL	600-900	7.15-8.62					
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1215	17.00					
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1127	14.25					
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1054	11.89					
Huang <i>et al.</i> (2015)	BSC	1100	8.21	23.44	3.64			
Su <i>et al.</i> (2021)	LBL	622	13.90					

Legenda: ρ – Densidade; τ_{ij} – Tensão de cisalhamento, sendo j a direção de aplicação da carga e i a direção perpendicular ao plano de cisalhamento.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do bambu engenheirado sob flexão

Estudos	PBE	ρ (kg/m ³)	σ_{fz}	E_{fz}	MOR	σ_{fxy}	E_{fxy}	MOR
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
								
Sharma <i>et al.</i> (2015)	LBL	686	77.00-83.00	11000.00-13000.00				
Sharma <i>et al.</i> (2015)	BSC	1163	119.00	13000.00				
Wu e Xiao (2018)	Glubam		111.20			114.20		
Correal <i>et al.</i> (2014)	LBL			12720.00	103.00		13260.00	122.40
Sinha <i>et al.</i> (2014)	LBL			12190.00	89.20		22300.00	70.13
Xiao <i>et al.</i> (2013)	Glubam					99.00	9400.00	
Correal e Lopez (2008)	LBL				81.90			
Xiao <i>et al.</i> (2008)	LB		75.00				888.00	
Xiao (2020)	Glubam	800-880	99.00					
Han <i>et al.</i> (2023)	BSC	940-1360	129.03	10750.00				
Han <i>et al.</i> (2023)	IBLVL	980-1300	162.62	14350.00				
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	644	76.00-79.00	10200.00-10500.00				
Sharma, Gatoó e Ramage (2015)	LBL	673	79.00	10400.00				
Zhou <i>et al.</i> (2019)	BSC			12.57	104.57			
Zhou <i>et al.</i> (2019)	BLVL			15.83	121.31			
Chen <i>et al.</i> (2020)	LBL		111.50	8870.00				
Li <i>et al.</i> (2020)	BSC	1254	144.30	9919.00				
Sulastiningsih e Nurwati (2009)	LBL	710-750		7267.00-10031.00	38.60-95.10			
Sulastiningsih e Nurwati (2009)	LBL	940		10100.00-11600.00	66.05-81.20			
Mahdavi <i>et al.</i>	LBL	510		9000.00	77.00			
Xiao <i>et al.</i> (2013)	Glubam	800-900		9000.00	99.00			
Huang <i>et al.</i> (2013)				13000.00	89.00			
Sharma <i>et al.</i> (2017)		666	56.60	8612.00		61.70	9093.00	
Sharma <i>et al.</i> (2017)		666	58.60	9178.00		66.70	10412.00	
Rao <i>et al.</i> (2022)	BSC	1200		27700.00	253.70			
Huang, Ji e Yu (2019)	BSC	720-1300		13500.00-32300.00	178.50-398.00			
Li <i>et al.</i> (2019)	LBL	640	89.70-99.20	5932.00-9093.00		93.90-101.10	6490.00-9177.00	
Li <i>et al.</i> (2016a)	LBL	635	63.87	10912.00	63.95			

Ni <i>et al.</i> (2016)	GLB	600-900		7671.00- 10149.00	85.12- 115.13
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1215	166.50	18650.00	
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1127	155.33	16390.00	
Kumar <i>et al.</i> (2016)	BSC	1054	131.83	14680.00	
He <i>et al.</i> (2015)	LBL	653.8	70.90	10300.00	
Zhang, Wang e Ren (2014)	BLVL			26180.00	249.98
Nugroho e Ando (2000)	BSC	600		6168.00	52.20
Nugroho e Ando (2000)	BSC	700		6629.00	73.80
Nugroho e Ando (2000)	BSC	800		7933.00	84.00
Nugroho e Ando (2000)	BSC	900		7825.00	108.40
Nugroho e Ando (2001)	LBL	870-1010		9434.00- 11866.00	62.70- 83.50
Nugroho e Ando (2001)	LBL	870-1010		10297.00- 12062.00	69.30- 86.00
Nugroho e Ando (2001)	LBL	870-1010		10493.00- 10885.00	67.60- 74.00
Li <i>et al.</i> (2018)	LBL		87.74	9478.00	85.75 8730.00
Silva <i>et al.</i> (2023)	BSC		200.00	22000.00	
Silva <i>et al.</i> (2023)	LB		99.00		
Shangguan <i>et al.</i> (2016)	BSC	1220	198.00- 229.00	25000.00- 30000.00	
Su <i>et al.</i> (2021)	LBL	622	92.60	7999.00	
Chen <i>et al.</i> (2016)	BLVL			11150.00	102.04
Chen <i>et al.</i> (2016)	BLVL			7020.00	87.83

Legenda: LB – *Laminated bamboo*; ρ – Densidade; σ_{fij} – Resistência à flexão, sendo i a direção da flexão e j a direção de aplicação da carga; E_{fz} – Módulo de elasticidade na flexão, sendo i a direção da flexão e j a direção de aplicação da carga; MOR, módulo de ruptura.

Fonte: Autora (2024).

Diversos estudos tem mostrado que o bambu engenheirado possui propriedades mecânicas comparáveis e até superiores a outros materiais estruturais, como madeira, o bambu roliço e produtos de madeira engenheirada, como o *laminated veener lumber* (LVL) (Huang *et al.*, 2015; Rao *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015).

2.4.6 *Laminated bamboo lumber* (LBL)

O bambu laminado é o tipo mais comum de bambu engenheirado usado na construção (Fahim *et al.*, 2022). O bambu laminado em aplicações estruturais tem o potencial de mudar a forma como os edifícios são construídos (Penellum *et al.*, 2018). Segundo Xiao (2022), existem

duas categorias de bambu laminado: o bambu laminado de tiras finas (cerca de 2 mm), comumente conhecido como *plybamboo*, e bambu laminado de tiras espessas (cerca de 5 a 8 mm), às vezes chamado de *laminated bamboo lumber* (LBL).

O LBL é um tipo de bambu laminado fabricado com tiras de bambu fresadas prensadas a frio ou a quente dispostas horizontalmente ou verticalmente, para formar seções retangulares (Li, Haitao *et al.*, 2019). Os bambus dos gêneros *Phyllostachys*, *Dendrocalamus*, *Bambusa* e *Gigantochloa* são os mais utilizados para a produção de LBL (Dauletbek *et al.*, 2021).

Apesar do seu grande potencial comercial no futuro, existe apenas um pequeno conjunto de pesquisas sobre LBL na literatura (Mahdavi *et al.*, 2011). O processo produtivo pode ser dividido nas seguintes etapas: (1) os colmos de bambu são submetidos à divisão em tiras delgadas; (2) em seguida, as tiras de bambu passam por um processo de aplainamento e tratamento, que envolve a remoção da cera e sílica presentes em suas superfícies, além de conferir uma seção transversal retangular; (3) as tiras, que foram secas ao ar para atingir uma umidade inferior a 12%, são alinhadas lado a lado, enquanto adesivos de poliuretano são aplicados verticalmente a essas tiras; (4) os laminados formados pelas tiras são prensados para produzir os produtos LBL finais, aplicando-se uma pressão adequada de aproximadamente 0,6 MPa ao longo de cerca de 4 horas (Sun; He; Li, 2020).

Diversos outros estudos descrevem procedimentos de fabricação semelhantes para o LBL (Correal *et al.*, 2014; Li, Haitao *et al.*, 2019; Nugroho; Ando, 2001; Sharma *et al.*, 2017; Sinha; Way; Mlasko, 2014; Su *et al.*, 2021; Sulastiningsih; Nuwarti, 2009). Um processo de fabricação apresentado por Sharma *et al.* (2015) é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Processo de fabricação do bambu laminado



Fonte: Sharma *et al.* (2015).

No bambu laminado, preservam-se tanto as fibras longitudinais quanto uma parte da matriz original do colmo (Sharma *et al.*, 2015). A indústria emprega os termos “*edgewise*” e

“flatwise” para descrever a orientação da menor dimensão da tira dentro da placa. Contudo, essa descrição não é claramente definida em relação à seção da viga (Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). Portanto, as duas orientações são aqui descritas como radial horizontal (*flatwise*) e radial vertical (*edgewise*), conforme Sharma *et al.* (2015).

2.4.6.1 Propriedades físicas e mecânicas do LBL

Ao considerar o LBL para aplicações estruturais, a compreensão completa das suas propriedades físicas e mecânicas fundamentais torna-se cada vez mais necessária (Chen *et al.*, 2020).

Para o LBL, o teor de umidade varia de 7 a 12% (Correal *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2016; Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2017). Nugroho e Ando (2001) avaliaram a resistência da ligação, a absorção de água, o inchamento e a expansão linear do LBL. A resistência da ligação variou de 0.58 a 0.91 MPa. O valor médio de absorção de água em duas horas e vinte e quatro horas variou entre 13% e 24.8%, respectivamente. O inchamento da espessura médio em duas horas e vinte e quatro horas foi de 5.7% e 12.1%, respectivamente. A expansão linear em duas e vinte e quatro horas apresentou valor médio de 0.28% e 0.48%, respectivamente.

Sulastiningsih e Nuwarti (2009), o teor de umidade do LBL variou de 12.7 a 13.7% com média de 13%. A densidade média do LBL produzido foi de 0.73 g/cm³. O inchamento em espessura do LBL variou de 2.5 a 4.1% com média de 3.3% e *Gigantochloa Apus* (2.7%) apresentou valores inferiores a *Gigantochloa Robusta*. A expansão linear não foi afetada pelo número de camadas ou espécie do bambu, variando de 0.07 a 0.17%.

Segundo Correal *et al.* (2014), os valores de retração nas direções radial e tangencial foram de 3.5% e 4.0%, respectivamente, e a retração em volume foi estimada em 7.7%. Uma vez que os valores de retração nas direções radial e tangencial são inferiores aos da maioria das espécies de madeira, o bambu laminado pode ser considerado um material dimensionalmente mais estável. Os resultados dos testes de dureza variaram de 5000 N a 6500 N aproximadamente, o que pode ser considerado dentro da média quando comparado aos valores relatados para espécies de madeira com densidade semelhante.

Do ponto de vista do projeto, o mesmo coeficiente médio de Poisson pode ser usado para estimar as propriedades do LBL sem fazer diferença entre tração e compressão (Chen *et al.*, 2020). Conforme estudos realizados nos últimos anos, o LBL apresenta coeficiente de Poisson variando de 0.21 a 0.27 na tração paralela à fibra (Chen *et al.*, 2020; Correal *et al.*,

2014; Li, Haitao *et al.*, 2018), e, variando de 0.29 a 0.34 na compressão paralela à fibra (Chen *et al.*, 2020; Li, Hai-Tao *et al.*, 2016). O bambu laminado apresenta coeficiente de Poisson inferior às espécies de madeira, com valores variando de 0.25 a 0.40 (Correal *et al.*, 2014).

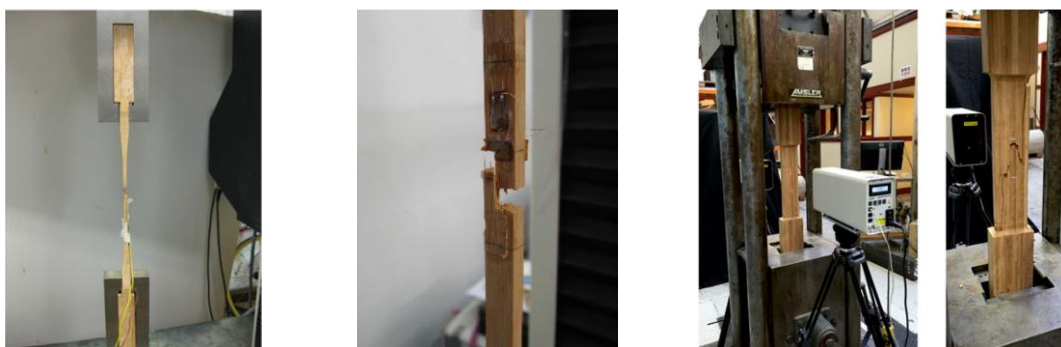
Sharma, Gatóo e Ramage (2015) investigaram o efeito de dois tipos de métodos de processamento, branqueamento e caramelização. Na tensão paralela à fibra, tanto o bambu laminado branqueado quanto o semi-caramelizado exibiram comportamento linear antes da ruptura. Comportamento linear até a falha também foi observado em outros estudos (Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2015). Correal *et al.* (2014), classificou o principal modo de falha na tração paralela à fibra como ruptura por tração transversal às fibras na seção intermediária do comprimento da amostra, com uma trinca visível estendendo-se ao longo da direção longitudinal.

Nos ensaios de tração longitudinal conduzidos por Ni *et al.* (2016), a falha se iniciou nas juntas presentes na seção transversal, as quais foram responsáveis pela baixa resistência à tração em comparação a outros estudos. A ruptura por cisalhamento ocorreu primeiro na parte mais externa, e, à medida que a fissura crescia, a ruptura por tração ocorreu em determinado ponto e resultou em ruptura por cisalhamento na parte interna.

De modo geral, o LBL apresenta falha frágil e repentina na faixa intermediária dos corpos de prova quando submetido à tração paralela às fibras, sem deformação plástica aparente (Chen *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2017; Sinha; Way; Mlasko, 2014). Contudo, a configuração da fissura pode variar, podendo assumir formas de fraturas planas, inclinadas ou em formato de “Z” (Chen *et al.*, 2020). A Figura 14 ilustra modos de falhas típicos em LBL.

Os testes de tração paralela às fibras utilizaram dois tipos de corpos de prova (em escala real e uma amostra pequena). Um aumento de 30% na resistência à tração média (50 MPa) e um aumento de 8% no módulo médio (8713 MPa) foi observado na amostra *dogbone* em comparação com a amostra de camada única (Sharma *et al.*, 2017).

Figura 14 – Modos de falha do LBL sob tração paralela à fibra



(a)

(b)

(c)

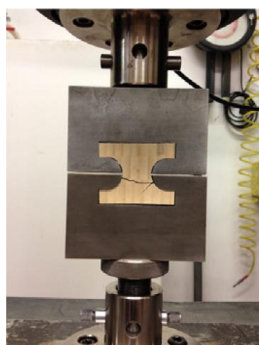
Fonte: a) Sharma, Gatóo e Ramage (2015); b) Chen *et al.* (2020); c) Sharma *et al.* (2017).

Estudos obtiveram resistência à tração paralela à fibra cerca de quarenta vezes a resistência perpendicular (Correal *et al.*, 2014; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). Na tração perpendicular à fibra a falha ocorreu em vários locais dentro da amostra. As fraturas ocorreram através do bambu e não na linha de cola do adesivo (Correal *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015).

Segundo He *et al.* (2015), o modo de falha do LBL submetido à tração perpendicular às fibras é caracterizado pela ruptura abrupta entre camadas adjacentes de bambu, e a capacidade de carga da amostra cai repentinamente sem muita deformação. Na Figura 15, são ilustrados modos de falha típicos do LBL sob tração perpendicular às fibras.

Nos ensaios de tração perpendicular à fibra, a orientação radial vertical apresentou resistência e módulo ligeiramente melhores (10%) em comparação com a orientação radial horizontal (Sharma *et al.*, 2017).

Figura 15 - Modos de falha do LBL sob tração perpendicular às fibras



(a)



(b)

Fonte: a) Sharma, Gatóo e Ramage (2015); b) Sharma *et al.* (2015).

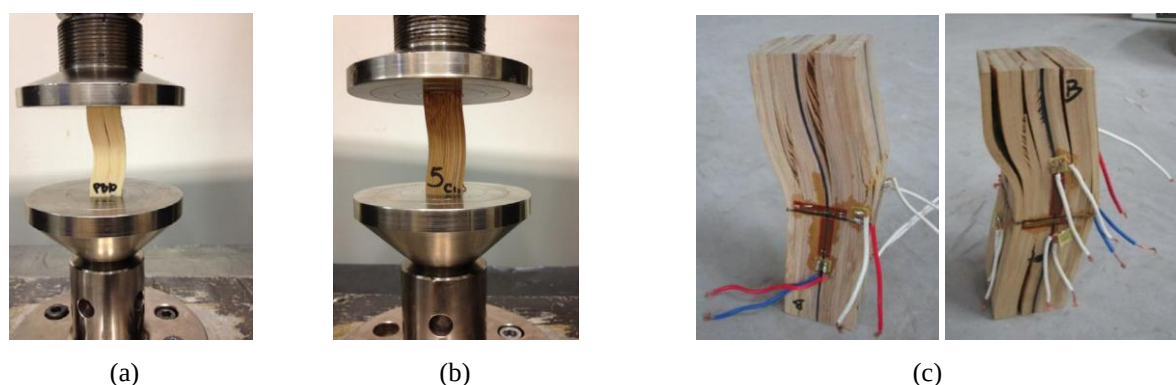
Sulastiningsih e Nuwarti (2009) investigaram as propriedades físicas e mecânicas do LBL com foco particular nos efeitos das espécies e do número de camadas. Foi observado que o MOR, o MOE e a resistência à compressão paralela à fibra diminuem à medida que o número de camadas aumenta.

Sob compressão paralela à fibra, o LBL apresenta comportamento de falha por flambagem da seção, sem falhas de cisalhamento típicas observadas, embora a divisão tenha sido observada no bambu laminado branqueado (Sharma *et al.*, 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). O comportamento de flambagem é consistente com outros estudos de compressão em bambu laminado (Sharma *et al.*, 2017; Sinha; Way; Mlasko, 2014).

Conforme He *et al.* (2015), para o carregamento da direção longitudinal, o LBL apresentou falha por esmagamento, em seguida, foram observadas falhas nas linhas de cola. Chen *et al.* (2020), observaram três modos de falha típicos: rasgo, falha por dobramento e fissuras longitudinais nas tiras de bambu. Na maioria dos casos, a resistência de união das camadas adesivas foi superior à das tiras de bambu, o rasgo foi a falha mais comum. Modos de falha do LBL sob compressão são ilustrados na Figura 16.

Na compressão paralela à fibra, o LBL demonstrou comportamento bilinear (He *et al.*, 2015; Sharma *et al.*, 2015). De forma semelhante, no estudo conduzido por Correal *et al.* (2014), o LBL exibiu uma faixa elástica inicial e um comportamento inelástico secundário com módulo de elasticidade tangente quase constante até a ruptura, indicando um comportamento dúctil. Chen *et al.* (2020) observaram comportamento semelhante.

Figura 16 – Modos de falha do LBL sob compressão paralela às fibras

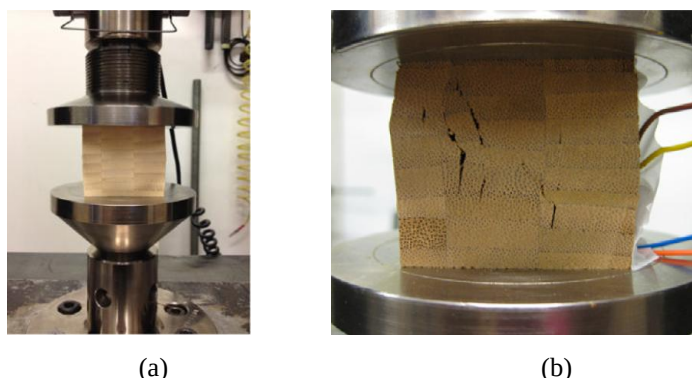


Fonte: a) Sharma, Gatóo e Ramage (2015); b) Sharma *et al.* (2015); c) Chen *et al.* (2020).

Na compressão perpendicular à fibra, o LBL exibe comportamento bilinear, com um aumento linear na carga, seguido de um platô e endurecimento. O modo de falha é caracterizado como a fratura da matriz e das fibras do bambu, resultando em abaulamento das amostras e fissuras nos laminados (Figura 17) (Sharma *et al.*, 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015).

He *et al.* (2015) também observaram modo de falha devido a fissuras através das tiras de bambu, ao longo da matriz. Segundo Correal *et al.* (2014), o LBL exibiu uma faixa elástica inicial clara na compressão perpendicular às fibras, seguida por um comportamento inelástico. O modo de ruptura foi classificado como esmagamento. No estudo de Sharma *et al.* (2017), por sua vez, a falha típica foi a divisão dos laminados individuais.

Figura 17 - Modos de falha do LBL sob compressão perpendicular às fibras



(a)

(b)

Fonte: a) Sharma, Gatóo e Ramage (2015); b) Sharma *et al.* (2015).

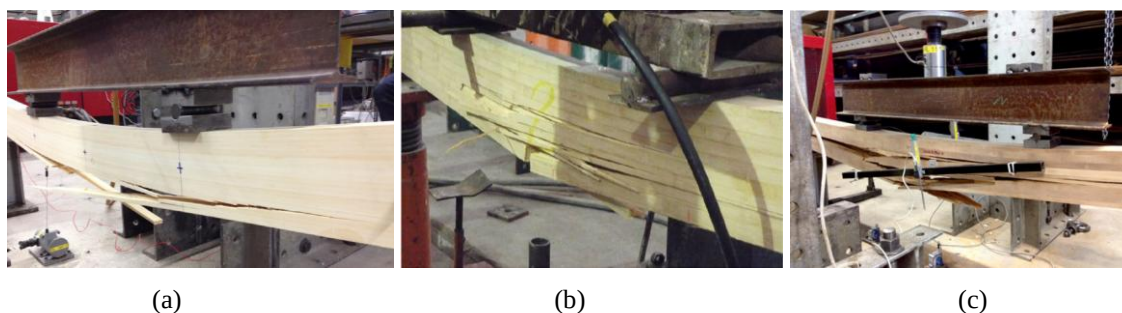
O LBL suporta grandes deflexões sob flexão antes da falha (Li, Haitao *et al.*, 2019; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). A ruptura ocorreu nas faces de tração dos corpos de prova no meio do vão, exibindo o que é caracterizado como falhas de cisalhamento longitudinais na profundidade da viga (Sharma *et al.*, 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015). Sob condições de flexão, o LBL tem a capacidade de resistir a grandes quantidades de compressão no topo da viga, com modo de falha caracterizado por ruptura frágil por tração iniciada na face tracionada mais externa da viga (Figura 18) (Chen *et al.*, 2020; He *et al.*, 2015; Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018, 2019; Sharma *et al.*, 2017).

Sinha, Way, Mlasko (2014) identificaram quatro tipos de falhas em vigas LBL: ruptura por cisalhamento interlaminar na zona de tração; ruptura por cisalhamento interlaminar em zona de compressão; ruptura por cisalhamento interlaminar no meio da viga; e ruptura por tração na fibra extrema da zona de tração da viga. Correal *et al.* (2014) identificou modos de rupturas distintos conforme a orientação de carregamento do LBL. O modo de ruptura na orientação radial horizontal foi identificado como tração de fragmentação, enquanto o modo de ruptura na orientação radial vertical foi cisalhamento horizontal.

As juntas presentes nas vigas LBL representam pontos de fragilidade sob tensão, sendo, consequentemente, os principais iniciadores da falha, o que ocasiona a redução da resistência tanto à flexão quanto à tração (Li, Haitao *et al.*, 2018; Ni *et al.*, 2016).

No estudo realizado por He *et al.* (2015), o LBL apresentou comportamento linear-elástico até o pico de carga, em seguida, a capacidade de carga e a rigidez das vigas diminuiram, e em seguida a ruptura por tração. Outros estudos observaram que as vigas LBL se comportam elasticamente até aproximadamente metade da carga última e carregamento e depois apresentaram comportamento elastoplástico (Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018).

Figura 18 – Modos de falha do LBL sob flexão



Fonte: a) Sharma, Gatóo e Ramage (2015); (b) He *et al.* (2015); c) Sharma *et al.* (2017).

Takeuchi, Estrada e Linero (2018) investigaram a mecânica de falha do LBL com diferentes direções de fibra sob cisalhamento. Conforme os resultados dos ensaios, no cisalhamento paralelo às fibras o processo de fratura ocorre na matriz do parênquima. A trinca exibe um modo de fratura no qual uma tensão de cisalhamento atua paralelamente à superfície da trinca e um lado da trinca desliza em relação ao outro (Figura 19a).

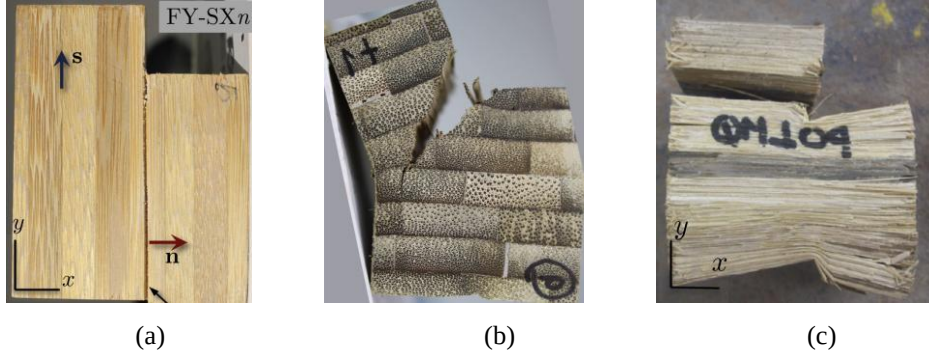
No cisalhamento perpendicular às fibras, as quais não cruzam o plano de área reduzida, a fratura também ocorre na matriz do parênquima e atravessa diversas superfícies de contato entre as lâminas. O caminho da trinca é orientado 45° em relação ao plano de área reduzida (Figura 19b). A trinca exibe um modo de fratura no qual uma tensão principal de tração normal atua sobre a superfície da trinca, produzindo uma lacuna entre os lados da trinca. No LBL com fibras perpendiculares à direção do carregamento e cruzando o plano de área reduzida, diversas fissuras foram formadas perpendicularmente à direção do carregamento e paralelas à orientação da fibra (Figura 19c).

Segundo Sharma, Gatóo e Ramage (2015), o bambu semi-caramelizado demonstrou um comportamento mais uniforme, enquanto o bambu branqueado apresenta maior compressibilidade antes que a falha por cisalhamento ocorra dentro das fibras. Sharma, Gatóo e Ramage (2015), Sharma *et al.* (2015) e Correal *et al.* (2014), identificaram o modo de falha típico para cisalhamento paralelo à fibra como ruptura por cisalhamento através do substrato do bambu, com plano de ruptura paralelo à direção de aplicação da carga.

Conforme Chen *et al.* (2020), no cisalhamento paralelo às fibras, as curvas tensão-deslocamento exibiram propriedades elásticas até que a tensão de cisalhamento final fosse atingida, então a tensão de cisalhamento caiu repentinamente, o que correspondeu às características de ruptura por cisalhamento. Uma rachadura principal entre os laminados de bambu foi vista ao longo da direção do carregamento, enquanto nenhum outro dano apareceu. Sharma *et al.* (2017) conduziram ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, considerando a

influência das orientações de laminação. Ambas as orientações mostraram resistências ao cisalhamento comparáveis.

Figura 19 – Modos de falha do LBL sob cisalhamento



Fonte: Takeuchi, Estrada e Linero (2018).

2.4.6.2 Relações constitutivas do LBL

A relação tensão-deformação apresenta características lineares desde o carregamento até a ruptura, sem estágio descendente e estágio de platô de escoamento. Portanto, o material se comporta de forma elástico-frágil (Chen *et al.*, 2020; Li, Hai-Tao *et al.*, 2016). Chen *et al.* (2020) propuseram um modelo simplificado para a relação tensão-deformação axial de tração paralelamente às fibras (Eq. 1):

$$\sigma = E_t \varepsilon \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{et} \quad (1)$$

Na qual, ε_{et} é a deformação de tração última e E_t é o MOE de tração paralelo à fibra. Li *et al.* (2018) propuseram um modelo (Eq. 2) com base nos ensaios de compressão e tração paralelos à fibra.

$$\sigma = \begin{cases} E_t \varepsilon & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \\ E_c \varepsilon & (-\varepsilon_{cy} \leq -\varepsilon \leq 0) \\ \sigma_{cy} + k_{cep} E_c (\varepsilon - \varepsilon_{cy}) & (-\varepsilon_{c0} \leq -\varepsilon \leq \varepsilon_{cy}) \\ \sigma_{c0} & (-\varepsilon_{cu} \leq -\varepsilon \leq -\varepsilon_{c0}) \end{cases} \quad (2)$$

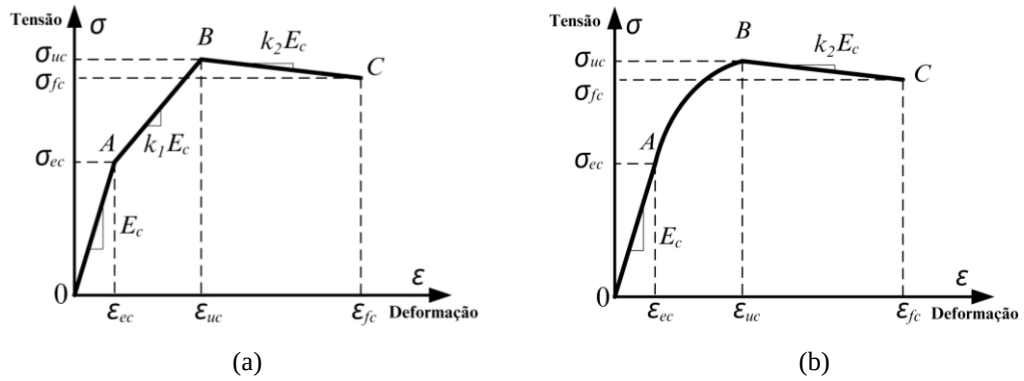
$$k_{cep} = \frac{\sigma_{c0} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cy}) E_c} = \frac{\sigma_{ep} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{ep} - \varepsilon_{cy}) E_c} \quad (3)$$

Aqui σ é o valor da tensão da madeira laminada de bambu; E_t e E_c são o módulo de elasticidade sob condições de tração e compressão, respectivamente; ε é o valor de deformação da madeira laminada de bambu; ε_{cy} é a deformação para o ponto de escoamento; ε_{tu} é o valor da deformação de tração final; ε_{ep} é o valor da deformação elástica-plástica; σ_{cy} é o valor da

tensão de escoamento por compressão; σ_{ep} é o valor da tensão elástico-plástica; k_{cep} é a razão entre a inclinação elástico-plástica; ε_{c0} é o valor da deformação do pico de compressão; σ_{c0} é o valor da tensão de pico de compressão; e ε_{cu} é o valor final da deformação por compressão.

Chen *et al.* (2020) propuseram dois modelos de relação tensão-deformação para descrever o comportamento do LBL sob compressão paralela às fibras, um modelo trilinear e outro polinomial. Os modelos são ilustrados na Figura 20, na qual, σ_{ec} , σ_{uc} e σ_{fc} são tensão limite elástica, tensão de pico e tensão de ruptura, respectivamente, e ε_{ec} , ε_{uc} e ε_{fc} são as deformações compressivas correspondentes.

Figura 20 – a) Modelo trilinear do LBL sob compressão; b) modelo polinomial do LBL sob compressão



Fonte: Chen *et al.* (2020).

Portanto, as equações que descrevem a relação tensão-deformação do modelo trilinear podem ser expressas da seguinte forma:

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{ec} \\ \sigma_{uc} - k_1 E_c (\varepsilon_{uc} - \varepsilon) & \varepsilon_{ec} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{uc} \\ \sigma_{uc} + k_2 E_c (\varepsilon - \varepsilon_{uc}) & \varepsilon_{uc} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{fc} \end{cases} \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{0.35 \sigma_{uc}}{E_c (\varepsilon_{uc} - \varepsilon_{ec})} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{0.05 \sigma_{uc}}{E_c (\varepsilon_{uc} - \varepsilon_{fc})} \quad (6)$$

Em que, E_c é o MOE de compressão e ε é o valor de deformação do LBL.

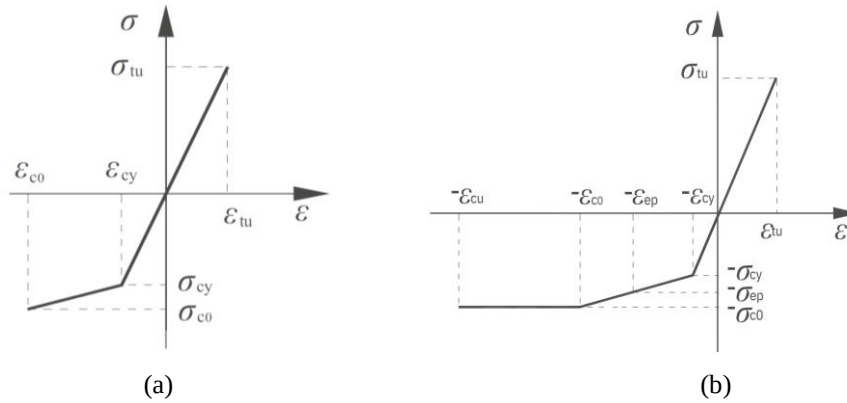
O modelo polinomial também apresenta três estágios, similarmente ao modelo trilinear. Os segmentos “AO” e “BC” se mantêm iguais à Eq. 2 e as características não lineares de tensão-deformação da curva “AB” são descritas por uma função polinomial cúbica. Além disso, uma transição suave foi proposta entre a linha “OA” e a curva “AB”. Dessa forma, equação do segmento “AB” pode ser dada como segue:

$$\sigma_c = a\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + c\varepsilon + d \quad \varepsilon_{ec} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{uc} \quad (7)$$

Aqui, a, b, c e d são constantes determinadas pelas condições de compatibilidade de contorno.

Com base no módulo de elasticidade e na tensão última na ruptura identificados por meio de testes experimentais, Li *et al.* (2019) e Li *et al.* (2018) propuseram modelos para o comportamento tensão-deformação do LBL estrutural sob flexão. Os modelos são ilustrados nas Figura 21.

Figura 21 - Modelo de tensão-deformação do bambu laminado sob flexão



Fonte: a) Li *et al.* (2019); b) Li *et al.* (2018).

Os modelos também podem ser expressos pelas Equações (8) e (9) (Li, Haitao *et al.*, 2019), para o modelo ilustrado na Figura 21a, e Equações (10) e (11) (Li, Haitao *et al.*, 2018), para o modelo apresentado na Figura 21b:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\varepsilon_{cy} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \\ \sigma_{cy} + \delta_{ep}E(\varepsilon - \varepsilon_{cy}) & (\varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cy}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\delta_{ep} = \frac{\sigma_{c0} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cy})E} = \frac{\sigma_{ep} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{ep} - \varepsilon_{cy})E} \quad (9)$$

Nas quais, σ é o valor da tensão do LBL; E é o MOE; ε é o valor de deformação do LBL; ε_{cy} é a deformação para o ponto de escoamento; ε_{tu} é a deformação de tração final; ε_{ep} é a deformação elástico-plástica; σ_{cy} é a tensão de escoamento por compressão; σ_{ep} é a tensão elástico-plástica; δ_{ep} é a razão entre a inclinação elástico-plástica e o MOE; ε_{c0} é o valor da deformação do pico de compressão; σ_{c0} é o valor da tensão de pico de compressão; ε_{cu} é o valor final da deformação por compressão.

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (-\varepsilon_{cy} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \\ \sigma_{cy} + k_{cep}E(\varepsilon - \varepsilon_{cy}) & (-\varepsilon_{c0} \leq -\varepsilon \leq -\varepsilon_{cy}) \\ \sigma_{c0} & (-\varepsilon_{cu} \leq -\varepsilon \leq -\varepsilon_{c0}) \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{cep} = \frac{\sigma_{c0} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cy})E} = \frac{\sigma_{ep} - \sigma_{cy}}{(\varepsilon_{ep} - \varepsilon_{cy})E} \quad (11)$$

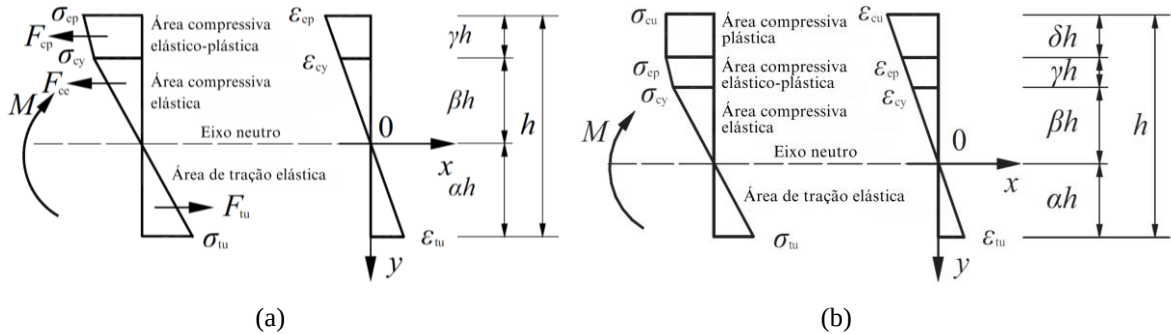
Aqui, k_{cep} é a razão entre a inclinação elástico-plástica e o MOE, e os demais parâmetros têm o mesmo significado que nas Equações (2).

A estreita concordância entre os modelos e os resultados experimentais obtidos pelos estudos apoia o comportamento hipotético do LBL na flexão, em que sob tensão de tração o material permanece elástico linear até romper de maneira frágil, enquanto sob tensão de compressão o material se encontra no estágio elástico-plástico e deforma plasticamente (Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018, 2019).

Independentemente do comprimento da amostra, a deformação na seção transversal da viga LBL é basicamente linear durante todo o processo de carregamento, comprovando a suposição da seção transversal plana (Li, Haitao *et al.*, 2018, 2019). Contudo, quando a carga aplicada atinge o limite elástico, as fibras sob tensão de compressão entram gradativamente no estado plástico e o módulo elástico de compressão diminui, levando à redistribuição da força interna da seção transversal, resultando no deslocamento do eixo neutro para baixo para atingir um novo equilíbrio (Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018).

As distribuições de tensão-deformação para a seção transversal intermediária no estado de falha final podem ser expressas como na Figura 22.

Figura 22 – a) Distribuição de tensão-deformação no estado de falha final; b) Distribuição de tensão-deformação no estado de falha final para o Modo III



Fonte: a) Li *et al.* (2019); b) Li *et al.* (2018).

Com base no modelo tensão-deformação ilustrado na Figura 22a, o momento fletor último para vigas LBL simplesmente apoiadas pode ser obtido conforme Equação (12) (Li, Hai-Tao *et al.*, 2016):

$$M = \frac{Ebh^2}{6(\varepsilon_t + \varepsilon_{ep})^2} (2\varepsilon_t^3 + 5\varepsilon_{cy}^3 - 3\varepsilon_{ep}^2 \varepsilon_{cy} - 5k_{ep} \varepsilon_{cy}^3 + 5k_{ep} \varepsilon_{ep}^2 \varepsilon_{cy} + 2k_{ep} \varepsilon_{ep}^3) \quad (12)$$

Aqui, ε_t é a deformação de tração, b é a largura da seção transversal da viga, h é altura da viga, e os demais parâmetros têm o mesmo significado que nas Equações (2) e (3).

Segundo Li *et al.* (2018), as vigas de bambu laminado apresentam três possíveis modos de falha sob flexão: (1) todas as fibras de bambu na zona compressiva podem ainda estar no estágio elástico quando a viga rompe; (2) algumas fibras na zona compressiva podem estar no estágio plástico-elástico e algumas podem estar no estágio elástico quando a viga falha; e (3) algumas fibras na zona de compressão podem estar no estágio totalmente plástico, algumas no estágio elástico-plástico e algumas no estágio elástico quando a viga falha. Na Figura 22b, é ilustrada graficamente a distribuição de tensão-deformação no estado de falha final para o terceiro modo.

Com base nas equações acima, o momento fletor último para as vigas LBL que rompem no modo três pode ser obtido conforme Equação (13):

$$M = \frac{bh^2}{6\alpha} E\varepsilon_t (2\alpha^3 + 2\beta^3 - 6\beta^2\gamma - 3\beta\gamma^2 - 12k_{cep}\beta^2\gamma + 9\beta k_{cep}\gamma^2 + 2k_{cep}\gamma^3) + \delta bh^2 \sigma_{cu} \left(\beta + \gamma + \frac{1}{2} \delta \right) \quad (13)$$

Aqui, α , β , γ e δ são os coeficientes de altura e podem ser calculados conforme Li *et al.* (2018). Os demais parâmetros têm o mesmo significado que nas Equações (2) e (3).

Li *et al.* (2019) propuseram uma fórmula de cálculo da deflexão no meio do vão de vigas LBL em condições não lineares. Duas hipóteses foram adotadas de acordo com os resultados dos testes: a área sob flexão pura estava em um estágio não linear e k_{ep} foi escolhido como a curvatura para esta área, (2) a área do vão sob cisalhamento estava em um estágio elástico e k_e foi escolhido como a curvatura para esta área. Assim, a equação de deflexão última no meio do vão pode ser expressa da seguinte forma:

$$w(L/2) = \frac{k_{ep}L}{4} + \frac{F_m L^3}{162EI} - \frac{13k_{ep}L^2}{73} \quad (14)$$

$$k_{ep} = \frac{\varepsilon_{ep} + \varepsilon_{tu}}{h} \quad (15)$$

Na qual, F_m é a carga máxima de flexão, E é o MOE, I é o momento de inércia da viga e L é o vão da viga.

2.4.7 *Glued laminated bamboo (Glubam)*

Com base no conceito de madeira lamelada colada (*glulam*), Xiao (2008) desenvolveu um novo processo de laminação de bambu, resultando no produto denominado de bambu laminado colado (*glubam*). O *glubam* possui uma definição técnica clara e é projetado para aplicações estruturais (Xiao, 2022). Além disso, os métodos de construção de pré-fabricação em fábrica e montagem no local do *glubam* têm facilitado sua aplicação em grande escala, proporcionando condições favoráveis para sua utilização (INBAR, 2021b).

Sun, He e Li (2020) descrevem o processo de fabricação nas seguintes etapas: (1) seleção do bambu; (2) divisão dos colmos de bambu em tiras com espessura de 2–3 mm e largura de 20–30 mm, removendo a cera das superfícies dos colmos durante essa etapa; (3) alinhamento paralelo das tiras de bambu, formando cortinas de bambu; (4) aplicação de resina de fenol formaldeído (FF), seguida pela prensagem a quente dessas cortinas empilhadas; (5) colagem, empilhamento, compressão e união das folhas de bambu para criar elementos estruturais.

Portanto, o *glubam* é produzido a partir de um processo de prensagem em duas etapas. A primeira consiste na produção das folhas de *glubam*, ou *plybamboo*. A segunda etapa envolve o dimensionamento do *plybamboo* em dimensões específicas, conforme necessário para o elemento estrutural (Li, Z. *et al.*, 2018). O processo de fabricação é ilustrado na Figura 23.

Os componentes estruturais típicos do *glubam* utilizam folhas com tiras de bambu dispostas 80% na direção longitudinal e 20% na direção transversal. Geralmente, existem 15 ou menos camadas de cortinas de bambu, e cada uma tem cerca de 2 mm de espessura (Xiao; Yang; Shan, 2013). As folhas de *glubam* também podem apresentar a mesma quantidade de tiras de bambu orientadas nas direções longitudinal e transversal (Xiao; Zhou; Shan, 2010).

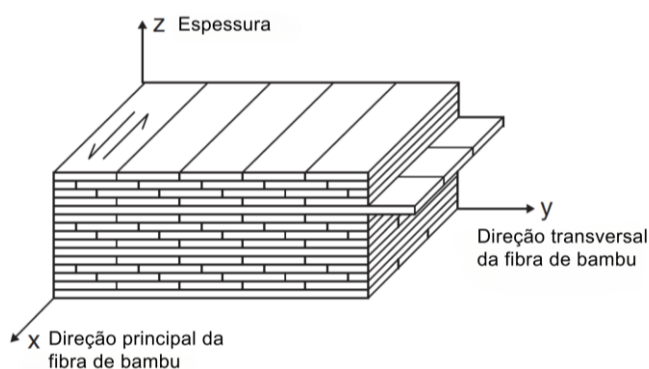
Figura 23 – Novo processo de fabricação do *glubam*

Fonte: Sun, He e Li (2020).

2.4.7.1 Propriedades físicas e mecânicas do *glubam*

Para investigar as propriedades do *glubam*, é essencial estabelecer um sistema de coordenadas. Isso permite identificar a direção principal, onde está alinhada a maior proporção de fibras do *glubam*, e a direção transversal, onde está alinhada a menor proporção de fibras do material (Figura 24).

Figura 24 - Definição de sistema de coordenadas



Fonte: Xiao (2022).

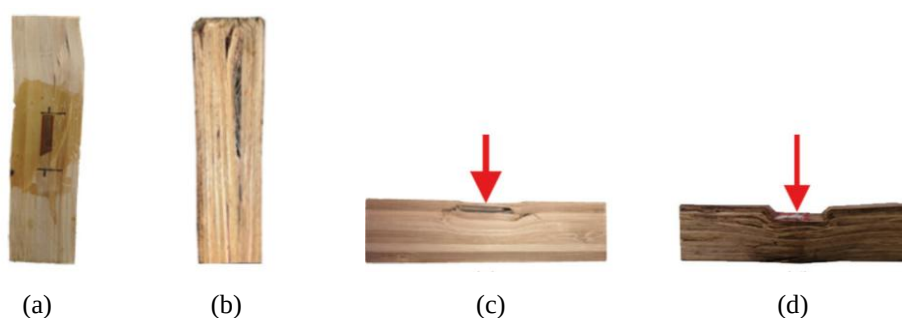
Wu e Xiao (2018) conduziram experimentos para avaliação das propriedades do *glubam*, visando sua aplicação em um modelo de treliça espacial com diferentes configurações. Ensaio de compressão foram realizados em amostras pequenas e em escala real. Sua alta

resistência à compressão longitudinal e baixa discrepância o tornam um material ideal para sistemas de treliça espacial.

Xiao, Yang e Shan (2013) realizaram ensaios de compressão longitudinal em amostras de *glubam*. As fibras foram comprimidas juntas como um feixe de tubos até que a carga final fosse atingida, apresentando deformação significativa. Na compressão paralela às fibras, as falhas das amostras de *glubam* em escala real foram causadas principalmente pelo esmagamento do material e, em alguns casos, associadas à delaminação (Wu; Xiao, 2018).

Para amostras de *glubam* de tiras grossas, a falha de flambagem fora do plano sob carga na direção principal foi observada (Figura 25a). Para amostras de tiras finas, foi observado delaminação das camadas de bambu sob compressão na direção principal (Figura 25b) (Xiao, 2022).

Figura 25 – Modos de falha típicos na compressão na direção principal (a e b) e transversal (c e d)



Fonte: Xiao (2020).

Na compressão perpendicular às fibras, o *glubam* exibe modo de falhar caracterizado por esmagamentos locais, e tanto os espécimes de bambu com tiras grossas (Figura 25c) quanto com tiras finas (Figura 25d) exibiram resultados semelhantes (Xiao, 2022).

Sob compressão na direção principal, o *glubam* demonstra um comportamento altamente dúctil, apresentando um platô plástico nas curvas tensão-deformação. Os corpos de prova de bambu demonstram uma maior ductilidade e estabilidade quando comprimidos nas direções transversais (Xiao, 2022).

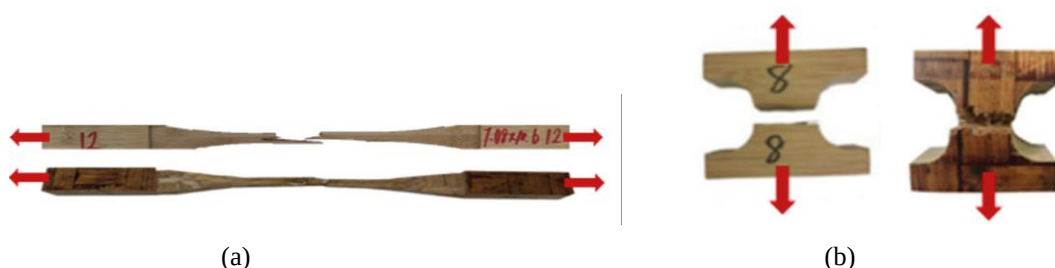
Wu e Xiao (2018) observaram um comportamento linear até a falha para o *glubam* sob tração paralela à fibra. O *glubam* atingiu a carga máxima correspondente à ruptura repentina com forte ruído. A resistência à tração média foi de 106.7 MPa. Xiao, Yang e Shan (2013) também observaram um comportamento elasto-frágil. A resistência à tração média do *glubam* na direção principal da fibra foi de 82 MPa e o módulo de elasticidade foi de 10400 MPa.

Yang, Xiao e Lam (2014) estudaram as propriedades de tração em diferentes direções da fibra principal por meio de teste de tração fora do eixo. Observou-se que as amostras de 0° (carregadas ao longo das fibras principais) desenvolveram a maior resistência à tração.

Na tração paralela às fibras, o *glubam* atingiu a carga máxima correspondente à ruptura repentina. Na maioria dos casos, a fibra quebrou na seção mais fraca do meio ou nas juntas de emenda de diferentes tiras de bambu. As amostras de tração podem falhar de diferentes maneiras, incluindo fratura da fibra de bambu, delaminação e falha na conexão de diferentes tiras de bambu (Wu; Xiao, 2018). Para amostras sob tração na direção da fibra principal, não há diferenças aparentes nos modos de falha entre amostras de tiras grossas e tiras finas. A ruptura por tração dos corpos de prova na região efetiva foi o modo de ruptura típico observado (Xiao, 2022).

Para amostras sob tração na direção transversal, o *glubam* de tiras grossas apresentou ruptura repentina, enquanto o *glubam* de tiras finas apresentou ruptura gradativa devido a presença de fibras na direção transversal (Xiao, 2022). A Figura 26 mostra modos de falha típicos em ambas as direções.

Figura 26 – Modos de falha do *glubam* em tração na direção principal (a) e transversal (b)



Fonte: Xiao (2022).

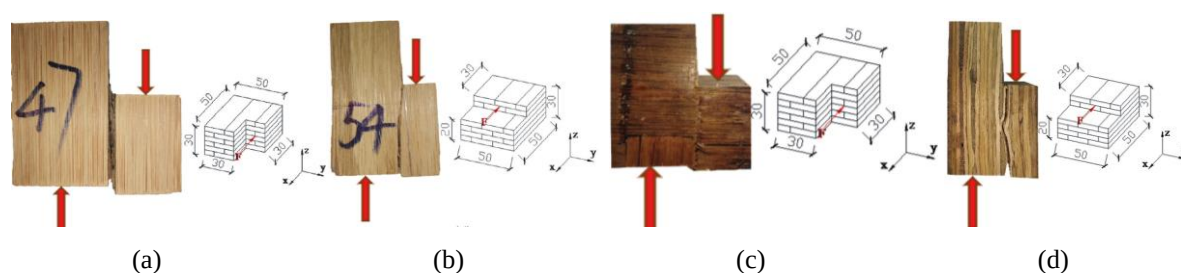
Devido à sua complexa configuração de fibra de bambu, o *glubam* possui características distintas em diferentes direções. Portanto, os testes de cisalhamento do *glubam* precisam ser realizados em seis direções de cisalhamento possíveis. Essas direções de cisalhamento são denotadas como τ_{yx} , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} e τ_{zy} . Para ij ($i = x, y, z$; $j = x, y, z$), o primeiro subscrito i indica a direção normal ao plano de cisalhamento, j é a direção do carregamento (Xiao, 2022).

A resistência ao cisalhamento do *glubam* também foi testada com duas configurações diferentes, e as diferenças foram mínimas. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras média foi de 7.1 MPa, enquanto foi de 7.5 MPa para o plano de cisalhamento paralelo à superfície de ligação e 6,6 MPa para o plano de cisalhamento perpendicular à superfície de ligação (Wu; Xiao, 2018).

A superfície de falha por cisalhamento era geralmente paralela à orientação da fibra de bambu ou à superfície de ligação (Wu; Xiao, 2018).

Quando a seção transversal da amostra *glubam* é submetida à força de cisalhamento ao longo da direção principal, o modo de falha é caracterizado por cisalhamento da porção *glubam* ao longo do plano de aplicação da força, para o *glubam* de tiras grossas (Figura 27a e Figura 27b), e para o *glubam* de tiras finas (Figura 27c e Figura 27d). A falha dos dois tipos de *glubam* é bastante diferente quando a seção que atravessa a direção principal é submetida a cisalhamento na direção transversal (Xiao, 2020).

Figura 27 – Modos de falha do *glubam* sob cisalhamento



Fonte: Xiao (2022).

Segundo Xiao (2022), a resistência ao cisalhamento dos painéis de tiras finas, com fibras dispostas em configuração bidirecional, é cerca de 1.8 vezes superior à dos painéis de tiras grossas, onde as fibras estão dispostas unidirecionalmente. Assim, a laminação cruzada do bambu para criar um tipo de CLB poderia melhorar a resistência ao cisalhamento e o comportamento.

As fibras que cruzaram a ação da força de cisalhamento foram inicialmente dobradas e algumas eventualmente quebraram. Verificou-se que o valor médio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é de cerca de 7.2 MPa (Xiao; Yang; Shan, 2013).

Vigas *glubam* foram desenvolvidas e verificadas quanto ao desempenho mecânico, por meio de testes em escala real. Foi demonstrado que as vigas *glubam* apresentam rigidez e capacidade de carga satisfatórias para aplicações estruturais (Xiao *et al.*, 2008; Xiao; Zhou; Shan, 2010).

Um novo tipo de paredes de cisalhamento leves feitas com uma estrutura de bambu laminado (*glubam*) e painéis de revestimento de bambu é apresentado neste artigo. Os resultados dos testes mostram que as paredes de cisalhamento *glubam* têm capacidade suficiente para resistir a ações sísmicas, enquanto o desempenho geral é próximo das paredes de cisalhamento de madeira leve convencionais, mas com menos ductilidade (Wang; Xiao; Li, 2017).

O módulo de elasticidade e a resistência à flexão foram testados em duas condições, com a carga transversal paralela ou perpendicular às interfaces de ligação. A resistência média à flexão foi de 112.6 MPa. As resistências à flexão foram bastante semelhantes para as duas configurações diferentes, enquanto os modos de ruptura foram distintos (Wu; Xiao, 2018).

Li Z. *et al.* (2018) testaram dois tipos de vigas de *glubam* feitas com diferentes placas de *plybamboo* pré-processadas e diferentes configurações de tiras (tiras finas e espessas). As vigas com a configuração radial horizontal apresentaram maior resistência à flexão do que as vigas radial vertical. Além disso, as juntas de dedos demonstraram ter pouca influência na rigidez inicial, mas reduziram significativamente as capacidades de suporte finais das vigas *glubam*. Os modos de falha observados são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Modos de falha de vigas *glubam* com tiras grossas (a) e finas (b e c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Li Z. *et al.* (2018).

2.4.7.2 Relações Constitutivas do *glubam*

A modelagem teórica das relações constitutivas para o bambu é notavelmente complexa. Especificamente para o *glubam* feito de tiras finas, é possível desenvolver modelos constitutivos semelhantes aos usados em compósitos reforçados com fibras (Xiao, 2022).

Um modelo linear simples foi estabelecido para os dois tipos de *glubam* (Li *et al.* 2021), conforme as Equações (16) e (17).

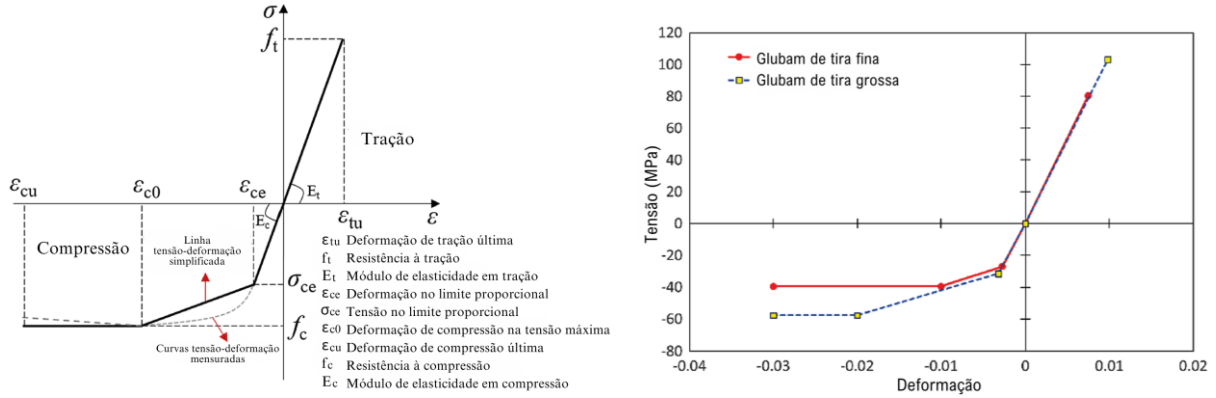
$$\sigma = E_t \varepsilon \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \quad (16)$$

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon & \varepsilon_{ce} \leq \varepsilon \leq 0 \\ E_c \varepsilon_{ce} + (\varepsilon - \varepsilon_{ce}) \frac{f_c - E_c \varepsilon_{ce}}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{ce}} & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{ce} \\ \sigma = f_c & \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \end{cases} \quad (17)$$

Aqui, ε_{tu} é a deformação de tensão final, dada por $\varepsilon_{tu} = f_t/E_t$; f_t e f_c são a resistência à tração e compressão, respectivamente. E_t e E_c são o módulo de elasticidade na tração e compressão, respectivamente. ε_{ce} é a deformação do limite proporcional, ε_{c0} é a deformação de

compressão na tensão máxima e ε_{cu} é a deformação de compressão final. A Figura 29 apresenta os modelos simplificados para o *glubam* com tira grossa e tira fina, respectivamente.

Figura 29 – a) Modelo simplificado de tensão-deformação *glubam*; b) relações tensão-deformação axial linear para dois tipos de *glubam*



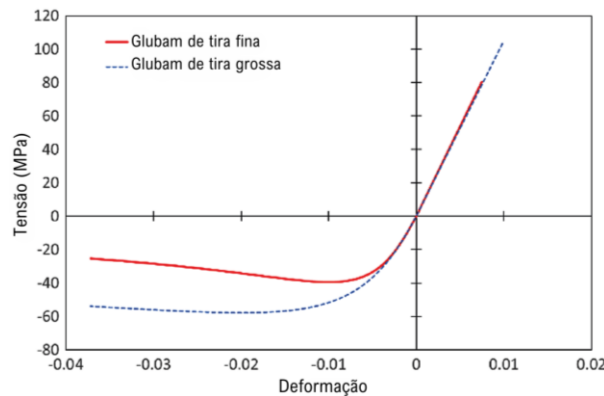
Fonte: Xiao (2022).

Um modelo mais sofisticado é sugerido para o comportamento compressivo (Xiao, 2022):

$$\sigma = \begin{cases} E_t \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ f_c \frac{xr}{r-1+x^r} & \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

Em que, x é a deformação compressiva relativa, dada por $x = \varepsilon/\varepsilon_{c0}$, r é um coeficiente, dado por $r = E_c/(E_c - f_c / \varepsilon_{c0})$, ε_{tu} é a deformação de tensão máxima, dada por $\varepsilon_{tu} = f_t/E_t$. ε_{c0} é a deformação de compressão na tensão máxima e ε_{cu} é a deformação de compressão final. Este modelo refinado utiliza seis propriedades de material e é mostrado na Figura 30 para *glubam* de tiras grossas e de tiras finas.

Figura 30 – Modelo tensão-deformação refinado para *glubam* sob compressão



Fonte: Xiao (2022).

Segundo Li Z. *et al.* (2018) as vigas *glubam* se comportaram de forma linear. A equação de equilíbrio interno do momento pode ser obtida a partir da Equação (19):

$$M = \left(f_{uc} x \left(\frac{1}{2} x + x' \right) + \frac{1}{3} x' f_{uc} \right) t n + \frac{1}{3} f_{ut} (h - x - x')^2 (n - 1) t \quad (19)$$

Na qual, n e t são o número de camadas de *plybamboo* e a espessura, respectivamente; x é a altura de escoamento da zona de compressão; x' é a altura de não escoamento da zona de compressão; h é a altura da seção transversal; f_{uc} é o valor final da tensão de escoamento de compressão; e f_{ut} é o valor final da tensão de escoamento de tração;

2.4.8 *Bamboo scrimber*

O *bamboo scrimber* (BSC) é fabricado a partir de seções trituradas do colmo de bambu, que são revestidas com uma resina, comprimidas e depois aquecidas para curar a resina (Sharma *et al.*, 2017). O processo mantém a direção longitudinal das fibras de bambu (Sharma *et al.*, 2015), conforme apresentado na Figura 31.

O *bamboo scrimber* possui a vantagem de ser facilmente processado, permitindo que os fabricantes utilizem equipamentos e tecnologias de processamento originalmente desenvolvidos para madeira (Huang; Ji; Yu, 2019).

Sun, He e Li (2020) descrevem o seguinte processo de fabricação para o *bamboo scrimber*: (1) divisão dos colmos de bambu pela metade e remoção dos nós; (2) achatamento e enrolamento das metades de bambu em feixes de fibras de bambu, que são quebrados na direção longitudinal e conectados na direção transversal; (3) secagem dos feixes de fibras até atingirem um teor de umidade de 5 a 10%, seguido pela saturação com adesivo de resina PF; (4) prensagem a quente dos feixes de fibras de bambu saturados com resina, permitindo que a resina PF cure e formando o produto final. O processo de fabricação é materialmente eficiente, utilizando cerca de 80% das matérias-primas.

Figura 31 - Processo geral de fabricação do *bamboo scrimber*



Fonte: Sharma *et al.* (2015).

Devido a esse processo de compressão, as tiras utilizadas podem ser irregulares, o que possibilita um maior aproveitamento da matéria-prima. Isso parece favorecer a obtenção de produtos finais com maior resistência e módulo, adequados para aplicações estruturais. No entanto, é importante ressaltar que a densidade desses produtos é relativamente alta, e o aumento do uso de adesivos pode ser considerado uma desvantagem (Xiao, 2022).

2.4.8.1 Propriedades físicas e mecânicas do *bamboo scrimber*

É uma característica essencial que as propriedades físicas e mecânicas do scrimber de bambu possam ser projetadas pelo ajuste de sua estrutura e tecnologia de fabricação (Huang; Ji; Yu, 2019). De acordo com Kumar *et al.* (2016), todas as propriedades mecânicas do *bamboo scrimber* variam significativamente com a densidade do material, bem como com a orientação da fibra. Uma relação linear positiva foi encontrada entre densidade e MOR (ou MOE). Nugroho e Ando (2000) também observaram que as propriedades de resistência melhoram com o aumento da densidade.

Kumar *et al.* (2016) observaram que o resultado da absorção de água a longo prazo também varia significativamente com a densidade das amostras. Segundo Shangguan *et al.* (2016), absorção de umidade diminuiu ligeiramente quando a temperatura estava abaixo de 170 °C e aumentou quando a temperatura excedeu 170 °C. A diminuição da densidade e a destruição da estrutura química podem ser as razões do aumento da absorção de umidade em altas temperaturas. Rao *et al.* (2022) observaram que o conteúdo de resina do *bamboo scrimber* está indiretamente relacionado à taxa de absorção de água.

No geral, BSC tem resistências ligeiramente superiores ao bambu laminado em todas as propriedades, com exceção do cisalhamento paralelo à fibra. O aumento da capacidade é atribuído às fibras densificadas dentro da resina de fenol formaldeído (Sharma *et al.*, 2015).

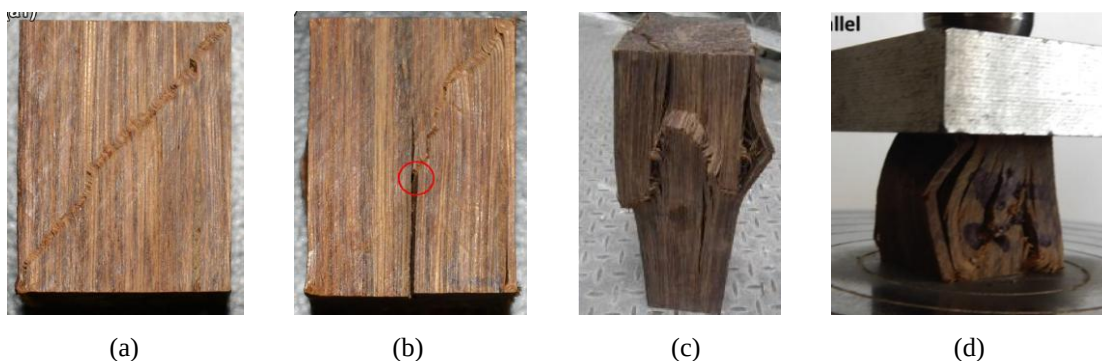
Rao *et al.* (2022) investigaram as propriedades mecânicas do *bamboo scrimber* com diferentes teores de resina. Os resultados de flexão mostraram que o MOE e o MOR foram superiores a 200 MPa e 22 GPa, respectivamente, e o conteúdo de resina não foi significativamente afetado.

Shangguan *et al.* (2016) observaram três tipos de falha na compressão paralela às fibras: falha diagonal (Figura 32a), falha final (Figura 32b) e falha tipo Y (Figura 32c). Para o tipo de falha diagonal, o deslocamento da fibra ocorreu ao longo do plano de cisalhamento (plano diagonal) durante o processo de compressão. No processo de transferência de tensão, a camada adesiva sofre delaminação e a tensão é liberada. Se a camada adesiva não puder suportar a

transferência de tensão e rachar até a extremidade, forma-se o tipo de falha de fissura final. Modos de falhas semelhantes foram observados por Li *et al.* (2020). Sob compressão paralela à fibra, também foram observados modos de ruptura por flambagem geral da seção da amostra (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013; Huang *et al.*, 2015).

Segundo Kumar *et al.* (2016), o *bamboo scrimber* se comporta como um material dúctil sobre compressão paralela às fibras. O *bamboo scrimber*, sob compressão paralela e perpendicular à fibra, apresenta estágio elástico e estágio elástico-plástico nas curvas tensão-deformação. Entretanto, os corpos de prova sob compressão paralela à fibra também apresentaram estágio plástico claro (Li *et al.*, 2020).

Figura 32 - Tipos de falha de amostras de compressão paralelas à fibra: a) falha diagonal; b) falha final; c) falha tipo Y



Fonte: Shangguan *et al.* (2016).

Na compressão perpendicular às fibras, Sharma *et al.* (2015) observaram um modo de falha caracterizado por fratura da matriz e das fibras de bambu, demonstrando ligeira influência da direção da linha de cola. Segundo Huang *et al.* (2015), na compressão perpendicular às fibras, o *bamboo scrimber* apresentou uma trinca diagonal com ângulo em torno de 45° em relação à direção do carregamento, ocasionando a falha devido ao deslizamento entre as partes superior e inferior da mesma. Os danos sob compressão transversal são, na verdade, causados pela ação de cisalhamento ao longo da interface fibra-matriz. Modos de falha típicos são ilustrados na Figura 33.

Figura 33 - Modos de falha do *bamboo scrimber* sob compressão perpendicular às fibras



(a)

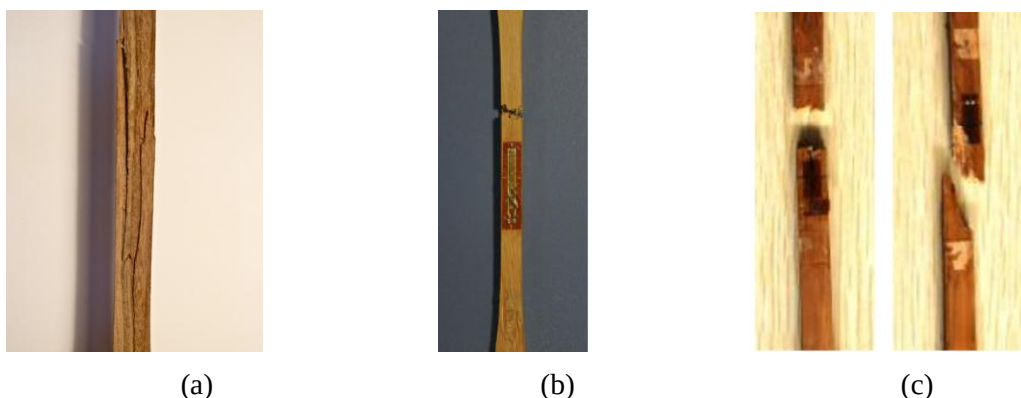
(b)

Fonte: a) Sharma *et al.* (2015); b) Kumar *et al.* (2016).

Segundo Sharma *et al.* (2015), na tração paralela e perpendicular às fibras as amostras exibiram comportamento linear antes da ruptura. A maioria das falhas ocorreu em vários locais dentro da amostra e através do bambu, e não dentro do adesivo. Kumar *et al.* (2016) observaram comportamento frágil tanto na direção paralela quanto perpendicular à fibra. Comportamento semelhante foi observado por Huang *et al.* (2015). Modos de falhar típicos são ilustrados na Figura 34.

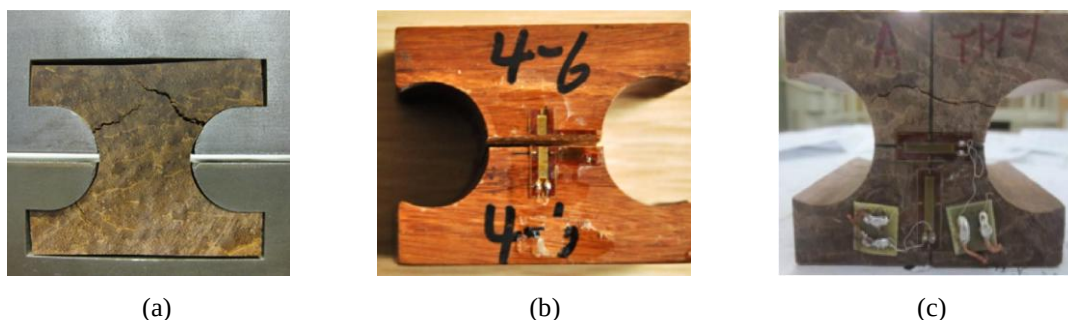
Dongsheng, Aiping e Yuling (2013) observaram que a ruptura do corpo de prova tracionado paralelamente às fibras se deve à ruptura na seção intermediária. Huang *et al.* (2015) observaram dois modos de falha: um no qual as superfícies quebradas eram planas e perpendiculares ao eixo longitudinal, e outro no qual as superfícies quebradas eram inclinadas em relação ao eixo longitudinal (Figura 34c). Segundo Li *et al.* (2020), as fibras ao redor dos nós naturais do bambu são pontos fracos e as amostras foram quebradas primeiro em torno desses pontos.

Figura 34 – Modos de falha típicos sob tração paralela às fibras do *bamboo scrimber*



Fonte: a) Sharma *et al.* (2015); b) Kumar *et al.* (2016); c) Huang *et al.* (2015).

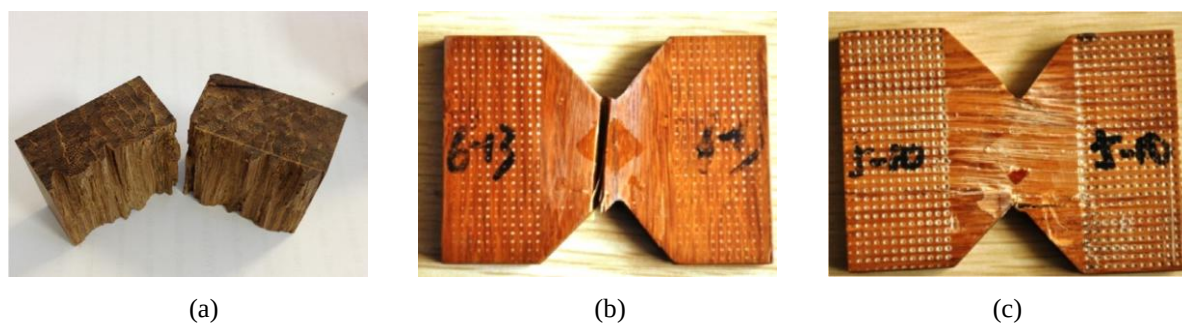
Segundo Li *et al.* (2020), algumas das amostras sob tração perpendicular à fibra apresentaram estágio não linear nas curvas de tensão-deformação. No caso de tensão perpendicular às fibras, as tensões normais são transmitidas através da matriz e das fibras. Como a resistência à tração da matriz é muito menor que a das fibras, a resistência das fibras não pode ser exercida e o dano ocorre no material da matriz, a falha do compósito é atribuída à fratura da matriz (Huang *et al.*, 2015). Alguns modos de falha típicos são ilustrados na Figura 35.

Figura 35 - Modos de falha do *bamboo scrimber* sob tração perpendicular à fibra

Fonte: a) Sharma *et al.* (2015); b) Dongsheng, Aiping e Yuling (2013); c) Li *et al.* (2020).

Kumar *et al.* (2016) observou falha por delaminação repentina no ensaio de cisalhamento. A resina pode não penetrar uniformemente nos feixes de bambu mais densos e essa pode ser a razão para a ruptura repentina da amostra. O modo de falha observado por Sharma *et al.* (2015) foi a fratura ao longo do plano de cisalhamento paralelo às fibras.

Em Huang *et al.* (2015), o cisalhamento no plano paralelo e transversal à fibra mostram quase o mesmo modo de falha, ambas foram rasgadas simetricamente em duas partes ao longo da fissura localizada centralmente nos entalhes em V ao longo do eixo de carregamento (Figura 36b). Enquanto no cisalhamento perpendicular às fibras, as fibras próximas ao entalhe foram submetidas à ação de tração, resultando em rachaduras paralelas à direção da fibra (Figura 36c).

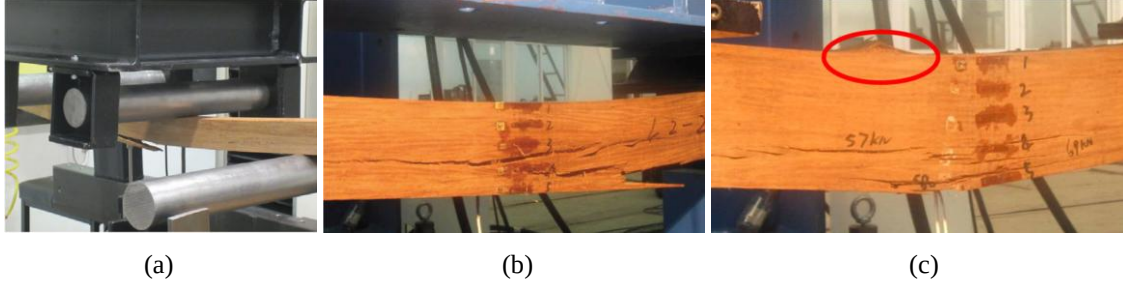
Figura 36 - Modos de falha do *bamboo scrimber* sob cisalhamento

Fonte: a) Sharma *et al.* (2015); b) e c) Huang *et al.* (2015).

Sob flexão, o *bamboo scrimber* pode alcançar grandes deslocamentos antes da falha (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013; Sharma *et al.*, 2015). Segundo Dongsheng, Aiping e Yuling (2013), o mecanismo de dano por flexão das vigas pode ser assumido que: as vigas podem ser idealizadas como elemento elástico perfeito no início do carregamento; com o aumento do carregamento, as fibras no topo da zona compressiva atingem primeiro o estado plástico e a tensão delas vai gradualmente chegando à resistência máxima à compressão de fora estendendo-se para dentro da viga; e a tensão das fibras na parte externa da zona de tração é finalmente atingida pela resistência à tração máxima e então quebrada. E em alguns casos pode-se observar

abaulamento na superfície superior das vigas (Figura 37c). Outros estudos também observaram ruptura típica por tração das fibras mais externas no meio do vão da amostra (Li *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2015). Modos de falha típicos são ilustrados na Figura 37.

Figura 37 - Modos de falha típicos para amostras de flexão do *bamboo scrimber*

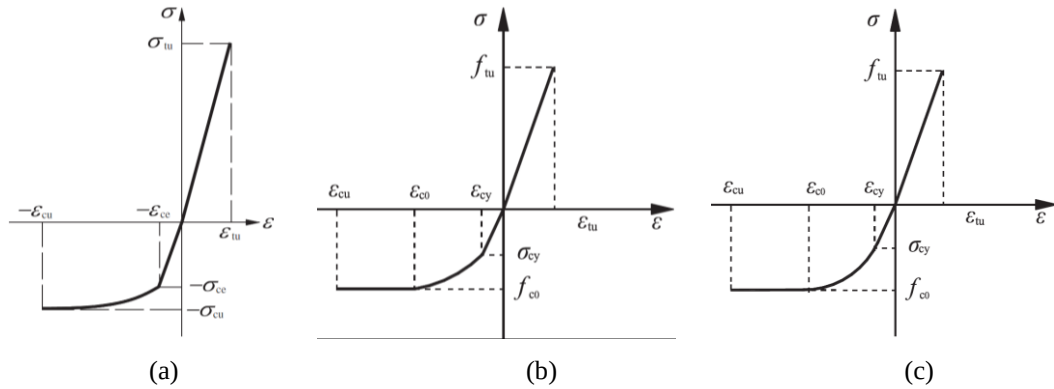


Fonte: a) Sharma *et al.* (2015); b) e c) Dongsheng, Aiping e Yuling (2013).

2.4.8.2 Relações constitutivas do *bamboo scrimber*

O mecanismo de danos e a lei constitutiva desempenham um papel importante na análise e projeto estrutural (Huang *et al.*, 2015). Segundo Dongsheng, Aiping e Yuling (2013) as relações tensão-deformação uniaxiais na direção paralela à fibra do BSC podem ser descritas pelas curvas mostradas na Figura 38a, das quais o segmento não linear pode ser simulado por polinômio quadrático.

Figura 38 - Relações tensão-deformação uniaxiais



Fonte: a) Dongsheng, Aiping e Yuling (2013); b) e c) Li *et al.* (2020).

Portanto, as equações que descrevem as relações tensão-deformação do BSC (Figura 38a) podem ser expressas como (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013):

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \lambda_1 \varepsilon^2 + \lambda_2 \varepsilon + \lambda_3 & -\varepsilon_{cu} \leq \varepsilon \leq -\varepsilon_{ce} \\ E_c \varepsilon & -\varepsilon_{ce} \leq \varepsilon \leq 0 \\ E_t \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (20)$$

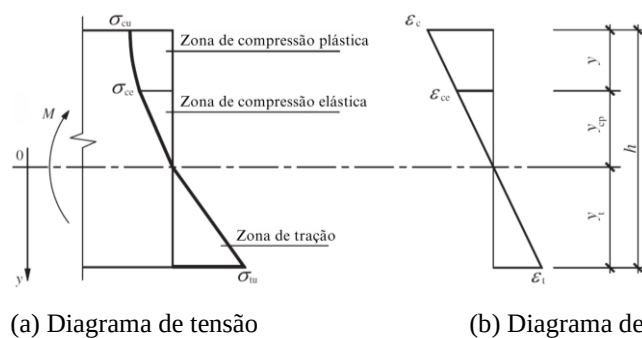
Aqui, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ são calculados conforme Dongsheng, Aiping e Yuling (2013); ε_{cu} é a deformação última de compressão, ε_{ce} é a deformação correspondente ao limite proporcional;

Li *et al.* (2020) apresentaram três modelos de relação tensão-deformação para o *bamboo scrimber* sob tração e compressão paralelas à fibra, a saber, o modelo com quatro segmentos retos, o modelo de função quadrática (Figura 38b) e o modelo de função cúbica (Figura 38c). Os dois últimos modelos fornecem uma melhor previsão da relação tensão-deformação no estágio elasto-plástico.

Huang *et al.* (2015) identificaram quatro tipos de relações tensão-deformação com base em experimentos de tração, compressão e cisalhamento em BSC. As amostras sob tração paralela à fibra, cisalhamento paralelo e transversal à fibra exibiram comportamento linear completo desde o carregamento até a falha. O modelo de tensão-deformação do BSC sob compressão paralela à fibra pode ser expresso por um polinômio de segunda ordem, apresentando três seguimentos: um seguimento inicial linear; um seguimento não linear entre a tensão de escoamento e de pico; e um seguimento de amolecimento não linear após o pico a tensão de pico. Quando submetido à compressão e cisalhamento perpendiculares à fibra, as curvas tensão-deformação do BSC apresentam dois seguimentos, um linear e outro não linear. Sob tração perpendicular à fibra, o BSC exibe características não lineares aproximadamente completas durante todo o processo de carregamento.

A distribuição de deformações na direção paralela às fibras ao longo da profundidade da seção permanece aproximadamente linear desde o início do carregamento até a falha. Assim, a suposição do plano, isto é, seções planas antes da flexão permanecem planas após a flexão, é quase corrigida para a flexão das vigas de BSC. Portanto, a influência do efeito cortante na flexão da viga pode ser desprezada (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013). Portanto, os diagramas de tensão e deformação ao longo da seção de momento podem ser traçados conforme mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Diagramas de tensão e deformação ao longo da seção de momento



Fonte: Dongsheng, Aiping e Yuling (2013).

Portanto, a tensão em relação à coordenada y pode ser expressa pela Equação (21):

$$\sigma(y) = \begin{cases} f(y) & -(y_c + y_p) \leq y \leq -y_c \\ E_c k_p y & -y_c \leq y \leq 0 \\ E_t k_p y & 0 \leq y \leq y_t \end{cases} \quad (21)$$

Em que, E_c e E_t são os módulos de compressão e tração, respectivamente; k_p é a curvatura da viga na seção de momento; y_p , y_c e y_t são as profundidades das zonas plástica, compressiva e de tração, respectivamente.

Segundo Dongsheng, Aiping e Yuling (2013), o momento na seção pode ser expresso como:

$$M = M_s + \frac{wk_p}{3} (E_c y_c^3 + E_t y_t^3) \quad (22)$$

Aqui, M_s é o momento produzido pela força de compressão na zona plástica, k_p é a curvatura da viga trabalhando em estado não linear e w é a largura da seção.

Supondo que o vão de momento esteja em estado não linear e sua curvatura seja k_p , enquanto que o vão de cisalhamento permaneça em estado elástico e sua curvatura seja k_e , Dongsheng, Aiping e Yuling (2013) forneceram a equação da curvatura do segmento de momento puro da viga:

$$y = -\frac{1}{4} k_0 F a \left(x^2 - lx + \frac{1}{3} a^2 \right) \quad a \leq x \leq l/2 \quad (23)$$

$$k_0 = \frac{3(1 + \sqrt{\xi})^2}{\xi E_c b h^3} \quad (24)$$

Na qual, F é a carga aplicada, a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio, l é o comprimento do vão, b é o comprimento do vão sob flexão pura e h é altura da seção transversal.

2.5 PADRÕES E CÓDIGOS DE BAMBU

O bambu e suas diversas formas surgem como um novo material para a construção moderna. No entanto, sua utilização estrutural ainda carece de especificações completas. A disponibilidade de documentos técnicos para testes, certificação e orientações de projeto, fabricação e construção é limitada (Xiao, 2022).

As características do bambu, como suas propriedades mecânicas, físicas e anatômicas, são influenciadas por diversos fatores ambientais. Dessa forma, a extrapolação e utilização de dados entre diferentes localidades e espécies de bambu se tornam desafiadoras, devido às variações e à utilização de diferentes metodologias (Hidalgo-López, 2003).

No final do século XX, deu-se início ao esforço de desenvolver padrões para a utilização do bambu como elemento construtivo e estrutural (Amede *et al.*, 2021). Em 1973, surgiu a primeira norma sobre testes físicos mecânicos do bambu, intitulada “*Indian Standard 6874 - Method of tests for bamboo*”, que posteriormente foi reeditada em 2008. Além disso, em 2012, a Índia publicou a norma denominada “*Indian Standard (IS) 15912-2012: Structural Design using Bamboo - Code of Practice*”, para regulamentar o uso do bambu em construções (Marçal, 2018).

Em 2004, a ISO elaborou três normas específicas para o bambu. A ISO (2004a), designada como ISO 22156, abrange as especificações para o projeto estrutural de bambu, incluindo colmo completo, meio colmo e estruturas de bambu laminado. As ISO (2004b) e (2004c), designados como ISO 22157, abrangem uma variedade de testes que visam determinar as propriedades mecânicas do bambu. Esses testes incluem análises do teor de umidade, densidade, tração, compressão, cisalhamento e resistência à flexão (Fahim *et al.*, 2022).

Apesar do amplo uso do bambu como material de construção alternativo e sustentável, seu emprego como elemento de design estrutural é limitado devido à falta de padrões e códigos abrangentes. Essa ausência de diretrizes adequadas tem gerado hesitação na indústria em utilizar o bambu para construir elementos estruturais (Amede *et al.*, 2021).

Atualmente, cerca de dezessete países possuem padrões nacionais relacionados à construção em bambu. Entre eles, nove dispõem de normas desenvolvidas pelo próprio país, incluindo Brasil, Colômbia, Peru, China, Índia, Etiópia, Nepal, Uganda e Estados Unidos. Os demais países – Equador, Indonésia, Filipinas, Vietnã, Quênia, Itália, Reino Unido e Holanda – adotam padrões ISO como seus padrões nacionais diretamente, que é a forma mais eficiente de ser recomendada a países interessados em construção em bambu. No Quadro 2, são apresentadas as normas e códigos existentes sobre bambu.

Quadro 2 - Normas e códigos de bambu existentes

País	Códigos	Normas
China		JG/T 199:2007 Método de teste para propriedades físicas e mecânicas do bambu usado na construção

		GB/T 15780:1995 Métodos de teste para propriedades físicas e mecânicas de bambus GB/T 37805:2019 Tubo composto de enrolamento de bambu GB/T 38071:2019 Cortina de tira de bambu laminada estrutural Madeira serrada GB/T 40487:2021 Madeira lamelada de bambu estrutural GB/T 2690:2000 Madeira de bambu JG/T 428:2014 Forma composta de <i>plybamboo</i> com estrutura de aço
Índia	Código Nacional de Construção da Índia, seção 3 – Madeira e bambu: 3B, 2010 9096:1979 Código de práticas para preservação de bambu para fins estruturais	IS 6874:2008 Método de testes para bambus roliços IS 15912:2012 Projeto estrutural usando bambu – código de prática IS 16096:2013 Bambus – Painel composto de bambu e juta para portas ocas – Especificação IS 16073:2013 Bambus – Painel composto de bambu e juta para portas – Especificação IS 7344:1974 Postes de barraca de bambu IS 8242:1976 Métodos de testes para bambus partidos IS 13958:1994 Especificação para placa de esteira de bambu para uso geral
Colômbia	Regulamentos colombianos de construção resistente a terremotos – capítulo G12 Estruturas de <i>Guadua</i> , 2010	NTC 5407:2006 Uniões de Estruturas com <i>Guadua angustifolia Kunth</i> NTC 5525:2007 Métodos e testes para determinação das propriedades físicas e mecânicas de <i>Guadua angustifolia Kunth</i> NTC 6338:2019 Caixotão com <i>Guadua angustifolia Kunth</i> NTC 6413:2020 Estruturas de bambu – classificação de colmos de bambu – princípios e procedimentos básicos
Equador	Norma Equatoriana de Construção – capítulo 17 Uso de <i>Guadua Angustifolia Kunth</i> na Construção, 2011	INEN 42:1976 Cana de Bambu <i>Guadua</i>
Peru	Regulamentos Nacionais de Construção, Seção III. Código E100 – Projeto e Construção com Bambu, 2012	E-100:2012 Norma técnica – Bambu
Brasil		ABNT NBR 16828-1:2020 Estruturas de bambu Parte 1: projeto ABNT NBR 16828-2:2020 Estruturas de bambu Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu

EUA	ASTM D5456:2013 Especificação padrão para avaliação de produtos de madeira composta estrutural
Etiópia	ES 6416:2021 Projeto de estruturas de bambu ES 6417:2021 Preservação de bambu para fins de construção
Nepal	NBC 204:1994 Diretrizes para construção de edifícios resistentes a terremotos: construção de terra (EB) (parte 3 materiais 3.4 bambu; parte 9 9.3 bambu para pisos e telhados; parte 10 componentes resistentes a terremotos)
Uganda	US 2114:2020 Preservação de bambu e cana para fins estruturais – Código de prática
Internacional	ISO 22156:2004 Bambu – projeto estrutural ISO 22157-1:2004 Bambu – determinação das propriedades físicas e mecânicas – parte 1: requisitos ISO 22157-2:2004 Bambu – determinação de propriedades físicas e mecânicas – parte 2: manual de laboratório ISO 19624:2018 Estruturas de bambu — Classificação do colmo de bambu — Princípios e propriedades básicas ISO 23478:2022 Estruturas de bambu – Produtos de bambu projetados – Métodos de teste para determinação de propriedades físicas e mecânicas ISO 5257:2023 Estruturas de bambu – Produtos de bambu projetados – Métodos de teste para determinação de propriedades mecânicas usando amostras de tamanho pequeno

Fonte: Adaptado de Amede *et al.* (2021), Gatóo *et al.* (2014) e Kewei *et al.* (2022).

Ao longo dos últimos anos, devido à ausência de normas que especifiquem métodos de teste adequados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas de produtos de bambu engenheirado, tanto de amostras pequenas quanto de amostras em escala real, diversos pesquisadores testaram produtos de bambu engenheirado com base em métodos de testes desenvolvidos para madeira e madeira engenheirada.

Diversos estudos utilizaram a ASTM D143 (ASTM, 2023), Métodos de teste padrão para pequenas amostras claras de madeira, para a realização de ensaios experimentais de tração, compressão, cisalhamento e flexão em pequenas amostras de bambu engenheirado (Chen *et al.*, 2020; Correal *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2015; Li, Haitao *et al.*, 2019; Ni *et al.*, 2016; Sharma

et al., 2015; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015; Sinha; Way; Mlasko, 2014; Takeuchi; Estrada; Linero, 2018; Wu; Xiao, 2018).

Outras normas ASTM tais como, ASTM D198 (ASTM, 2022), Métodos de teste padrão para testes estáticos de madeira serrada em tamanhos estruturais, e a ASTM D1037 (ASTM, 2020), Métodos de teste padrão para avaliar propriedades de materiais de painéis de partículas e fibras à base de madeira, foram empregadas para investigação das propriedades mecânicas de produtos engenheirados de bambu (Dongsheng; Aiping; Yuling, 2013; Li, Hai-Tao *et al.*, 2016; Li, Haitao *et al.*, 2018; Sinha; Way; Mlasko, 2014; Sulastiningsih; Nuwarti, 2009).

As normas europeias EN 373 (BS, 1957), Métodos de teste de pequenas amostras claras de madeira, EN 408 (CEN, 2012), Estruturas de madeira – madeira estrutural e madeira laminada colada, EN 384 (CEN, 2016), Madeira Estrutural – Determinação de valores característicos de propriedades mecânicas e densidade, também foram utilizadas para avaliação do desempenho estrutural de produtos de bambu engenheirado (Sharma *et al.*, 2015, 2017; Sharma; Gatóo; Ramage, 2015).

Normas chinesas que fornecem metodologias para determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira também foram empregadas na avaliação das propriedades de produtos de bambu engenheirado. Entre elas cita-se a JG/T 199 (2007), Métodos de ensaio para propriedades físicas e mecânicas do bambu utilizado na construção, GB/T 1931 (SAC, 2009a), Método para determinação do teor de umidade da madeira, GB/T 1933 (SAC, 2009b), Método para determinação da densidade da madeira e a GB/T 1936.1 (SAC, 2009c), Método de teste de resistência à flexão de madeira (He *et al.*, 2015; Nugroho; Ando, 2001; Shangguan *et al.*, 2016; Wu; Xiao, 2018).

Embora os modos de falha e resistências observados pareçam ser semelhantes aos da madeira, são necessárias mais pesquisas para compreender as influências e a aplicabilidade dos métodos de teste baseados em madeira para bambu engenheirado (Sharma *et al.*, 2015).

A primeira norma internacional sobre bambu engenheirado para uso estrutural foi publicada em 2022, denominada ISO 23478 (ISO, 2022), Estruturas de bambu – Produtos de bambu engenheirado – Métodos de teste para determinação de propriedades físicas e mecânicas (ISO, 2022), representando um marco crucial no desenvolvimento de produtos de bambu engenheirado padronizados para uso na construção. Este documento é aplicável a formas prismáticas de bambu laminado colado e *bamboo scrimber* destinados a resistir à flexão, cisalhamento, cargas axiais ou combinações destes.

No final de 2023, um novo padrão internacional para bambu engenheirado foi lançado pela ISO, conhecido como ISO 5257, Estruturas de bambu – Produtos de bambu engenheirado – Métodos de ensaio para determinação de propriedades mecânicas utilizando corpos de prova de pequeno porte (ISO, 2023). Essa norma fornece aos usuários um método de teste alternativo à ISO 23478 para determinar as seguintes propriedades: resistência à tração paralela à fibra; módulo de tração paralelo à fibra; resistência à compressão paralela à fibra; resistência à tração perpendicular à fibra; módulo de tração perpendicular à fibra; resistência à compressão perpendicular à fibra; módulo de compressão perpendicular à fibra; resistência ao cisalhamento paralelo à fibra e módulo de cisalhamento paralelo à fibra.

No final de 2024, foi publicada a primeira norma ISO para bambu laminado colado estrutural, a ISO 7567 – Estruturas de bamboo — Bambu laminado colado — Especificações do produto. Esta norma estabelece os requisitos para componentes de bambu laminado colado destinados a aplicações estruturais. Embora atualmente a maior parte do bambu laminado colado seja produzida a partir do bambu mossô, a norma também se aplica a outras espécies de bambu, como *Guadua angustifolia* e *Dendrocalamus asper*, desde que seja demonstrado que o desempenho exigido por este documento foi alcançado. Os requisitos básicos são aplicáveis a membros estruturais em todas as classes de serviço (ISO, 2024).

2.6 ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE

As mudanças climáticas estão se intensificando a um ritmo sem precedentes, impulsionadas pelas emissões humanas de gases do efeito estufa (GEE), especialmente dióxido de carbono (CO₂) (Nath; Sileshi; Das, 2020). As emissões resultantes da fabricação de concreto, aço e alumínio utilizados na construção de edifícios são estimadas em cerca de 6% das emissões globais (IEA, 2022). Outros materiais como tijolos e vidro, representam cerca de 2-4% das emissões globais. Somados, estes representariam cerca de 9% da energia operacional global e das emissões relacionadas com os processos (UN ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022).

De acordo com um relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) (OCDE, 2019), os materiais de construção deverão dominar o consumo de recursos nas economias em desenvolvimento em rápido crescimento, prevendo-se que as emissões relacionadas com os materiais de construção aumentem entre 3.5 e 4.6 Gt CO₂eq/ano até 2060.

Para a seleção e implementação de novos materiais de construção, os inovadores nesta área estão a trabalhar em duas frentes principais: (1) reduzir as emissões de materiais de

construção convencionais e (2) aumentar a quota de mercado de materiais de construção alternativos, como soluções locais de baixo carbono e materiais híbridos e de base biológica (United Nations Environment Programme, 2022). Portanto, há necessidade de recursos renováveis alternativos que sejam financeiramente viáveis, estruturalmente fortes e duráveis, e ambientalmente sustentáveis (Fahim *et al.*, 2022).

Nesse cenário, o crescente interesse numa economia baseada em recursos biológicos renováveis e um maior foco na redução de GEE para cumprir as metas climáticas proporcionam muitas oportunidades para o bambu como um recurso renovável versátil e de rápido crescimento (Van Der Lugt; Nicholson, 2023).

O bambu é um vasto recurso de desenvolvimento inexplorado que os países das regiões tropicais e subtropicais do mundo podem explorar de diversas formas para oferecer soluções inteligentes de mitigação e adaptação climática (INBAR, 2014). As florestas de bambu auxiliam no controle de erosão e na conservação de solo, bem como, na melhoria da fertilidade do solo e no sequestro de carbono da atmosfera (Nath; Sileshi; Das, 2020). Estudos indicam que certas espécies de bambu podem armazenar de 94 a 392 tC/ha, contribuindo assim para a mitigação das emissões de carbono (Van Der Lugt; Thanglong; King, 2018).

Além disso, o bambu armazena aproximadamente 45% de carbono em sua biomassa, tornando-se um sumidouro de carbono altamente eficaz. Esse percentual é comparável ao de outras espécies de crescimento rápido, como o pinheiro e o eucalipto, também reconhecidas por seu papel no sequestro de carbono (Carbonari; Carbonari, 2023).

O bambu possui vários atributos únicos. Regenera-se rapidamente e pode ser colhido sem necessidade de replantio. Assim, o bambu pode ser obtido de forma sustentável para criar uma grande quantidade de materiais de construção. O carbono armazenado no bambu pode durar várias décadas na forma de produtos de bambu duráveis e de alto valor, podendo durar ainda mais se o material for reutilizado ou reciclado (Van Der Lugt; Nicholson, 2023). Portanto, se produtos de bambu forem empregados na construção de habitações, o carbono poderá ser armazenado por décadas, ou até mais tempo (Kewei *et al.*, 2022).

O bambu ganhou popularidade na comunidade de construção verde porque é um material renovável, natural e biodegradável (Bonilla *et al.*, 2010). Existe um espaço real para a industrialização de produtos de bambu para construção, uma vez que podem proporcionar benefícios sustentáveis devido às suas características de baixa emissão de carbono (De Araujo *et al.*, 2023). Entre os muitos produtos derivados do bambu que fortalecem a adaptação estão aqueles utilizados para construir habitações climaticamente inteligentes (INBAR, 2014).

O ciclo de colheita do bambu dura de 3 a 5 anos, significativamente mais rápido do que as florestas de madeira, que normalmente levam 25 anos. Além disso, o bambu produz doze vezes mais material de construção verde do que madeira (Yadav; Mathur, 2021). Uma plantação de bambu *Guadua* pode armazenar e reduzir 401 tC/ha, enquanto uma de bambu *Mossô* armazena cerca de 295.7 tC/ha. Em contrapartida, uma plantação de abetos chineses armazenará e reduzirá cerca de 236.7 tC/ha (Van Der Lugt; Nicholson, 2023).

Em um estudo de Bonilla *et al.* (2010), a metodologia de contabilidade de energia foi utilizada para avaliar a sustentabilidade da produção de bambu na Austrália, China e Brasil. Esta classificação baseou-se na relação entre produção e impacto ambiental. Com base nesta abordagem de avaliação de eficiência, o Brasil e a Austrália ficaram em primeiro e segundo lugar, respectivamente. Embora o Brasil tenha tido a menor eficiência geral na produção, foi capaz de fornecer o abastecimento mais sustentável dos três países examinados.

A adoção de sistemas de construção baseados em bambu pode auxiliar os países produtores desse material a alcançarem os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) na área da habitação, enquanto também contribui para os esforços globais de redução de CO₂ e mitigação das mudanças climáticas (Escamilla *et al.*, 2018).

Em um estudo realizado por Van der Lugt, Van den Dobbelsteen e Janssen (2006), foi conduzida uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) do bambu roliço para quantificar seus efeitos ambientais como material de construção. Os resultados revelaram que, em determinadas aplicações, o bambu alcançou um “fator 20” de impacto ambiental, indicando uma carga no ambiente 20 vezes menor do que as alternativas convencionais atualmente utilizadas.

Recentes avanços no processamento e desenvolvimento de produtos têm ampliado a quantidade de bambu convertida em materiais duráveis, como móveis e materiais de construção (INBAR, 2014). Quando cultivados e colhidos em florestas geridas de forma sustentável, o bambu armazena mais CO₂ durante o crescimento do que emite durante a produção. Essa tendência também se aplica aos produtos de bambu engenheirado (Van Der Lugt; Nicholson, 2023).

Os impactos ambientais dos materiais de construção à base de bambu aumentam em relação ao seu nível de industrialização. Uma diferença significativa no impacto ambiental pode ser observada entre produtos industrializados e artesanais (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

A falta de familiaridade e experiência com bambu tem sido identificada como uma das causas principais da ineficiência e dos custos desnecessários associados à construção com esse

material. Espera-se que esses problemas diminuam à medida que a familiaridade com o bambu aumenta (Mahdavi *et al.*, 2011).

Reduzir o teor de cola e encontrar alternativas de cola não tóxicas e de base biológica, reciclar e reutilizar produtos de bambu engenheirado usados em edifícios projetados para desmontagem são elementos-chave para reduzir ainda mais a pegada de carbono desses produtos (Van Der Lugt; Nicholson, 2023).

Escamilla *et al.* (2018) avaliaram o impacto ambiental causado pelo uso de quatro matérias de construção diferentes (bambu, tijolo, bloco oco de concreto e bambu engenheirado) em edifícios, por meio de uma ACV. A ACV considerou a extração, produção, transporte e utilização dos materiais de construção. A avaliação foi localizada geograficamente na Colômbia. Os resultados mostram que o uso de bambu engenheirado proporciona o menor impacto ambiental por unidade funcional para um edifício de vários andares, enquanto a construção tradicional de bambu seria a melhor opção para casas térreas.

2.7 A INDÚSTRIA DO BAMBU

2.7.1 A indústria do bambu ao redor do mundo

À medida que são estabelecidos padrões mais elevados para promover a sustentabilidade na indústria da construção, a utilização crescente de materiais de construção ecológicos tem contribuído para o comércio internacional de produtos de bambu (Liu *et al.*, 2020).

Apesar das inúmeras possibilidades de uso, o bambu enfrenta desafios no que se refere ao comércio, devido a equívocos relacionados ao material e outros motivos, principalmente a falta de conhecimento sobre seus benefícios e aplicações (Silva *et al.*, 2023).

A importância desse valioso recurso biológico tem sido amplamente reconhecida em escala global ao longo dos anos. Como resultado, várias nações que não possuem a ocorrência de espécies nativas de bambu estão começando a explorar o potencial desse biomaterial no contexto do projeto de edificações sustentáveis (De Araujo *et al.*, 2023). Possivelmente impulsionados pelo consumo de produtos de bambu provenientes de países em desenvolvimento, nas últimas décadas têm surgido na Europa edifícios e estruturas construídos com base no bambu (Janssen, 2000).

Diversos países, como Peru, Colômbia, Equador, China, Filipinas, Índia, Uganda, Madagascar, Etiópia e Ruanda, adotaram estratégias nacionais para regular e impulsionar o desenvolvimento dos setores relacionados ao bambu (Kewei *et al.*, 2022).

Os produtos de bambu engenheirado têm potencial para utilização na indústria da construção na China devido a suas diversas vantagens (Xing *et al.*, 2018). Essas vantagens incluem uma excelente relação entre resistência e peso, capacidade antissísmica, compatibilidade ambiental e economia no processo de pré-fabricação (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

No entanto, o desenvolvimento da tecnologia de bambu engenheirado ainda enfrenta diversos obstáculos, como a falta de legislações e códigos de projeto e construção adequados. A China possui 1120 empresas envolvidas em produtos de bambu e apenas 9.2% estão relacionadas à indústria de construção, com base no Terceiro Censo Industrial Nacional (Xing *et al.*, 2018).

Xing *et al.* (2018) realizaram uma *survey* com nove membros da indústria da construção para investigar a situação atual e a adequação do bambu para a produção de painéis laminados. Do ponto de vista das empresas, a disponibilidade no mercado é a maior barreira para limitar o uso do bambu engenheirado. Outros fatores incluem custo do material, tecnologia e desempenho ao fogo também são obstáculos ao desenvolvimento desses materiais, bem como, a falta de conhecimento sobre o material.

Estima-se que as florestas de bambu na África cubram mais de 1.5 milhões de hectares. De acordo com estudos realizados sobre a utilização do bambu na África, constatou-se que esse recurso natural é subvalorizado em comparação aos produtos de madeira. Além disso, seus usos predominantes ainda se baseiam em práticas tradicionais, havendo apenas um número limitado de empresas de manufatura relatadas até o momento (Zea Escamilla *et al.*, 2019).

Em Gana, o bambu é amplamente utilizado em áreas rurais e urbanas para diversos fins construtivos. Esse versátil recurso é empregado na construção de cercas, andaimes, estruturas para casas de barro, adereços, vigas, materiais para telhado e na amarração de palha em coberturas residenciais. Ademais, a aplicação do bambu no país se estende à produção e utilização de produtos processados, tais como painéis de bambu compensado, pisos, persianas, portas e móveis. Essa diversidade de usos demonstra a importância e a viabilidade do bambu como material de construção e componente chave na indústria de transformação do Gana (Obiri; Oteng-Amoako, 2007).

Na Nigéria, a taxa de uso de bambu ainda é baixa. O bambu é usado em áreas rurais para construir casas de barro onde os colmos servem como armações estruturais (Atanda, 2015). O bambu é tradicionalmente usado em andaimes, casas de sombra, cercas e fabricação de

móveis. Outros usos de bambu para construção na Nigéria incluem elementos estruturais para edifícios, painéis à base de bambu e móveis (Ladapo; Oyegoke; Bello, 2017).

Na Etiópia, existem duas espécies nativas de bambu, cuja distribuição abrange uma extensão territorial superior a 1 milhão de hectares. Nas regiões rurais etíopes, onde o bambu é abundante, a população local utiliza os colmos desse material para diversas finalidades, como a construção de moradias, a delimitação de cercas e a produção de móveis. Essa prática tradicional reflete a relevância do bambu como recurso versátil e sustentável para atender às necessidades socioeconômicas das comunidades locais (Desalegn; Tadesse, 2014).

No Quênia, a construção tradicional de bambu desempenha um papel significativo ao oferecer uma alternativa econômica para criar casas duráveis, saudáveis e seguras. Apesar das preocupações sobre o uso do bambu como material de engenharia, existe um potencial promissor para aprimorar elementos estruturais e otimizar sistemas por meio de métodos de bambu projetado. No entanto, o desenvolvimento de compósitos estruturais de bambu ainda está em progresso, especialmente em nações africanas (Habibi; Obonyo; Memari, 2023).

O bambu engenheirado possui potencial para se tornar um produto competitivo no mercado. Com avanços contínuos em pesquisa e desenvolvimento, o bambu engenheirado tem o potencial de se tornar uma alternativa competitiva e sustentável aos materiais estruturais convencionais (Sharma *et al.*, 2015).

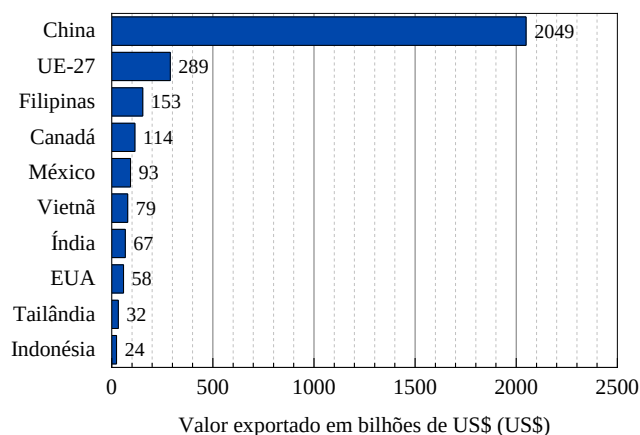
2.7.2 Mercado internacional

Em 2019, o comércio internacional de produtos de bambu atingiu cerca de 3.054 bilhões de dólares, o que representa um aumento significativo (cerca de 100%) em relação a 2017. Isto se deve à gama recentemente alargada de códigos dos Sistemas Harmonizados de Descrição e Codificação de Mercadorias (HS) para produtos de bambu, que permitem aos países reportar com maior precisão o comércio. Entretanto, é provável que os números apresentados ainda sejam subestimados e que muitos produtos continuem a ser erroneamente classificados como madeira (INBAR, 2021a).

Os três principais mercados de exportação de bambu são a Ásia (81%), Europa (10%) e América do Norte (9%). Enquanto as principais importações são: Europa (33%), América do Norte (32%) e Ásia (31%). Apesar da sua abundância natural de bambu, África é responsável por menos de 1% das exportações. Outras regiões do mundo, incluindo a América do Sul e Central, exportaram ainda menos (UNCTAD, 2022).

A Figura 40 mostra os principais países exportadores de produtos de bambu em 2019. Apesar da baixa ou inexistente produção local de bambu, os avançados métodos de processamento encontrados na Europa e na América do Norte são responsáveis pelos elevados níveis de comércio de produtos de bambu nessas regiões (INBAR, 2021a).

Figura 40 – Principais exportadores de produtos de bambu em 2019



Fonte: Adaptado de INBAR (2021a).

Os tipos de produtos comercializados por cada país variam amplamente e incluem utensílios de cozinha, artigos de uso diário, produtos tecidos de bambu, móveis, materiais de construção, entre outros (INBAR, 2021a). Pela Tabela 7, se especificam os produtos de bambu engenheirado, para aplicação na construção, conforme o código HS e sua participação nas exportações globais em 2019.

Tabela 7 – Códigos HS para produtos de bambu e sua participação nas exportações globais em 2019

Código HS	Produtos	Categoria	Valor exportado*	% do total exportado*
440921	Piso de bambu	Painéis à base de bambu	116	3.4
441210	Bambu compensado		122	3.6
441873	Painéis de piso de bambu montados usados para construção	Painéis de bambu para construção	51	1.5
441891	Outros painéis de bambu usados para construção		203	5.9

Legenda: * Os valores apresentados estão em milhões de dólares.

Fonte: Adaptado de INBAR (2021a).

O código HS 440921 engloba produtos denominados madeira de bambu, incluindo ripas e frisos para parquet, não montados. Em 2020, as exportações totais em valor de madeira de bambu foram de aproximadamente US\$ 98.3 milhões. O maior exportador foi a China, responsável por aproximadamente 90% do total de exportações. Entre os principais

exportadores, estão Estados Unidos, Holanda, Reino Unido e Sérvia. Enquanto os cinco principais importadores foram França, Malásia, Reino Unido, Austrália e Alemanha (UNCTAD, 2022).

O código HS 441210 inclui produtos de bambu compensado, painéis folheados e madeira laminada feita de bambu. Em 2020, as exportações em valor de produtos de bambu laminado foram de aproximadamente US\$ 87.9 milhões. O maior exportador foi a China, responsável por 81% do total das exportações de bambu laminado. Os outros principais exportadores foram os Estados Unidos, a Holanda, a Espanha e a Alemanha. Os cinco principais importadores foram os Estados Unidos, Holanda, Cingapura, Canadá e Japão. Juntos, eles representaram 67% do total das importações globais (UNCTAD, 2022).

O código HS 441873 inclui painéis de piso de bambu montados. Em 2020, a China foi o maior exportador de painéis montados para pavimentos feitos de bambu, representando 54% das exportações mundiais. A Holanda foi o segundo maior exportador, com um valor estimado de US\$ 10.9 milhões. Quantidades menores foram exportadas da Ucrânia, Itália e Canadá. Os cinco principais importadores de painéis montados de bambu em 2020 com base nos dados disponíveis foram os Estados Unidos, Reino Unido, Dinamarca, Holanda e Nova Zelândia (UNCTAD, 2022).

Em 2020, as Filipinas foram o maior exportador de madeira feita de bambu utilizada em produtos de marcenaria e carpintaria para construção, classificados no HS 441891. Foi responsável por quase 70% das exportações globais (113.5 milhões de dólares), seguida pela Letônia, Canadá, Estados Unidos e Países Baixos. Os produtos de carpintaria incluem, entre outros, portas, janelas, persianas e escadas feitos de bambu, enquanto os produtos de carpintaria incluem elementos estruturais como vigas, caibros e suportes de telhado. Os cinco principais importadores foram os Estados Unidos e os países da União Europeia (Holanda, França, Noruega, Dinamarca). Juntos, representaram 87% por cento do total das importações globais, com um valor estimado de 138.5 milhões de dólares (UNCTAD, 2022).

2.8 CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT): ASPECTOS GERAIS

O tópico a seguir enfoca os aspectos mais significativos do CLT relacionados ao seu processo de fabricação, metodologia utilizada para definir suas características de material e procedimento de projeto para situações específicas de projeto. Além disso, fornece uma visão geral das normas europeias e dos tipos europeus de madeira macia utilizados na estrutura homogênea do CLT, os quais podem servir de inspiração e apoio ao desenvolvimento do CLB.

2.8.1 *Cross-laminated timber (CLT)*

Ao longo da história, as estruturas tradicionais de madeira têm sido utilizadas principalmente como sistemas de estrutura leve. O interesse pelas estruturas de madeira ressurgiu em meados da década de 1960, após a introdução de um novo produto à base de madeira denominados produtos de madeira engenheirada (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018).

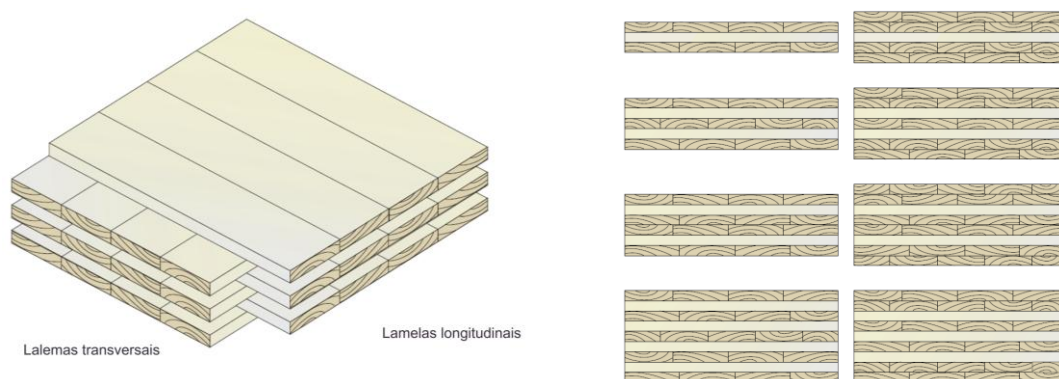
Produtos como o *glued laminated lumber (Glulam)* permitiram a construção de estruturas lineares de maiores vãos, mais complexas e altamente robustas. No âmbito dos incentivos ao desenvolvimento subsequentes, um novo produto compósito denominado *cross-laminated timber (CLT)* foi patenteado em meados da década de 1990 (Brandner *et al.*, 2016).

O CLT é um produto rígido em forma de placa composto por um número apropriado de camadas (na sua maioria ímpares: 3, 5 ou 7), onde cada camada é feita de placas/lamelas dispostas adjacentes umas às outras, e onde as camadas vizinhas são mais frequentemente coladas em um ângulo de 90° entre si (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). Na Europa e no Canadá, o CLT é feito principalmente de *spruce-pine-fir (SPF)*, *douglas fir-Larch*, e *southern pine* (Sun; He; Li, 2020).

Atualmente, a principal espécie de madeira macia utilizada pelos produtores europeus de CLT é o abeto norueguês (*Picea abies*), também frequentemente encontrado em associação com o abeto prateado (*Abies alba*) (Wieruszewski; Mazela, 2017). Várias espécies de madeira (principalmente madeira de qualidade inferior) foram investigadas para explorar o seu potencial de fabricação de CLT (Sun; He; Li, 2020). O CLT pode ser feito a partir de qualquer espécie ou mistura de espécies mistas, fornecendo suas propriedades físicas e mecânicas para garantir a adequação das madeiras a serem coladas (Yusoh *et al.*, 2022). Cada camada de um painel CLT está exposta a cargas diferentes dependendo da sua aplicação. Classes de madeira mais baixas são frequentemente usadas para as camadas internas que sofrem tensões mais baixas (Cherry *et al.*, 2019).

Os painéis de CLT consistem em várias camadas de tábuas de madeira empilhadas transversalmente (normalmente a 90°) e coladas em suas faces largas e, às vezes, também nas faces estreitas. Além da colagem, podem ser usados pregos, parafusos ou cavilhas de madeira para fixar as camadas (Karacabeyli; Gagnon, 2019), incluindo os produtos variantes *dowel-cross-laminated timber (DCLT)* e *nail-cross-laminated timber (NCLT)*. A configuração e seções transversais de painéis CLT se encontram destacadas na Figura 41.

Figura 41 – a) Configuração do painel CLT; b) Exemplos de seções transversais de painéis CLT



Fonte: Gagnon *et al.* (2013).

Esta estrutura multicamadas e altamente otimizada fornece capacidade de carga dentro e fora do plano, para que possa ser usada como painéis de parede e piso (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). Propriedades naturais e ambientais favoráveis, acompanhadas de superfícies esteticamente agradáveis, são razões para a crescente utilização do CLT nos últimos anos, como testemunhado pelo crescente número de edifícios residenciais e de escritórios (Ringhofer; Schickhofer, 2013). O produto é caracterizado por um elevado nível de pré-fabricação e, portanto, o trabalho no local é rápido, envolvendo principalmente apenas a montagem e ligação de painéis individuais (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). O baixo peso próprio facilita o trabalho de fundação e permite seu uso mesmo em áreas propensas a terremotos (Brandner *et al.*, 2016).

Além disso, o processo de laminação cruzada proporciona maior estabilidade dimensional ao produto, o que permite a pré-fabricação de lajes longas e largas, paredes longas de um andar e condições de altura de placa alta, como em configurações de estrutura do tipo balão. Adicionalmente, a laminação cruzada fornece propriedades de resistência e rigidez relativamente altas no plano e fora do plano, conferindo ao painel capacidades de ação bidirecional. O efeito de “reforço” proporcionado pela laminação cruzada no CLT também aumenta consideravelmente a resistência à divisão do CLT para certos tipos de sistemas de conexão (Brandner *et al.*, 2016; Karacabeyli; Gagnon, 2019).

Para concretizar todo o potencial deste material, revelou-se fundamental intensificar as atividades no domínio da normalização e harmonização dos regulamentos e normas existente (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). De modo geral, o design, a produção, o comportamento e as propriedades relacionadas aos produtos de madeira engenheirada têm sido regulamentados por diversas normas técnicas (De Araujo *et al.*, 2023).

A primeira norma europeia para CLT, EN 16351 (CEN, 2015), regula apenas limitações relacionadas à produção e construção e, mesmo assim, ainda falta um procedimento de projeto

uniforme (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). Diferentes órgãos governamentais também publicaram livros e manuais que oferecem recomendações e procedimentos de concepção baseados nos resultados obtidos em numerosos projetos de pesquisa realizados até o momento. Pode-se citar como exemplos o CLT Handbook do Canadá (Karacabeyli; Gagnon, 2019), o CLT Handbook dos Estados Unidos (Karacabeyli; Douglas, 2013) e o CLT Handbook Sueco (Confederation Of Timber Industries, 2022).

Além desses manuais, existem outras normas, tais quais a Norma Japonesa agrícola para CLT (JAS, 2019) e a ANSI/APA PRG 320 (ANSI/APA, 2019). Esta última, é a norma norte americana e fornece requisitos para dimensões e tolerâncias, desempenho, métodos de teste, garantia de qualidade e fabricação de painéis CLT. Essas normas especificam requisitos mínimos para uso de CLT na construção, porém ainda não foi incluído um método de projeto padronizado, o que é muito necessário para promover o uso de estruturas CLT (Anwar-Us-saadat *et al.*, 2022).

Um processo de fabricação típico para CLT inclui as seguintes etapas: seleção da madeira serrada, agrupamento e aplainamento da madeira serrada, aplicação de adesivo, disposição e prensagem do painel, corte do produto, usinagem de superfície, marcação e embalagem. Testes rigorosos de controle de qualidade na fábrica são necessários para garantir que o produto CLT final será adequado para a aplicação pretendida (Karacabeyli; Gagnon, 2019).

As tolerâncias de umidade do material básico são de $12 \pm 3\%$ (ANSI/APA, 2019). O material é classificado visualmente ou por máquina de acordo com EN 14081-1 (CEN, 2005), ou DIN 4074-1 (DIN, 2012). As lamelas são conectadas longitudinalmente por meio de juntas tipo dedo. Ao realizar tais juntas de dedos é necessário utilizar um adesivo adequado em conformidade com, por exemplo, EN 301 (CEN, 2006). Os adesivos usados com mais frequência incluem melamina-ureia-formaldeído (MUF), adesivo de poliuretano de componente único (1K-PUR) e adesivo de isocianato de polímero de emulsão (EPI) (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018), bem como, melamina-formaldeído (MF) (Wieruszewski; Mazela, 2017).

Quanto à disposição e colagem das lamelas, o espaçamento máximo de 6 mm é especificado em muitos regulamentos técnicos, incluindo EN 16351 (CEN, 2015). No entanto, a contribuição da aplicação de cola ao longo dos lados estreitos das lamelas é questionável e geralmente é recomendado que possa ser negligenciada ou pelo menos limitada às camadas internas do elemento (Brandner, 2013).

A resistência da junta entre os planos depende da precisão da usinagem da superfície, da pressão de prensagem e do sistema adesivo utilizado (Wieruszewski; Mazela, 2017). Os valores variam de 0.10 a 1.0 N/mm² se forem utilizados macacos hidráulicos, enquanto os valores correspondentes variam de 0.05 a 0.10 N/mm² para macacos a vácuo, e os valores variam de 0.01 a 0.20 N/mm² para pressão exercida por parafusos, braçadeiras e unhas (Brandner, 2013).

É válido de ressaltar que, uma vez que os painéis de piso CLT são relativamente macios e leves, o projeto é frequentemente governado por critérios de serviço (vibração, deflexão e fluência) e não pela sua resistência (Cherry *et al.*, 2019).

Na Figura 41, é ilustrado um painel CLT de 5 camadas com suas seções transversais. A orientação das fibras nas camadas externas de um painel CLT é comumente denominada como direção principal de resistência ou direção de maior resistência, enquanto a orientação das fibras nas camadas ortogonais é designada como direção secundária de resistência ou direção de menor resistência.

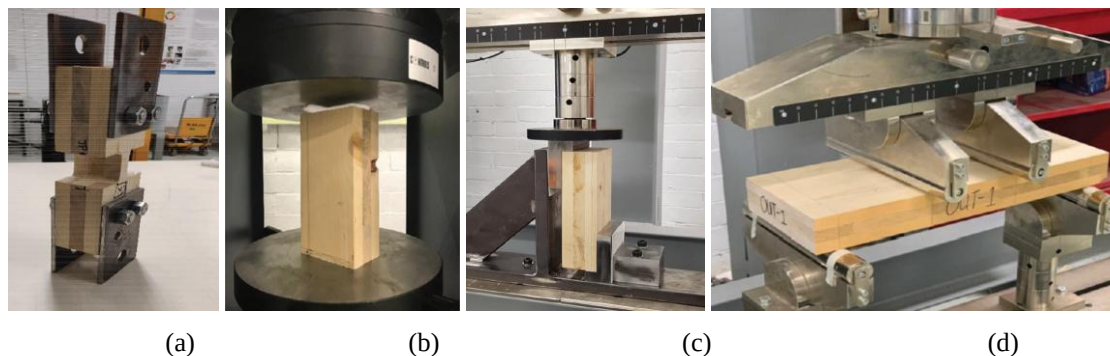
A madeira é um material ortotrópico com resistência mecânica significativamente maior ao longo da direção da fibra. No entanto, a resistência perpendicular à fibra também requer atenção para diversas aplicações estruturais (Anwar-Us-saadat *et al.*, 2022).

2.8.2 Propriedades físicas e mecânicas do CLT

Segundo Unterwieser e Schickhofer (2013), existem duas abordagens para determinar as propriedades mecânicas do CLT: determinação com base nas propriedades mecânicas das camadas individuais em combinação com o modelo de suporte de carga e a determinação com base em testes de elementos CLT.

A DIN EN 16351 (DIN, 2021) estabelece as regras para a determinação das resistências CLT com base em experimentos, descreve os métodos de preparação de amostras e arranjos de carregamento, bem como, as equações para determinar as propriedades mecânicas a partir dos testes. Exemplos de configuração de testes em CLT são ilustrados na Figura 42.

Figura 42 – a) Teste de tração; b) teste de compressão; c) experimento de cisalhamento plano; d) teste de flexão de curto vão



Fonte: Anwar-Us-saadat *et al.* (2022).

Entretanto, uma grande desvantagem da abordagem experimental consiste no fato de que cada vez que a disposição, o tipo de material ou qualquer um dos parâmetros de fabricação mudam, mais testes são necessários para avaliar as propriedades desses produtos. Por outro lado, uma abordagem analítica, uma vez verificada com dados de teste, oferece uma alternativa mais geral e menos dispendiosa (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018; Popovski *et al.*, 2019).

A temperatura ambiente e a umidade relativa geralmente não permanecem constantes ao longo da vida útil das estruturas, resultando em flutuações no teor de umidade de equilíbrio (EMC) dos elementos estruturais de madeira (Chiniforush *et al.*, 2022). Como o CLT é feito de madeira, um material higroscópico, os comportamentos de expansão e retração devem ser considerados ao projetar edifícios altos sob diferentes condições de umidade (Pang; Jeong, 2018).

Do ponto de vista do desempenho estrutural, as propriedades físicas e mecânicas da madeira estão sujeitas a variações conforme seu teor de umidade (Chiniforush *et al.*, 2022). Embora a laminação de camadas de madeira em direções perpendiculares conduza a uma expansão/contração mais uniforme em diferentes direções, variações naturais da umidade relativa podem induzir tensões significativas. Tais tensões podem levar, a longo prazo, ao desenvolvimento de fissuras, divisões e delaminação no material (Chiniforush *et al.*, 2022; Popovski *et al.*, 2019).

Um dos parâmetros que caracteriza a matéria-prima e determina sua resistência é a densidade, que varia de 480 a 500 kg/m³ em média para painéis CLT (Hematabadi *et al.*, 2020; Wieruszewski; Mazela, 2017). A densidade e as propriedades mecânicas apresentam uma correlação positiva, ou seja, uma maior densidade está associada a valores mais elevados de propriedades mecânicas (Hematabadi *et al.*, 2020; Muñoz *et al.*, 2022; Saavedra Flores *et al.*, 2016; Yusoh *et al.*, 2022).

De Araujo *et al.* (2023) reuniram as principais propriedades físicas e mecânicas dos painéis CLT produzidos por alguns dos principais produtores (Tabela 8).

Tabela 8 – Principais propriedades físicas e mecânicas de painéis CLT comerciais

Fabricante	D ¹	CS ²	MOE ³	TC ⁴	SSPL ⁵	SSPA ⁶
KLH Massivholz	500			0.12	0.02	0.24
Hasslacher	480	24.50	14700.00	0.12	0.01	0.24
Binderholz	480	21.00	12000.00	0.12	0.01	0.24
Mayr-Melnhof Holz	480	24.00	11500.00	0.10	0.01	0.24

Legenda: ¹ – Densidade (kg/m³); ² – resistência à compressão (N/mm²); ³ – módulo de elasticidade (N/mm²); ⁴ – Condutividade térmica (W/m.K); ⁵ – comportamento de retração-inchamento ao nível do painel (%); ⁶ – Comportamento de retração-inchamento em ângulo perpendicular ao nível do painel (%).

Fonte: De Araujo *et al.* (2023).

No que diz respeito às resistências e propriedades como produto estrutural, faz-se distinção entre carregamento fora do plano e carregamento dentro do plano. Para CLT sob carregamento fora do plano, as configurações de teste, os valores característicos e os procedimentos de projeto são bem acordados. Para diafragmas CLT sob carregamento no plano, algumas propriedades ainda estão em discussão, resultando atualmente em regulamentações conservadoras (Brandner *et al.*, 2017).

Na prática, a montagem dos painéis CLT ocorre por meio de conectores metálicos, como fixações, cantoneiras e parafusos. Esses elementos desempenham a função de unir os componentes de CLT, assegurando a integridade da estrutura e facilitando a transferência de cargas (Pozza; Scotta, 2015). Como os painéis CLT têm uma alta rigidez no plano em comparação com as conexões, a maior parte da capacidade de dissipação de energia é fornecida pelas conexões metálicas, enquanto os painéis de parede permanecem dentro do domínio elástico (Shahnewaz; Dickof; Tannert, 2023).

Embora o CLT seja predominantemente empregado em aplicações de piso e parede, o material também pode ser empregado como viga ou verga de forma eficiente (Popovski *et al.*, 2019). O uso do CLT sob condições de carregamento no plano, como em vigas ou vergas, pode fornecer robustez adicional. Isto se deve a alta resistência à tração perpendicular ao comprimento da viga fornecida pelas camadas ortogonais, tornando-as menos suscetíveis a trincas (Flaig; Blaß, 2013).

O CLT, ao ser empregado como painel de parede, está sujeito a tensões de tração durante eventos sísmicos. Assim, a resistência à tração é também um dos valores característicos importantes que determinam a adequação do CLT em aplicações específicas (Ido *et al.*, 2016).

Anwar-Us-saadat *et al.* (2022) investigaram as propriedades de tração ao longo dos eixos maior e menor do CLT, e observaram que o CLT apresenta comportamento frágil sob tração. Unterwieser e Schickhofer (2013) propuseram uma equação para prever as propriedades de tração do CLT, com base na resistência das lamelas. Ido *et al.* (2016) também investigaram as propriedades de tração do CLT e com base nos resultados dos testes, propuseram uma equação para previsão da resistência à tração do CLT, que leva em consideração o efeito da utilização de lamelas de diferentes resistências na seção transversal do CLT:

$$f_{t,0,CLT,net,k} = f_{t,0,1,k} \left(\frac{A_{transformada}}{A_{real}} \right) \quad (25)$$

$$A_{transformada} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{l,0,i} \times E_{l,0,i}}{E_{l,0,i-max}} \right) \quad (26)$$

Aqui, $f_{t,0,1,k}$ é a resistência à tração de uma única lamela, A_{real} é a área da seção transversal bruta e $A_{transformada}$ é a área transformada com base no módulo de elasticidade das lamelas em diferentes camadas, i representa uma única camada com lamela paralela ao grão, n é o número total de camadas com lamela paralela ao grão, $A_{l,0,i}$ é a área bruta da i -ésima camada, $E_{l,0,i}$ é o MOE da i -ésima camada e $E_{l,0,i-max}$ é o MOE máximo entre todas as camadas paralelas ao grão.

O CLT, quando empregado como sistemas de parede, está sujeito a três tipos de carregamento: cargas de compressão axial no plano provenientes da gravidade e cargas móveis, carregamento lateral no plano devido a cargas de vento e sísmicas e carregamento lateral fora do plano devido a cargas de vento (Popovski *et al.*, 2019).

Quando os painéis CLT são carregados sob cargas axiais no plano, apenas as camadas com laminações orientadas paralelamente à carga axial aplicada devem ser consideradas capazes de suportar essa carga (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018; Popovski *et al.*, 2019).

A verificação de elementos CLT em compressão perpendicular ao painel é necessária devido ao carregamento vertical imposto por pilares ou paredes em sistemas do tipo plataforma (Gong *et al.*, 2023). Brandner (2018) realizou uma revisão do estado da arte sobre as propriedades de compressão perpendiculares ao plano de painéis CLT. Diversos outros estudos foram conduzidos com o objetivo de determinar a performance do CLT sob compressão perpendicular ao plano do painel (Brandner; Schickhofer, 2014; Gong *et al.*, 2023) e paralela ao plano do painel (Anwar-Us-saadat *et al.*, 2022; He *et al.*, 2020; He; Sun; Li, 2018).

Oh *et al.* (2015) e Pang e Jeong (2018) estabeleceram modelos para previsão da resistência à compressão do CLT. A equação proposta por Pang e Jeong (2018) (Eq. 27 e 28),

assume que a deformação em cada camada da seção transversal do CLT é a mesma, permitindo a consideração da capacidade de uma camada representativa.

$$P_{CLT,i} = \frac{\sum_{j=1}^n (A_{l,0j} \times E_{l,0j})}{A_{l,0,i} \times E_{l,0,i}} \times f_{c,0,l,i} \times A_{l,0,i} \quad (27)$$

$$f_{c,0,CLT,net,k} = \frac{\sum_{j=1}^n (A_{l,0j} \times E_{l,0j})}{E_{l,0,i}} \times f_{c,0,l,i} \quad (28)$$

Nas quais, i representa uma lamela de interesse paralela ao grão que é assumida para iniciar a falha, $P_{CLT,i}$ é a capacidade de carga na qual a i -ésima camada falha, n é o número total de lamelas com camadas paralelas às fibras, j representa uma única lamela dentro da camada paralela às fibras, $A_{l,0j}$ é a área bruta da j -ésima camada, $E_{l,0j}$ é o MOE da j -ésima camada, $A_{l,0,i}$ é a área bruta da i -ésima camada, $E_{l,0,i}$ é o MOE da i -ésima camada e $f_{c,0,l,i}$ é a resistência à compressão da lamela na i -ésima camada.

Propriedades elásticas no plano como módulo de cisalhamento e módulo de flexão, bem como rigidez de cisalhamento e rigidez de flexão, são alguns dos parâmetros vitais do CLT para seu uso em membros estruturais (Brandner *et al.*, 2017).

Cargas de flexão fora do plano do elemento CLT causam tensão de cisalhamento na direção da fibra nas camadas longitudinais, enquanto a tensão de cisalhamento perpendicular à direção da fibra ocorre nas camadas transversais (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). O cisalhamento de rolamento é a capacidade de cisalhamento da madeira no plano perpendicular (Anwar-Us-saadat *et al.*, 2022). O módulo e a resistência ao cisalhamento de rolamento são propriedades mecânicas decisivas em placas de CLT (Aicher; Christian; Hirsch, 2016), que podem controlar o projeto e o desempenho de sistemas de piso ou parede CLT (Popovski *et al.*, 2019).

De maneira geral, as construções feitas com CLT representam um sistema estrutural extremamente eficaz, sobressaindo-se por sua leveza, resistência, rigidez e habilidade para dissipar energia. Essas características os tornam especialmente apropriados para regiões propensas a terremotos (Sandoli *et al.*, 2021). Este potencial foi evidenciado por (Hayes; Koliou; van de Lindt, 2023; Pozza; Scotta, 2015; Shahnewaz; Dickof; Tannert, 2023).

Quando os painéis CLT são usados em aplicações de piso ou telhado para suportar cargas de gravidade, eles são submetidos a flexão. Da mesma forma, os painéis CLT usados em aplicações de parede podem ser submetidos a flexão devido às cargas do vento que atuam no edifício (Popovski *et al.*, 2019). Nos últimos anos, extensas pesquisas foram conduzidas sobre

as propriedades de resistência à flexão dos painéis CLT devido ao seu desempenho superior como elemento de flexão (He *et al.*, 2020; He; Sun; Li, 2018; Hematabadi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2023).

Yusof *et al.* (2019) e Yusoh *et al.* (2022) testaram as propriedades de flexão e de compressão no plano do CLT. Os modos de falha dominantes da flexão CLT foram concluídos como cisalhamento de rolamento, delaminação da linha de cola e tração. Os do CLT sob compressão foram concluídos como cisalhamento, fendilhamento e esmagamento.

Na literatura, existem três métodos comumente utilizados para calcular as propriedades mecânicas de painéis CLT sob uma determinada condição de carga. Estes são a teoria das vigas unidas mecanicamente (método Gamma modificado), o método da analogia de cisalhamento e a teoria das vigas de Timoshenko (Popovski *et al.*, 2019).

O método de analogia de cisalhamento pode ser usado para determinar a rigidez e deflexão de um painel sob flexão e as tensões axiais e de cisalhamento ao longo de suas camadas (Cherry *et al.*, 2019). A fórmula para determinação da rigidez efetiva à flexão do painel é apresentada na Equação 29.

$$EI_{eff,y} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot \frac{t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot t_i \cdot z_i^2 \quad (29)$$

Aqui, b_y é a largura do painel para o eixo maior de resistência, E_i é o módulo de elasticidade das laminações da i -ésima camada (E , para laminações nas camadas longitudinais, $E_{\perp}$, para laminações nas camadas transversais), n é o número de camadas no painel, t_i é a espessura das laminações da i -ésima camada, e z_i é a distância entre o ponto central da i -ésima camada e a linha neutra.

A rigidez de cisalhamento efetiva no plano $(GA)_{eff,zy}$ do painel CLT na direção principal pode ser calculada de acordo com o método de analogia de cisalhamento como:

$$GA_{eff,zy} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_y}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b_y}\right)\right]} \quad (30)$$

Aqui, G_i é o módulo de cisalhamento das laminações na i -ésima camada (G , para laminações nas camadas longitudinais, e $G_{\perp}$, para laminações nas camadas transversais), e h é a espessura do painel.

2.9 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Segundo Conboy (2009), a estratégia e abordagem de análise da literatura raramente recebem a devida atenção, com a maioria dos artigos enfatizando mais as fases de coleta e análise de dados empíricos da pesquisa. Assim, o foco recai sobre a coleta e análise de dados empíricos, negligenciando as conexões e relações com o estado da arte das pesquisas publicadas na mesma área de estudo, que possam indicar correlação do desenvolvimento de uma teoria (Conforto; Amaral; Da Silva, 2011).

As revisões da literatura e as sínteses de evidências são importantes produtos de pesquisa que contribuem para o avanço da ciência de forma incremental, com base em resultados anteriores (Lame, 2019). Uma revisão sistemática da literatura (RSL), assim como outros tipos de estudo de revisão, é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema. Esse tipo de pesquisa oferece um resumo das evidências associadas a uma estratégia de intervenção específica, utilizando métodos explícitos e sistemáticos de busca, avaliação crítica e síntese das informações selecionadas (Sampaio; Mancini, 2007).

Segundo Conforto, Amaral e Da Silva (2011), uma revisão sistemática da literatura “é o processo de coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar um conjunto de artigos científicos com o propósito de criar um embasamento teórico-científico (estado da arte) sobre um determinado tópico ou assunto pesquisado”.

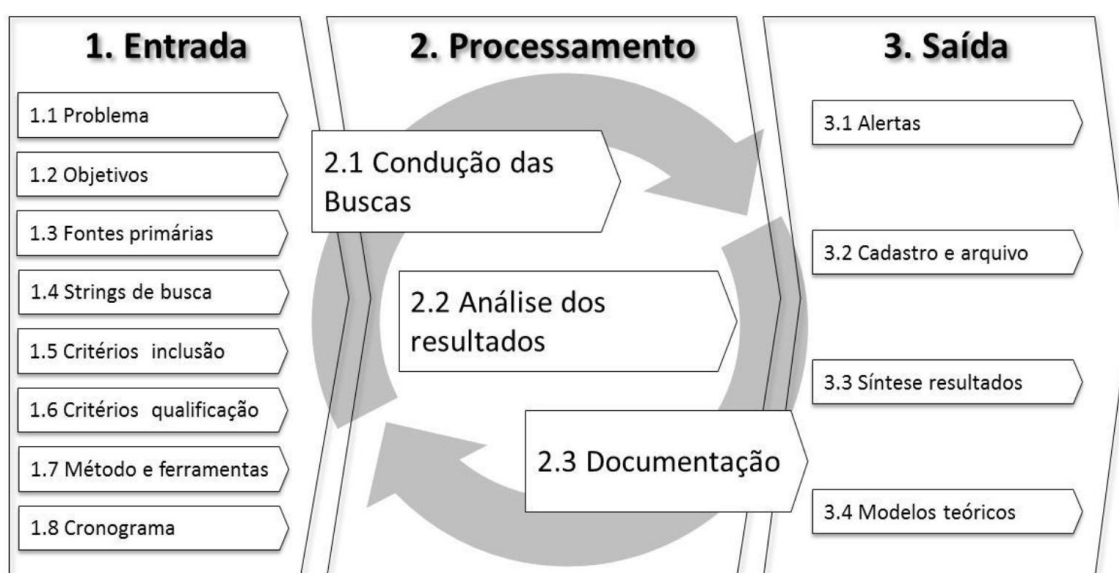
Comparadas a uma revisão tradicional, que frequentemente dependem quase que inteiramente da experiência dos autores, as revisões sistemáticas tratam o processo de revisão da literatura como um processo científico e aplicam conceitos de pesquisa empírica para tornar o processo de revisão mais transparente e replicável e para reduzir qualquer viés que possa afetar a imparcialidade ou objetividade da revisão (Lame, 2019).

Ao viabilizarem de maneira clara e explícita um resumo abrangente de todos os estudos relacionados a uma intervenção específica, as revisões sistemáticas permitem a incorporação de um espectro maior de resultados relevantes, ao invés de restringir as conclusões à análise de somente alguns artigos (Sampaio; Mancini, 2007). Os resultados de uma revisão sistemática possibilitam a identificação de lacunas na teoria que podem ser investigadas por outros pesquisadores, mas que não foram identificadas em estudos semelhantes devido à superficialidade e falta de rigor na revisão da literatura (Conforto; Amaral; Da Silva, 2011).

As revisões sistemáticas são particularmente valiosas para consolidar informações de um conjunto de estudos realizados independentemente, os quais podem apresentar resultados divergentes e/ou concordantes. Além disso, elas ajudam a identificar áreas que carecem de evidências, orientando assim futuras investigações (Sampaio; Mancini, 2007). Assim, devido à abundância e diversidade de fontes de informação no meio científico, é exigido um esforço singular para compreender mais profundamente o estado atual da arte e, conseqüentemente, para identificar lacunas genuínas na teoria que demandam investigação (Conforto; Amaral; Da Silva, 2011).

Conforto, Amaral e Da Silva (2011) apresentaram um roteiro para execução da RSL denominado RBS Roadmap. Esse roteiro é organizado em fases e etapas, possuindo 15 etapas distribuídas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída), conforme a Figura 43.

Figura 43 – Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática – RBS Roadmap



Fonte: Conforto, Amaral e Da Silva (2011).

2.10 MÉTODO DE PESQUISA SURVEY

Uma pesquisa *survey* é um método de coleta e análise de dados em que os entrevistados respondem a perguntas ou declarações que foram preparadas previamente (Kasunic, 2005). As *surveys* são um método comum para coletar dados primários. Elas representam uma ferramenta flexível capaz de gerar informações tanto qualitativas quanto quantitativas, dependendo de como são estruturadas e analisadas (Macdonald; Headlam, 2008).

Frequentemente, os termos “questionário” e “*survey*” são empregados de forma intercambiável, embora exista uma distinção sutil, porém importante, entre eles. Uma *survey* é

um processo, enquanto um questionário é o instrumento utilizado nesse processo (Kasunic, 2005). Outra clara distinção ainda remete ao fato que os questionários são documentos preenchidos pelos entrevistados e os formulários são anotados pelo entrevistador (Hand, 2008), como nas pesquisas por internet.

Os métodos quantitativos são técnicas de pesquisa utilizadas para reunir dados quantitativos, dados que podem ser ordenados, classificados e medidos. Enquanto os métodos qualitativos fornecem resultados geralmente ricos e detalhados, oferecendo ideias e conceitos para informar sua pesquisa (Macdonald; Headlam, 2008). Em outras palavras, os dados qualitativos consistem em palavras, enquanto que dados quantitativos consistem em números (Kasunic, 2005).

As pesquisas *surveys* são recomendadas quando é necessário gerar dados primários de um grande número de fontes para responder à pergunta de pesquisa. As *surveys* são um meio útil de coletar dados de empresas, organizações comunitárias e residentes (Macdonald; Headlam, 2008). As pesquisas *surveys* devem ser implementadas seguindo diretrizes e procedimentos rígidos. O não cumprimento destas diretrizes pode levar a resultados enganosos que podem ser contestados e refutados (Kasunic, 2005).

Na pesquisa *survey*, é essencial definir tanto a amostra quanto o plano de amostragem de forma a garantir a confiabilidade dos resultados da pesquisa. Durante a amostragem, os dados são tipicamente coletados de uma população e, após análise, tenta-se inferir conclusões sobre as características ou parâmetros dessa população. Assim, o desenho da amostra deve assegurar que esta seja representativa da população em questão (Da Silva *et al.*, 2019). *Surveys* por amostragem podem permitir estimativas muito precisas sobre as populações que retratam (Babbie, 2003).

Existem dois principais métodos de amostragem: a probabilística e a não probabilística. Na amostragem probabilística, destacam-se: aleatória simples, sistemática, estratificada, por conglomerados e por etapas, sendo geralmente empregadas em pesquisas de natureza quantitativa. Por outro lado, na amostragem não probabilística, incluem-se aquelas selecionadas por acessibilidade ou conveniência, intencionalmente ou por tipicidade, por cotas, bola de neve, casos típicos e casos críticos, geralmente utilizadas em estudos qualitativos (Babbie, 2003).

Kasunic (2005) descreve o processo de condução de uma pesquisa *survey* em sete etapas: (1) identificação dos objetivos da investigação; (2) identificação e caracterização do público-alvo; (3) elaboração do plano de amostragem; (4) elaboração do questionário; (5) teste

piloto do questionário; (6) distribuição do questionário; e (7) análise dos resultados e escrita do relatório.

No contexto de *surveys* setoriais, quando não há uma lista oficial da população alvo, a prospecção, listagem e verificação da veracidade dessa população podem ser realizadas por *websites* corporativos (De Araujo *et al.*, 2020, 2021). Mediante pesquisas setoriais impulsionadas pela prospecção em sites corporativos na internet, De Araujo (2017) e De Araujo e Christoforo (2023) obtiveram resultados representativos para caracterizar o setor de construções em madeira em diferentes aspectos.

Os sites na Internet e os perfis em redes sociais têm sido as principais alternativas para a apresentação virtual das empresas aos seus atuais e futuros clientes (De Araujo *et al.*, 2022). O aumento do uso de *smartphones* tem ampliado o acesso à internet, permitindo alcançar mais pessoas de maneira rápida e econômica em comparação com métodos de *surveys* mais tradicionais como cara a cara, correio ou telefone, o que expande as oportunidades e o alcance das pesquisas (Da Silva *et al.*, 2019).

2.11 CONSIDERAÇÕES ACERCA DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Atualmente, o uso do bambu como material de engenharia se baseia principalmente em tradições práticas, conhecimento ancestral e experiência em engenharia, devido à falta de diretrizes de projeto adequadas. O desenvolvimento dessas normas e códigos seria um passo importante para promover o uso e as aplicações do bambu na indústria da construção, aproveitando suas vantagens competitivas por meio de estudos contínuos e protocolos de teste.

Diversos pesquisadores têm se dedicado a estudar e avaliar as propriedades físicas e mecânicas de produtos de bambu engenheirado. A determinação das propriedades físicas e mecânicas em engenharia é crucial para identificar as possíveis aplicações estruturais dos PBE's. Embora a análise dos estudos recentes sobre bambu modificado revele um interesse crescente, é imperativo realizar mais testes seguindo métodos padronizados, como os já estabelecidos para madeira. Ao estabelecer um consenso sobre os métodos de teste aplicados à caracterização dos materiais de bambu, será possível criar uma base de conhecimento para o desenvolvimento de produtos estruturais e estabelecer os padrões necessários para sua integração no mercado convencional.

Com base nas informações apresentadas, observa-se, que a China é de fato o principal exportador de produtos de bambu para construção. Os outros principais exportadores são os Estados Unidos e Canadá e países da Europa. Portanto, considerando-se apenas produtos de

bambu aplicáveis a fins de construção, Ásia, América do Norte e Europa, se mantêm como as principais regiões exportadoras desses produtos. Quanto às importações, os principais importadores são países da Europa, América do Norte e Ásia. Apesar da longa história que países da América Latina, como Colômbia, Equador e Peru, apresentam com a construção em bambu, esses países, e a América Latina como um todo, não se encontram entre os principais exportadores de produtos de bambu.

Dessa forma, diante do cenário global de intensificação das mudanças climáticas e da necessidade premente de reduzir as emissões GEE, é inevitável que o bambu engenheirado se torne um protagonista no futuro da construção civil. Com a demanda por materiais de construção sustentáveis e de baixa pegada de carbono em constante crescimento, o bambu se destaca como uma opção versátil, renovável e altamente eficiente em termos de armazenamento de carbono. Sua rápida regeneração, capacidade de sequestro de carbono durante o crescimento e ampla gama de aplicações na construção tornam-no uma escolha atrativa para atender às exigências ambientais e econômicas dos mercados globais. Assim, o bambu engenheirado não apenas promete se tornar uma alternativa viável aos materiais convencionais, mas também contribuirá significativamente para mitigar os impactos negativos da construção civil no meio ambiente.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo, são apresentados detalhadamente os métodos e procedimentos adotados para alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa. São descritos as etapas e os instrumentos de pesquisa utilizados, bem como as estratégias de análise e interpretação dos resultados. Este capítulo fornece uma visão clara e detalhada do processo metodológico adotado, permitindo uma compreensão abrangente de como a pesquisa foi conduzida e de como os resultados foram obtidos.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E SURVEY EMPRESARIAL

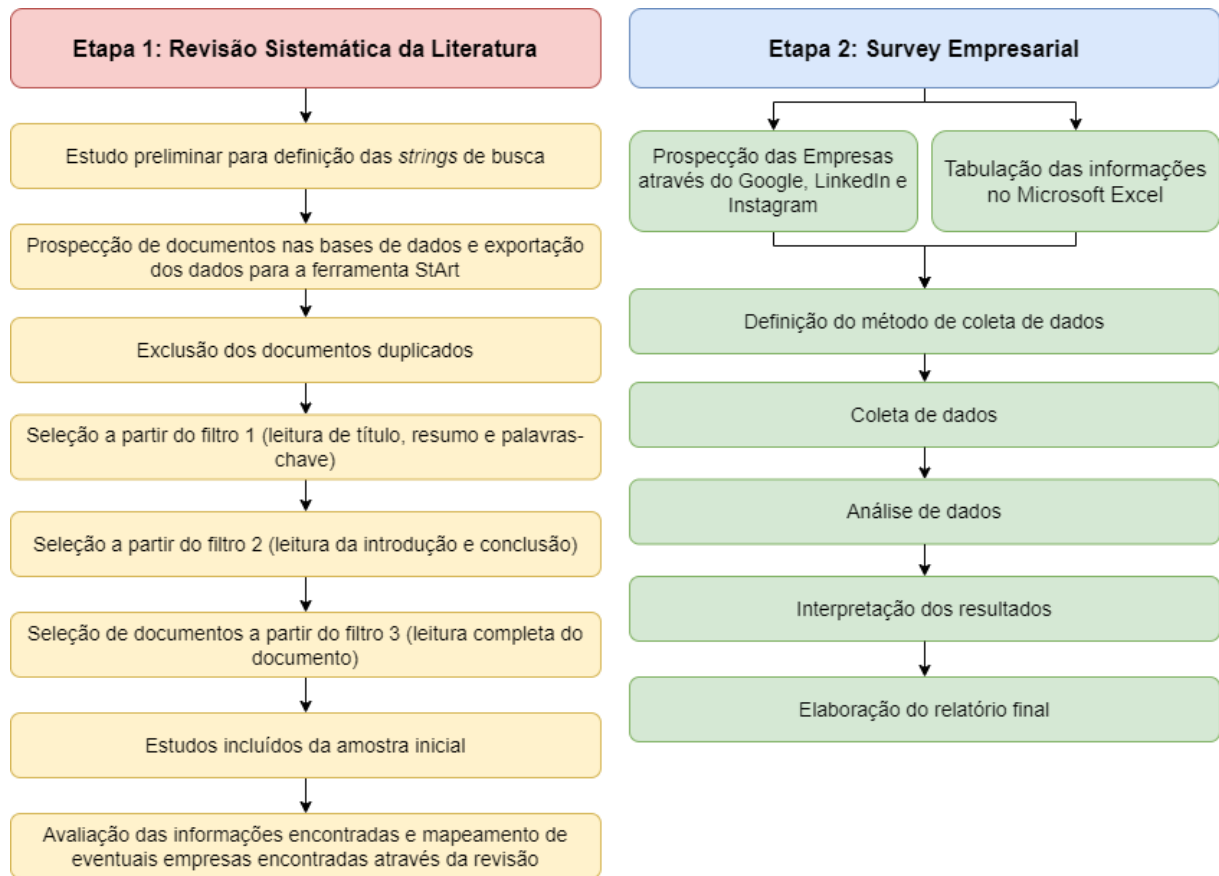
O estudo foi desenvolvido a partir de dois procedimentos metodológicos. A primeira etapa incluiu uma revisão sistemática da literatura (RSL) para identificar e coletar informações de artigos publicados em revistas revisadas por pares, artigos de anais de congressos, livros e capítulos de livros, entre outros documentos relevantes. A segunda etapa consistiu em uma *survey* empresarial aplicada a empresas envolvidas na produção de bambu engenheirado estrutural. Esta metodologia foi adotada a fim de se obter uma compreensão mais abrangente da representatividade, distribuição geográfica, produtos fabricados, atividades desenvolvidas, aplicações e outros aspectos relevantes relacionados a indústria de bambu engenheirado estrutural.

Além disso, essa abordagem visou identificar a situação atual da indústria global, comparando as informações coletadas nas publicações da primeira etapa (revisão sistemática da literatura) com as novas descobertas obtidas na segunda etapa (*survey* empresarial), por meio das pesquisas nos *websites* oficiais de produtores de bambu engenheirado estrutural. As seções a seguir detalham as principais etapas de cada metodologia.

3.1.1 Delineamento da Pesquisa

Para atingir os objetivos propostos, o delineamento da pesquisa foi composto pelas etapas apresentadas no fluxograma a seguir.

Figura 44 – Fluxograma do delineamento da pesquisa



Fonte: Autora (2024).

3.1.2 Revisão Sistemática da Literatura: Indústria de Bambu Engenheirado Estrutural

A primeira etapa do estudo consistiu na realização de uma RSL representativa para coletar informações de artigos científicos, livros e outros documentos relevantes. A fim de analisar o panorama literário da indústria global de bambu engenheirado estrutural, foram adotadas duas bases de dados científicas: Scopus e Web of Science. A Scopus é uma das maiores e mais abrangentes bases de dados de literatura acadêmica do mundo, sendo amplamente utilizada por acadêmicos e profissionais para buscar, avaliar e analisar a produção científica em diversas áreas do conhecimento. A Web of Science (WoS) é outra das principais bases de dados de literatura acadêmica, reconhecida globalmente por sua abrangência e qualidade.

A RSL abrangeu uma ampla gama de fontes, incluindo artigos publicados em periódicos revisados por pares, artigos de conferências, livros e capítulos de livros. Foram consideradas publicações escritas em inglês, chinês, espanhol e português. Não foram estabelecidas restrições

quanto ao período de publicação, de forma a considerar todas as publicações existentes nas bases de dados.

Inicialmente, um estudo preliminar sobre o tema da pesquisa foi realizado com o objetivo de obter uma definição assertiva das *strings* de busca e adquirir um conhecimento mais aprofundado sobre o tema. Essa etapa permitiu uma delimitação mais precisa do problema de pesquisa e dos objetivos do estudo, assim como, a definição mais assertiva das palavras-chave e *strings* de busca.

As *strings* de busca definidas para a RSL são apresentadas no Quadro 3, com seus respectivos operadores booleanos “AND” e “OR”. Foram adotadas quatro *strings* de buscas. Cada *string* se refere a um produto de bambu engenheirado com aplicações estruturais. Como mencionado no Capítulo 2, o *Laminated bamboo lumber* (LBL), o *Glued Laminated Bamboo* (*Glubam*) e *Bamboo scrimber* (BSC) são os três principais produtos de bambu utilizados em aplicações estruturais, enquanto o *Cross-laminated bamboo* (CLB) é um produto emergente, mas com elevado potencial para aplicações estruturais, semelhantemente ao *Cross-laminated Timber* (CLT).

Os termos “*industry*”, “*industrialization*”, “*manufacture*”, “*manufacturing*”, “*producer*” e “*developer*” foram utilizados para tornar a *string* mais específica e direcionada ao objetivo de analisar o cenário literário da indústria global de produtos de bambu engenheirado. As siglas referentes a cada produto de bambu não foram consideradas como palavras-chave nas *strings* de busca, a fim de evitar a prospecção de documentos de outras áreas que utilizam a mesma sigla para outros fins.

Quadro 3 - *Strings* de busca da RSL

Bases de dados	<i>Strings</i> de busca
Scopus WoS	“ <i>laminated bamboo lumber</i> ” AND (“ <i>industry</i> ” OR “ <i>industrialization</i> ” OR “ <i>manufacture</i> ” OR “ <i>manufacturing</i> ” OR “ <i>producer</i> ” OR “ <i>developer</i> ”)
Scopus WoS	(“ <i>glued laminated bamboo</i> ” OR <i>glubam</i>) AND (“ <i>industry</i> ” OR “ <i>industrialization</i> ” OR “ <i>manufacture</i> ” OR “ <i>manufacturing</i> ” OR “ <i>producer</i> ” OR “ <i>developer</i> ”)
Scopus WoS	(“ <i>bamboo scrimber</i> ” OR “ <i>parallel strand bamboo</i> ” OR “ <i>parallel bamboo strand lumber</i> ” OR “ <i>bamboo strand woven</i> ”) AND (“ <i>industry</i> ” OR “ <i>industrialization</i> ” OR “ <i>manufacture</i> ” OR “ <i>manufacturing</i> ” OR “ <i>producer</i> ” OR “ <i>developer</i> ”)
Scopus WoS	(“ <i>cross laminated bamboo</i> ” OR “ <i>cross-laminated bamboo</i> ”) AND (“ <i>industry</i> ” OR “ <i>industrialization</i> ” OR “ <i>manufacture</i> ” OR “ <i>manufacturing</i> ” OR “ <i>producer</i> ” OR “ <i>developer</i> ”)

Fonte: Autora (2024).

Cada *string* de busca foi submetida em ambas as bases de dados, Scopus e Web of Science. As *strings* de busca foram pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave de todos os documentos indexados nas bases de dados. As informações de citação, informações bibliográficas, resumos e palavras-chaves dos documentos encontrados foram exportados das bases de dados no formato RIS e posteriormente importadas para o software *State of the Art Through Systematic Review* (StArt).

A primeira etapa da RSL foi realizada por meio do software StArt, o qual foi desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Enquanto as etapas posteriores, foram realizadas utilizando o software de planilhas eletrônicas Excel.

A condução de uma RSL envolve a caracterização de cada estudo selecionado, a avaliação de sua qualidade, a identificação de conceitos importantes e a conclusão sobre o que a literatura informa em relação a um determinado tema (Sampaio; Mancini, 2007).

Para realizar a RSL, é fundamental estabelecer um protocolo de pesquisa. O protocolo da RSL define a estrutura metodológica que deve ser seguida para a execução da revisão sistemática. A presente pesquisa adotou um protocolo cuja a estrutura é composta pela definição das *strings* de busca, dos critérios de inclusão e exclusão, dos critérios de qualidade e dos critérios de extração.

Após a prospecção de documentos a partir das *strings* de busca estabelecidas, os documentos identificados foram submetidos a um processo de filtragem para verificar a sua adequação aos critérios de inclusão e exclusão determinados para esta pesquisa. Assim, se o documento atende aos requisitos dos critérios de inclusão, ele é selecionado para a próxima etapa, sendo avaliado de acordo com o filtro seguinte. Caso o documento atenda aos critérios de exclusão, sendo removido dos documentos de interesse para a realização da RSL.

Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos conforme Quadro 4 e Quadro 5, respectivamente.

Quadro 4 - Critérios de inclusão

Critérios	Descrição
I1	Documentos que dissertem sobre produtos de bambu engenheirado estrutural
I2	Documentos que dissertem sobre aspectos relacionados a indústria de bambu engenheirado
I3	Documentos que dissertem sobre aspectos relacionados a produtores de bambu engenheirado estrutural
I4	Documentos que dissertem sobre normas e códigos de bambu engenheirado estrutural

Fonte: Autora (2024).

Quadro 5 - Critérios de exclusão

Critérios	Descrição
E1	Documentos que não dissertem sobre produtos de bambu engenheirado estrutural (incluindo indústria, produção, aplicações estruturais, normas e códigos)
E2	Documentos escritos em idiomas que não sejam: em inglês, chinês, espanhol e português
E3	Documentos indisponíveis para acesso da autora no momento da prospecção
E4	Documentos duplicados entre bases de dados

Fonte: Autora (2024).

Os critérios de inclusão foram definidos para garantir uma revisão sistemática da literatura abrangente e relevante, centrada nos principais aspectos da indústria de bambu engenheirado estrutural. O critério I1 foca em documentos que abordam produtos de bambu engenheirado estrutural, assegurando a análise de tecnologias e aplicações específicas desse material. O critério I2 amplia o escopo para incluir aspectos relacionados à indústria de bambu engenheirado, proporcionando uma visão sobre o desenvolvimento e as tendências do setor. O critério I3 considera documentos que discutem os produtores de bambu engenheirado estrutural, permitindo o entendimento das práticas, desafios e contribuições dos atores-chave na cadeia produtiva. Finalmente, o critério I4 abrange normas e códigos relativos ao bambu engenheirado estrutural, fundamentais para avaliar a regulamentação, padronização e a conformidade dos produtos e práticas dentro da indústria.

A primeira fase da RSL consistiu na identificação dos documentos. Nessa etapa, como mencionado anteriormente, os resultados de busca foram exportados em formato RIS para o software StArt. Em seguida, os documentos duplicados entre as bases de dados foram identificados e removidos. Após a exclusão dos duplicados, as informações bibliográficas, informações de citação, resumos e palavras-chave dos documentos prospectados nas bases de dados foram exportados do software StArt para o software Microsoft Excel, no qual foram submetidos ao processo de filtragem e posterior análise.

A processo de filtragem dos documentos foi conduzido em três etapas: seleção, elegibilidade e inclusão. Na etapa de seleção (Filtro 1), foram submetidos a leitura os títulos, resumos e palavras-chave de cada documento. Nessa etapa, os documentos que não atenderam a nenhum dos critérios de inclusão apresentados no Quadro 4 foram descartados. Aqueles que atenderem a pelo menos um dos critérios de inclusão avançaram para a próxima análise. A etapa de elegibilidade (Filtro 2) consistiu na leitura dos tópicos introdução e conclusões dos documentos aprovados na etapa de seleção. Assim como no filtro anterior, os documentos que satisfizeram pelo menos um dos critérios de inclusão foram selecionados para o filtro seguinte.

A etapa de inclusão (Filtro 3) consistiu na leitura completa de cada documento. Após a leitura completa, os documentos que atenderem a pelo menos um dos critérios de inclusão foram incluídos na amostra final de documentos a serem analisados nesta RSL. Assim, foram identificadas e coletadas as informações de interesse para caracterizar e discutir o atual cenário da indústria global de bambu engenheirado estrutural. Também foram considerados artigos relevantes encontrados na busca cruzada.

Uma RSL requer a definição de uma estratégia de busca e uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada. Para classificar os artigos incluídos na revisão quanto ao atendimento aos objetivos do estudo, os documentos foram classificados quanto aos critérios de qualidade apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Critérios de classificação da qualidade das publicações filtradas

Critérios	Descrição Do Critério De Qualidade	Lista Para Escolha
Q1	O documento disserta sobre o bambu engenheirado como elemento estrutural?	Sim, Não
Q2	O documento descreve os processos produtivos de PBE's estrutural?	Sim, Não
Q4	O documento apresenta aplicações de PBE's como elemento estrutural?	Sim, Não
Q5	O documento aborda sobre as espécies de bambu utilizadas na produção de PBE's estrutural?	Sim, Não
Q6	O documento apresenta normas ou códigos sobre PBE's estrutural?	Sim, Não

Fonte: Autora (2024).

Após a classificação dos artigos conforme critérios de qualidade, foi realizada a coleta das informações correspondentes às perguntas de extração definidas no Quadro 7.

Quadro 7 - Campos de critérios de extração dos dados das publicações

Critérios de extração	Tipo	Conteúdo
Quais PBE's são utilizados como elemento estrutural?	Texto	Livre
Quais os processos de fabricação de PBE's estrutural?	Texto	Livre
Quais as aplicações de PBE's na construção?	Texto	Livre
Os resultados experimentais são positivos para utilização do bambu como elemento estrutural?	Escolha na lista	{Sim,Não}
Quais as espécies de bambu mais utilizadas na PBE's estrutural?	Texto	Livre
Quais os países que possuem a indústria de bambu engenheirado estrutural mais desenvolvida?	Texto	Livre
Quais as normas para bambu engenheirado estrutural?	Texto	Livre

Fonte: Autora (2024).

Como mencionado anteriormente, os documentos incluídos na RSL foram registrados em planilhas eletrônicas, por meio das quais foram realizadas a classificação dos documentos

de acordo com os critérios de qualidade de acordo com o Quadro 6, bem como, a extração das informações de interesse de acordo com o Quadro 7.

Os dados bibliométricos provenientes das bases de dados foram inseridos em planilhas eletrônicas, permitindo a quantificação das métricas da literatura existente. Essas métricas, como autorias, tipos de publicação, países de origem, ano de publicação e volumes de publicações por ano, foram representadas em gráficos a fim de possibilitar uma análise visual e compreensão mais clara dos resultados.

Ao final, foi elaborado um relatório contendo uma síntese abrangente da literatura analisada. Nesse documento, foram apresentadas, de maneira clara e estruturada, as principais descobertas, análises e conclusões obtidas a partir da revisão sistemática conduzida.

3.1.3 *Survey* Empresarial

O método empregado para a prospecção, listagem e checagem das empresas de bambu engenheirado foi representado pelas buscas em seus *websites* corporativos. A primeira fase da *survey* empresarial consistiu na prospecção das empresas. Para identificar as empresas da indústria global de bambu engenheirado, foram realizadas pesquisas pelos buscadores Google®, Bing® e Baidu® e das plataformas de mídias sociais LinkedIn®, Instagram® e Facebook®. No âmbito das bases de dados científicas, documentos obtidos na etapa anterior de revisão sistemática foram utilizados para identificar potenciais produtores e empresas. A fim de garantir uma análise representativa, este processo de busca considerou essas diferentes fontes de informação para formalizar uma lista de produtores de bambu engenheirado estrutural.

A sistematização por meio dos mecanismos de busca na internet e das mídias sociais mencionadas envolveu a realização de pesquisa por termos individuais (conforme Quadro 8). Durante a etapa de leitura dos resultados de cada busca individual, foram identificados e salvos relatórios, manuais técnicos e catálogos relevantes.

Paralelamente à prospecção das empresas, foi realizada a tabulação das informações relevantes, em planilhas do Microsoft Excel, referente a cada empresa identificada. Foram registrados o nome da empresa, juntamente com o país onde está localizada, a atividade desempenhada, *website* e mídias sociais, bem como, o buscador ou documento por meio do qual a empresa ou fabricante foi identificado. A fim de confirmar a existência dos potenciais empresas, foi realizado uma pesquisa simultânea nos motores de busca, LinkedIn®, Facebook® e Instagram®. Essas pesquisas visaram identificar a representação oficial de cada empresa, seja por meio de seu perfil nas redes sociais ou de seu *website*.

Quadro 8 - Palavras-chave a serem utilizadas para busca de produtores de bambu engenheirado

Motores de busca	Termos de Busca
Google® Bing® Baidu®	<i>“Engineered bamboo factory”</i>
	<i>“Engineered bamboo industry”</i>
	<i>“Engineered bamboo manufacturer”</i>
	<i>“Engineered bamboo producer”</i>
	<i>“Laminated bamboo lumber factory”</i>
	<i>“Laminated bamboo lumber industry”</i>
	<i>“Laminated bamboo lumber manufacturer”</i>
	<i>“Laminated bamboo lumber producer”</i>
	<i>“Bamboo scrimber factory”</i>
	<i>“Bamboo scrimber industry”</i>
	<i>“Bamboo scrimber manufacturer”</i>
	<i>“Bamboo scrimber producer”</i>
	<i>“Parallel strand bamboo factory”</i>
	<i>“Parallel strand bamboo industry”</i>
	<i>“Parallel strand bamboo manufacturer”</i>
	<i>“Parallel strand bamboo producer”</i>
	<i>“Glued laminated bamboo factory”</i>
	<i>“Glued laminated bamboo industry”</i>
	<i>“Glued laminated bamboo manufacturer”</i>
	<i>“Glued laminated bamboo producer”</i>
	<i>“Cross-laminated bamboo factory”</i>
	<i>“Cross-laminated bamboo industry”</i>
	<i>“Cross-laminated bamboo manufacturer”</i>
	<i>“Cross-laminated bamboo producer”</i>
LinkedIn®	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>
Facebook®	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>
Instagram®	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>
	<i>“Bamboo”</i>

Fonte: Autora (2024).

No Quadro 9, são apresentadas as plataformas B2B (*Business-to-Business*) prospectadas para identificar empresas que fabricam produtos de bambu engenheirado estrutural. Para a realização desta pesquisa, utilizou-se *“engineered bamboo”*, *“laminated bamboo”* e *“bamboo scrimber”* como termos de busca nas plataformas Made-in-China, Alibaba e Global Sources. Essa abordagem foi adotada devido à relevância dessas plataformas no mercado B2B,

permitindo acessar diretamente informações sobre fabricantes e fornecedores de materiais específicos para aplicações estruturais. A escolha do termo de busca visou garantir a padronização e facilitar a localização de produtos relacionados ao foco do estudo.

Quadro 9 – Plataformas B2B prospectadas

Plataformas B2B	Termos de Busca
Made-in-china	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>
Alibaba	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>
Global Sources	<i>“Engineered bamboo”</i>
	<i>“Laminated bamboo”</i>
	<i>“Bamboo scrimber”</i>

Fonte: Autora (2024).

No Quadro 10, são apresentados os motores de busca utilizados, juntamente com os termos de busca empregados em chinês e em inglês, para realizar a prospecção de empresas que fabricam bambu engenheirado estrutural. As ferramentas de busca selecionadas foram Google®, Bing® e Baidu®, sendo este último especialmente relevante para consultas no mercado chinês, onde o uso do bambu em aplicações estruturais é amplamente desenvolvido.

Os termos de busca em mandarim foram obtidos a partir de traduções diretas (com o auxílio do Google Tradutor), consulta à base de dados da Scopus e revisão de artigos acadêmicos para assegurar a adequação da nomenclatura técnica. Entre os termos empregados, destacam-se: 工程竹结构 (*“engineered bamboo structure”*) e 工程竹制造商 (*“engineered bamboo manufacturer”*), que foram utilizados para localizar fabricantes e fornecedores de materiais estruturais de bambu engenheirado.

Essa estratégia de busca, utilizando múltiplos termos e idiomas, foi elaborada para garantir uma prospecção ampla e abrangente, permitindo identificar tanto empresas quanto tecnologias e produtos relacionados ao uso de bambu engenheirado estrutural. O uso de diferentes motores de busca assegurou o acesso a informações de diversas regiões e mercados, contribuindo para os objetivos da pesquisa.

Quadro 10 – Termos de busca em chinês

Motores de busca	Termos de Busca	Termos de Busca
Google® Bing® Baidu®	工程竹结构 ¹	“Engineered bamboo structure”
	工程竹制造商 ¹	“Engineered bamboo manufacturer”
	竹集成材 ²	“Laminated bamboo” ou “bamboo glulam”
	竹集成方材 ³	“Laminated bamboo” ou “bamboo glulam”
	集成竹材 ⁴	“Laminated bamboo” ou “bamboo glulam”
	竹重组材 ³	“Bamboo scrimber”
	重组竹 ⁵	“Recombinant bamboo”
	称重竹 ⁶	“Heavy bamboo”/ “Reconstructed bamboo”

Legenda: ¹ Google Tradutor; ² Scopus; ³ Liu *et al.* (2016); ⁴ Liu *et al.* (2016); ⁵ Wang *et al.* (2020); ⁶ Baidu (2024).

Fonte: Autora (2024).

As *strings* de busca utilizadas na prospecção de empresas que fabricam bambu engenheirado estrutural estão especificadas no Quadro 11, realizadas por meio da análise de publicações científicas nas bases de dados Scopus (SC) e Web of Science (WoS). Essas *strings* foram elaboradas com base em termos técnicos amplamente utilizados na literatura acadêmica e no setor industrial, de forma a abranger diferentes tipos de produtos estruturais de bambu.

A primeira *string* inclui termos como “bamboo scrimber”, “parallel strand bamboo”, “strand woven bamboo” e “parallel bamboo strand lumber”, indicando um resultado quase 23% maior no Scopus frente ao Web of Science. Esses termos estão relacionados a materiais engenheirados densificados, amplamente aplicados em estruturas devido às suas propriedades mecânicas superiores.

A segunda *string*, “laminated bamboo lumber”, obteve 127 resultados na Scopus e 103 na Web of Science, direcionando a busca para produtos de bambu laminado utilizados em elementos estruturais. A terceira *string*, “glued laminated bamboo” ou “glulam”, apresentou 30% mais resultados na Scopus que na Web of Science, sendo focada no bambu laminado colado, conhecido por suas aplicações em vigas e colunas de grandes dimensões.

Por fim, a quarta *string*, “cross laminated bamboo” ou “cross-laminated bamboo”, retornou mais de 24% dos resultados na Scopus que na Web of Science. Esses termos estão associados ao bambu laminado cruzado, um material relativamente novo e promissor para aplicações em painéis estruturais.

A utilização dessas *strings* permitiu identificar artigos que mencionam fabricantes ou aplicações desses materiais, contribuindo para mapear as empresas que produzem bambu engenheirado estrutural. O cruzamento de informações entre as bases de dados garantiu maior abrangência e precisão na prospecção.

Quadro 11 – *Strings* de busca para prospecção de empresas em publicações na base de dados Scopus e Web of Science

<i>Strings</i>	Scopus	WoS
<i>“bamboo scrimber” OR “parallel strand bamboo” OR “strand woven bamboo” OR “parallel bamboo strand lumber”</i>	329	268
<i>“laminated bamboo lumber”</i>	127	103
<i>“glued laminated bamboo” OR glubam</i>	156	120
<i>“cross laminated bamboo” OR “cross-laminated bamboo”</i>	36	29

Fonte: Autora (2024).

A pesquisa conduzida a partir das *strings* apresentadas no Quadro 11 resultou em 1168 documentos identificados. Dentre esses, 527 foram considerados duplicados e 11 foram descartados por estarem fora do escopo do estudo. Após essas exclusões, restaram 631 documentos. Destes, 118 não estavam acessíveis à autora, reduzindo o total para 513 documentos disponíveis para análise.

A prospecção das empresas de bambu engenheirado mencionadas nesses documentos não envolveu a leitura completa de todos os textos. Essa etapa foi realizada por meio de uma análise detalhada da seção *Materiais e Métodos* de cada artigo e das afiliações dos autores, complementada pela busca de termos específicos no texto utilizando o atalho “Ctrl + F”. Os termos utilizados para identificar empresas por meio do atalho incluíram: “company”, “enterprise”, “manufacturer”, “producer”, “provider”, “fabricator”, “maker”, “supplier”, “Ltd.”, “produced”, “manufactured”, “made”, “fabricated”, “supplied” e “provided”.

A segunda fase do *survey* setorial consistirá na definição das questões que nortearão a coleta de dados e caracterização das empresas identificadas. Questões primárias foram propostas com base no estudo realizado por De Araujo e Christoforo (2023) e são apresentadas no Quadro 12. As questões consideradas visaram compreender os aspectos corporativos e caracterizar a indústria global de bambu engenheirado estrutural acerca da localização geográfica das plantas fabris atualmente em operação, dos objetivos corporativos, tipos de produtos fabricados, canais de contato com os clientes, entre outros aspectos. Com base nas informações e no volume de empresas identificadas na fase de prospecção, foram elaboradas novas questões com o objetivo de obter a caracterização mais completa possível. Somente informações compartilhadas nos sites oficiais foram consideradas nesta investigação, garantindo um cenário mais assertivo.

Quadro 12 - Questões e aspectos primários em avaliação nesta *survey*

Questões	Justificativa	Alternativa
Identificar a localização da empresa	Entender se as empresas especificam seus locais para os clientes	País
Identificar a atividade da empresa	Entender as áreas de atuação que compõe a setor de bambu engenheirado	Produção; prestação de serviços
Identificar todos os produtos/serviços	Entender os objetivos do mercado e detalhes do produto	Descrição do produto; fotos do produto; performance do produto; sustentabilidade do produto; vantagens do produto
Identificar todas as linguagens de comunicação	Entender o acesso da empresa ao mercado externo entregando conteúdo em diferentes idiomas	Livre
Identificar os canais de contato com o cliente	Entender quais os canais comunicação formal com os clientes	Caixa de mensagem; Telefone; Whatsapp; e-mail; Facebook®; X®; Instagram®; LinkedIn®
Identificar estruturas e atributos corporativos em relação a dados e valores	Compreender se as empresas expõem claramente os seus objetivos, condições e valores	História; atividades/negócios; equipes de trabalho; esquema de produção
Identificar o ano de fundação	Entender quantos anos de atuação a empresa possui	Idade
Identificar se existem certificações de produto/processos, etc.	Entender quais as certificações presentes nessa indústria	Certificação técnica
Identificar espécies de bambu, adesivos e resinas	Entender quais as matérias-primas matéria-prima utilizadas	Espécies de bambu, adesivos
Identificar as aplicações dos produtos	Entender quais as finalidades dos produtos	Obras de construção
Identificar o nível de tecnológico e de industrialização	Entender qual o nível de industrialização dos produtos/prestadores de serviço	Maquinário e tecnologias

Fonte: Adaptado de De Araujo e Christoforo (2023).

Uma vez definido o método de coleta de dados, foi iniciada a coleta propriamente dita. A princípio, essa fase envolveu a análise dos dados corporativos das empresas de bambu engenheirado utilizando seus *websites* oficiais. Os dados corporativos foram coletados e organizados de acordo com as questões apresentadas no Quadro 12.

Os dados coletados foram utilizados para elaborar gráficos e tabelas com o objetivo de avaliar cada alternativa identificada para as questões analisadas. Assim, foram gerados gráficos representando a localização das empresas, as atividades realizadas, os produtos fabricados, os anos de atuação, entre outros aspectos relevantes observados.

Com base na análise dos dados, é possível interpretar os resultados obtidos e responder à pergunta de pesquisa. Nesta etapa, é importante considerar a relevância dos achados em relação aos objetivos da pesquisa e discutir possíveis implicações teóricas e práticas.

Por fim, foi redigido o relatório final da pesquisa, descrevendo todos os aspectos do estudo, desde a definição dos objetivos até a interpretação dos resultados.

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA: *CROSS-LAMINATED BAMBOO* (CLB)

Um dos objetivos deste estudo é realizar uma revisão do estado arte do *cross-laminated bamboo* (CLB), um produto engenheirado de bambu emergente. Para isso, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura. Visou-se, por meio da RSL, identificar aspectos tais quais: o nível de produção industrial do CLB; as normas relacionadas a fabricação e caracterização das propriedades do CLB; as espécies, propriedades mecânicas e modelos constitutivos do CLB; bem como, as suas aplicações construtivas.

Esta etapa baseou-se em uma revisão sistemática representativa para identificar e coletar informações de artigos publicados em revistas com revisão por pares, artigos de anais de congressos, livros e capítulos de livros. A prospecção de documentos foi realizada em duas principais plataformas de busca, Scopus e Web of Science. A pesquisa incluiu todas as publicações disponíveis nas bases de dados, sem qualquer restrição quanto ao período de publicação, de forma a considerar todas as publicações existentes sobre este tema. O Quadro 13 apresenta a *string* de busca definida.

Essa revisão sistemática foi conduzida seguindo o mesmo procedimento descrito no tópico 3.1.2. Os resultados obtidos a partir da *string* apresentada no Quadro 13 foram exportados em formato RIS para o software StArt, onde foram realizadas a identificação e a exclusão de documentos duplicados. Em seguida, os dados bibliométricos foram transferidos para o Microsoft Excel, onde ocorreu o primeiro filtro da etapa de triagem dos documentos. O processo de filtragem foi conduzido em três etapas, conforme descrito previamente no tópico 3.2.1.

Quadro 13 – *Strings* de busca da RSL

Bases	<i>Strings</i>
Scopus Web of Science	“ <i>cross laminated bamboo</i> ” OR “ <i>cross-laminated bamboo</i> ”

Fonte: Autora (2024).

Os critérios de inclusão e exclusão, utilizados para avaliar os documentos em cada fase do processo de filtragem de documentos (seleção, elegibilidade e inclusão), são apresentados nos Quadro 14 e Quadro 15, respectivamente.

Quadro 14 – Critérios de inclusão

Critério	Descrição
I1	Inclusão de documentos que dissertem sobre o CLB

Fonte: Autora (2024).

Quadro 15 - Critérios de exclusão

Critério	Descrição
E1	Exclusão de documentos que não dissertem sobre o CLB
E2	Exclusão de trabalhos duplicados

Fonte: Autora (2024).

Os artigos incluídos na revisão sistemática foram classificados conforme os critérios de qualidade apresentados no quadro a seguir (Quadro 16).

Quadro 16 - Critérios de qualidade

Critério	Descrição do critério de qualidade	Lista para escolha
Q1	O documento disserta sobre o CLB?	Sim, Não
Q2	O documento descreve os processos de fabricação do CLB?	Sim, Não
Q3	O documento apresenta as aplicações do CLB na construção?	Sim, Não
Q4	O documento cita as espécies de bambu utilizadas na produção do CLB?	Sim, Não
Q5	O documento discorre sobre as barreiras na utilização do CLB como elemento estrutural?	Sim, Não
Q6	O documento apresenta normas ou códigos relacionados ao CLB?	Sim, Não
Q7	O documento aborda sobre metodologias/testes de caracterização do CLB?	Sim, Não
Q8	O documento aborda sobre modelos constitutivos e mecanismos de falha do CLB?	Sim, Não
Q9	O documento discorre sobre as propriedades físicas e mecânicas do CLB?	Sim, Não
Q10	O documento aborda sobre simulação numérica para avaliação do desempenho estrutural do CLB?	Sim, Não

Fonte: Autora (2024).

Além da classificação dos documentos conforme critérios de qualidade, foi realizada a coleta das informações correspondentes às perguntas de extração definidas no Quadro 17.

Quadro 17 - Campos de critério de extração

Campo	Tipo	Conteúdo

Quais os processos de fabricação do CLB?	Texto	Livre
Quais as aplicações do CLB na construção?	Texto	Livre
Os resultados experimentais/simulação numérica são positivos para utilização do CLB como elemento estrutural?	Escolha na lista	{Sim,Não}
Quais as espécies de bambu utilizadas para fabricação do CLB?	Texto	Livre
Quais os adesivos e resinas utilizadas na fabricação do CLB?	Texto	Livre
Quais as dimensões do CLB?	Texto	Livre
Quais as barreiras para a adoção do CLB como material estrutural?	Texto	Livre
Quais as normas e códigos relacionados ao CLB?	Texto	Livre
Quais os ensaios utilizados na caracterização das propriedades do CLB?	Texto	Livre
Quais os modos de falha apresentados pelo CLB?	Texto	Livre
Quais os modelos constitutivos propostos para o CLB?	Texto	Livre

Fonte: Autora (2024).

Os documentos que foram selecionados no Filtro 3, e foram analisados e interpretados serão incluídos no repositório de artigos da pesquisa. Os documentos foram armazenados com o apoio do *software* para gerenciamento de referências Mendeley.

Os dados bibliométricos extraídos das bases de dados e registrados em planilhas do Microsoft Excel foram utilizados para quantificar métricas de publicação por meio de gráficos e tabelas, incluindo informações sobre autoria, tipos de publicações, origens, anos de publicação e volumes anuais. As publicações selecionadas foram analisadas detalhadamente, e as informações relevantes foram extraídas conforme o Quadro 17. Esses dados subsidiaram a construção dos argumentos necessários para a revisão do estado da arte do CLB, abrangendo aspectos como propriedades, aplicações, processos de manufatura, além de normas e códigos aplicáveis.

3.3 REVISÃO SISTEMÁTICA: *CROSS-LAMINATED BAMBOO AND TIMBER* (CLBT)

Durante a revisão sobre o CLB, identificou-se um novo produto híbrido de bambu engenheirado e madeira laminada cruzada, denominado CLBT (*cross-laminated bamboo and*

timber). Para realizar a revisão sistemática da literatura sobre o CLBT, foi adotado um processo metodológico semelhante ao empregado na revisão do CLB.

O objetivo da revisão sistemática da literatura (RSL) foi identificar aspectos relacionados ao CLBT, incluindo o nível de produção industrial, as normas aplicáveis à sua fabricação e caracterização de propriedades, as espécies utilizadas, suas propriedades mecânicas e suas aplicações no setor construtivo.

Essa etapa foi fundamentada em uma revisão sistemática representativa, que buscou coletar informações de artigos publicados em revistas científicas com revisão por pares, anais de congressos, livros e capítulos de livros. A busca pelos documentos foi realizada nas duas principais plataformas, Scopus e Web of Science. A pesquisa abrangeu todas as publicações disponíveis nessas bases de dados, sem restrição temporal, com o objetivo de incluir todas as contribuições relevantes ao tema. A *string* de busca utilizada está apresentada no Quadro 18.

Essa revisão sistemática foi conduzida a partir do mesmo procedimento descrito no tópico 3.2. A filtragem dos documentos foi conduzida em três etapas, assim como descrito anteriormente no tópico 3.1.2.

Quadro 18 – *Strings* de busca da RSL

Bases	<i>Strings</i>
Scopus Web of Science	“ <i>cross laminated bamboo and timber</i> ” OR “ <i>cross-laminated bamboo and timber</i> ”

Fonte: Autora (2024).

Os critérios de inclusão e exclusão, utilizados para avaliar os documentos em cada fase do processo de filtragem de documentos (seleção, elegibilidade e inclusão), são apresentados nos Quadro 19 e Quadro 20, respectivamente.

Quadro 19 - Critérios de inclusão

Critério	Descrição
I1	Inclusão de documentos que dissertem sobre o CLBT

Fonte: Autora (2024).

Quadro 20 - Critérios de exclusão

Critério	Descrição
E1	Exclusão de documentos que não dissertem sobre o CLBT
E2	Exclusão de trabalhos duplicados

Fonte: Autora (2024).

Os artigos incluídos na revisão sistemática foram classificados conforme os critérios de qualidade apresentados no quadro a seguir (Quadro 21).

Quadro 21 - Critérios de qualidade

Critério	Descrição do critério de qualidade	Lista para escolha
Q1	O documento disserta sobre o CLBT?	Sim, Não
Q2	O documento descreve os processos de fabricação do CLBT?	Sim, Não
Q3	O documento apresenta as aplicações do CLBT na construção?	Sim, Não
Q4	O documento cita as espécies de bambu utilizadas na produção do CLBT?	Sim, Não
Q5	O documento discorre sobre as barreiras na utilização do CLBT como elemento estrutural?	Sim, Não
Q6	O documento apresenta normas ou códigos relacionados ao CLBT?	Sim, Não
Q7	O documento aborda sobre metodologias/testes de caracterização do CLBT?	Sim, Não
Q8	O documento aborda sobre modelos constitutivos e mecanismos de falha do CLBT?	Sim, Não
Q9	O documento discorre sobre as propriedades físicas e mecânicas do CLBT?	Sim, Não
Q10	O documento aborda sobre simulação numérica para avaliação do desempenho estrutural do CLBT?	Sim, Não

Fonte: Autora (2024).

Além da classificação dos documentos conforme critérios de qualidade, será realizada a coleta das informações correspondentes às perguntas de extração definidas no Quadro 22.

Quadro 22 - Campos de critério de extração

Campo	Tipo	Conteúdo
Quais os processos de fabricação do CLBT?	Texto	Livre
Quais as aplicações do CLBT na construção?	Texto	Livre
Os resultados experimentais/simulação numérica são positivos para utilização do CLBT como elemento estrutural?	Escolha na lista	{Sim,Não}
Quais as espécies de bambu utilizadas para fabricação do CLBT?	Texto	Livre
Quais os adesivos e resinas utilizadas na fabricação do CLBT?	Texto	Livre
Quais as dimensões do CLBT?	Texto	Livre
Quais as barreiras para a adoção do CLBT como material estrutural?	Texto	Livre
Quais as normas e códigos relacionados ao CLBT?	Texto	Livre
Quais os ensaios utilizados na caracterização das propriedades do CLBT?	Texto	Livre

Quais os modos de falha apresentados pelo CLBT?	Texto	Livre
Quais os modelos constitutivos propostos para o CLBT?	Texto	Livre

Fonte: Autora (2024).

Os documentos selecionados no Filtro 3 foram analisados, interpretados e incluídos no repositório de artigos da pesquisa. Para organização e gerenciamento, os documentos foram armazenados com o auxílio do software Mendeley.

Os dados bibliométricos, registrados em planilhas do Microsoft Excel a partir das bases de dados, foram utilizados para quantificar métricas de publicação por meio de gráficos e tabelas, abrangendo autorias, tipos de publicação, origens, anos e volumes anuais. As publicações selecionadas foram lidas, e as informações relevantes foram extraídas conforme o Quadro 22, com o objetivo de embasar a revisão do estado da arte do CLB, abordando propriedades, aplicações, processos de manufatura, modelos constitutivos, bem como normas e códigos aplicáveis.

**4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA DA INDÚSTRIA DE
BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL**

4 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

Neste capítulo, são apresentados os resultados da revisão sistemática da literatura, com foco na indústria de bambu engenheirado estrutural. O capítulo abrange tanto a análise bibliométrica dos documentos selecionados quanto a síntese das informações extraídas, proporcionando uma visão abrangente sobre o estado atual da pesquisa e desenvolvimento nesse campo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS

Os resultados da busca realizados nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS), utilizando as *strings* definidas na Tabela 9, totalizaram 182 documentos identificados. A *string* S1 resultou em um total combinado de 34 documentos entre as duas bases, enquanto a *string* S2 apresentou 49 documentos. A *string* S3 destacou-se por obter o maior número de publicações, totalizando 88 documentos, refletindo a maior relevância acadêmica e industrial dos temas relacionados ao *bamboo scrimber*. Por outro lado, a *string* S4 apresentou o menor número de documentos, com apenas 11 publicações identificadas, indicando uma menor representatividade nos tópicos abordados por essa *string*.

Tabela 9 – Resultados das *strings* de busca em cada base de dados

<i>Strings</i>	Código	Scopus	WoS
“laminated bamboo lumber” AND (“industry” OR “industrialization” OR “manufacture” OR “manufacturing” OR “producer” OR “developer”)	S1	21	13
(“glued laminated bamboo” OR <i>glulam</i>) AND (“industry” OR “industrialization” OR “manufacture” OR “manufacturing” OR “producer” OR “developer”)	S2	29	20
(“bamboo scrimber” OR “parallel strand bamboo” OR “parallel bamboo strand lumber”) AND (“industry” OR “industrialization” OR “manufacture” OR “manufacturing” OR “producer” OR “developer”)	S3	50	38
(“cross laminated bamboo” OR “cross-laminated bamboo”) AND (“industry” OR “industrialization” OR “manufacture” OR “manufacturing” OR “producer” OR “developer”)	S4	6	5

Fonte: Autora (2024).

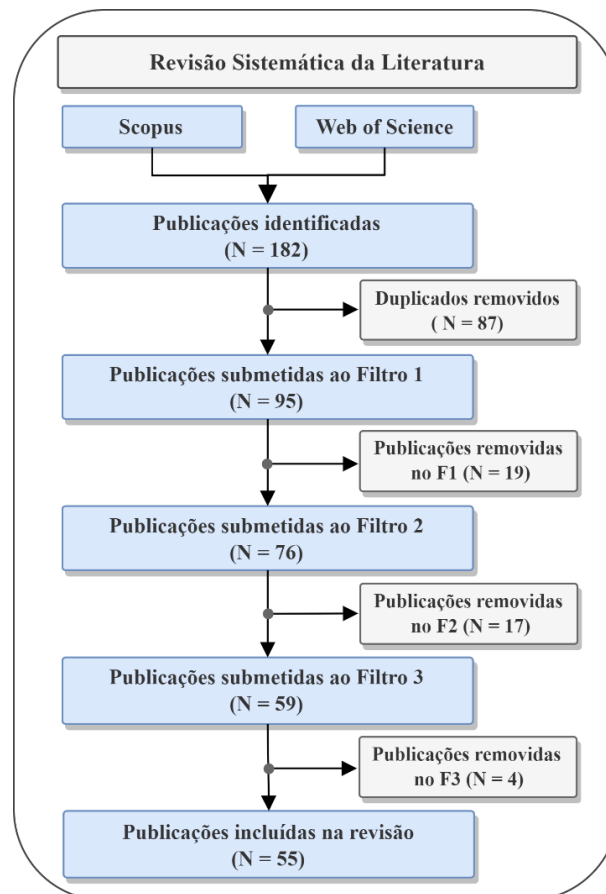
Na Figura 45, é apresentado o fluxograma PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) utilizado na condução da Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O fluxograma detalha as etapas de identificação, triagem e inclusão dos estudos no processo, garantindo clareza e transparência metodológica.

Inicialmente, foram identificadas 182 publicações nas bases de dados Scopus e Web of Science. Após a remoção de 87 publicações duplicadas entre as bases, restaram 95 documentos,

os quais foram submetidos ao primeiro filtro (F1). Esse filtro envolveu a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, com o objetivo de excluir estudos que não atendiam aos critérios previamente estabelecidos. Como resultado, 19 publicações foram eliminadas nesta etapa.

As 76 publicações remanescentes passaram pelo segundo filtro (F2), que consistiu em uma análise mais detalhada, com base na leitura das introduções e conclusões. Essa avaliação resultou na exclusão de 17 documentos, restando 59 publicações consideradas relevantes para o filtro final (F3). No último filtro, que envolveu a leitura completa dos textos, quatro documentos foram removidos, culminando em um total de 55 publicações incluídas na revisão. Todo o processo de forma clara e objetiva é ilustrado na Figura 45, permitindo uma compreensão visual do fluxo de seleção e triagem dos estudos.

Figura 45 - Fluxograma PRISMA da Revisão Sistema da Literatura

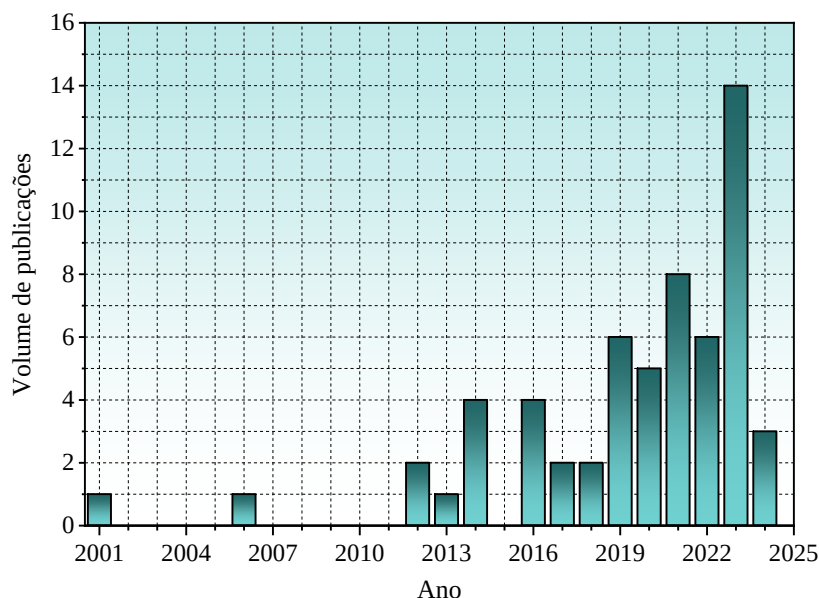


Fonte: Autora (2024).

No gráfico da Figura 46, é ilustrado o volume de publicações ao longo dos anos relacionadas ao uso de bambu engenheirado na indústria da construção civil, considerando os 55 documentos selecionados para esta revisão sistemática. Os dados foram extraídos das bases

Scopus e Web of Science e abrangem o período desde a primeira publicação identificada, em 2001, até o ano de 2024.

Figura 46 - Volume de publicações por ano



Fonte: Autora (2024).

De 2001 a 2013 (Figura 46), observa-se um volume reduzido de publicações, com no máximo uma ou duas publicações por ano. Esse comportamento sugere que o tema recebeu pouca atenção nesse período inicial, possivelmente devido à falta de desenvolvimento tecnológico ou interesse científico na aplicação do bambu engenheirado na construção civil.

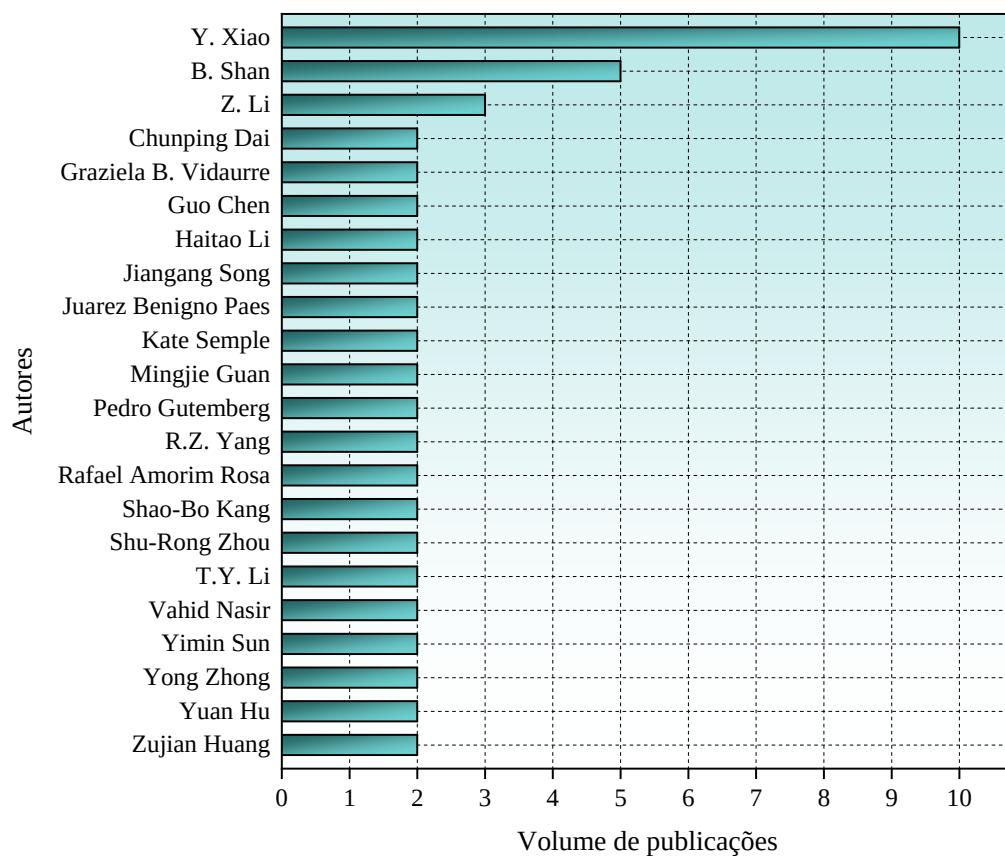
A partir de 2016, identifica-se um crescimento gradual no volume de publicações, indicando um aumento do interesse acadêmico e científico no tema. Esse crescimento se torna mais significativo a partir de 2019, com um aumento consistente no número de publicações anuais. O ano de 2023 representa o pico de publicações, com 14 documentos, evidenciando um período de maior atenção e esforço de pesquisa na área. Em 2024, nota-se uma redução no número de publicações em relação ao pico de 2023, o que pode estar relacionado ao fato de a coleta de dados ainda estar em andamento para este ano, indicando que novos documentos podem ser adicionados posteriormente (Figura 46).

Esse padrão de crescimento ao longo das décadas demonstra que o tema do bambu engenheirado na construção civil tem ganhado relevância, acompanhando avanços tecnológicos, maior conscientização sobre a sustentabilidade na construção civil e desafios específicos que impulsionaram novas investigações. O pico observado em 2022 reflete o

momento de maior maturidade e interesse da comunidade acadêmica, consolidando a importância do tema na agenda de pesquisa global.

O volume de publicações por autor entre as 55 publicações analisadas neste estudo é apresentado a partir da Figura 47. No total, foram identificados 232 autores contribuindo para esses trabalhos, mas o gráfico inclui apenas aqueles com participação em pelo menos 2 publicações, destacando os autores mais ativos na área de pesquisa sobre bambu engenheirado na construção civil.

Figura 47 – Volume de publicações por autor



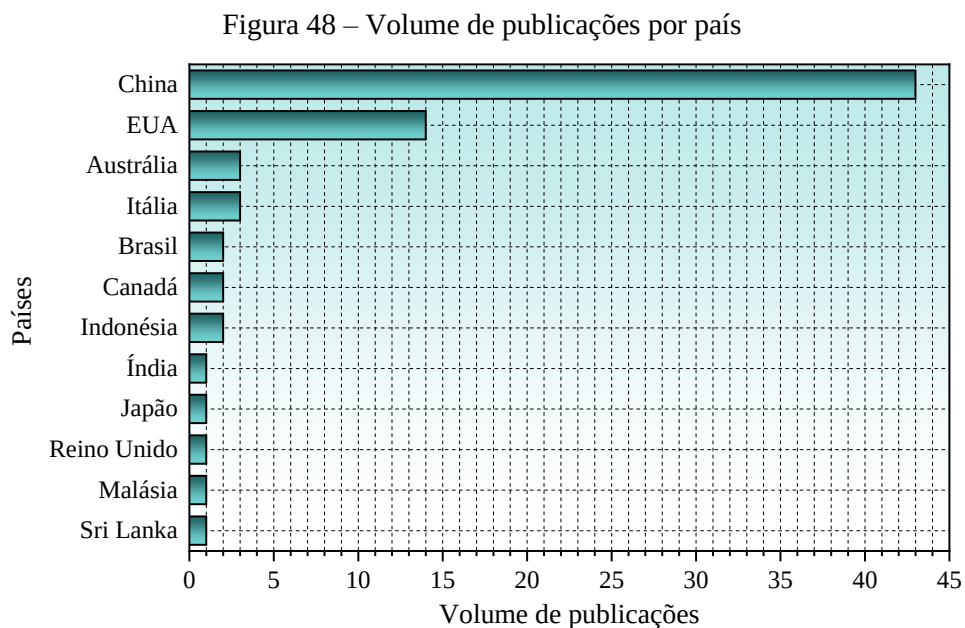
Fonte: Autora (2024).

O autor Y. Xiao lidera em número de publicações, com um total de 10 trabalhos, seguido por B. Shan, com 5 publicações, e Z. Li, com 3. Esses pesquisadores, juntamente com os demais representados no gráfico, têm desempenhado um papel significativo no desenvolvimento da área. A maioria dos autores possui entre 1 e 2 publicações, o que também demonstra uma contribuição menos centralizada.

A concentração de publicações em um grupo seleto de autores reflete uma característica comum em campos de pesquisa em desenvolvimento, onde determinados pesquisadores assumem posições de destaque na produção científica. Com base nesses dados, é possível

concluir que alguns pesquisadores possuem um papel de destaque no avanço do conhecimento sobre bambu engenheirado, sendo potenciais referências para investigações futuras. O gráfico também aponta para a diversificação da pesquisa, com um número expressivo de autores contribuindo, o que reforça a relevância do tema e o interesse da comunidade científica.

O gráfico da Figura 48 exibe o volume de publicações por país, considerando as 55 publicações analisadas neste estudo. Os dados refletem a distribuição geográfica da produção científica na área e permitem identificar os países com maior contribuição para a literatura.



Fonte: Autora (2024).

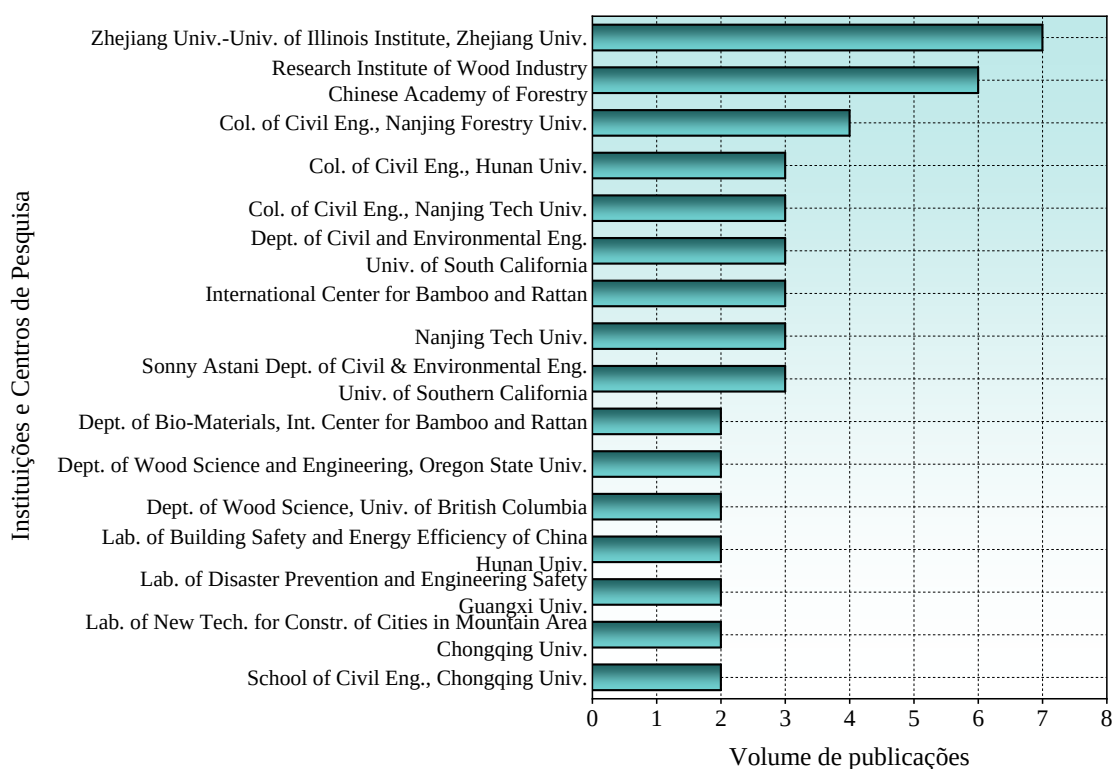
A China lidera amplamente, com 43 publicações, representando a grande maioria dos estudos. Esse domínio pode ser atribuído à ampla disponibilidade de bambu no país, além de políticas e investimentos voltados para a pesquisa e desenvolvimento de materiais sustentáveis. Em seguida, os Estados Unidos ocupam o segundo lugar, com 14 publicações, indicando um interesse significativo, ainda que substancialmente menor que o da China. Países como Austrália e Itália possuem 3 publicações cada, seguidos por Brasil, Canadá e Indonésia, com 2 publicações cada. Por fim, Índia, Japão, Reino Unido, Malásia e Sri Lanka contribuíram com 1 publicação cada (Figura 48).

Essa distribuição evidencia que a China é o principal polo de pesquisa e desenvolvimento na área, com contribuições muito superiores às dos demais países. A posição dos Estados Unidos reflete uma inserção relevante na temática, possivelmente motivada pelo avanço tecnológico e interesse em materiais sustentáveis. A presença de outros países com números mais modestos, como Brasil e Indonésia, indica um esforço crescente, mas ainda em

estágios iniciais de desenvolvimento. Além disso, a participação de outros países (Figura 48), embora menor, sugere uma expansão gradual da pesquisa para diferentes contextos geográficos, o que pode refletir o interesse global em soluções sustentáveis na construção civil.

A Figura 49 reúne as instituições e centros de pesquisa classificados pelo volume de publicações relacionadas ao tema do bambu engenheirado na construção civil. Esses dados evidenciam as principais instituições que contribuem para o avanço científico na área, destacando a liderança de algumas entidades específicas.

Figura 49 – Instituições e Centros de Pesquisa por volume de publicações



Fonte: Autora (2024).

A Zhejiang University-University of Illinois Institute ocupa a primeira posição, com 7 publicações, refletindo uma colaboração acadêmica internacional robusta e um papel central no desenvolvimento de pesquisas sobre o tema. Em seguida, o Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, aparece com 6 publicações, destacando-se como uma das principais instituições chinesas em pesquisa sobre materiais de base florestal (Figura 49).

Outras instituições, como os Colégios de Engenharia Civil da Nanjing Forestry University e da Hunan University, registraram 4 e 3 publicações, respectivamente, enquanto o Department of Civil and Environmental Engineering, University of South California, junto a outras instituições internacionais e chinesas, também apresenta 3 publicações cada. Além

dessas, um conjunto significativo de instituições contribuiu com 2 publicações cada, entre elas a Oregon State University, o International Center for Bamboo and Rattan, e o Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of China. Esses números evidenciam a relevância de centros localizados em diferentes regiões, embora com destaque predominante de instituições chinesas (Figura 49).

A produção científica sobre bambu engenheirado é liderada por instituições chinesas, refletindo o investimento do país em sustentabilidade e recursos renováveis. Apesar desse domínio, o tema atrai interesse internacional, com contribuições de países como Estados Unidos e Canadá, e parcerias globais, como a entre Zhejiang University e University of Illinois, destacando a relevância da colaboração no avanço do conhecimento.

A Tabela 10 reúne a frequência de palavras-chave identificadas nas 55 publicações analisadas. Foram inicialmente detectadas 162 palavras-chave, das quais 50 foram selecionadas por sua relevância, seja por aparecerem pelo menos duas vezes, seja por representarem variações ou temas relacionados a outras palavras de maior frequência.

Tabela 10 – Palavras-chaves com maior número de ocorrências

Palavras-chave	Frequência	Palavras-chave	Frequência
<i>Bamboo scrimber</i>	13	<i>Structural design</i>	2
<i>Mechanical properties</i>	13	<i>Thermal treatment</i>	2
<i>Laminated bamboo lumber (LBL)</i>	10	<i>Water resistance</i>	2
<i>Bamboo</i>	7	<i>Wood scrimber</i>	2
<i>Glulam</i>	7	<i>Adhesion mechanism</i>	1
<i>Connection</i>	3	<i>Adhesive bonding strength</i>	1
<i>Engineered bamboo products</i>	3	<i>Bending performance</i>	1
<i>Glued-laminated bamboo</i>	3	<i>Bio-adhesive</i>	1
<i>Adhesive</i>	2	<i>Biomass adhesive</i>	1
<i>Axial compression</i>	2	<i>Bonding interface</i>	1
<i>Bamboo composite</i>	2	<i>Bonding shear strength</i>	1
<i>Bambusa vulgaris</i>	2	<i>Design and construction</i>	1
<i>Bending properties</i>	2	<i>Design recommendation</i>	1
<i>Carbon dioxide emission</i>	2	<i>Engineered bamboo</i>	1
<i>Composites</i>	2	<i>Environmental impacts</i>	1
<i>Cyclic loading</i>	2	<i>Environmental sustainability</i>	1
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	2	<i>Fire retardant</i>	1
<i>Density</i>	2	<i>Flammability parameters</i>	1
<i>Dimensional stability</i>	2	<i>Laminated bamboo products (LBPs)</i>	1
<i>Energy consumption</i>	2	<i>Laminated products</i>	1
<i>Fire resistance</i>	2	<i>Mechanical parameters</i>	1

ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

<i>Laminated bamboo</i>	2	<i>Monotonic and cyclic loading</i>	1
<i>Manufacturing</i>	2	<i>Monotonic load</i>	1
<i>Production</i>	2	<i>Nail</i>	1
<i>Shear walls</i>	2	<i>Nail connection</i>	1

Fonte: Autora (2024).

Entre os termos selecionados, destaca-se a alta frequência de “*bamboo scrimber*” e “*mechanical properties*”, cada um com 13 ocorrências, indicando temas centrais para o desenvolvimento da pesquisa sobre bambu engenheirado estrutural. Palavras relacionadas, como “*mechanical parameters*”, reforçam o foco nas propriedades mecânicas como eixo principal de investigação.

Outros termos relevantes são “*laminated bamboo lumber (LBL)*”, com 10 ocorrências, “*laminated bamboo*”, com 2 ocorrências, “*laminated bamboo products (LBPs)*” e “*laminated products*”, com 1 ocorrência cada, demonstrando o enfoque em produtos de bambu laminado. Os termos “*glubam*”, com 7 ocorrências, e “*glue-laminated bamboo*”, com 3 ocorrências, que também se refere ao *glubam*, destacam o interesse no estudo deste produto de bambu engenheirado.

Palavras associadas a adesivos, como “*adhesive*”, com 2 ocorrências, “*adhesion mechanism*”, “*adhesive bonding strength*”, “*bio-adhesive*” e “*biomass adhesive*”, com 1 ocorrência cada, refletem o interesse em técnicas de colagem, fundamentais na fabricação de materiais engenheirados de bambu. As palavras “*connection*”, com 3 ocorrências, “*nail*” e “*nail connection*”, com 1 ocorrência cada, demonstram o interesse do estudo dos tipos de conexões utilizadas nos produtos de bambu engenheirado.

Termos como “*axial compression*”, “*bending properties*”, “*dimensional stability*” e “*structural design*”, cada um com 2 ocorrências, juntamente com “*bending performance*”, “*bonding interface*” e “*bonding shear strength*”, com 1 ocorrência cada, indicam a análise de desempenho estrutural e propriedades específicas do material, aspectos essenciais para validar sua aplicação em elementos construtivos.

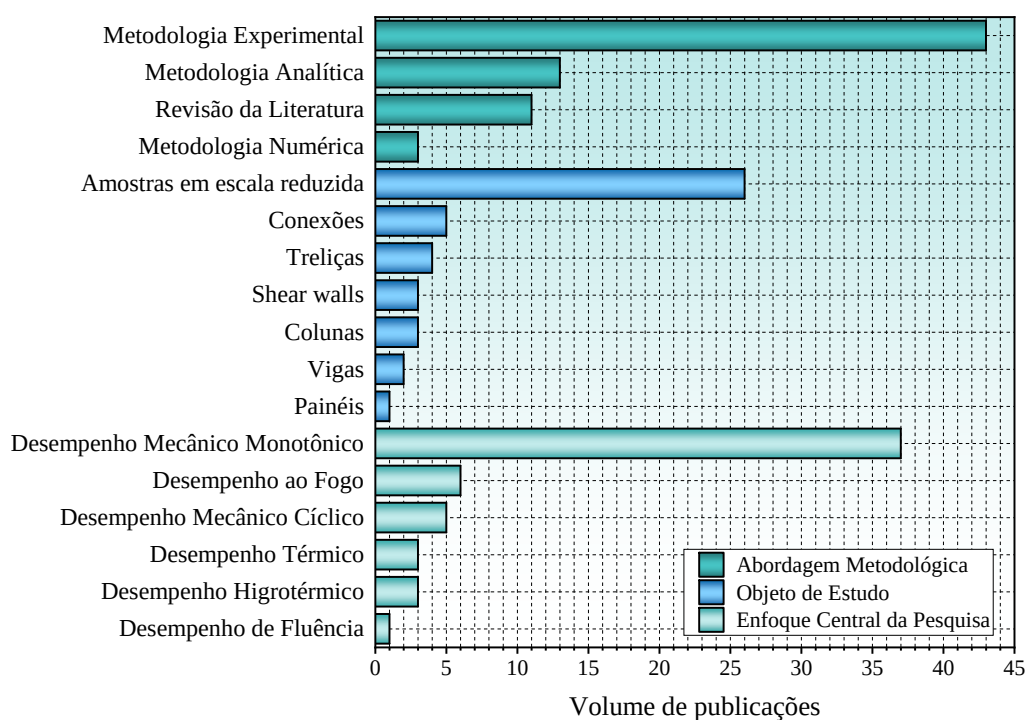
Termos como “*fire resistant*”, com 2 ocorrências, “*fire retardant*” e “*flammability parameters*”, com 1 ocorrência cada, evidenciam o interesse no estudo do desempenho ao fogo dos produtos de bambu engenheirado. De forma similar, termos como “*thermal treatment*” e “*water resistance*”, com 2 ocorrências cada, indicam o foco nas propriedades higrotérmicas desses materiais.

Adicionalmente, palavras como “*environmental sustainability*”, “*carbon dioxide emission*”, e “*energy consumption*” destacam a preocupação com a sustentabilidade e impacto ambiental do uso de bambu engenheirado, alinhando-se às demandas globais por materiais ecologicamente corretos.

A síntese das palavras-chave revela os principais focos de pesquisa na área de bambu engenheirado estrutural, com ênfase no desenvolvimento e caracterização de materiais como *bamboo scrimber* e laminados, além de investigações sobre suas propriedades mecânicas e desempenho estrutural. A ênfase em adesivos, conexões e sustentabilidade destaca a relevância das técnicas de fabricação e do impacto ambiental no desenvolvimento do bambu engenheirado, consolidando-o como uma alternativa sustentável e promissora para a construção civil.

A Figura 50 envolve a distribuição das publicações incluídas nesta revisão sistemática segundo a abordagem metodológica adotada. É importante destacar que, em alguns casos, um mesmo artigo pode adotar mais de uma metodologia, refletindo a diversidade de estratégias de análise utilizadas na área de pesquisa sobre bambu engenheirado estrutural.

Figura 50 – Distribuição das publicações quanto à metodologia adotada, tipos de elemento e foco principal



Fonte: Autora (2024).

Entre as abordagens metodológicas identificadas, a Metodologia Experimental destaca-se amplamente, sendo empregada em 43 publicações. Esse número evidencia o caráter

predominantemente prático da pesquisa na área, com foco em testes laboratoriais e ensaios que permitem avaliar diretamente o comportamento mecânico, térmico, cíclico e de outros aspectos fundamentais para aplicações estruturais. A Metodologia Analítica aparece como a segunda abordagem mais frequente, presente em 13 publicações. Essa abordagem envolve o uso de modelos teóricos e análises matemáticas para interpretar ou prever o desempenho de elementos de bambu engenheirado, muitas vezes complementando os dados experimentais.

A Revisão da Literatura foi identificada em 11 publicações, indicando uma contribuição significativa de estudos que sintetizam o conhecimento existente e oferecem panoramas abrangentes sobre a evolução da área, principais desafios e tendências futuras. Por fim, a Metodologia Numérica aparece em 3 publicações. Essa abordagem, que utiliza simulações computacionais e modelagem numérica, ainda é menos explorada no campo, mas possui grande potencial para complementar estudos experimentais e analíticos, especialmente em cenários onde os testes laboratoriais são limitados.

Os dados mostram que a pesquisa sobre bambu engenheirado estrutural é majoritariamente empírica, com ênfase em metodologias experimentais, enquanto abordagens analíticas e numéricas, embora menos frequentes, complementam o desenvolvimento e o potencial de aplicação na construção civil.

A Figura 50 evidencia a variedade de elementos estruturais e amostras avaliados nas pesquisas sobre bambu engenheirado estrutural. O maior número de publicações, 26, concentra-se em amostras em escala reduzida, destacando-se como o principal objeto de estudo. Essa predominância reflete a preferência por modelos experimentais simplificados, que permitem avaliar o comportamento de materiais e elementos de bambu engenheirado com maior controle e menor custo, antes de sua aplicação em estruturas de maior escala.

Entre os elementos estruturais específicos, as conexões aparecem como o segundo objeto de estudo mais frequente, com 5 publicações. Este foco é justificado pela importância das conexões na transferência de cargas e no desempenho geral de estruturas de bambu engenheirado. Outros objetos de estudo, como treliças (4 publicações), *shear walls* (3 publicações), colunas (3 publicações), e vigas (2 publicações), indicam o interesse em explorar a viabilidade de elementos estruturais específicos em aplicações práticas. Por outro lado, os painéis, com apenas 1 publicação, representam um tema menos abordado, possivelmente devido a uma menor maturidade das pesquisas ou à complexidade de seu estudo.

A pesquisa sobre bambu engenheirado está concentrada em estudos com amostras em escala reduzida, refletindo uma fase inicial de desenvolvimento experimental. Embora menos

frequentes, estudos sobre elementos estruturais, como conexões e shear walls, representam avanços relevantes para aplicações práticas. A menor quantidade de publicações sobre painéis indica a necessidade de mais investigações, dado seu potencial em sistemas construtivos inovadores.

Pela Figura 50, destacam-se os principais aspectos investigados pelos artigos que compõem essa revisão. O Desempenho Mecânico Monotônico surge como o enfoque predominante, representando 37 publicações. Esse resultado reflete a ênfase na avaliação das propriedades mecânicas sob cargas aplicadas de forma estática e crescente, um aspecto essencial para determinar a viabilidade estrutural do bambu engenheirado em aplicações práticas.

O Desempenho ao Fogo aparece em 6 publicações, indicando um interesse significativo na investigação da resistência térmica do material, dado o papel crítico do desempenho ao fogo em estruturas de engenharia civil. De forma semelhante, o Desempenho Mecânico Cíclico, com 5 publicações, foca na resposta do material a cargas variáveis no tempo, incluindo cargas que simulam condições sísmicas. Outros enfoques incluem o Desempenho Térmico e o Desempenho Higrotérmico, cada um com 3 publicações, destacando o interesse em compreender como o bambu engenheirado se comporta frente a variações de temperatura e umidade, fatores essenciais para garantir a durabilidade do material.

Por fim, o Desempenho de Fluência, com apenas 1 publicação, representa uma área ainda pouco explorada, mas de grande importância para avaliar o comportamento do material sob cargas sustentadas ao longo do tempo. A pesquisa sobre bambu engenheirado estrutural concentra-se no desempenho mecânico monotônico, indicando um estágio inicial focado na caracterização do material. Contudo, o interesse em desempenho ao fogo, cíclico e higrotérmico demonstra uma diversificação gradual para atender a demandas específicas de aplicações práticas.

Em síntese, a pesquisa sobre bambu engenheirado encontra-se em uma fase de expansão, caracterizada pela diversificação crescente de enfoques e metodologias. A predominância de estudos empíricos reflete o estágio inicial do desenvolvimento científico na área, enquanto o foco em aplicações práticas, como conexões e desempenho ao fogo, aponta para avanços relevantes rumo à consolidação do material como uma alternativa sustentável na construção civil. Entretanto, apesar do crescente interesse no setor, não foram encontrados estudos abrangentes sobre as características da indústria global de bambu engenheirado estrutural. A ausência de informações detalhadas sobre produção, distribuição, consumo e

tendências de mercado desse material representa um entrave significativo ao desenvolvimento de estratégias eficazes que possam fomentar sua adoção em larga escala.

4.2 PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS

Nesta seção, são apresentados os estudos identificados nesta revisão. É importante destacar que os documentos cujo foco principal é o CLB serão discutidos em detalhe no Capítulo 6 e, portanto, não estão incluídos na presente síntese.

4.2.1 Amostras de bambu engenheirado em escala reduzida

Nugroho e Ando (2001) investigaram o impacto da estrutura de camadas e da orientação da linha de cola (horizontal e vertical) na resistência e no módulo de elasticidade do LBL. O estudo também examinou os efeitos do tratamento de pré-prensagem a quente, destacando a influência da temperatura e do tempo de prensagem na espessura, densidade e estabilidade dimensional do material. Os feixes com linha de cola na direção radial horizontal apresentaram maior resistência, com valores superiores de módulo de ruptura e módulo de elasticidade, demonstrando a vantagem dessa orientação.

Xiao, Yang e Shan (2013) investigaram o processo de produção, o impacto ambiental, especialmente em termos de consumo energético e emissões de dióxido de carbono, e as propriedades mecânicas do *glubam*. Similarmente, Xiao *et al.* (2014) avaliaram o desempenho do *glubam* por meio de diversos testes experimentais em pequenas amostras livres de defeitos. As propriedades mecânicas do *glubam*, incluindo resistência à tração, compressão e flexão, demonstraram ser comparáveis às da madeira, confirmando sua adequação para uso em aplicações estruturais.

Cai *et al.* (2024) compararam as propriedades mecânicas do BGLB (*braided glued laminated bamboo*) com o *bamboo scrimber* (BSC) em testes de tração, compressão, flexão e impacto de baixa velocidade. O BGLB apresentou resistência significativamente superior à do BSC em tração, compressão e flexão, especialmente nos ângulos de 45° e 90°, além de maior absorção de energia em impactos. O material demonstrou comportamento quase isotrópico e maior resistência a falhas catastróficas, com danos progressivos observados em análise microscópica.

He *et al.* (2018) e Zhou *et al.* (2019) investigaram o impacto do processo de tecelagem de feixes de bambu na melhoria de materiais engenheirados à base de bambu. He *et al.* (2018) avaliaram como o “*bamboo bundle knitting*” aprimora a eficiência, uniformidade da densidade,

estabilidade dimensional e resistência ao cisalhamento do *bamboo scrimber*, demonstrando sua adequação para uso interno e externo. Zhou *et al.* (2019) desenvolveram um método de fabricação de BLVL baseado na tecelagem, aumentando a eficiência industrial. Eles identificaram que duas escovagens proporcionaram maior uniformidade e que o tratamento térmico impactou significativamente a rigidez mecânica, com efeito mínimo na transmitância de luz.

Songsong e Maosong (2021) avaliaram modelos constitutivos viscoelásticos para descrever o comportamento de fluência em tração de *bamboo scrimber* a curto prazo. O estudo comparou o modelo de Maxwell e uma versão combinada com derivadas fracionárias, verificando que ambos ajustam bem os dados experimentais, mas o modelo combinado apresenta maior precisão. Os resultados sugerem que o *bamboo scrimber* é viável para aplicações estruturais onde a fluência é crítica, permitindo determinar a resistência à tração com base em distribuições probabilísticas. O modelo combinado mostrou-se mais adequado para aplicações de engenharia.

Sun e Wan (2021) analisaram as características de resistência à tração axial do *bamboo scrimber* por meio de modelos estatísticos (normal, lognormal e Weibull de três parâmetros). A resistência e a deformação última apresentaram maior variabilidade em comparação com o módulo de tração. A distribuição Weibull de três parâmetros destacou-se por melhor ajustar os dados em condições de alta segurança, permitindo a definição de um ponto de segurança absoluto, o que a torna mais adequada para aplicações em projetos de engenharia.

Sulastiningsih *et al.* (2021) avaliaram os efeitos das espécies de bambu nas propriedades físicas e mecânicas do bambu laminado, analisando *Dendrocalamus asper*, *Dendrocalamus giganteus*, *Dendrocalamus latiflorus* e *Gigantochloa levis*. A ANOVA identificou diferenças estatisticamente significativas em propriedades como teor de umidade, densidade, absorção de água, inchamento, módulo de ruptura, módulo de elasticidade, resistência à compressão e dureza, enquanto a resistência de colagem não foi afetada pelas espécies. O bambu laminado de *D. asper* apresentou resistência equivalente à madeira de classe I, e os de *D. giganteus*, *D. latiflorus* e *G. levis* à classe II, segundo a classificação de resistência da Indonésia.

Zhu *et al.* (2022) investigaram como o design estrutural influencia as propriedades físico-mecânicas de compósitos de madeira e bambu. O aumento da densidade dos compósitos laminados, alcançado com maior conteúdo de lâminas de bambu (de 640 kg/m³ a 1290 kg/m³), melhorou a resistência à água e o desempenho mecânico devido à modificação na estrutura porosa. As propriedades físico-mecânicas, com exceção de uma amostra, atenderam ou

superaram as normas GB/T 20241-2006 e GB/T 30364-2013, destacando o potencial desses compósitos para uso em estruturas externas e revestimentos de piso.

Lin *et al.* (2023) investigaram o impacto da matriz nas propriedades micromecânicas das fibras de bambu (BCFs) submetidas ao tratamento térmico e sua correlação com as propriedades macromecânicas dos compósitos de bambu. A 140 °C, as propriedades das BCFs e dos compósitos de bambu permanecem estáveis, mas a 200 °C ocorre uma redução de aproximadamente 50% na resistência à tração, enquanto o módulo de tração se mantém praticamente inalterado.

Guan *et al.* (2023) analisaram o comportamento mecânico do *bamboo scrimber* sob cargas combinadas de tração e flexão, considerando diferentes taxas de carregamento e forças de pré-tração. O aumento da taxa de carregamento elevou a carga máxima de flexão, a deflexão de fratura, a deformação total e a energia dissipada. Já o aumento da força de pré-tração melhorou a carga máxima de flexão, o módulo efetivo e a energia dissipada, além de tornar as posições de fratura mais aleatórias. Análises por microscopia eletrônica de varredura (SEM) revelaram que o modo de fratura transita de delaminação para fratura fibra/matriz com forças de pré-tração crescentes.

Syaifudin, Irawati e Awaludin (2022) avaliaram o desempenho ao cisalhamento de vigas de LBL preservadas com deltametrina e coladas com ureia-formaldeído. Testes realizados conforme as normas ASTM D905 e MD Block mostraram que o tratamento com deltametrina reduziu a resistência da colagem adesiva em aproximadamente 5%, mas a análise ANOVA indicou que essa redução não é estatisticamente significativa. A resistência das amostras tratadas corresponde a 95% das não tratadas, confirmando a adequação da deltametrina como preservativo para vigas de LBL.

Wu *et al.* (2023) analisaram os efeitos da densidade e do teor de resina no desempenho de religação do *bamboo scrimber* (BSC), focando em suas propriedades de superfície e aplicabilidade em componentes de construção de larga escala. O aumento da densidade reduziu a porosidade, diminuindo a rugosidade e a molhabilidade, o que melhorou a resistência ao cisalhamento da linha de cola devido à maior uniformidade estrutural. O aumento do teor de resina também reduziu rugosidade e molhabilidade, preenchendo lacunas e aumentando a hidrofobicidade, resultando em maior resistência ao cisalhamento e menor taxa de delaminação. Essas melhorias tornam o material mais eficiente para aplicações estruturais.

Chen *et al.* (2023) desenvolveram um método de processamento de unidades de bambu (*bamboo flattening and grooving unit*) por aplainamento e ranhuramento, visando padronizar e

melhorar o tratamento superficial do material. O processo resultou em alta eficiência no uso do bambu e aumento da área de colagem. O ranhuramento permitiu que o LBL mantivesse capacidade de suporte de carga após a falha máxima e expôs células do parênquima, contribuindo para a formação da força de adesão.

Guan *et al.* (2021) investigaram adesivos à base de sangue de porco modificados com NaOH, glutaraldeído ou ambos (APB – adesivo de sangue de porco modificado por álcali, GPB – adesivo de sangue de porco modificado por glutaraldeído e AGPB – adesivo de sangue de porco modificado por álcali e glutaraldeído) para aplicação em LBL. As modificações melhoraram a resistência à água e as propriedades adesivas, como confirmado por análises térmicas, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia SEM. Os adesivos modificados mostraram maior estabilidade térmica, com estruturas mais densas e compactas. O AGPB destacou-se com resistência ao cisalhamento úmido de 4.6 MPa, sendo uma solução eficiente e sustentável para produtos de bambu engenheirado.

Shan *et al.* (2021) estudaram a adesão e os defeitos nas linhas de cola do *glubam* sob prensagem a frio, utilizando adesivos com diferentes dosagens de sílica fumê. A dosagem ideal de 1.9% foi identificada para modificar um adesivo epóxi comercial, melhorando sua capacidade de preenchimento e resistência de ligação. Além disso, testes ultrassônicos não destrutivos em amostras de *glubam* com defeitos artificiais permitiram desenvolver um método para inspeção de defeitos nas linhas de cola.

Rosa *et al.* (2014, 2016) investigaram as propriedades físicas e mecânicas do bambu laminado produzido com *Dendrocalamus giganteus* e *Bambusa vulgaris*, considerando o impacto de tratamentos preservativos (imersão em água ou solução de octaborato) e adesivos (RF, MUF, EPI e PVAc). O adesivo RF apresentou o melhor desempenho, seguido pelo MUF, enquanto EPI e PVAc foram ineficientes, especialmente em cisalhamento e estabilidade dimensional. O tratamento preservativo não influenciou a resistência à compressão axial, e o módulo de elasticidade variou de acordo com a espécie e o adesivo utilizado. Métodos não destrutivos mostraram limitações para estimar o módulo de ruptura, mas o método de vibração transversal foi o mais preciso para o módulo de elasticidade em ambas as espécies. *D. giganteus* demonstrou maior estabilidade dimensional e resistência mecânica, enquanto *B. vulgaris* foi mais sensível aos tipos de adesivo, com menor estabilidade. Apenas MUF e RF atenderam aos requisitos de delaminação e foram adequados para uso externo.

Meng *et al.* (2023) desenvolveram um *glubam*, utilizando a lignina residual do próprio bambu como adesivo natural, eliminando a necessidade de adesivos externos. O material

apresentou resistência ao cisalhamento de 4.4 MPa e resistência à tração de 300 MPa, superando adesivos biológicos e sendo comparável a adesivos sintéticos. A lignina formou uma interface adesiva resistente por meio de ligações de hidrogênio e entrelaçamento com fibrilas de celulose. O processo de delignificação e prensagem térmica resultou em maior densidade, compactação das fibras e redução de poros.

Syaifudin, Irawati e Awaludin (2022) analisaram o desempenho à flexão de vigas LBL de *Dendrocalamus asper* preservadas com deltametrina e coladas com ureia-formaldeído. O tratamento preservativo com 0.01% de deltametrina não impactou o desempenho à flexão. O módulo de elasticidade médio foi de 18.84 MPa e 18.20 MPa, enquanto o módulo de ruptura médio foi de 110 MPa e 109 MPa para amostras tratadas e não tratadas, respectivamente. Ambas apresentaram boa ductilidade, com índices médios de 4.8 para amostras não tratadas e 3.9 para tratadas.

Du, Song e Chen (2014) analisaram o impacto de diferentes métodos de aplicação do retardante de fogo $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ nas propriedades do *bamboo scrimber*. A aplicação antes da colagem melhorou o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade, enquanto a aplicação após a colagem reduziu esses valores. Embora a aplicação antes da colagem ofereça melhores propriedades mecânicas, ela aumenta os custos e a complexidade operacional. Por outro lado, a aplicação após a colagem simplifica o processo e reduz custos, mas compromete o desempenho mecânico do material.

Solarte, Hidalgo e Torero (2018) analisaram a inflamabilidade do bambu laminado, focando em parâmetros como fluxo de calor crítico para ignição, temperatura de ignição, inércia térmica e taxas de combustão, comparando-os com produtos de madeira. O bambu laminado apresentou fluxo de calor crítico de 14 kW/m² e temperatura de ignição de 365 °C, superiores às de madeiras como pinheiro-radiata e faia. A inércia térmica foi de 1.25 kW²s/m⁴K², destacando-se em relação a outras espécies comerciais. A taxa crítica de perda de massa foi estimada em 2.75 g/m²s, mostrando redução em altos fluxos de calor. O estudo caracteriza o comportamento ao fogo do bambu laminado, utilizado em aplicações como revestimentos e bancadas.

Yu *et al.* (2022) avaliaram o efeito de diferentes espessuras de camadas de fibra de vidro (GF) nas propriedades mecânicas, durabilidade e resistência ao fogo do *bamboo scrimber* reforçado com GF (GF-BCS). Camadas mais espessas de GF melhoraram as propriedades mecânicas, com aumentos de 7% na resistência à compressão, 25% na resistência ao cisalhamento, 18% no MOR e 22% no MOE. Após testes de envelhecimento, os GF-BCS

apresentaram estabilidade dimensional aprimorada e desempenho mecânico comparável ao BS tradicional. Na resistência ao fogo, camadas espessas reduziram em 50% a profundidade de carbonização, 15–28% a perda de massa e 25% a temperatura máxima após exposição à chama. O teste de resistência ao fogo mostrou aumento de 650% na duração de resistência e redução de 400% na taxa de perda de massa, com menor elevação de temperatura. O MOR residual dos GF-BSCs foi superior, evidenciando o papel da GF na melhoria geral dos compósitos.

Li X. *et al.* (2023) investigaram dois métodos de modificação térmica no *bamboo scrimber*, avaliando propriedades físicas, mecânicas e de resistência ao fogo, além de alterações químicas e microestruturais nos feixes de bambu. O grupo HL, tratado com vapor superaquecido a 200 °C, apresentou maior resistência à água, coloração mais escura, maior MOE e melhor desempenho em retardar fumaça e reduzir emissões de CO. O grupo LS, tratado com vapor saturado a 140 °C, teve MOR superior e falha em formato “Z” com fibras expostas, enquanto o grupo HL exibiu seções mais planas. Ambos os tratamentos resultaram em redução de MOR e MOE sob condições úmidas. A degradação térmica da hemicelulose foi a principal responsável pelas alterações nas propriedades químicas e estruturais. O tratamento térmico em alta temperatura melhorou o rendimento de carvão e a resistência ao fogo.

4.2.2 Paredes de bambu engenheirado

Jiang *et al.* (2006) investigaram o uso de bambu em paredes, avaliando isolamento acústico, térmico e resistência ao fogo, conforme a norma GB/T15225-94. As paredes, compostas por placas de bambu, gesso e armações de madeira, apresentaram redução sonora de 32 dB (nível III) e transmitância térmica de 2,3 W/(m²·K) (nível IV), atendendo aos requisitos de construção na China. A resistência ao fogo foi de 20 minutos, indicando a necessidade de melhorias para uso em residências.

Di *et al.* (2021) desenvolveram uma tipologia de parede de contraventamento leve de madeira reforçada com painéis de *bamboo scrimber* nas extremidades, substituindo parte do painel de OSB por dois painéis de *bamboo scrimber* ou SPF de alta resistência. Essa abordagem alterou o modo de falha das paredes tradicionais, eliminando a ruptura nos painéis de extremidade e aumentando a utilização das propriedades do material. O reforço com PSB melhorou a capacidade de carga última e proporcionou distribuição uniforme de tensões, especialmente com parafusos. O espaçamento de 150 mm entre conectores mostrou melhor ductilidade. Recomenda-se o uso de painéis de SPF com parafusos e de PSB com pregos ou parafusos devido ao desempenho lateral superior.

Gao e Xiao (2017) investigaram o comportamento monotônico e cíclico de paredes de cisalhamento de aço formado a frio revestidas com painéis de *glubam*. As paredes apresentaram modos de falha e resistências ao cisalhamento comparáveis aos de materiais convencionais à base de madeira. A resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento foi independente da razão de aspecto, indicando que cada painel suporta as forças de forma autônoma. Os conectores *hold-down* demonstraram ser eficazes contra forças de elevação causadas por carregamentos horizontais no topo das paredes.

4.2.3 Vigas de bambu engenheirado

Zhou *et al.* (2012) investigaram o comportamento dinâmico e a fadiga em vigas de *glubam* sob carregamentos repetidos, avaliando sua aplicação em estruturas como pontes. A fadiga reduziu a capacidade de carga em cerca de 10%, devido à fragilidade nas juntas e degradação das colagens. Quando o carregamento cíclico permaneceu dentro do valor de projeto, a rigidez das vigas não sofreu redução significativa, validando sua aplicação nessas condições. No entanto, cargas acima do valor de projeto reduziram substancialmente a resistência, indicando a necessidade de limitar o tráfego para aumentar a durabilidade. A flexibilidade do bambu contribuiu para a boa estabilidade dinâmica das vigas sob fadiga.

Zhong *et al.* (2017) analisaram vigas de *bamboo scrimber* reforçadas e não reforçadas, propondo um modelo mecânico simplificado para prever deflexão e capacidade de carga. As vigas reforçadas apresentaram aumento de até 58% na capacidade última de carga e 82% na rigidez à flexão em comparação com as não reforçadas. O modelo proposto mostrou boa concordância com os resultados experimentais. A rigidez e a carga última foram influenciadas pelo diâmetro do reforço (12–20 mm) e pelo tratamento térmico dos feixes de bambu, com contribuições do reforço variando de 23% a 45% para rigidez e de 15% a 31% para capacidade de carga. Os resultados confirmaram a integração eficaz entre os elementos de reforço e de bambu na seção transversal composta.

4.2.4 Colunas de bambu engenheirado

Dong *et al.* (2023) analisaram o comportamento de colunas de *bamboo scrimber* parcialmente revestidas sob compressão axial, compostas por um elemento de aço em H e membros de *bamboo scrimber*. Os resultados mostraram que a restrição parcial à flambagem melhorou significativamente a capacidade de carga axial, atrasando a flambagem do aço e a falha do *bamboo scrimber*, aumentando a margem de segurança. As colunas falharam por

flambagem e cisalhamento em cunha nos elementos de *bamboo scrimber*. Um método de cálculo desenvolvido para estimar a capacidade de carga última das colunas parcialmente revestidas apresentou precisão, com erros entre 0.97% e 6.03% em relação aos resultados experimentais.

Li *et al.* (2016b) analisaram o comportamento de membros estruturais de LBL sob compressão excêntrica radial, avaliando o impacto da razão de excentricidade. Testes com membros de 73 mm x 73 mm x 1000 mm mostraram que falhas por tração precederam as de compressão devido à maior sensibilidade da resistência à tração a defeitos. As curvas de deflexão lateral seguiram um padrão senoidal, e a distribuição de deformações foi linear, validando a teoria de flexão em seção normal. A carga última diminuiu rapidamente com o aumento da excentricidade no início, estabilizando posteriormente. Tanto as deflexões laterais quanto as deformações longitudinais aumentaram com a excentricidade, mas as variações reduziram perto da carga última. Uma equação proposta para o coeficiente de influência da excentricidade mostrou boa concordância com os resultados experimentais.

Zhou *et al.* (2023) investigaram o comportamento de flambagem global de pilares de seção caixão de *bamboo scrimber* por meio de testes experimentais e simulações numéricas. As colunas exibiram flambagem global inelástica devido à relação tensão-deformação não linear do *bamboo scrimber*, com deslocamentos laterais significativos na ruptura. A carga de flambagem diminuiu rapidamente com o aumento da esbeltez, e o método de projeto para madeira laminada colada superestimou a resistência à flambagem global devido às diferenças materiais e falhas nas conexões. O modelo numérico, considerando imperfeições geométricas e propriedades não lineares, previu a resistência à flambagem com boa precisão, especialmente em colunas mais esbeltas. Foi recomendado um valor de 0.4 para o parâmetro c na norma ANSI/AWC NDS-2015 para incorporar as propriedades não lineares e as falhas de conexão.

4.2.5 Desempenho de conexões de bambu engenheirado

Li T. *et al.* (2024) analisaram o desempenho mecânico de juntas de LBL conectadas por placas metálicas dentadas (MPC) para aplicação em treliças de bambu engenheirado. A orientação das chapas metálicas impactou a resistência à tração e ao cisalhamento, sendo mais eficaz com fendas dos dentes alinhadas ao comprimento da chapa. Um novo modelo angular reduziu erros de predição para carregamentos não ortogonais. As juntas de LBL apresentaram maior resistência de projeto em comparação ao SPF, devido à maior densidade e uniformidade do LBL. Embora com diferenças no desempenho de ancoragem em relação ao *glulam*, a

inclusão de fibras transversais no LBL foi sugerida para melhorar a resistência em direções perpendiculares à carga.

Chen *et al.* (2021) analisaram o comportamento mecânico de conexões pregadas em LBL, considerando parâmetros como diâmetro, número de linhas e fileiras de pregos. A resistência e rigidez das conexões aumentaram com o diâmetro e o número de pregos por fileira, enquanto a ductilidade diminuiu. Conexões com múltiplos pregos apresentaram resistência inferior à soma das capacidades individuais devido à falha antes da redistribuição de carga. Modelos como a fórmula de Hossain, o Eurocode 5 e a equação de carga-deslocamento de Folz demonstraram boa precisão para prever o comportamento dessas conexões. A resistência e rigidez foram influenciadas por fatores como resistência à flexão dos pregos, espessura dos membros, efeito de tração axial (*rope effect*), gravidade específica e teor de umidade do LBL.

Kang *et al.* (2024) investigaram o comportamento cíclico de conexões de *bamboo scrimber* em vigas I e colunas em seção caixa. Conexões de aço em L (JAC) apresentaram melhor ductilidade que as conexões em T (JTC). O aumento de 4 para 10 parafusos na mesa da viga melhorou a dissipação de energia, deslocando a falha para o cisalhamento nas zonas de painel. Conexões JAC-10 e JTC-10 tiveram aumentos de resistência (6.8% e 68.8%) e ductilidade (95.5% e 55.6%), respectivamente. Sob cargas cíclicas, JAC-4 e JTC-4 mostraram menor resistência última, mas maior ductilidade, enquanto JAC-10 e JTC-10 mantiveram a resistência com redução de ductilidade devido ao dano acumulado. Tensões de cisalhamento nas conexões JTC-10 superaram em até 1.5 vezes a resistência do *bamboo scrimber* paralelo às fibras, destacando sua eficácia.

Wang *et al.* (2019) analisaram o desempenho de sistemas de conexão em paredes de cisalhamento leves de *glulam*. O sistema inclui conexões painel-armação, armação-armação e dispositivos de ancoragem. A resistência e ductilidade das conexões painel-armação dependem do ângulo de carregamento em relação às tiras de bambu. Conexões armação-armação com pregos de alta resistência apresentam maior resistência e dissipação de energia comparadas a pregos comuns. Simulações de elementos finitos indicaram que dispositivos de ancoragem e cargas verticais aumentam a rigidez e a capacidade das paredes, com pregos de alta resistência superando pregos ST46 em desempenho lateral.

Sinha e Miyamoto (2014) avaliaram a capacidade de resistência lateral de conexões LBL-OSB e a aplicabilidade dos modelos de escoamento da National Design Specification for Wood Construction (NDS) de 2012. Testes monotônicos indicaram que as conexões LBL-OSB possuem resistência lateral comparável às conexões OSB-abeto de Douglas, sem diferenças

significativas entre geometrias de borda e placa. Os modelos de escoamento da NDS foram eficazes para prever a capacidade e os modos de escoamento em conexões de borda, desde que a resistência ao embutimento dos materiais seja previamente conhecida.

Xiao *et al.* (2014) avaliaram o desempenho de conexões parafusadas em *glubam*, variando as distâncias lateral e de extremidade, conforme a norma ASTM D5652-95. Os testes mostraram que a resistência aumentou com a distância lateral, mas não houve uma correlação consistente com a distância de extremidade. Os modos de falha predominantes foram cisalhamento e tensão líquida. Equações baseadas na teoria de Johansen foram ajustadas por regressão para prever a resistência máxima das conexões, combinando resultados experimentais com modelos teóricos. O estudo confirmou o bom desempenho das conexões, com a distância lateral sendo um fator chave na resistência.

4.2.6 Treliças de bambu engenheirado

Li Z. *et al.* (2019) estudaram o comportamento estrutural de uma treliça híbrida assimétrica de aço e *glubam*, com vão de 12 metros, projetada via BIM. Testes em escala real e em elementos individuais mostraram que membros de *glubam* sob compressão falham por flambagem no eixo fraco, enquanto as conexões falham por ruptura por tração nas extremidades. A capacidade de carga dos membros de *glubam* superou a das conexões, e a capacidade à compressão pode ser estimada pelo método de comprimento efetivo. Recomenda-se otimizar conexões de aço, usar membros de compressão com maior inércia, reforçar as regiões de conexão com parafusos e adicionar contraventamento. A treliça atendeu às exigências de deflexão e capacidade de carga, mas melhorias foram sugeridas para evitar falhas fora do plano e aumentar a robustez, incluindo reforços nas cordas inferiores e adição de terças e contraventamentos.

Quarantaa, Demartino e Xiao (2019) caracterizaram o comportamento dinâmico de uma treliça híbrida de *glubam* e aço, abordando vibrações, amortecimento viscoso e diretrizes para projeto sob cargas dinâmicas, com foco em passarelas de pequeno e médio porte. O estudo recomendou uma razão de amortecimento viscoso conservadora de 1.5% para o modo fundamental de flexão e entre 0.5% e 1.5% para outros modos. As análises numéricas indicaram bom desempenho dinâmico das passarelas de *glubam* sob vibrações induzidas por pedestres, demonstrando a adequação da estrutura para aplicações modulares.

Ma e Xiao (2020) desenvolveram um método de design paramétrico para uma treliça espacial híbrida de aço e *glubam*, integrando modelagem, análise, otimização e fabricação em

uma única plataforma, o Grasshopper. Utilizando os plugins GeometryGym e Karamba, realizaram análises estruturais paramétricas, permitindo a troca de dados com o SAP2000 e análises FEA diretamente no Grasshopper. Sob condições de apoio simples e cargas do código chinês GB 50009 (2012), os resultados das duas abordagens foram consistentes, mas o Grasshopper demonstrou maior eficiência, sendo escolhido para a otimização paramétrica.

Candela e Demartino (2020) demonstraram o uso de um Veículo Aéreo Não Tripulado (UAV) comercial de baixo custo para fotogrametria de curta distância, capturando imagens para reconstruir um modelo 3D detalhado de uma estrutura treliçada em *glubam* e aço. O modelo 3D foi utilizado para gerar desenhos “as-built”, comparar medidas com os projetos originais, realizar análises estruturais e planejar a manutenção. O estudo concluiu que a técnica é eficaz, rápida e econômica, permitindo criar modelos digitais precisos para monitoramento e gestão da saúde estrutural.

4.2.7 Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) de produtos de bambu engenheirado

Li, Yuan e Guan (2016) realizaram uma Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) do bambu laminado, identificando altos impactos ambientais nas etapas de carbonização, secagem e termo-compressão, responsáveis por mais de 67% da carga ambiental devido ao uso de combustíveis fósseis. A resina ureia-formaldeído foi o principal fator de esgotamento de recursos e destruição da camada de ozônio. Emissões de oxinitretos e fosfatos contribuíram para eutrofização, acidificação e criação de ozônio fotoquímico. Xiao *et al.* (2014) avaliaram o *glubam*, destacando seu baixo consumo energético (2.67 GJ/m³) e emissão de carbono negativa (-261 kg de CO₂/m³), absorvendo mais carbono do que emite, consolidando-o como uma opção sustentável em relação a materiais como cimento, aço e alumínio.

4.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Os processos de fabricação desempenham um papel central no avanço do mercado de bambu engenheirado, pois definem a qualidade, eficiência produtiva e viabilidade econômica dos produtos desenvolvidos. Como um material renovável e sustentável, o bambu possui características únicas que o tornam promissor para aplicações estruturais. No entanto, sua transformação em produtos engenheirados exige técnicas avançadas, como laminação, prensagem, tratamentos térmicos e adesivos especializados, para garantir desempenho mecânico, durabilidade e compatibilidade com normas construtivas. Assim, a síntese dos

métodos de fabricação apresentados na Tabela 11 oferece uma visão abrangente do estado atual da evolução do bambu engenheirado na literatura.

Tabela 11 – Produtos de bambu engenheirado, espécies e aspectos do processo de fabricação

RF	TP	ESP	C (mm)	L (mm)	E (mm)	Adesivo	TA (g/m ²)	TP	TMP	PP (MPa)
1	LB	Mossô	150	20	5	Adesivos baseados em sangue de porco (APB, GPB e AGPB)	400	À quente	15 min	2.0
2	LBL	Mossô	1100	1100	25	PF		À quente	2h	4.8
3	<i>glubam</i>	Mossô				Epóxi				
4	LBL	Mossô				Resorcinol	300	À frio	12h	20.0 kg/cm ²
5	LB	<i>Bambusa vulgaris</i> <i>D. giganteus</i>	470	30		EPI, MUF, PVAc e RF		À frio		1.0
6	BSC	Mossô				PF		À frio		22.0
7	BLVL	Mossô	300	150	14	PF				
8	<i>glubam</i>	Mossô	2440	1220	30	PF				
9	<i>glubam</i>					Bioadesão baseada na ligação de lignina in situ		À quente		20.0
10	LBL	<i>Bambusa vulgaris</i> <i>D. giganteus</i>				EPI MUF PVAc RF	225 425 150 400	À frio	1h 3h 3h 7h	1.0
11	BVC	Mossô				PF				
12	LBL	<i>D. giganteus</i> <i>D. latiflorus</i> <i>Gigantochloa levis</i> <i>D. asper</i>				Isocianato à base de água	250	À frio	1h	54.2 Nm
13	<i>glubam</i>	Mossô	2440	1220	30	PF		À quente	15 min	20.0
14	LBL	Mossô				PF		À quente	45 min	10.0-2.0
15	BSC	Mossô				PF				
16	BSC					PF		À frio		20.0
17	<i>glubam</i>		2440	1220		PF				3.0 - 3.5
18	<i>glubam</i>		2440	1220						
19	BSC	Mossô	3600	150	150			À frio		37.0
20	LB	Mossô								
21	<i>glubam</i>	Mossô	2440	1220	28	PF				
22	LBL	<i>Dendrocalamus asper</i>				Ureia-formaldeído	300	À frio e à quente	1-4h	2.0
23	BSC	Mossô	1000	1000	20	PF		À quente	1h	1.5
24	BSC					PF				
25	BSC	Mossô	2440	1220	25	PF		À quente	20 min	5.0
26	BSC	Mossô						À quente		5.0
27	BSC					PUR			4h	3.0
28	LBL	Mossô				PF		À quente		1.8-4.7
29	BSC	Mossô								
30	LBL	Mossô								
31	LBL					EPI		À quente	15 min	2.0
32	BSC	Mossô				PF		À quente	30 min	5.0

Legenda: RF – Referências; ESP – Espécies; C – Comprimento; L – Largura; E – Espessura; TA – Taxa de aplicação do adesivo; TP – Tipo de prensagem; P – Pressão de prensagem; BVC – Bamboo Veneer Composite; *D. giganteus* –

Dendrocalamus giganteus; *D. latiflorus* – *Dendrocalamus latiflorus*; *D. asper* – *Dendrocalamus asper*; EPI – Emulsão de Isocianato Polimérico; MUF – Melamina-Ureia-Formaldeído; PVAc – Acetato de Polivinila Lincado; RF – Resorcinol-Formaldeído; PF – Fenol-formaldeído; APB – *Alkali-Modified Pig Blood Adhesive*; GPB – *Glutaraldehyde-Modified Pig Blood Adhesive*; AGPB – *Alkali-and-Glutaraldehyde-Modified Pig Blood Adhesive*; 1 – Guan *et al.* (2021); 2 – Cai *et al.* (2024); 3 – Shan *et al.* (2021); 4 – Nugroho e Ando (2001); 5 – Rosa *et al.* (2014); 6 – Songsong e Maosong (2021); 7 – Zhou *et al.* (2019); 8 – Xiao *et al.* (2014); 9 – Meng *et al.* (2023); 10 – Rosa *et al.* (2016); 11 – Lin *et al.* (2023); 12 – Sulastiningsih *et al.* (2021); 13 – Xiao, Yang e Shan (2013); 14 – Chen *et al.* (2023); 15 – Guan *et al.* (2023); 16 – Sun e Wan (2021); 17 – Jiang *et al.* (2006); 18 – Gao e Xiao (2017); 19 – Zhong *et al.* (2017); 20 – Solarte, Hidalgo e Torero (2018); 21 – Zhou *et al.* (2012); 22 – Syaifundin, Irawati e Awaludin (2022); 23 – Yu *et al.* (2022); 24 – Du, Song e Chen (2014); 25 – Li X. *et al.* (2023); 26 – Dong *et al.* (2023); 27 – Zhou *et al.* (2023); 28 – Li *et al.* (2016b); 29 – Kang *et al.* (2024); 30 – Chen *et al.* (2021); 31 – Sinha e Miyamoto (2014); 32 – Hu *et al.* (2022).

Fonte: Autora (2024).

Os estudos revisados apresentaram diferentes processos de fabricação de produtos de bambu engenheirado, demonstrando a diversidade de técnicas e materiais utilizados. Hu *et al.* (2022) investigaram como a extensão da fibrilação (número de passagens pelos rolos dentados) influencia a absorção de resina, densidade e propriedades mecânicas do *bamboo scrimber* de feixe largo. A preservação parcial do córtex externo aumentou a taxa de aproveitamento para 90%, em comparação aos 55% do *bamboo scrimber* convencional. A fibrilação criou fissuras e expôs fibras, dobrando a área superficial e aumentando a absorção de resina em 2.7 vezes após quatro passagens.

Durante a consolidação, essas fissuras formaram uma rede de intertravamento mecânico impregnada de resina, melhorando a absorção de água, estabilidade dimensional e desempenho mecânico. Para otimizar custo e desempenho, os autores recomendaram 1–2 passagens de fibrilação e densidade entre 0.9–1.0 g/cm³. O uso de tiras largas e alinhamento aprimorado na esteira reduziu sobreposições aleatórias, elevando significativamente a qualidade em relação ao *bamboo scrimber* convencional.

Li *et al.* (2012) desenvolveram um processo seco-molhado para fabricação de lâminas de bambu, superando limitações dos métodos secos e molhados existentes. O estudo analisou o teor de umidade das tiras de bambu sob diferentes pressões e tempos de condicionamento, avaliando qualidade e propriedades das lâminas. O novo método aumentou a absorção de umidade, melhorou a transferência de calor, eliminou danos por amaciamento desigual e alcançou rendimento de 66%, superior aos 20% do processo seco convencional, com melhorias no teor de umidade final e na qualidade da aparência.

Guan *et al.* (2021) desenvolveram bambu laminado empregando adesivos à base de sangue de porco, tratados quimicamente com alcalinização por NaOH e/ou modificação com glutaraldeído. Esses adesivos foram aplicados em tiras de bambu alinhadas paralelamente, curadas a 125 °C por 15 minutos sob uma pressão de 2 MPa, com consumo de adesivo de 400 g/m².

Rosa *et al.* (2014, 2016) também produziram bambu laminado, mas utilizando colmos tratados por imersão em água ou em uma solução de octaborato de dissódio tetra-hidratado (Timbor) a 2% por 15 dias. Após o tratamento, os colmos foram transformados em taliscas padronizadas, com remoção das camadas externas e internas para melhorar a adesão. Essas taliscas foram secas em estufa por cinco dias com temperaturas gradativas (40 °C a 103 °C) e climatizadas por 72 horas (20 °C e 65% de umidade relativa) até atingir massa constante. Na montagem, foram utilizados adesivos EPI, MUF, PVAc e RF, aplicados com diferentes gramaturas e tempos de prensagem, sendo o RF (400 g/m², 7 horas), PVAc (150 g/m², 3 horas), EPI (225 g/m², 1 hora) e MUF (425 g/m², 3 horas). As taliscas foram prensadas a frio com pressão de 1 MPa.

Sulastiningsih *et al.* (2021) adotaram outro método, preparando tiras de bambu com espessura de 5.5 a 6.5 mm, removendo as camadas internas e externas. Essas tiras foram secas ao ar por uma semana, tratadas com solução de borato a 7% por quatro horas como medida preservativa e, posteriormente, secas ao sol até atingir umidade de cerca de 12%. O LBL foi montado em escala laboratorial, com tiras dispostas verticalmente e adesivo isocianato à base de água aplicado na proporção de 250 g/m². As tiras foram prensadas a frio em grampos de madeira por uma hora, com força de 54.24 Nm, e os painéis estabilizados por duas semanas antes dos testes.

Sinha e Miyamoto (2014) relataram um processo de fabricação do LBL que inclui a fragmentação do bambu em tiras, remoção de impurezas por raspagem, colagem com adesivo EPI e prensagem a quente. O método resulta em seções retangulares laminadas verticalmente e unidas sob alta pressão e temperatura, formando uma estrutura final sem juntas nas extremidades.

Syaifudin, Irawati e Awaludin (2022) descreveram a produção de vigas LBL a partir de tiras de bambu com 20-30 mm de largura e 5-10 mm de espessura, também com remoção das camadas externas e internas. As tiras foram tratadas com solução de deltametrina a 0.01% por imersão a frio, secas até atingir umidade de 10%-15%, e aderidas com ureia-formaldeído (300 g/m²). O processo envolveu prensagem a frio (2 MPa) e a quente (95-105 °C por 30 minutos), com intervalo de 1-4 horas entre os estágios. Após estabilização de 24 horas em temperatura ambiente, as placas foram lixadas, unidas e submetidas a nova prensagem, resultando nas vigas LBL.

Esses estudos demonstram a flexibilidade dos processos de fabricação de bambu engenheirado, abrangendo diferentes tratamentos, adesivos e técnicas de prensagem, adaptados às necessidades específicas de cada produto final.

Sonsong e Maosong (2021) produziram *bamboo scrimber* por prensagem a frio. As fibras de bambu foram impregnadas com resina fenólica sob alta pressão, posteriormente secas, comprimidas a 22 MPa em uma caixa de aço e curadas em forno por 12 horas. O material final apresentou densidade de 1.08 g/cm³ e teor de umidade de 5.6%.

Por sua vez, Hu *et al.* (2016) desenvolveram compósitos a partir de colmos de bambu cortados em segmentos de 2 m e transformados em feixes menores, que foram prensados para formar tapetes de bambu orientados. Os tapetes foram inicialmente secos a 70 °C até alcançarem 10% de umidade, tingidos em banho-maria por 12 horas (em água a 90 °C ou etanol a 75 °C, pH 5–6) e secos novamente até atingir equilíbrio de umidade. Após esse processo, os tapetes foram impregnados com adesivo fenol-formaldeído, ajustando o teor de resina para 15%. Depois de uma nova secagem até 12% de umidade, os tapetes foram prensados a quente em moldes de 300 mm × 170 mm × 20 mm a 140 °C por 25 minutos, resultando em compósitos com espessura final de 20 mm e densidade de 1.1 g/cm³.

Chen *et al.* (2023) fabricaram *bamboo scrimber* utilizando tiras de bambu achatadas, com remoção das camadas externas, fixação da espessura e ranhuramento, resultando em unidades de 5.5 a 7.5 mm de espessura. Após secagem em estufa a 70 °C até alcançar umidade de 8-10%, as unidades foram armazenadas em ambiente controlado, cortadas em dimensões padrão de 750 mm × 34 mm × 6.8-7 mm e montadas por empilhamento lateral. A densidade foi ajustada controlando a largura, e a prensagem a quente foi realizada a 125 °C, com pressão inicial de 10 MPa reduzida para 2 MPa após atingir a espessura desejada, durante 45 minutos.

Sun e Wan (2021) produziram *bamboo scrimber* por prensagem a frio, envolvendo três etapas: imersão das fibras em resina fenólica sob alta pressão, secagem, e compressão a 22 MPa em uma caixa de aço até atingir a densidade padrão, seguida de cura em forno por 12 horas com o molde fixado por parafusos. Yu *et al.* (2022) fabricaram compósitos de *bamboo scrimber* reforçados com fibra vidro, a partir de feixes de bambu mossô carbonizados a vapor sob alta pressão (1 MPa, 120 °C, 90 minutos) e secos até alcançar densidade de 0.65 g/cm³ e umidade de 8%. Os feixes foram impregnados com resina fenólica (PF), secos a 40 °C (umidade de 8–10%) e organizados em camadas paralelas com fibra de vidro no exterior. Os compósitos foram prensados a quente a 1.5 MPa por 60 minutos, seguidos de 14 dias de condicionamento (25–30 °C e 60–65% de umidade) até atingirem peso constante.

Li X. *et al.* (2023) fabricaram *bamboo scrimber* com resina fenol-formaldeído, utilizando diferentes métodos de modificação térmica. O processo envolveu corte, remoção de camadas, desfibramento, tratamento térmico, imersão na resina, secagem, montagem e prensagem a quente (140 °C, 5 MPa, 20 minutos). Dois grupos foram tratados termicamente: um com vapor saturado a 140 °C e outro com vapor superaquecido a 200 °C, ambos por 2 horas. Após 15 dias de armazenamento, os materiais foram fresados para dimensões finais.

Hu *et al.* (2022) também produziram *bamboo scrimber* a partir de bambu aplainado, fibrilado e seco até atingir o teor de umidade adequado. Os feixes foram impregnados com resina fenólica, secos novamente, organizados em moldes e compactados por prensagem a quente (145 °C, 5 MPa), formando painéis de 20 mm. Após resfriamento, os painéis foram cortados e condicionados.

Zhou *et al.* (2019) desenvolveram o *bamboo bundle laminated veneer lumber* (BLVL), semelhante ao *bamboo scrimber*. O processo começou com tiras de bambu (2–3 cm) obtidas por divisão longitudinal dos colmos e escovação em máquina de rolagem, resultando em feixes de diferentes características morfológicas. Esses feixes foram entrelaçados transversalmente em lâminas de 1.9 m com fios de algodão espaçados a 40 cm como conexão. As lâminas foram submetidas a tratamentos térmicos sob pressão: alta (0.32–0.34 MPa, 130–150 °C, 150 minutos) e baixa (0.10–0.12 MPa, 110–120 °C, 120 minutos), ajustando o teor de umidade para 10%. Posteriormente, as lâminas foram impregnadas com resina fenólica diluída (18% de sólidos) e secas até alcançar umidade entre 8% e 12%.

Os processos de fabricação descritos nos artigos revisados refletem a diversidade e o estágio de desenvolvimento acadêmico na área de bambu engenheirado. Embora avanços significativos tenham sido feitos em adesivos especializados, técnicas de prensagem e tratamentos térmicos, a dependência de resinas à base de formaldeído ainda representa uma limitação ambiental. Esforços para incorporar adesivos alternativos, como os derivados de sangue de porco ou lignina, são promissores.

A heterogeneidade nos métodos de tratamento do bambu, como secagem e preservação, evidencia a falta de padronização, o que pode impactar a qualidade dos produtos e dificultar sua inserção em mercados globais. Além disso, a complexidade de alguns processos produtivos impõe desafios à escalabilidade e aos custos industriais.

Por outro lado, inovações como a incorporação de fibras de vidro e melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade ampliam as possibilidades de aplicação do bambu engenheirado em estruturas. A área de pesquisa está em evolução, mas a padronização, a

sustentabilidade e a simplificação dos processos produtivos são essenciais para consolidar o material como uma alternativa viável e competitiva no mercado.

4.4 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS E NORMAS

A Tabela 12 sintetiza os testes experimentais descritos nos artigos revisados, destacando os métodos aplicados, normas utilizadas e características dos corpos de prova. Os testes experimentais mais frequentes incluem flexão, tração, compressão e cisalhamento, refletindo a ênfase na caracterização das propriedades mecânicas do bambu engenheirado. Outras avaliações, como resistência ao fogo, teste de conexões e delaminação, também foram observadas, mas com menor frequência, indicando um interesse crescente, embora ainda limitado, em explorar o desempenho do material em condições específicas e aplicações práticas.

As normas utilizadas nos estudos demonstram a diversidade e a abrangência dos procedimentos adotados. Destacam-se as normas ASTM (American Society for Testing and Materials) e GB/T (normas chinesas), que foram amplamente aplicadas para testes de flexão, tração e cisalhamento. A ASTM D143 (Métodos de Ensaio Padrão para Pequenas Amostras Claras de Madeira), por exemplo, foi empregada em diversos trabalhos para avaliar a resistência em tração e cisalhamento, enquanto a GB/T 17657 (Métodos de Ensaio para Avaliação das Propriedades de Painéis à Base de Madeira e Painéis Decorados com Superfície de Madeira) foi frequentemente utilizada para testes de cisalhamento na linha de colagem. Outras normas, como a ISO 5660-1 (Ensaio de Reação ao Fogo) e a AITC T110 (Teste de delaminação cíclica) foram aplicadas em ensaios de resistência ao fogo e delaminação, respectivamente.

Normas específicas para conexões, como a ASTM D5652 (Métodos de Ensaio Padrão para Conexões Parafusadas em Produtos de Madeira e à Base de Madeira) e a ISO 16670 (Estruturas de Madeira – Ligações Feitas com Fixadores Mecânicos – Método de Ensaio Cíclico Quase-Estático Reverso), foram utilizadas em estudos que avaliaram o desempenho de sistemas viga-coluna e conexões pregadas. A variedade de normas reflete o estágio de desenvolvimento da pesquisa, com diferentes abordagens e critérios dependendo do contexto regional e do foco dos estudos. Os dados da tabela indicam que a literatura se concentra principalmente na avaliação de propriedades mecânicas básicas. No entanto, a baixa frequência de testes avançados em escala real destaca a necessidade de ampliar as investigações para explorar de forma mais abrangente o comportamento desses materiais em aplicações estruturais práticas.

A predominância das normas ASTM e GB/T evidencia a liderança de países como China e Estados Unidos na pesquisa sobre bambu engenheirado. Contudo, a ausência de padronização

global nas metodologias e a aplicação restrita de algumas normas internacionais sugerem a necessidade de maior uniformidade e cooperação entre os pesquisadores para consolidar os métodos de avaliação. Além disso, a maior adoção de normas internacionais pode facilitar a comparação de resultados e promover a aceitação do bambu engenheirado como material estrutural competitivo em mercados globais.

Tabela 12 – Síntese dos testes experimentais e normas aplicadas

Ref.	Teste	A	Normas	C (mm)	L (mm)	E (mm)	PC	VC	CP
1	Testes de Cisalhamento	10	DIN EN 302-1	150	20	5		2.5 mm/min	Falha
	Teste de Tração	5-10	GB/T 1927.14	370	25	15		1 mm/min	Falha
	Teste de Compressão	5- 10	GB/T 1927.11	30	25	25		0.6 mm/min	Falha
2	Teste de flexão de 3 pontos	5- 10	GB/T 1927.9	300	25	25		1 mm/min	Falha
	Teste de Impacto de Baixa Velocidade	3	ASTM D7136/D7136M	100	100	25	50, 75, 100, 125, 150, 200, 250 e 300 J		
	Teste de cisalhamento	10	ASTM D143 GB/T 17657						Falha
3	Testes não destrutivos por ultrassom	6		1000 500 600	150 250	56 84 112	10 ciclos a 250 kHz		
	Teste de flexão de 3 pontos	10	JIS Z-2113	320	20	20			Falha
4	Teste da linha de cola	5	JIS A-5908	50	50				Falha
5	Teste de flexão de 3 pontos		NBR 7190						Falha
	Teste de tração	9	ASTM D143	9.05 - 9.49	5.00 - 5.10				Falha
6	Teste de Fluência por Tração de Curto Prazo		ASTM D2990						
8	Teste de resistência da conexão	9	ASTM D5652	495		28			Falha
10	Teste de Delaminação	16	AITC T110						Falha
11	Teste de tração		GB/T 40247	408	25	15			Falha
	Delaminação		JAS 2007						
	Flexão		ASTM D 1037						
	Compressão Paralela às Fibras		ASTM D 1037						
12	Dureza		ASTM D 1037						
	Resistência de Colagem		JAS 2007						
	Teste de Falha do Bambu		JAS 2007						
13	Teste de tração	16	ASTM D143	460	25	30			Falha

ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

	Teste de cisalhamento		ASTM D143	62	60	50	1 mm/min	Falha
	Teste de compressão	26		45	30	30	1 mm/min	Falha
	Teste de flexão de 3 pontos			300	30	30		Falha
14	Teste de flexão		GB 17657					Falha
	Teste de flexão e tração combinados	9					2, 20, 200 mm/min	Falha
15	Teste de flexão de 3 pontos	15		100	10		2, 20, 200 mm/min	Falha
	Teste de Tração	15		260	20	6	2, 20, 200 mm/min	Falha
16	Teste de Tração	9	ASTM D143				0.5 mm/min	
17	Teste de resistência ao fogo		GB/T 15225	2440	1220			
	Testes de carregamento lateral	16	ASTM E564	2440	1220			
18	Testes de carregamento lateral	16	ASTM E2126	2440	1220		ISO CUREE	
19	Teste de flexão de 4 pontos	6	GB/T 50329	3600	150	150	5 mm/min	Falha
20	Calorímetro Cônico	53	ISO 5660-1	90	90	40		
21	Teste de flexão de 4 pontos	6		6200	450	84		Falha
	Teste de flexão de 4 pontos		ASTM D-143	760	50	50	5mm/min	Falha
22	Teste de cisalhamento da linha de colagem		ASTM D905 MD Block	70 50.8	30 44.4	15 38	2.5 mm/min	Falha
	Testes de compressão		GB/T 1935	30	20	20	2.0 mm/min.	Falha
	Testes de Cisalhamento		GB/T 1937	40	35	20	1.0 mm/min.	Falha
23	Teste de flexão de 3 pontos		GB/T 1936	300	20	20	8.0 mm/min.	Falha
	Teste de cisalhamento da linha de colagem		GB/T 17657	50	50	20		Falha
	Teste de resistência o fogo			50	50	20		
24	Teste de flexão de 3 pontos	16		450	50	20	10 mm/min	
	Teste de resistência ao fogo	2	ISSO 5660-1	100	100	20		
25	Teste de compressão	45		200 300 400				D25mm
26	Teste de compressão	30		1010 1683 2357 2500	100	20		Falha

ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

27	Teste de compressão	40	1000	73	73	Df40mm 15% Cmáx Falha
28	Teste em conexões viga-coluna	4	ISO 16670		ISO 16670	
	Teste de ancoragem	10	GB/T 50329 CSA S347			Falha
29	Teste de Tração	3	GB/T 50329 CSA S347			Falha
	Teste de cisalhamento	3	GB/T 50329 CSA S347			Falha
30	Testes <i>push-out</i> em conexões pregadas	25	ASTM D1761		1.5 mm/min	Falha
31	Teste de carregamento lateral em conexões pregadas	22			5 mm/min	Falha
32	Teste de conexões		ASTM D1761			Falha
33	Teste em escala real em treliça		ASTM E73 GB/T 50329			Falha

Legenda: Ref. – Referências; A – Quantidade de amostras; C – Comprimento do corpo de prova; L – Largura do corpo de prova; E – espessura do corpo de prova; PC – Protocolo de carregamento; VC – Taxa de carregamento; CP – Critério de parada; D25mm – Deflexão de 25 mm; Df40mm – Deflexão de 40 mm; 15% Cmáx – 15% de queda da carga máxima; ASTM D143 – *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*; GB/T 17657 – *Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-Based Panels and Surface Decorated Wood-Based Panels*; ISO 5660-1 – *Reaction-to-Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate (Cone Calorimeter Method)*; ASTM D5652 – *Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products*; ISO 16670 – *Timber Structures - Joints Made with Mechanical Fasteners - Quasi-Static Reversed Cyclic Test Method*; ASTM E2126 – *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements*; JIS Z-2113 – *Methods of Testing Bamboo for Structural Use*; ASTM D1037 – *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*; GB/T 50329 – *Standard for Test Method of Timber Structures*; AITC T110 – *Standard Test for Adhesive Bond Strength*; 1 – Guan *et al.* (2021); 2 – Cai *et al.* (2024); 3 – Shan *et al.* (2021); 4 – Nugroho e Ando (2001); 5 – Rosa *et al.* (2014); 6 – Songsong e Maosong (2021); 8 – Zhou *et al.* (2019); 10 – Meng *et al.* (2023); 11 – Lin *et al.* (2023); 12 – Sulastiningsih *et al.* (2021); 13 – Xiao, Yang e Shan (2013); 14 – Chen *et al.* (2023); 15 – Guan *et al.* (2023); 16 – Sun e Wan (2021); 17 – Jiang *et al.* (2006); 18 – Gao e Xiao (2017); 19 – Zhong *et al.* (2017); 20 – Solarte, Hidalgo e Torero (2018); 21 – Zhou *et al.* (2012); 22 – Syaifundin, Irawati e Awaludin (2022); 23 – Yu *et al.* (2022); 24 – Li X. *et al.* (2023); 25 – Dong *et al.* (2023); 26 – Zhou *et al.* (2023); 27 – Li *et al.* (2016b); 28 – Kang *et al.* (2024); 29 – Li T. *et al.* (2024); 30 – Chen *et al.* (2021); 31 – Sinha e Miyamoto (2014); 32 – Wang *et al.* (2019); 33 – Li Z. *et al.* (2019).

Fonte: Autora (2024).

As informações apresentadas sobre os testes experimentais e normas aplicadas na pesquisa sobre bambu engenheirado oferecem insights para o desenvolvimento da indústria e do mercado desse material estrutural. Essas informações podem orientar as empresas na padronização de processos produtivos e na melhoria dos produtos existentes.

A ampla aplicação de normas, como as da ASTM e GB/T, demonstra a relevância de seguir padrões internacionais na avaliação de propriedades mecânicas e no desempenho de produtos de bambu engenheirado. A adoção dessas normas pelas empresas pode contribuir para garantir a qualidade e a consistência dos produtos, facilitando sua aceitação em mercados exigentes, assim como, reduzir custos de rejeição e retrabalho, ao estabelecer critérios claros para o controle de qualidade. Além disso, a integração de métodos padronizados nos processos

industriais pode fortalecer a confiança do consumidor e promover a competitividade dos produtos no mercado global.

A predominância de normas internacionais nos estudos reflete a importância de alinhar os produtos de bambu engenheirado às exigências globais. Para empresas, isso implica no acesso a mercados internacionais e no fortalecimento de parcerias comerciais com outras indústrias e setores interessados em materiais sustentáveis.

Os resultados da pesquisa não apenas fortalecem o conhecimento técnico, mas também oferecem uma base estratégica para o crescimento da indústria de bambu engenheirado. Empresas que souberem aplicar essas informações estarão melhor posicionadas para atender às demandas do mercado, promover inovações e consolidar o bambu engenheirado como um material estrutural competitivo e sustentável em escala global.

4.5 APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DOS PRODUTOS DE BAMBU ENGENHEIRADO

Diversos estudos destacam as amplas aplicações do *glubam* como material estrutural sustentável e de alto desempenho. Shan *et al.* (2021) mencionam o uso do *glubam* na fabricação de componentes estruturais, como vigas e pilares, em construções semelhantes às de madeira laminada colada. No contexto de construções temporárias e modulares, Xiao *et al.* (2014) exploram o uso do *glubam* em edifícios implantados em áreas afetadas por desastres, como o terremoto de Sichuan em 2008. Edifícios residenciais e modulares foram construídos aproveitando as propriedades estruturais, a leveza e a sustentabilidade do material. Essas estruturas são fáceis de montar, desmontar e transportar, sendo adequadas para situações de emergência ou construções provisórias. Estruturas mais complexas, como pavilhões e parques, também foram projetadas com *glubam*, incluindo edifícios com vigas de até 16.5 metros de comprimento e seções de 800 mm de profundidade por 120 mm de largura.

Xiao, Yang e Shan (2013) ampliam as aplicações do *glubam*, sugerindo sua utilização em edifícios residenciais, industriais e públicos, além de moradias unifamiliares e sistemas estruturais de grandes vãos, como galpões industriais. O material também é proposto para estruturas de treliça, devido à sua capacidade de suportar cargas significativas em espaços industriais e públicos. Meng *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2019) também destacam o potencial do *glubam* em sistemas pré-fabricados, incluindo paredes de contraventamento, estruturas de armação leve e sistemas híbridos *glubam*-madeira. Esses estudos reforçam a versatilidade do

material em diversas partes estruturais, como vigas, montantes, painéis de vedação e sistemas de cobertura.

No campo das estruturas híbridas e de grandes vãos, Li Z. *et al.* (2019) propõem o uso do *glubam* em sistemas de treliça para coberturas e construções industriais. Quaranta, Demartino e Xiao (2019) apresentam sistemas estruturais específicos para telhados e pontes de pequeno e médio vão, como passarelas, destacando a construção fácil e rápida, eficiência no uso dos materiais e baixos custos de fabricação.

Os estudos destacam as aplicações do *bamboo scrimber* como um material estrutural versátil e sustentável, com foco em construções de engenharia e arquitetura. Lin *et al.* (2023) e Chen *et al.* (2023) ressaltam seu uso em materiais externos e estruturais para edificações, enfatizando sua adequação para aplicações de engenharia estrutural devido às suas propriedades de resistência e durabilidade.

No contexto de estruturas de pontes e grandes vãos, Sun e Wan (2021) destacam o *bamboo scrimber* como material ideal para esses tipos de aplicação, devido às suas propriedades mecânicas superiores, resistência e estabilidade. De forma similar, Zhong *et al.* (2017) e Zhong *et al.* (2012) enfatizam o uso do *bamboo scrimber* em vigas de grandes dimensões e colunas longas, combinadas com elementos de reforço para melhorar a capacidade de carga e a rigidez à flexão. Essas aplicações são especialmente indicadas para estruturas de grande porte e construções sustentáveis que demandam alto desempenho mecânico.

Quanto a elementos específicos, como colunas estruturais, Zhou *et al.* (2023) propõem o *bamboo scrimber* como uma alternativa eficiente para membros estruturais delgados, adequados a estruturas leves e edifícios onde o peso reduzido e a sustentabilidade ambiental são prioridades. Dong *et al.* (2023) complementam ao sugerir o uso do material em colunas parcialmente encapsuladas, oferecendo maior flexibilidade e funcionalidade em projetos arquitetônicos e estruturais.

Os estudos também destacam o potencial do LBL para diversas aplicações estruturais. Syaifudin, Irawati e Awaludin (2022) sugerem o uso de vigas de LBL como material de construção em estruturas que demandam alto desempenho e longevidade. Li *et al.* (2016b) ampliam essa perspectiva, propondo a aplicação do LBL também em colunas estruturais, destacando sua viabilidade em membros verticais que suportam cargas significativas. Complementando essas propostas, Sinha e Miyamoto (2014) exploram o uso do LBL em *framings* estruturais, enfatizando sua versatilidade em sistemas construtivos mais amplos.

**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA
CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BAMBU
ENGENHEIRADO ESTRUTURAL**

5 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

Esta seção apresenta os resultados e discussões relacionados à caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural, abrangendo aspectos gerais das empresas analisadas, os produtos comercializados e suas respectivas aplicações. Também são abordados os processos de fabricação comuns entre as empresas, informações sobre a infraestrutura das fábricas e exemplos de projetos reais que utilizam bambu engenheirado em estruturas de edifícios e outros tipos de construções. Adicionalmente, são discutidas as normas e certificações mencionadas por essas empresas.

5.1 LIMITAÇÕES OBSERVADAS NA PROSPECÇÃO DE EMPRESAS

Durante a realização desta pesquisa, uma das principais dificuldades encontradas foi a prospecção dos *websites* de empresas chinesas citadas em artigos científicos e outros documentos identificados por meio das palavras-chave utilizadas nos mecanismos de busca selecionados. Essa dificuldade deve-se, principalmente, às variações na tradução dos nomes dessas empresas para o inglês, o que gerou inconsistências na grafia e dificultou a identificação precisa das entidades. Em alguns casos, uma mesma empresa apresentava seu nome traduzido de três a quatro formas diferentes, o que dificultou tanto a localização dos *websites* nos mecanismos de busca quanto a verificação se nomes muito similares se referiam à mesma empresa. Um exemplo disso é observado em empresas citadas em artigos científicos, como Anhui Hongyu Bamboo Industry Co., Ltd., Anhui Hongyu Bamboo Products Co., Ltd. e Anhui Hongyu Bamboo Technology Co., Ltd.

Além disso, o fato de os nomes das empresas serem apresentados apenas em inglês nos documentos consultados, sem a versão original em chinês, aumentou a complexidade da prospecção. Essa dificuldade tornou-se mais evidente quando os *websites* das empresas não ofereciam uma versão em inglês, dificultando ainda mais sua localização na internet. Para contornar esse problema, a metodologia foi ajustada para incluir palavras-chave em chinês, o que possibilitou identificar empresas cujos *websites* estavam disponíveis exclusivamente nesse idioma.

Outra limitação relevante foi a definição dos termos corretos em chinês para compor as *strings* de busca. Esse desafio foi enfrentado utilizando bases de dados científicas, como a Scopus, para compreender como os produtos de bambu eram referenciados em publicações

acadêmicas, além de consultas a artigos científicos e *websites* de notícias e matérias oriundas da China.

Adicionalmente, dificuldades foram encontradas no acesso a supostos *websites* de empresas de bambu engenheirado estrutural. Em alguns casos, os *hiperlinks* fornecidos em plataformas de descrição de empresas estavam associados a domínios indisponíveis ou inacessíveis. Esses problemas incluíam domínios fora de operação, restrições geográficas de acesso ou simplesmente páginas que apresentavam erro ou estavam fora do ar.

Para mitigar essas limitações, foi utilizado um serviço de VPN, permitindo que o IP de acesso fosse registrado em diferentes localizações ao redor do mundo. No entanto, mesmo com o uso dessa ferramenta, alguns *websites* não puderam ser acessados devido à inexistência do domínio, restrições específicas de acesso ou indisponibilidade por motivos técnicos.

Essas dificuldades evidenciam as barreiras encontradas na prospecção de informações sobre empresas chinesas, principalmente no contexto de materiais emergentes, como o bambu engenheirado, e reforçam a necessidade de estratégias metodológicas adaptativas para superar tais desafios.

5.2 ASPECTOS GERAIS ACERCA DAS EMPRESAS E WEBSITES

Durante a prospecção de empresas, realizada por meio dos diferentes motores de busca definidos no capítulo de metodologia, foram investigados mais de 635 *websites*. Entre os *websites* analisados, estavam empresas fabricantes ou comercializadoras de bambu engenheirado para diversas aplicações, incluindo itens para mobiliário, utensílios de cozinha, revestimentos de pisos e paredes, entre outras utilizações. Além de empresas diretamente relacionadas ao bambu engenheirado, as *strings* de busca também identificaram produtos correlatos, abrangendo desde maquinários até materiais de madeira engenheirada e madeira serrada.

A triagem dos *websites* baseou-se na análise das informações disponíveis nos portais, incluindo descrições de produtos, imagens, aplicações dos produtos e exemplos de uso em situações reais. Em alguns casos, mesmo na ausência de informações detalhadas sobre produtos de bambu engenheirado estrutural, algumas empresas apresentavam páginas contendo imagens que ilustravam a utilização de bambu engenheirado em aplicações estruturais, seja em etapas de construção ou em obras finalizadas. Nestes casos, a empresa foi inserida como fabricante de bambu engenheirado estrutural. Após essa análise, foram selecionadas 20 empresas para compor a caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural.

O mapa da Figura 51 apresenta a localização geográfica e a quantidade de empresas dedicadas à produção de bambu engenheirado para fins estruturais. A distribuição por país evidencia o nível de desenvolvimento da indústria em diferentes regiões do mundo.

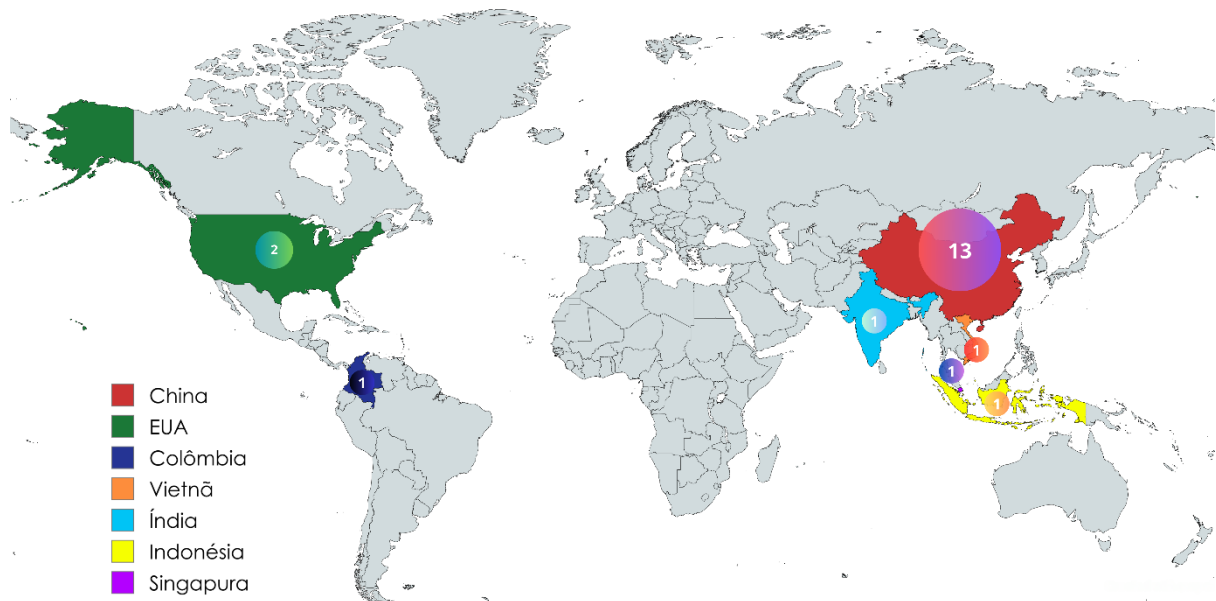
A China se destaca como o principal polo global, concentrando 13 empresas no setor. Este domínio pode ser atribuído à disponibilidade abundante de matéria-prima, ao avanço tecnológico e à capacidade industrial instalada no país, que favorecem a produção em larga escala e com competitividade. Os Estados Unidos aparecem em segundo lugar, com 2 empresas, indicando uma crescente aceitação e interesse por produtos de bambu engenheirado em mercados desenvolvidos, possivelmente motivados por fatores como sustentabilidade e inovação.

Outros países, incluindo Índia, Colômbia, Indonésia, Vietnã e Singapura, possuem apenas uma empresa cada. Essa distribuição limitada sugere que o setor nestas regiões ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, possivelmente devido a barreiras como limitações tecnológicas ou mercados consumidores menos estabelecidos para esse tipo de produto.

Este panorama reflete tanto a concentração da indústria em algumas regiões quanto o potencial de expansão em mercados emergentes. A análise sugere oportunidades para investimentos estratégicos em regiões com matéria-prima abundante e crescente interesse pela sustentabilidade nos setores da construção civil. Além disso, a consolidação de novas empresas pode ajudar a atender à demanda global por materiais sustentáveis e de alta performance estrutural.

Em resumo, o mapa destaca a liderança consolidada da China no setor de bambu engenheirado estrutural e aponta para uma presença global ainda limitada, mas em expansão. A concentração das empresas em um único país contrasta com a distribuição dispersa nos demais, evidenciando tanto a força do mercado chinês quanto o potencial de crescimento em outras regiões do mundo. Essa distribuição reflete a importância de políticas de incentivo e da infraestrutura tecnológica para o desenvolvimento do setor.

Figura 51 – Mapa da localização das empresas de bambu engenheirado estrutural



Fonte: Autora (2024).

O mapa da Figura 52 apresenta a distribuição de escritórios regionais das empresas de bambu engenheirado estrutural em diferentes países, destacando a quantidade de empresas estabelecidas em cada localidade. Observa-se que os Estados Unidos (EUA) e Israel lideram o ranking, com 3 escritórios regionais cada, seguidos pela Tailândia, com 2 escritórios. Os demais países, incluindo Austrália, Brasil, Camboja, Canadá, Colômbia, Dinamarca, França, Índia, Indonésia, Itália, Malásia, Nova Zelândia, Paquistão, Peru, Portugal, Singapura, Emirados Árabes Unidos e Vietnã, possuem apenas um escritório regional cada.

Esses dados permitem inferir algumas conclusões importantes sobre a estratégia de expansão e atuação global dessas empresas. A presença significativa de escritórios regionais nos EUA e em Israel sugere que esses mercados são considerados prioritários para o setor, possivelmente devido à alta demanda por materiais inovadores e sustentáveis, como o bambu engenheirado estrutural, bem como pela disponibilidade de recursos tecnológicos e infraestrutura para suportar operações regionais.

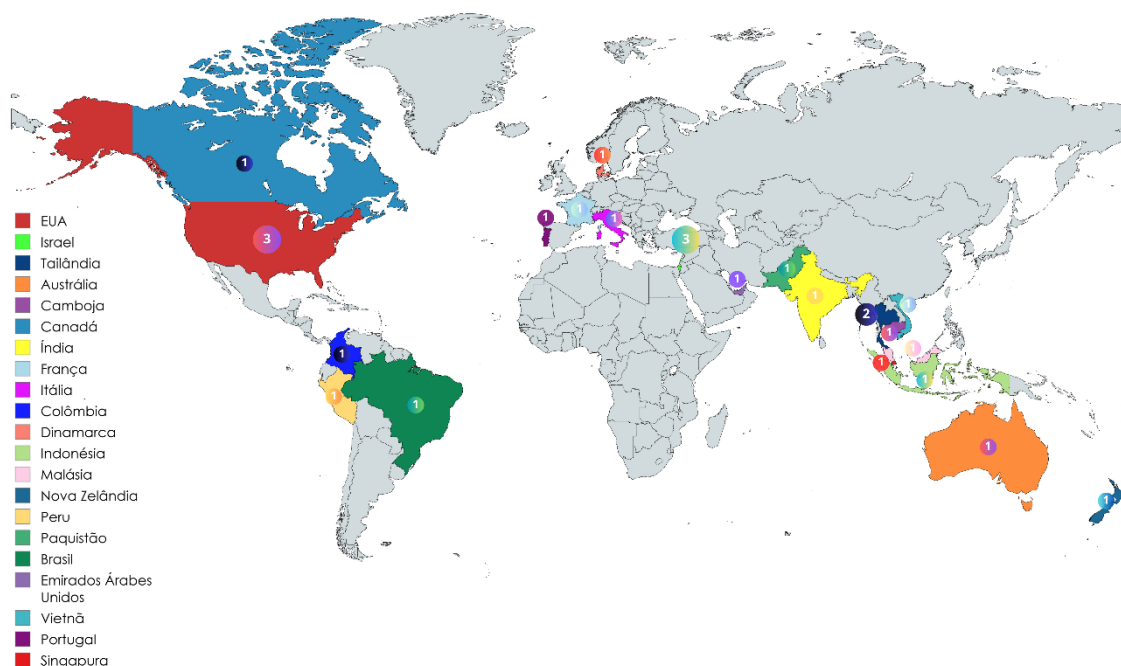
A Tailândia, com dois escritórios regionais, destaca-se como um *hub* regional na Ásia, possivelmente devido à proximidade com mercados emergentes e sua posição estratégica no sudeste asiático, onde o bambu é amplamente cultivado. A presença de escritórios em países como Brasil, Colômbia e Peru sugere um esforço para atender à crescente demanda na América

Latina, uma região rica em biodiversidade, mas com menor desenvolvimento no setor de materiais estruturais de bambu.

A ampla dispersão de escritórios em países como Canadá, Dinamarca, França, e Portugal, entre outros, reflete uma estratégia de inserção em mercados diversificados, alcançando tanto regiões com tradição no uso de materiais sustentáveis quanto áreas emergentes onde o bambu pode ser introduzido como alternativa inovadora. A presença de escritórios únicos nesses países indica que as empresas estão explorando novos mercados, embora ainda de forma pontual e experimental.

Em suma, a distribuição geográfica dos escritórios regionais evidencia uma estratégia global que combina foco em mercados prioritários, como EUA, Israel e Tailândia, com uma abordagem exploratória em regiões emergentes. Essa configuração reflete o caráter dinâmico e global do setor de bambu engenheirado estrutural, alinhando-se às demandas por soluções construtivas sustentáveis em diferentes contextos econômicos e culturais.

Figura 52 – Mapa da localização de sedes regionais das empresas de bambu engenheirado estrutural prospectadas



Fonte: Autora (2024).

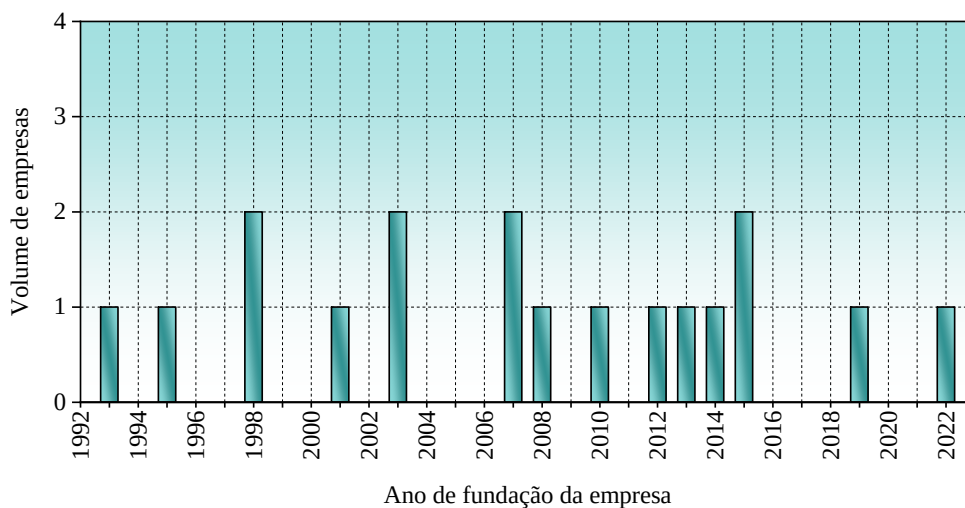
O gráfico da Figura 53 ilustra o ano de fundação das empresas voltadas à produção de bambu engenheirado estrutural, destacando a evolução temporal da criação dessas organizações. É importante mencionar que duas empresas não constam no gráfico devido à ausência de informações sobre o ano de fundação em seus respectivos *websites*.

A análise do gráfico indica que a fundação de empresas na indústria de bambu engenheirado estrutural ocorre de forma relativamente dispersa ao longo do tempo, com o primeiro registro em 1993 e o mais recente em 2022. O setor apresentou um máximo de duas novas empresas por ano nos anos de 1998, 2003, 2007 e 2015, sugerindo momentos de maior crescimento ou interesse pela indústria. Esses picos podem estar associados a avanços tecnológicos, maior conscientização sobre sustentabilidade ou expansão do mercado consumidor.

Em contrapartida, houve períodos de pouca ou nenhuma fundação de empresas, como de 2004 a 2006 e de 2016 a 2018. Esses intervalos podem refletir dificuldades econômicas, desafios tecnológicos ou restrições relacionadas ao acesso a mercados ou matéria-prima.

A análise temporal evidencia que o setor de bambu engenheirado estrutural está em constante desenvolvimento, embora ainda possua espaço para crescimento no surgimento de novas empresas. Esse panorama reflete tanto a crescente maturidade da indústria quanto o potencial de expansão em resposta à demanda crescente por materiais sustentáveis e de alto desempenho estrutural.

Figura 53 – Gráfico do ano de fundação das empresas de bambu engenheirado estrutural



Fonte: Autora (2024).

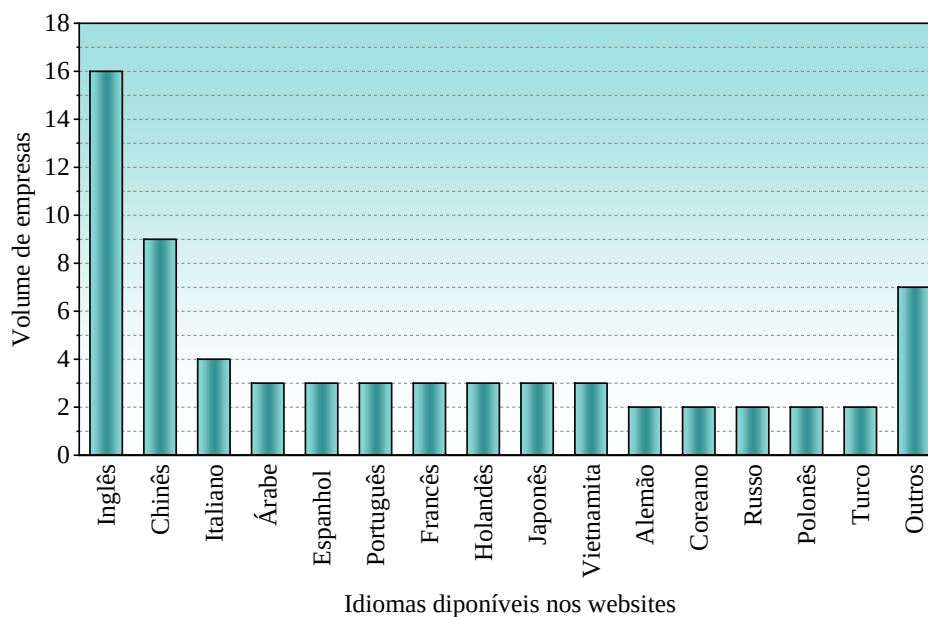
O gráfico apresentado na Figura 54 ilustra a distribuição dos idiomas disponíveis nos *websites* oficiais das empresas prospectadas, com foco na análise da indústria global de bambu engenheirado estrutural. Observa-se que o idioma inglês é amplamente predominante, sendo encontrado em 16 *websites*, o que reflete sua posição como língua franca no comércio e nas interações internacionais. O segundo idioma mais frequente é o chinês, presente em 8 *websites*, demonstrando a relevância da China no setor. Idiomas como italiano, árabe, espanhol,

português, francês, holandês, japonês, vietnamita, alemão, coreano, russo, polonês e turco também aparecem com menor frequência, refletindo a presença de empresas em diferentes regiões e seus respectivos mercados.

Na categoria “Outros”, encontram-se idiomas que apareceram em apenas um *website* cada, incluindo dinamarquês, finlandês, ucraniano, tcheco, grego, húngaro e romeno. Este resultado evidencia a diversidade linguística encontrada no setor, ainda que a concentração em alguns idiomas-chave seja evidente.

Uma análise adicional sugere que a predominância do inglês e do chinês está associada à maior integração dessas regiões nas cadeias globais de valor e à busca por acessibilidade internacional. Em suma, a análise dos idiomas disponíveis nos *websites* das empresas prospectadas não só reflete a distribuição geográfica das mesmas, mas também revela estratégias de mercado voltadas à internacionalização ou à consolidação em mercados regionais. Estes dados contribuem para compreender a organização e as tendências do setor global de bambu engenheirado estrutural.

Figura 54 – Gráfico dos idiomas disponíveis nos *websites* oficiais das empresas prospectadas



Fonte: Autora (2024).

O gráfico da Figura 55 apresenta os canais de comunicação disponíveis nos *websites* das empresas de bambu engenheirado estrutural. Os dados revelam que o e-mail e o endereço físico são os meios mais amplamente utilizados, presentes em 19 *websites*, evidenciando que essas empresas valorizam tanto a formalidade da comunicação por e-mail quanto a transparência e credibilidade associadas à disponibilização de um endereço físico.

O telefone e o formulário de contato (caixa de mensagem), presentes em 18 *websites* cada, aparecem como alternativas amplamente aceitas para facilitar o contato direto ou a interação automatizada com os clientes. Esses canais mostram que as empresas estão preocupadas em oferecer acessibilidade e praticidade no atendimento às demandas do público.

O WhatsApp, apesar de ser um canal de comunicação mais dinâmico e popular em outros setores, foi identificado em apenas 6 *websites*. Essa baixa adoção pode refletir uma característica particular dessa indústria, que parece priorizar a formalidade e a estruturação na comunicação, aspectos fundamentais em um setor de produtos altamente técnicos e voltados a aplicações estruturais.

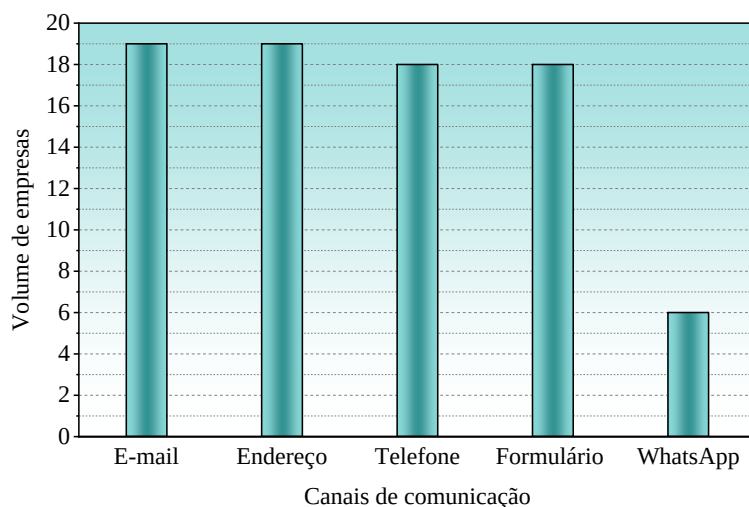
Com base nesses dados, algumas conclusões podem ser inferidas sobre o setor de bambu engenheirado estrutural. Primeiramente, observa-se uma forte ênfase em canais de comunicação tradicionais, como e-mail, telefone e endereço físico, o que sugere que a maioria das empresas busca atender a um público especializado, como engenheiros, arquitetos e construtoras, que valorizam formas de contato confiáveis e formais.

A presença significativa de formulários de contato indica um esforço para adotar ferramentas digitais que otimizem o atendimento e permitam coletar informações específicas de clientes de maneira eficiente. Por outro lado, a baixa adesão ao WhatsApp sugere que, embora a informalidade e a instantaneidade sejam atrativas, essas características ainda não são prioritárias para esse setor.

Esses dados também indicam que as empresas do setor possuem um perfil diversificado de clientes, atendendo tanto a mercados regionais quanto globais. A oferta de múltiplos canais reflete a preocupação em se adaptar às diferentes necessidades e preferências de comunicação. Além disso, a ausência de destaque para canais exclusivamente digitais pode apontar que o setor ainda se encontra em um estágio intermediário de modernização nas práticas de interação com o cliente.

Por fim, a análise sugere que, embora a indústria de bambu engenheirado estrutural ainda mantenha características tradicionais em sua abordagem de comunicação, há sinais de um movimento gradual em direção à diversificação e à digitalização, elementos que podem ser explorados para aumentar a competitividade e a acessibilidade no mercado global.

Figura 55 – Gráfico dos canais de comunicação com o cliente



Fonte: Autora (2024).

O gráfico da Figura 56 apresenta as redes sociais especificadas nos *websites* oficiais das empresas de bambu engenheirado estrutural analisadas. Entre as redes sociais avaliadas, o LinkedIn é a mais frequentemente utilizada, sendo especificada em 14 *websites*. Esse dado reflete a importância do LinkedIn como uma plataforma voltada para o networking profissional, promoção institucional e estabelecimento de conexões corporativas, alinhando-se à natureza técnica e empresarial do setor.

O Facebook e o Instagram aparecem em 12 *websites* cada, indicando que as empresas reconhecem a importância de utilizar redes sociais amplamente populares para engajamento e marketing visual. Essas plataformas permitem que as empresas alcancem um público mais amplo, inclusive consumidores finais e outros stakeholders, promovendo a visibilidade das marcas e de seus produtos.

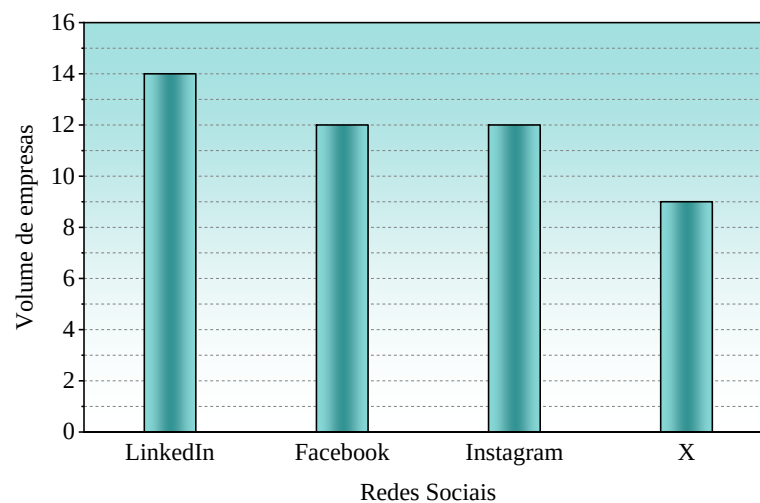
A plataforma “X” (anteriormente conhecida como Twitter) é mencionada em 9 *websites*. Embora menos presente em comparação ao LinkedIn, Facebook e Instagram, sua adoção demonstra que algumas empresas buscam aproveitar o potencial da comunicação em tempo real e do compartilhamento rápido de informações, características inerentes ao “X”.

Esses dados permitem concluir que as empresas do setor de bambu engenheirado estrutural adotam uma estratégia multicanal ao utilizar redes sociais que atendem a diferentes objetivos de comunicação. O LinkedIn é priorizado para fortalecer a presença no mercado profissional e técnico, enquanto o Facebook e o Instagram são utilizados para aumentar o alcance e engajamento com públicos mais amplos. A menor frequência de uso do “X” sugere

que, embora não seja uma prioridade, esta plataforma é usada por algumas empresas para complementar sua estratégia digital.

A análise revela uma abordagem estratégica que equilibra a comunicação profissional e o engajamento visual, alinhando-se às demandas específicas do setor. Essa combinação de plataformas reflete a busca por maior visibilidade e interação tanto no mercado técnico quanto junto a um público mais geral.

Figura 56 – Gráfico das redes sociais especificadas nos *websites* oficiais



Fonte: Autora (2024).

O gráfico da Figura 57 compila as informações disponíveis nos *websites* oficiais de 20 empresas, categorizando-as por tópicos de interesse. A análise revela os pontos fortes na comunicação e transparência do setor, bem como lacunas que ainda precisam ser abordadas. Nove empresas indicam que realizam fornecimento global, evidenciando a capacidade do setor de atender mercados internacionais e se posicionar como uma solução estrutural sustentável em diferentes regiões do mundo. A divulgação de projetos reais com bambu engenheirado estrutural é realizada por 11 empresas, demonstrando um esforço em apresentar exemplos práticos de aplicação do material. Essa prática reforça a confiabilidade do material ao demonstrar sua aplicação prática e desempenho em condições reais de uso.

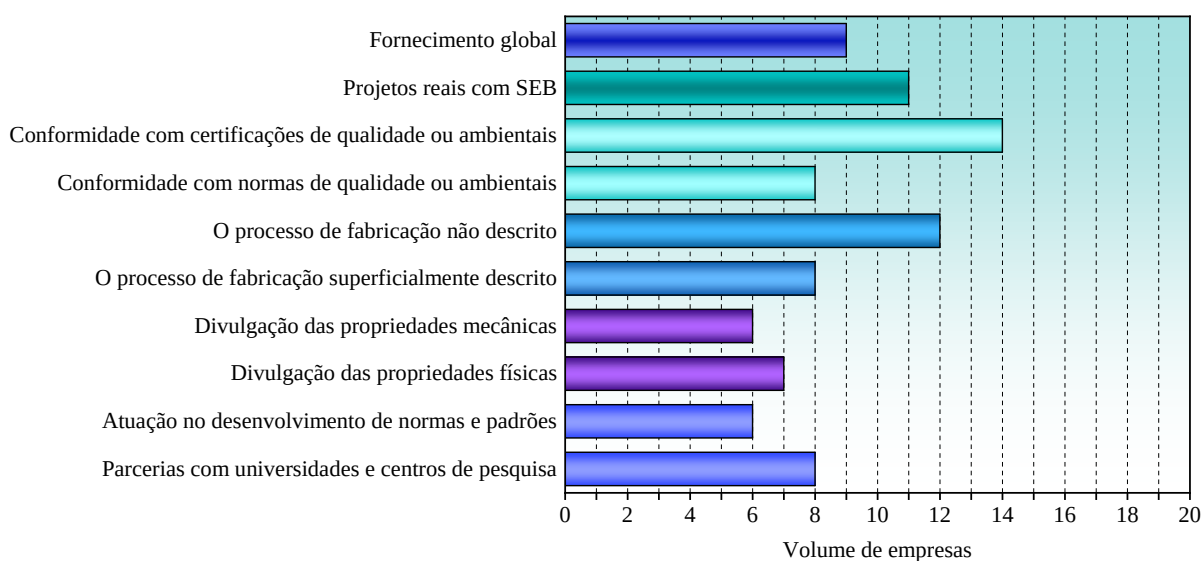
A conformidade com certificações de qualidade ou ambientais, divulgada por 14 empresas, é um ponto positivo que reflete o compromisso do setor com práticas sustentáveis e padrões de qualidade. No entanto, apenas 8 empresas mencionam a conformidade com normas de qualidade ou ambientais, o que aponta para uma lacuna significativa na adoção ou divulgação de normativas técnicas padronizadas.

O processo de fabricação é superficialmente descrito em 8 empresas, enquanto 12 não apresentam qualquer informação sobre esse aspecto. Nenhuma empresa fornece uma descrição detalhada do processo de fabricação. Essa ausência de informações detalhadas compromete a transparência e dificulta a comparação entre produtos. Além disso, apenas 7 empresas divulgam propriedades físicas e 6 apresentam propriedades mecânicas de seus produtos. Esses números baixos refletem a falta de detalhamento técnico nos *websites*, o que pode impactar negativamente a especificação do material em projetos que exigem confiabilidade estrutural.

Oito empresas destacam parcerias com universidades e centros de pesquisa, enquanto 6 mencionam sua atuação no desenvolvimento de normas e padrões. Embora esses números indiquem algum grau de colaboração e inovação, eles ainda são limitados, considerando a importância de regulamentação e pesquisa para o avanço do setor.

A análise da tabela demonstra que, embora algumas empresas mostrem avanços importantes em aspectos como certificações e divulgação de projetos reais, há lacunas significativas na apresentação de informações técnicas e no detalhamento dos processos de fabricação. A falta de transparência em relação às propriedades mecânicas e físicas e aos processos produtivos compromete a confiança dos profissionais que buscam especificar bambu engenheirado em projetos estruturais. A baixa adesão ou divulgação de conformidade com normas técnicas e a limitada participação no desenvolvimento de padrões e parcerias acadêmicas refletem a necessidade de maior engajamento por parte das empresas para consolidar o setor.

Figura 57 – Informações disponíveis nos *websites* oficiais das empresas



Fonte: Autora (2024).

5.3 DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS

5.3.1 altPlus

A altPlus é uma empresa da indústria florestal especializada no aproveitamento sustentável de recursos provenientes do bambu. A partir do bambu cultivado de forma sustentável, a empresa desenvolve e produz uma ampla gama de produtos. Contando com equipes internacionais e multidisciplinares, a altPlus oferece serviços especializados em design, engenharia, manufatura e soluções personalizadas para atender às demandas da indústria (altPlus, 2024a).

A altPlus oferece serviços de design e construção, incluindo consulta de viabilidade, design orçamentário, conformidade com códigos, análise ambiental, integração de tecnologias renováveis e gestão de projetos, atendendo arquitetos, engenheiros e parcerias público-privadas (altPlus, 2024b).

No *website* oficial da empresa, as áreas de negócio são divididas em altPlus EB (produtos de bambu engenheirado), altPlus Projects (assistência de design, engenharia, gerenciamento de projetos), altPlus Fiber (matérias-primas e produtos acabados de celulose e eco-polímeros). A altPlus EB fabrica produtos de bambu engenheirado para os setores de construção, industrial e distribuição. Sua atuação é focada em produtos de bambu laminado (LVBTM) e bambu compensado (EB Ply) (altPlus, 2024c).

5.3.2 Bamboo Era

A Sichuan Zhuyuan Technology Co., Ltd. (四川竹元科技有限公司) sob a marca registrada Bamboo Era, foi fundada em 2010 e está localizada na Zona de Desenvolvimento Econômico de Hongya, Sichuan, cobrindo uma área de 210 acres (Bamboo Era, 2024a). A empresa é uma entidade nacional de alta tecnologia envolvida na pesquisa, desenvolvimento, produção e vendas de materiais compósitos à base de bambu, conhecidos como “Bamboo Steel®”, além de atuar no comércio de importação e exportação de produtos relacionados (Bamboo Era, 2024b).

Em 2010, a empresa foi registrada e estabelecida. Em 2011, a linha de produção de placas de bambu engenheirado, sob a marca de “Bamboo Steel®” foi oficialmente concluída. A marca Bamboo Steel® foi registrada em 2012 no Escritório de Marcas da Administração Estatal para Indústria e Comércio da China e na Organização Internacional de Marcas de Madri (Bamboo Era, 2024a).

A empresa possui mais de 70 patentes e é uma unidade executora do Programa Nacional 863 e do Projeto do Programa Nacional de Tocha. Além disso, a Bamboo Era participa da formulação dos padrões da indústria, incluindo “*Bambu Reconstituído para Uso Estrutural*” e “*Terminologia de Materiais de Engenharia em Bambu*”, e contribui para os padrões coletivos de “Padrão de Design de Estruturas de Engenharia em Bambu”, “Padrão de Teste de Estruturas de Engenharia em Bambu” e “Padrão de Construção e Aceitação de Qualidade de Estruturas de Engenharia em Bambu” (Bamboo Era, 2024b). A empresa é certificada pelo sistema de qualidade ISO 9001 e pelo sistema ambiental ISO 14001. Desde a sua fundação, a empresa criou continuamente normas e padrões chineses e normas e padrões mundiais na indústria (Bamboo Era, 2024a).

5.3.3 ReNüTeq

A ReNüTeq é uma empresa internacional de tecnologia para a construção, sediada nos Estados Unidos, que se dedica à inovação por meio da integração de materiais sustentáveis, arquitetura, design de produtos e serviços de engenharia. A empresa oferece soluções completas para construção, abrangendo design, fornecimento de materiais e produtos, além de suas especificações conforme as necessidades de cada projeto. Sua sede conta com uma instalação de aproximadamente 8 mil metros quadrados, localizada em St. Charles, Missouri, EUA (ReNüTeq, 2024a).

A equipe da ReNüTeq estabelece parcerias estratégicas no modelo “*Business to Business*” (B2B), com o objetivo de desenvolver soluções construtivas de alto desempenho utilizando produtos de bambu engenheirado estrutural (SEB). A empresa fornece materiais para projetos globais, com operações de fabricação localizadas nos Estados Unidos e na Europa. O bambu *Guadua* utilizado em seus produtos é adquirido na América Latina (ReNüTeq, 2024a).

A ReNüTeq iniciou sua trajetória em 2003 com o desenvolvimento dos primeiros protótipos de componentes estruturais de SEB usando lamelas de bambu. Em 2009, a empresa liderou a integração do SEB na norma ASTM 5456 e estabeleceu o procedimento de teste, resultando na sua inclusão no IBC (Código Internacional de Construção) de 2012 e no AC47 da ICC-ES. Em 2015, a empresa foi redirecionada para tecnologias estruturais, encerrando a importação de produtos de bambu da China. Em 2016, a ReNüTeq foi fundada em Missouri, EUA, com foco exclusivo em bambu engenheirado da espécie *Guadua angustifolia* proveniente da América Latina e em conformidade com normas ASTM, ICC-ES e EN-1995 (ReNüTeq, 2024b).

Em 2017, a ReNüTeq implementou uma tecnologia focada em otimizar as fibras de maior desempenho do colmo do bambu. Neste mesmo ano, a ReNüTeq instalou o primeiro telhado de aeroporto feito com SEB certificado. Em 2017, empresa desenvolveu o RadLam® (Bambu Laminado Radial) para a fabricação de componentes estruturais como vigas e colunas. Em 2024, a ReNüTeq continua gerenciando projetos a partir de St. Charles (ReNüTeq, 2024b).

A ReNüTeq oferece soluções inovadoras e sustentáveis desde o conceito inicial até a instalação. Projetos típicos têm prazos de 10 a 14 semanas, enquanto menores podem ser agilizados com estoque padrão em St. Charles (EUA) e Frankfurt (UE). Projetos maiores podem levar de 18 a 22 semanas, conforme sua complexidade (ReNüTeq, 2024c; 2024d).

5.3.4 Taohuajiang Bamboo

A Hunan Taohuajiang Bamboo Technology Co., Ltd. foi fundada em julho de 2001 e está localizada na Zona de Desenvolvimento Econômico de Taohuajiang, Província de Hunan. Possui também subsidiárias em Changsha, Fujian e outros lugares (Taohuajiang Bamboo, 2024a). A empresa obteve, ao longo dos anos, várias patentes nacionais e resultados científicos na área de processamento de bambu e madeira, com 29 patentes nacionais concedidas ou em processo de aprovação no campo do processamento de bambu, 7 patentes internacionais protegidas pelo PCT, e 10 patentes estrangeiras nos Estados Unidos, Japão, Europa, França e Canadá (Taohuajiang Bamboo, 2024b).

As tecnologias de produção desenvolvidas, como “Recomposição de Bambu e Madeira” e “Carbonização Alta e Anticorrosão”, são resultados de pesquisa significativos na indústria de bambu da China, com potencial para aumentar substancialmente a taxa de utilização do bambu, o valor agregado dos produtos e o nível de mecanização da produção. Os produtos são exportados para mais de vinte países, incluindo os mercados da Europa, América do Norte, Japão e Coreia do Sul, com boa aceitação pelo mercado e uma perspectiva de expansão global significativa (Taohuajiang Bamboo, 2024b).

A empresa conta com três plataformas de pesquisa e desenvolvimento em nível provincial: o “Centro de Pesquisa em Engenharia da Província de Hunan”, o “Centro de Tecnologia Empresarial Reconhecido da Província de Hunan” e o “Centro de Design Industrial da Província de Hunan”. A empresa assinou acordos de cooperação de longo prazo entre indústria, academia e pesquisa com a Universidade de Ciência e Tecnologia Florestal Central do Sul, a Universidade Florestal de Nanjing, a Universidade de Hunan e o Instituto de Tecnologia Urbana de Hunan. Em conjunto com a Universidade de Ciência e Tecnologia

Florestal Central do Sul, a empresa executa o projeto “Pesquisa e Demonstração de Tecnologias-Chave para o Processamento Profundo de Bambu”, um projeto de grande importância tecnológica para a Província de Hunan (Taohuajiang Bamboo, 2024b).

A empresa participa da formulação e revisão de várias normas nacionais, setoriais e de grupos, além de aprimorar a gestão interna, valorizando a construção de um sistema padronizado, estabelecendo documentos de controle de qualidade em três níveis e aderindo rigorosamente ao controle de qualidade conforme normas internacionais e do setor. Atualmente, a empresa está em fase de expansão, utilizando tecnologias patenteadas desenvolvidas internamente para implementar uma produção mecanizada em larga escala, com o objetivo de transformar os recursos de bambu de Hunan em novos produtos de alta qualidade destinados ao mercado global (Taohuajiang Bamboo, 2024b).

Em parceria com a Universidade de Ciências e Tecnologia Florestal da China Central, a empresa desenvolveu, em 2012, o Projeto Chave de Pesquisa e Demonstração de Tecnologia de Processamento Profundo de Bambu. Entre suas principais conquistas estão as técnicas “Reestruturação de Bambu e Madeira” e “Carvão Anti-Corrosão”, que elevaram a taxa de utilização do bambu, o valor agregado dos produtos e o nível de mecanização na produção (Taohuajiang Bamboo, 2024c).

A Taohuajiang Bamboo é uma das dez maiores marcas da indústria de bambu na China, com mais de 500 acres de instalações distribuídas em múltiplas bases de produção. Suas operações são organizadas em dois sistemas principais: “madeira laminada de bambu” e “bambu anticorrosivo para uso externo” (Taohuajiang Bamboo, 2024d).

5.3.5 Bamboo International

Bamboo International (Group) Co. Ltd. (BIL) é uma empresa sediada em Hong Kong especializada em produtos arquitetônicos de bambu, bem como móveis e produtos exclusivos. A empresa é especializada em fornecer soluções de bambu personalizadas de ponta a ponta, desde a intenção do design, produção de fábrica, instalação e manutenção. A BIL é uma empresa verticalmente integrada, com uma equipe de design interna e uma equipe de pesquisa que explora e desenvolve aplicações e materiais de bambu por meio de várias tecnologias avançadas. A fábrica está situada em Jiangxi, China. A linha de produção é formada por manipuladores de materiais qualificados e maquinário avançado (Bamboo International, 2024a).

5.3.6 Feiyu Bamboo

A Jiangxi Feiyu Bamboo Materials Co., Ltd. (江西飞宇竹材股份有限公司) foi fundada em 16 de julho de 1998, com endereço registrado no Parque Industrial Fengxin, Cidade de Yichun, Província de Jiangxi. A companhia possui cinco filiais e atua na produção e comercialização de uma ampla gama de produtos, incluindo pisos laminados, pisos compostos de bambu e madeira, móveis de bambu, móveis de bambu engenheirado, materiais de construção de bambu engenheirado, entre outros produtos. Suas atividades também abrangem a comercialização online, cultivo e venda de bambu, reflorestamento e operações de importação e exportação de diversas mercadorias e tecnologias, tanto de forma direta quanto como agência (Feiyu Bamboo, 2024a).

Com 30 anos de experiência no setor, a Feiyu Bamboo opera com quatro grandes bases de produção, demonstrando sua capacidade industrial de alta escala, e já participou de mais de dois mil casos de cooperação em projetos (Feiyu Bamboo, 2024a).

5.3.7 ASIA Bamboo

A Anji Aixi Bamboo Industry Co., Ltd., operando sob a marca registrada ASIA Bamboo, é uma fabricante chinesa especializada em painéis de bambu engenheirado para móveis desde 2003. A empresa oferece uma ampla variedade de tamanhos e estruturas, atendendo clientes em todo o mundo. Seus principais produtos incluem painéis de bambu, bancadas, tampos de mesa e de balcão, folheados de bambu (como os usados em skates e longboards), vigas estruturais, madeira laminada para aplicações internas e externas, além de decks e revestimentos de parede de bambu. Com sede em Anji, a empresa ocupa uma área de mais de 4200 metros quadrados e conta com uma equipe de mais de 150 colaboradores. Atualmente, a ASIA Bamboo exporta seus produtos para mais de 40 países, consolidando-se como referência no mercado internacional (ASIA Bamboo, 2024a).

5.3.8 Bambufy

A Bambufy é uma empresa startup dedicada à fabricação de produtos de bambu engenheirado, com o objetivo de fornecer alternativas inovadoras e ecologicamente corretas para a construção e design. A Bambufy promove o uso do bambu como alternativa versátil e sustentável aos materiais convencionais, visando um futuro mais verde e sustentável (Bambufy, 2024a).

A Bambufy conta com uma equipe multidisciplinar composta por engenheiros, designers e especialistas em sustentabilidade, dedicados ao desenvolvimento de soluções inovadoras. A empresa oferece uma ampla gama de produtos de bambu engenheirado, atendendo a diversos setores e aplicações, desde pisos e revestimentos até membros estruturais duráveis e resistentes. Utilizando técnicas de fabricação avançadas, a Bambufy assegura qualidade e durabilidade consistentes em seus produtos (Bambufy, 2024b).

5.3.9 Jianzhu Green

A Jiangsu Jianzhu Green Bamboo Building Materials Technology Co., Ltd. (江苏见竹绿建竹材料科技股份有限公司) é uma empresa chinesa especializada em pesquisa e desenvolvimento, design e produção de estruturas de bambu integrado (集成竹) e decorações de bambu. Também foi pioneira na aplicação de construção de estruturas de bambu integrado na área de engenharia. Atualmente, a empresa participa da compilação de padrões e especificações nacionais de engenharia para estruturas de bambu e estabelece uma posição de liderança na indústria de construção de estruturas de bambu (Jianzhu Green, 2024a). A Jianzhu Green oferece serviços que incluem projetos de cooperação em pesquisa científica, design aprofundado e fornecimento e instalação (Jianzhu Green, 2024a; 2024b).

A empresa está comprometida com a industrialização de produtos de bambu e fez muitos projetos bem conhecidos em decoração de interiores de bambu e materiais de paisagismo externo, como o Nanjing Garden Expo Park, o Xuzhou Garden Expo Park, o Nanjing Youth Olympic Center, o Wuxi Grand Theater, o Shandong Provincial Capital Grand Theater, a Nanjing Niu Shou Mountain Scenic Area e outros projetos de referência conhecidos. Ao mesmo tempo, a empresa foi pioneira na aplicação de estruturas integradas de bambu. Desde que o projeto de bambu integrado foi implementado em Tongling, Anhui, em 2014, a empresa implementou com sucesso mais de 30 edifícios-chave de estrutura de bambu (Jianzhu Green, 2024b).

5.3.10 Greezu

Ganzhou Sentai Bamboo & Wood Co., Ltd. (Greezu) é um dos principais fabricantes de produtos de bambu na China, com 20 anos de experiência. A empresa oferece mais de 1500 tipos de produtos de bambu, alcançando uma produção mensal de até 5 milhões de peças. Suas instalações ocupam uma área de 40000 metros quadrados em Ganzhou, equipadas com tecnologia de ponta e atendendo aos padrões de construção e produção ISO 14001 (Sistemas de

gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso), ISO 9001 (Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos) e FSC (Forest Stewardship Council). Os produtos são submetidos a testes rigorosos conforme normas internacionais, como BS (British Standards), EN (European Norms) e ASTM (American Society for Testing and Materials) (Greezu, 2024a; 2024b).

Fundada em 1998, a Greezu é uma marca registrada comprometida com o desenvolvimento e a produção de produtos de bambu. Em 2023, novos prédios de escritórios e fábricas estão sendo construídos para atender à crescente demanda. A empresa também lançou uma linha inovadora de produtos classificados para uso externo e resistência ao fogo, posicionando-se como líder na indústria de bambu (Greezu, 2024a; 2024b).

Com uma estratégia focada na expansão global, a Greezu busca estabelecer parcerias comerciais de longo prazo com clientes de todo o mundo. A linha de produtos inclui painéis arquitetônicos de bambu, grades de teto, móveis e componentes para móveis, decks, pisos e madeira de bambu para uso estrutural. Atualmente, a Greezu não atua apenas como fabricante, mas também como fornecedora de soluções, oferecendo designs sustentáveis e inovações em bambu para o mercado internacional. A empresa também investe continuamente em pesquisa e desenvolvimento (Greezu, 2024a).

A empresa acumulou vasta experiência trabalhando com arquitetos, designers e atacadistas, o que permitiu que seus produtos fossem bem recebidos em diversos mercados, incluindo Japão, Coreia do Sul, Tailândia, Singapura, Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos, Canadá, México, Israel, Peru, Brasil, Argentina, Reino Unido, Alemanha, Rússia, Marrocos, Portugal, África do Sul, Irã, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos (Greezu, 2024a)

5.3.11 BWG

A BWG Mai Chau Joint Stock Company foi estabelecida em 2014 por meio da fusão e aquisição de uma empresa com 12 anos de experiência na produção industrial de bambu e madeira, localizada no distrito de Mai Chau, província de Hoa Binh, Vietnã. Desde 2015, a BWG tem investido na construção de um complexo industrial moderno dedicado à fabricação de produtos de bambu, com capacidade anual de 120000 m³ e conformidade com padrões internacionais. O complexo foi implantado em uma área de 6 hectares (BWG, 2024a).

A fábrica da BWG está localizada no centro da área de produção de bambu, na fronteira entre as províncias de Thanh Hoa e Mai Chau – as duas maiores regiões produtoras de bambu no Vietnã. As fontes de bambu da BWG são certificadas pelo FSC desde maio de 2019 (BWG,

2024a). A empresa possui 500 hectares de terra destinada ao cultivo de bambu, com acesso a um recurso total de 150000 hectares de bambu disponível. Conta, ainda, com uma equipe de 250 trabalhadores dedicados às operações (BWG, 2024b).

A BWG é a maior fábrica industrial de bambu do Vietnã, sendo a única fábrica no Vietnã capaz de produzir produtos de bambu laminado e *bamboo scrimber* com padrão internacional (BWG, 2024c). Entre seus principais produtos destacam-se: painéis de bambu, móveis, pisos, decks e revestimentos, pisos para caminhões e outros itens variados (BWG, 2024a). Além disso, também produzem vigas estruturais de bambu laminado (BWG, 2024d).

Todos os produtos da fábrica são controlados para garantir qualidade e atender aos requisitos de corporações internacionais. Os produtos de bambu são exportados para todo o mundo, incluindo os EUA, Europa, Canadá, Japão, Coreia, entre outros países (BWG, 2024a).

5.3.12 Exterior Bamboo

Fundada em 2008, a Exterior Bamboo concentra suas atividades na utilização do bambu como material ecológico e sustentável, destacando suas características como uma escolha promissora para aplicações na construção civil. A empresa se especializa na produção de madeira estrutural de bambu voltada para uso em áreas externas, com foco em oferecer produtos de alta qualidade e sustentabilidade para o mercado chinês. Os produtos incluem vigas e cavilhas, decks de bambu, painéis de parede, revestimentos, escadas, painéis acústicos de bambu e estábulos para cavalos, entre outros (Exterior Bamboo, 2024a; 2024b).

Com mais de 15 anos de experiência na fabricação de produtos de bambu, a Exterior Bamboo conta com departamentos especializados em controle de qualidade para assegurar que cada peça atenda aos padrões exigidos. Os produtos estruturais de bambu fornecidos pela empresa possuem certificações específicas para aplicações em projetos, e estão disponíveis em designs personalizados para atender às demandas de diferentes mercados (Exterior Bamboo, 2024a; 2024b).

5.3.13 Anos Bamboo

A Fujian Sanming Dachuan Bamboo Industry Co., Ltd., registrada sob a marca ANOS® desde 2015, é uma empresa especializada na fabricação de produtos de bambu engenheirado para aplicações internas e externas em edificações. A empresa fornece produtos ao mercado global, incluindo decks externos, revestimentos de parede, vigas, vigotas, cercas e materiais de

construção para exteriores, assim como pisos internos, painéis de parede, molduras de janela, cortinas de bambu, entre outros materiais de construção (Anos Bamboo, 2024a).

A ANOS possui uma equipe de pesquisa e desenvolvimento focada na criação de produtos sustentáveis e na personalização de soluções para atender às necessidades específicas dos clientes. Além disso, oferece suporte técnico dedicado para esclarecer dúvidas e garantir a satisfação dos projetos (Anos Bamboo, 2024a).

A ANOS oferece suporte ágil, garantindo respostas rápidas às dúvidas e solicitações dos clientes por meio do *website*. A empresa possui capacidade para atender pedidos em lotes e gerenciar grandes volumes de envio de forma eficaz. A companhia adota medidas de controle de qualidade para assegurar o atendimento aos padrões de qualidade. Seus produtos são recicláveis, permitindo sua reutilização como fertilizantes naturais ou cobertura morta. Com um suporte global abrangente, conta com uma equipe especializada em questões logísticas, incluindo envio e alfândega, para atender às demandas do mercado internacional (Anos, 2024a).

5.3.14 Sunzo Bamboo

Com mais de 25 anos de experiência na indústria e tecnologias patenteadas, a Hunan Yangming Zhuyong Technology Co., Ltd. produz produtos de bambu ecológicos e renováveis para clientes residenciais, hoteleiros, corporativos, arquitetos, construtores e designers. Registrada sob a marca Sunzo Bamboo, a empresa possui uma fábrica de 100000 metros quadrados e um processo patentado de extensão ilimitada de bambu (Sunzo Bamboo, 2024a).

A Sunzo Bamboo se destaca em produção, serviços de design personalizado e sustentabilidade ambiental, possuindo uma cadeia de suprimentos integrada, de florestas de bambu a instalações de processamento. A empresa utiliza uma tecnologia de extensão própria para aumentar a resistência e a versatilidade dos produtos de bambu. Além disso, a companhia possui uma equipe de especialistas que fornece serviços de design personalizados para atender às necessidades específicas do projeto, garantindo soluções para uma ampla gama de aplicações (Sunzo Bamboo, 2024b).

5.3.15 Lamboo

A Lamboo é uma fabricante e fornecedora de soluções de produtos arquitetônicos e estruturais de bambu engenheirado sediada nos EUA. Desde 2007, a Lamboo expandiu o desenvolvimento inicial de seus produtos estruturais e de uso externo, ampliando sua tecnologia para diversas outras soluções de produtos arquitetônicos, de construção e OEM. A Lamboo

trabalha com seus clientes desde o início de um projeto até sua conclusão. Os produtos Lamboo® podem ser fabricados para atender aos requisitos de design para aplicações internas, externas e estruturais (Lamboo, 2024a).

A Lamboo continua focada no desenvolvimento de produtos e sistemas arquitetônicos de bambu de última geração para a indústria da construção. Para 2023, a empresa refinou as ofertas de produtos e desenvolveram mais soluções de produtos prontas para uso, tornando mais fácil especificar a Lamboo. Agora separados em três categorias, os produtos são especificados como Lamboo Interiores, Exteriores e Aplicações Estruturais. A Lamboo também oferece serviços que incluem fresagem CNC, moldagem, marcenaria personalizada, acabamento, desenhos de oficina e consultoria de projeto. A Lamboo desenvolve soluções de pequenos projetos residenciais a grandes projetos comerciais (Lamboo, 2024a).

A Lamboo oferece serviços personalizados de fresamento, perfilamento, moldagem e marcenaria para atender projetos de arquitetura e design. Também fornece acabamentos internos e externos, além de desenhos técnicos para aplicações OEM e projetos arquitetônicos (Lamboo, 2024b).

5.3.16 Guadua Bamboo

A Guadua Bamboo S.A. consolidou-se como referência no cultivo e exportação de bambus tropicais gigantes na América Latina. Com uma rede internacional de compradores e fabricantes, a empresa conecta produtores de bambu, tanto privados quanto corporativos, a indústrias que demandam matéria-prima de bambu. A Guadua Bamboo utiliza florestas de bambu e terras de plantação de maneira e a uma taxa que mantém ou melhora sua biodiversidade, produtividade e capacidade de regeneração. A Guadua Bamboo conta com uma equipe formada por especialistas colombianos, europeus e americanos, cada um com experiência prática e expertise em sua área de atuação no setor de bambu (Guadua Bamboo, 2024a).

5.3.17 Run Zhun

A Zhejiang Run Zhu Technology Co., Ltd. (Run Zhun Lv Jian) é uma empresa chinesa de alta tecnologia, dedicada à pesquisa e desenvolvimento de edifícios modulares de bambu, materiais de bambu engenheirado para uso externo e tecnologias abrangentes de aplicação de bambu. A empresa possui uma equipe de design, pesquisa e desenvolvimento, fabricação e vendas. Desde 2008, seus membros têm se dedicado ao setor de bambu, focando no

desenvolvimento de edifícios e na integração da cadeia completa de recursos industriais do bambu (Run Zhu, 2024a).

A empresa possui três subsidiárias: Zhejiang Run Zhu Technology Co., Ltd., Fujian Run Zhu Technology Co., Ltd. e Yingtan Dajian Bamboo Industry Co., Ltd. A Run Zhu detém várias patentes de tecnologias para construções modulares de bambu. A Run Zhu atua como base conjunta de treinamento de pós-graduação em universidades renomadas, como a Universidade Florestal de Nanjing, a Universidade de Agricultura e Floresta de Fujian e a Universidade de Tecnologia de Hubei. Além disso, é membro do Conselho da Aliança Nacional de Inovação da Indústria de Materiais Estruturais de Bambu e coautor dos padrões técnicos “Bambu Reconstituído para Estruturas” e “Terminologia para Materiais de Engenharia de Bambu” (Run Zhu, 2024a).

No desenvolvimento de produtos, a empresa oferece soluções modulares de bambu ecologicamente corretas, abrangendo desde o design inicial, produção, instalação e manutenção. Entre os produtos desenvolvidos estão vilas modulares de bambu, sanitários modulares, pousadas modulares, móveis modulares de bambu, pisos modulares de bambu com tecnologia que reduz o tempo e custo de instalação, fachadas modulares de bambu, grades modulares, perfis personalizados de bambu, bambu recriado de grande escala, e outras inovações (Run Zhu, 2024a).

As principais marcas incluem: “Run Zhu ®” e “Cristal Bambu”, focadas em materiais externos de bambu recriado de alta resistência; “Run Zhu Home” e “Custom Bamboo”, voltadas para produtos personalizados de alta qualidade; “Run Zhu Hall®” e “Run Zhu Green Construction®”, especializadas em edifícios e móveis modulares de bambu; e “Ruizhu®” e “Yongyu Run Zhu®”, que fornecem pisos externos e materiais de bambu recriado de resistência média (Run Zhu, 2024a).

5.3.18 Dasso

O Grupo Dasso é uma empresa de alta tecnologia com uma equipe independente de pesquisa e desenvolvimento composta por 50 integrantes. Fundada em 1993, a marca Dasso® é reconhecida como uma das principais inovadoras globais da indústria de bambu. Com mais de 30 anos de experiência na produção de produtos de bambu, a empresa conta com 8 unidades de fabricação, mais de 1,000 funcionários e administra mais de 2,700 acres de florestas de bambu produtivas e sustentáveis na China (Dasso, 2024a).

A Dasso possui tecnologia patenteada e equipamentos de fabricação automatizados, o que lhe permite desenvolver produtos de alta qualidade. Além disso, a empresa é detentora de diversas patentes nacionais e internacionais para seus produtos de bambu e participa ativamente na formulação e elaboração de padrões nacionais e industriais (Dasso, 2024a).

A Dasso mantém parcerias estratégicas com instituições de ensino superior, institutos de pesquisa científica e empresas renomadas, como a Universidade de Cambridge, Universidade de Helsinque, Academia Chinesa de Silvicultura, Universidade Florestal de Nanjing, Universidade de Agricultura e Silvicultura de Zhejiang, entre outras. Essas colaborações reforçam sua posição de liderança na inovação e no desenvolvimento de soluções avançadas para a utilização sustentável do bambu (Dasso, 2024a).

5.3.19 PT Indobamboo Lestari

A PT Indobamboo Lestari, fundada em Kusamba, Bali, em 2012, tem como objetivo tornar-se uma empresa pioneira na Indonésia, focada no design e na fabricação de produtos estruturais de bambu engenheirado provenientes de programas sustentáveis de restauração florestal. A empresa integra práticas de manejo florestal sustentável baseadas na comunidade com tecnologia avançada de manufatura de bambu para oferecer um produto de construção neutro em carbono, atendendo tanto aos mercados domésticos quanto internacionais (Indobamboo, 2024a).

Por meio de uma cadeia de valor verticalmente integrada, a Indobamboo assegura o controle de qualidade de seus produtos e monitora os benefícios socioambientais desde a colheita até a manufatura e aplicação na construção civil (Indobamboo, 2024a).

A Indobamboo Lestari juntamente com o Bamboo Village Trust (BVT) receberam um subsídio de US\$ 375.000,00 do P4G. O P4G oferece financiamento, assistência técnica e suporte para parcerias que desenvolvem soluções climáticas nas áreas de alimentos, água e energia. Seu objetivo é promover crescimento verde e inclusivo em países de baixa e média renda, preparando empresas em estágio inicial para investimentos e apoiando transições climáticas nos sistemas mencionados. Além disso, o P4G facilita melhorias nos sistemas de países parceiros e compartilha aprendizados globalmente (P4G, 2024a). A parceria entre a Indobamboo Lestari e a Bamboo Village Trust expandirá o uso de produtos de construção à base de bambu com carbono negativo, fabricados na Indonésia, enquanto apoia parceiros rurais no manejo e restauração de paisagens degradadas por meio do bambu (P4G, 2024b).

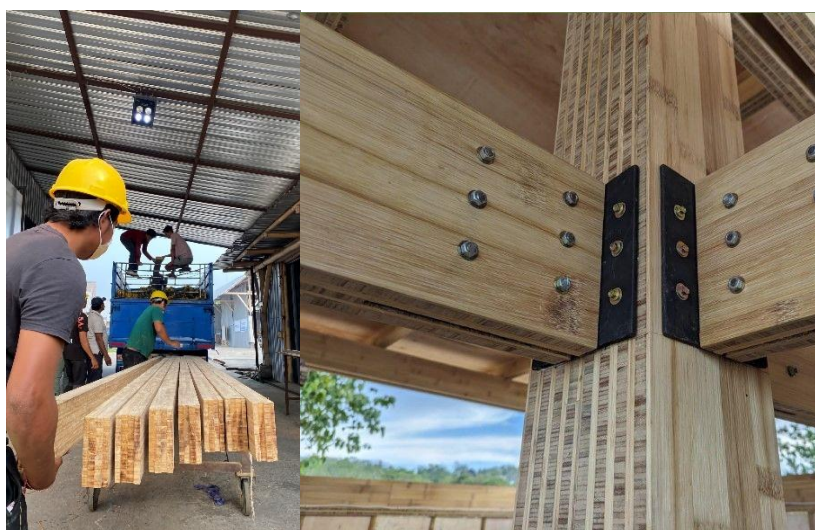
A Indobamboo Lestari desenvolveu um produto de bambu engenheirado estrutural que pode ser utilizado na construção de edifícios de múltiplos andares. Os resíduos gerados durante o processo de fabricação são transformados em briquetes para alimentar as caldeiras da fábrica da Indobamboo, criando um sistema de produção circular e fechado (P4G, 2024b).

Existem barreiras regulatórias que precisam ser superadas para aumentar o uso do bambu engenheirado estrutural. A Cave Urban e o Green Building Council of Indonesia (GBCI) apoiarão a Indobamboo Lestari no diálogo com ministérios relevantes para desenvolver um padrão nacional para a Indonésia. A criação de um padrão nacional permitirá o desenvolvimento de códigos de construção que favoreçam o uso de produtos de construção à base de bambu (P4G, 2024b).

Durante o financiamento do P4G, a Indobamboo buscará captar US\$ 300.000,00 para suas fábricas em Bali e Flores, além de planejar a expansão de suas operações e a construção de uma nova fábrica em Java. Como parte do projeto, a parceria também pretende construir edifícios de destaque com base em bambu e iniciar esforços para garantir compradores em mercados internacionais (P4G, 2024b).

No momento desta pesquisa, o *website* da Indobamboo está em construção. Dessa forma, não estão disponibilizadas informações específicas acerca das propriedades físicas e mecânicas dos produtos de bambu engenheirado estrutural desenvolvidos pela empresa. No LinkedIn da empresa são apresentadas algumas imagens de seus produtos (Figura 58).

Figura 58 – Produtos de bambu engenheirado da Indobamboo



Fonte: Indobamboo (2024b).

5.3.20 Widuz

A Widuz, fundada em 2019 por um grupo de cientistas e empresários, está inovando no desenvolvimento de uma nova classe de materiais de construção renováveis e sustentáveis, utilizando o bambu como matéria-prima. A empresa cria um material estrutural de alto desempenho, sintetizado a partir de fibras de bambu, que apresenta resistência até três vezes superior à da madeira convencional. Além disso, o material desenvolvido pela Widuz destaca-se por sua elevada estabilidade dimensional e por não ser suscetível a processos de deterioração ou degradação, características que o diferenciam significativamente da madeira tradicional (Widuz, 2024).

Devido à sua excepcional relação resistência-peso e durabilidade, o composto de alto desempenho desenvolvido pela Widuz apresenta-se como uma alternativa viável para elementos estruturais, como vigas, colunas e treliças, substituindo materiais de construção não renováveis, como concreto, madeira e aço. Tendo a indústria da construção como seu principal mercado, a Widuz também busca expandir a aplicação de seus produtos para elementos não estruturais, ampliando assim o potencial de utilização de seus materiais sustentáveis (por exemplo, painéis decorativos, pisos, portas e janelas, molduras, bancadas, revestimentos e bancadas de cozinha) (Widuz, 2024).

5.4 PRODUTOS E APLICAÇÕES

5.4.1 altPlus

A altPlus EB é o setor da empresa que tem foco principal em produtos de bambu laminado e bambu compensado (*plybamboo*). O bambu laminado produzido pela altPlus é classificado pela empresa como um *Laminated Veneer Bamboo* (LVB). A linha de produtos de bambu engenheirado da altPlus possui diversas aplicações como vigas estruturais, painéis estruturais, acabamentos de carpintaria, compensado industrial, entre outros materiais de construção. No *website* da altPlus, é possível identificar três linhas de produtos de bambu engenheirado: LVB™, EB Ply e M Series™ LVB (altPlus, 2024d).

O produto de bambu engenheirado estrutural da altPlus faz parte da linha de produtos M Series™ LVB (Figura 59). As principais características do altPlus® *Laminated Veneer Bamboo* - M Series LVB incluem alta resistência, estabilidade dimensional e versatilidade, tornando-o ideal para diversos projetos de construção, como reformas, construções, residências e elementos pré-fabricados (altPlus, 2024e).

O LVB™ oferece excelente desempenho contra empenamentos, fissuras e torções, apresentando elevada resistência à tração, compressão e flexão. Além disso, possui textura uniforme e estética contemporânea. Suas opções de dimensionamento flexível otimizam o uso de material. Este material pode ser utilizado em sistemas estruturais, incluindo vigas, vergas, montantes e colunas, estruturas vigas-pilar, estruturas de telhado, elementos de ponte e componentes para elementos de telhado, piso e parede (altPlus, 2024e).

No *website* da altPlus, a linha de produtos LVB™ é composta por três diferentes produtos LVB™ Beam, LVB™ Panel e LVB™ Panel X. A LVB™ Beam é composta por painéis de LVB™ com espessura de 19 mm, resultando em um material estrutural de alta performance. Esse processo de fabricação confere à LVB™ Beam resistência mecânica excepcional e elevada estabilidade dimensional, possibilitando a utilização de membros estruturais esbeltos e eficientes. Além disso, a LVB™ Beam se destaca por suas propriedades de alta resistência combinadas a uma superfície uniforme, tornando-a uma escolha ideal para sistemas estruturais do tipo pilar-viga (altPlus, 2024d).

Figura 59 – altPlus LVB™



Fonte: altPlus (2024d).

O LVB™ Panel é formado por camadas de lamelas de bambu coladas tanto nas superfícies largas quanto nas estreitas, sendo aplicado em revestimentos de tetos e paredes, escadas, corrimãos, acabamentos e pisos, sem menção a usos estruturais em edificações (altPlus, 2024d).

O LVB™ Panel X é um painel de bambu laminado cruzado com alta estabilidade dimensional, podendo ser fabricado em tamanhos superiores a 10 metros. Ele é aplicado tanto em elementos estruturais quanto de acabamento e pode ser integrado ao LVB™ Beam X. Contudo, a descrição não especifica se sua função estrutural abrange estruturas resistentes de

edifícios ou apenas esquadrias e móveis, já que não há imagens ilustrativas de sua aplicação em edificações (altPlus, 2024d).

No *website* da altPlus, é mencionada a série ou marca altPlus EB RadLam RLB; contudo, não são fornecidas informações específicas sobre este produto na plataforma oficial (altPlus, 2024f). O portfólio de produtos da altPlus também engloba componentes estruturais curvos, estruturas em kit e sistemas pré-fabricados modulares (altPlus, 2024b).

As aplicações dos produtos de bambu engenheirado da altPlus incluem estruturas de baixa e média alturas, estruturas comerciais, paredes cortina híbridas, sistemas solares, coberturas de entrada, conexões de vidro *spider* e opções personalizadas (altPlus, 2024f).

5.4.2 Bamboo Era

Bamboo Steel® (竹钢®) (Figura 60) é uma marca de produtos de bambu reconstituído da Zhuyuan Technology, desenvolvida com o suporte da plataforma tecnológica da Chinese Academy of Forestry e dos abundantes recursos de bambu de Hongya (Bamboo Era, 2024c). O Bamboo Steel® é chamado de “aço de bambu” porque sua resistência e densidade são comparáveis às do aço (Bamboo Era, 2024d).

Figura 60 – Bamboo Steel®



Fonte: Bamboo Era (2024c).

Com relação resistência/peso de 23.33 N.m/kg, a densidade do Bamboo Steel® varia de 1.0 a 1.4 g/cm³, com teor de umidade variando de 4 a 10% e coeficiente de Poisson de 0.4. O Bamboo Steel® apresenta elevada resistência mecânica, com resistência à tração ao longo da fibra superior a 350 MPa, resistência à compressão ao longo da fibra de pelo menos 300 MPa e resistência ao cisalhamento ao longo da fibra de 20 MPa. Possui também alta tenacidade, com módulo elástico à flexão superior a 30000 MPa. Em relação à resistência às intempéries, o material apresenta baixa taxa de expansão após 28 horas de absorção de água, com expansão de largura limitada a 2% e de espessura a 5%.

No quesito de resistência ao fogo, o Bamboo Steel® atinge a classificação B1 de retardância à chama para materiais orgânicos. O material também é resistente a insetos, atendendo ao padrão nacional nível 10, com taxa de sobrevivência de cupins reduzida a 0% e taxa de perda de massa das tábuas limitada a apenas 0.8%, de acordo com testes nacionais. Além disso, o Bamboo Steel® é uma escolha ecologicamente responsável, com emissões de formaldeído inferiores a 0.05 mg/m³, atendendo ao nível E0 de baixas emissões conforme os padrões nacionais (Bamboo Era, 2024c).

O Bamboo Steel® possui uma relação resistência/peso até cinco vezes superior à do aço Q235 e resistência à tração e compressão duas vezes maior que a do sândalo vermelho. Destaca-se por sua durabilidade e resistência à umidade, pragas, desgaste e condições extremas, como inundações e temperaturas extremas. Apresenta vida útil prolongada, sendo dez vezes mais resistente a formigas que a madeira de pinho e com longevidade superior à de madeiras anticorrosivas convencionais (Bamboo Era, 2024c).

O Bamboo Steel® apresenta excelente processabilidade, apesar de sua alta dureza, pode ser cortado e processado com equipamentos convencionais de serragem de madeira. Os painéis com espessura original de 10-30 mm e comprimento de 2500 mm utilizam adesivo de painel de dois componentes e podem ser montados usando métodos como junção de ponta a ponta, sobreposição, junção escalonada, *finger joint* e conexão por parafuso para obter vários metros de espessura e dezenas de metros de comprimento (Bamboo Era, 2024c).

Devido à dureza, pregos convencionais são desafiadores, mas o material permite fresagem e fixação com pregos auto-roscantes, resultando em conexões robustas. Pode ser lixado, aplainado, fresado e colorido com tintas, óleos ou vernizes convencionais, possibilitando uma ampla gama de acabamentos (Bamboo Era, 2024c).

Atualmente, as aplicações do Bamboo Steel® abrangem sete principais campos: materiais estruturais para construção, decoração de interiores e exteriores, materiais de pisos internos e externos, mobiliário, portas e janelas, materiais para paisagismo e construção pré-fabricada (Bamboo Era, 2024c). O Bamboo Steel® também é empregado em estruturas externas, permitindo a execução de estruturas de grandes vãos, incluindo vigas, colunas e lajes (Bamboo Era, 2024d).

5.4.3 ReNüTeq

Os produtos da ReNüTeq são produzidos a partir da espécie *Guadua sp.*, cultivada na Colômbia e certificada pela ASTM 5456. No caso da ReNüTeq, tanto o processo de preparação

das lamelas quanto o produto final, denominado Bambu Laminado Radial (RLB), sob a marca comercial RadLam® (Figura 61), são patenteados especificamente para aplicações estruturais em edificações (ReNüTeq, 2024e).

A tecnologia patenteada aprimora o uso das fibras de alto desempenho do colmo de bambu, concentrando-se na camada externa do colmo. O processo remove fibras de menor resistência, otimizando a seleção e maximizando o aproveitamento das fibras de alta qualidade para a laminação em produtos estruturais. O SEB de alto desempenho RadLam®, na forma “*Lam-Stock*”, é aplicado em estruturas e componentes estruturais. A ReNüTeq colabora com fabricantes de vigas de *glulam* e estruturas nos EUA, Alemanha, Itália e Japão, permitindo a integração de seus produtos em projetos ao redor do mundo (ReNüTeq, 2024f).

Figura 61 – RLB (Radial Laminated Bamboo) RadLam®



Fonte: ReNüTeq (2024g).

O SEB da ReNüTeq apresenta um módulo de elasticidade superior a 27,579 MPa, superando em mais de duas vezes o observado em produtos de madeira engenheirada, como o *glulam*. Em tração, o SEB destaca-se por sua resistência superior, sendo mais de 10 vezes maior. Com uma densidade 40% maior que a da madeira engenheirada, o material é especialmente indicado para conexões estruturais, mantendo sua forma mesmo sob elevadas cargas de compressão. Além disso, o SEB oferece desempenho aprimorado em situações de incêndio, graças à sua menor taxa de carbonização, e é 28% mais estável que a madeira maciça em ambientes com grandes variações de umidade e temperatura (ArchDaily, 2023).

As principais aplicações do RadLam® incluem sistemas e elementos estruturais, como colunas e vigas (retas, curvas, arqueadas e cônicas) alto desempenho, sistemas viga-pilar, treliças de piso e telhado, estruturas e coberturas alimentadas por energia solar, estações de carregamento de veículos elétricos, sistemas de envidraçamento estrutural (incluindo coberturas e sistemas de fachada), paredes cortina, além de estruturas pré-fabricadas em kit com todos os elementos de aço para a montagem da estrutura (ReNüTeq, 2024). Os produtos

RadLam® possuem aplicações diversificadas, abrangendo desde estruturas residenciais até torres de múltiplos andares (ReNüTeq, 2024b; 2024e; 2024h).

O SEB da ReNüTeq® permite dimensionamentos típicos de vigas de madeira lamelada colada, com o dimensionamento limitado apenas pelo transporte. As vigas e colunas possuem comprimentos que variam de 4'-0" (1.22 m) a 125'-0" (38.10 m), larguras entre 3.5" (88.90 mm) e 30" (762 mm) e profundidades de 3.5" (88.90 mm) a 72" (1828.80 mm). Os produtos *Lam-Stock* possuem espessuras que variam de 1.0" (25.40 mm), 1.5" (38.10 mm) e 2.0" (50.80 mm). Terças para sistemas estruturais para a produção de energia solar possuem dimensões nominais de 3" × 3" (76.2x76.2 mm), 3" × 5" (76.2x127.0 mm), 3" × 6" (76.2x152.4 mm), 3" × 8" (76.2x203.2 mm), 3" × 10" (76.2x254.0 mm), 3" × 12" (76.2x304.8 mm) (ReNüTeq, 2024i).

No *website* da ReNüTeq, são mencionadas algumas soluções estruturais, como componentes de "*laminated veneer bamboo*" (LVB), "*cross-laminated structural engineered bamboo*" e "*mass-ply bamboo panels*". Contudo, não há informações específicas disponíveis sobre esses produtos, o que impossibilita determinar se eles são efetivamente fabricados ou comercializados pela empresa (ReNüTeq, 2024b).

Quatro linhas de produtos, denominadas ReNüTeq® Frame™, ReNüTeq® SoLiS™, ReNüTeq® Glaz, e ReNüTeq® Form™, são apresentadas no *website* da empresa. A série estrutural ReNüTeq® Frame™ engloba diversos elementos e sistemas estruturais tais quais vigas retas, curvas, cônicas ou arqueadas, colunas, estruturas de telhado, sistemas estruturais viga-pilar, englobando estruturas de um ou vários andares (ReNüTeq, 2024e). A linha ReNüTeq® SoLiS™ engloba especificamente as estruturas que produzem energia solar tais como sistemas de cobertura, estações de veículos e estruturas para carregamento de veículos elétricos. Os vãos típicos variam de 9' (2.74 m) a 20' (6.10 m), com vãos livres de 12' (3.6576 m) a 48' (14.63 m) e balanços de até 50' (15.24 m) (ReNüTeq, 2024j).

A linha de produtos ReNüTeq® Glaz oferece soluções que combinam SEB e vidro estrutural para a construção de sistemas de cobertura, telhados, fachadas, átrios, claraboias e esquadrias (ReNüTeq, 2024k). Por sua vez, a série de produtos ReNüTeq® Form™ é projetada para diversas aplicações industriais e arquitetônicas, incluindo sistemas de grelha, componentes de escadas, estruturas de parede, sistemas de prateleiras comerciais e soluções de pedestal (ReNüTeq, 2024l).

A ReNüTeq desenvolveu uma solução híbrida estrutural que combina desempenho e estética, integrando uma treliça de aço soldado com banzos superior e inferior fabricados em

SEB (Figura 62). Essa abordagem utiliza a leveza e o design da estrutura aberta do aço soldado nas treliças, maximizando simultaneamente a alta resistência à tração do RadLam®. Essa integração permite reduzir a altura entre pisos, possibilitando a passagem de sistemas mecânicos e elétricos através das treliças, o que diminui a altura total do edifício e resulta em uma redução significativa nos custos de construção. Além disso, essa solução oferece benefícios adicionais, como melhor desempenho térmico, redução de ruídos e menor vibração entre pisos e sistemas de cobertura (ReNüTeq, 2024m).

Figura 62 – SEB + Welded Steel Web and Bearing Plate



Fonte: ReNüTeq (2024m).

5.4.4 Taohuajiang Bamboo

A Taohuajiang Bamboo produz uma ampla gama de materiais de bambu engenheirado. Para ambientes internos, a empresa oferece materiais laminados de bambu, enquanto para ambientes externos, produz materiais de bambu tratados contra corrosão e resistentes às intempéries. Todos os produtos seguem os padrões do sistema de gestão de qualidade internacional ISO 9001 e do sistema de gestão ambiental ISO 14001. A produção abrange dois tipos principais de bambu engenheirado, classificados com base na estrutura das fibras do material: o bambu laminado e o *bamboo scrimber* (Taohuajiang Bamboo, 2024b; 2024e).

A Taohuajiang Bamboo apresentou seu avanço em pesquisa e desenvolvimento de materiais estruturais de bambu durante o Segundo Congresso Global de Bambu e Rattan (BARC, 2022). Sob o tema “*Development and Application of Modern Bamboo Building Structural Materials*”, foi destacado o material “*Structural Laminated Bamboo Timber*” como uma solução inovadora para aplicações em estruturas de edificações (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

A empresa emprega tecnologia patenteada, incluindo equipamentos e o método de extensão ilimitada e tecnologia de formação de grande formato, para produzir painéis de bambu

engenheirado com dimensões de até 10 metros de comprimento e 1.2 metros de largura em um único processo, permitindo o corte em comprimentos personalizados conforme a necessidade do projeto. Esses painéis podem ser compostos em várias camadas, oferecendo alta resistência de ligação e excelente desempenho estrutural. Ele pode ser alongado a partir do emprego de emendas *finger joint*, alargado e engrossado arbitrariamente de acordo com diferentes requisitos de projeto (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

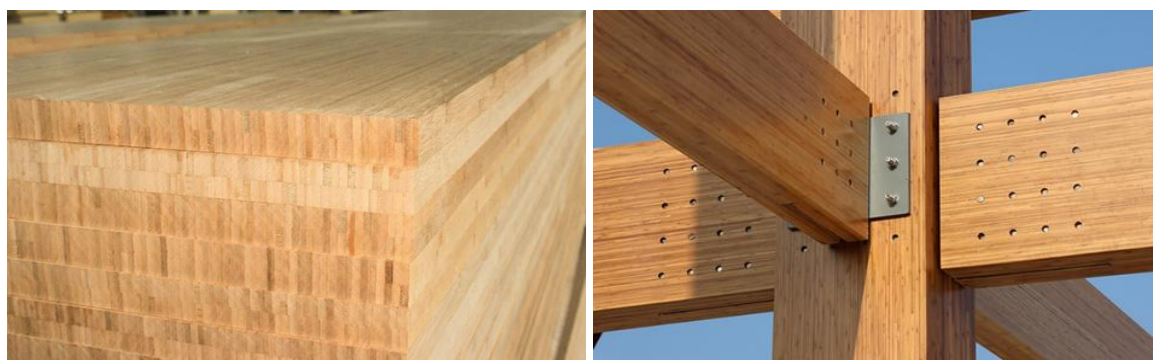
Segundo o *website* da companhia, o bambu laminado estrutural apresenta excelente desempenho em termos de resistência, durabilidade, adaptabilidade a dimensões variadas e resistência ao fogo, tornando-se adequado para aplicações em estruturas de edificações (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

No *website* da empresa, os produtos são divididos em seis categorias, e uma delas é denominada “*Bamboo Glued Timber*” (竹集成材). Dentro dessa linha de produtos, foi possível identificar dois produtos de bambu engenheirado destinados a aplicações estruturais: “*new bambooo structural material*” (新型竹结构材) e “*bamboo building materials*” (竹建筑结构材). No entanto, com base na descrição do produto apresentada, ambos os produtos são o produto “*structural laminated bamboo timber*”, apresentado pela Taohuajiang Bamboo no BARC 2022.

Segundo a descrição do produto, o material madeira laminada estrutural de bambu (Figura 63) destaca-se pela cor suave, textura clara, leveza, alta resistência e elasticidade, sendo ideal para treliças e soluções estruturais para grandes vãos. Esse produto de bambu engenheirado possui excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ao mofo e a traças, além de apresentar características retardantes de chama, podendo atingir o nível retardante de fogo B1. Eles podem ser usados para construir estruturas como vigas, colunas, painéis de parede, lajes de piso, etc., edifícios pré-fabricados, tetos, decoração em grelha, entre outras aplicações (Taohuajiang Bamboo, 2024g; 2024h).

O módulo de elasticidade na flexão ultrapassa 12116.89 MPa e a capacidade de carga limite chega a 95.3 kN, demonstrando excelentes propriedades mecânicas. Pode ser utilizado em estruturas de engenharia com cargas complexas, além de apresentar baixa densidade. Como material estrutural, reduz significativamente o peso próprio da construção, resultando em forças inerciais menores durante terremotos e oferecendo um bom desempenho de resistência sísmica (Taohuajiang Bamboo, 2024h).

Figura 63 – *Bamboo Glued Timber* da Hunan Taohuajiang



Fonte: Taohuajiang Bamboo (2024a; 2024h).

A linha de produtos “*Outdoor Lightly Carbonized Anti-Corrosion Bamboo Material*” (户外浅炭防腐竹材), traduzido para bambu tratado superficialmente contra corrosão para uso externo, engloba a personalização de alguns produtos estruturais de bambu, como pavilhões de bambu, varandas, casas e vilas, etc., feitos de *bamboo scrimber* que é altamente resistente à corrosão e ao intemperismo, e não propenso a deformações e rachaduras. O bambu tratado superficialmente contra corrosão para uso externo é um material durável e de alta tecnologia desenvolvido pela Taohuajiang Bamboo usando sua própria tecnologia de invenção patenteada (Taohuajiang Bamboo, 2024i).

A Taohuajiang oferece serviços completos para produção, venda, instalação, etc. de pavilhões de bambu, casas de bambu e salas de sol ao ar livre. Pavilhões de bambu realizados pela Taohuajiang são ilustrados na Figura 64 (Taohuajiang Bamboo, 2024j).

Figura 64 – a) Pavilhão de bambu tratado contra corrosão (防腐竹木凉亭), b) Pavilhão de lazer em bambu laminado pesado (重竹木休闲凉亭)



(a)



(b)

Fonte: Taohuajiang Bamboo (2024j).

5.4.5 Bamboo International

Na linha de produtos denominada “Elementos Especiais”, a Bamboo International destaca o Bambu Estrutural, produzido por meio de uma técnica especial de bambu engenheirado que permite a criação de estruturas em diversas formas, adaptando-se às especificações e demandas de projetos de designers e clientes. A empresa também oferece a possibilidade de desenvolver características personalizadas para atender a requisitos específicos (Bamboo International, 2024b).

Entretanto, informações detalhadas sobre o Bambu Estrutural, como sua aplicação em edificações, o processo de fabricação e as propriedades físicas e mecânicas do material, não são disponibilizadas, limitando a compreensão técnica sobre seu desempenho e viabilidade em contextos estruturais (Bamboo International, 2024b).

5.4.6 Feiyu Bamboo

No *website* da Feiyu Bamboo, é apresentada uma página dedicada a materiais estruturais de bambu (竹结构材), incluindo imagens ilustrativas de aplicações de bambu engenheirado em estruturas de edificações (Figura 65) e uma breve descrição das características dessas estruturas. De acordo com as informações disponíveis, as estruturas de bambu destacam-se pela facilidade de construção e instalação, curto período de execução, bom isolamento térmico e acústico, excelente resistência a terremotos, garantia de circulação de ar interno e baixo custo. No entanto, o *website* não fornece informações detalhadas ou específicas sobre os produtos de bambu engenheirado estrutural fabricados pela empresa. Com base nas imagens de aplicações e nos projetos apresentados, pode-se inferir que a Feiyu produz bambu engenheirado destinado a aplicações em estruturas de edificações (Feiyu Bamboo, 2024b).

Figura 65 – Aplicações de materiais de estruturais de bambu engenheirado disponíveis no *website* da Feiyu



Fonte: Feiyu Bamboo (2024b).

5.4.7 ASIA Bamboo

No *website* da ASIA Bamboo são apresentadas oito categorias de produtos: *bamboo panel*, *bamboo lumber*, *bamboo veneer*, *bamboo poles*, *bamboo decking*, *bamboo flooring*, *bamboo crafts* e *wood*. A linha de produtos denominada “*Bamboo Lumber*”, também referida como “*bamboo timber*”, “*bamboo planks*”, “*bamboo beams*” e “*bamboo dimensional lumber*”, é fabricada por meio da laminação de tiras de bambu para formar elementos sólidos. Esses produtos estão disponíveis em versões para uso interno e externo. As aplicações incluem caixilhos de janelas e portas, vigas estruturais ou colunas aplicadas em construções de edifícios. A ASIA Bamboo recomenda que os clientes adquiram pequenas quantidades do produto inicialmente, realizem testes destrutivos e utilizem o material em condições reais de trabalho por um período de um ano para avaliar seu desempenho antes de aplicações em larga escala (ASIA Bamboo, 2024b).

Na seção “Aplicações” do *website*, são ilustradas algumas vigas de bambu em aplicações estruturais (Figura 66). No entanto, nenhuma informação é fornecida acerca dos projetos.

Figura 66 – Vigas estruturais de bambu apresentadas no *website* da ASIA Bamboo



Fonte: ASIA Bamboo (2024b).

Dentro da categoria *bamboo lumber*, é apresentado o produto *laminated bamboo lumber* (LBL). Esse produto é fabricado a partir da laminação de tiras de bambu unidas para formar uma placa de bambu laminado, ou ainda múltiplas placas coladas para formar um bloco sólido. Este material é classificado como madeira dimensionada, ou S4S (*Smooth 4 Sides*), caracterizando-se por passar por um processo de aplainamento que resulta em superfícies perfeitamente lisas em todos os quatro lados, com dimensões fixas e precisas, apresentando

mínimas tolerâncias dimensionais. A madeira pode ser fabricada com bordas quadradas em todos os lados ou com bordas arredondadas ao longo do comprimento (ASIA Bamboo, 2024c).

Os produtos LBL incluem dois tipos de produto conforme as aplicações: “*indoor grade bamboo beams*” (vigas de bambu internas) e “*outdoor grade bamboo lumber*” (madeiras de bambu externas). As vigas de bambu internas, como as de $2440 \times 50 \times 25$ mm, podem ser utilizadas para revestimento de paredes, enquanto vigas maiores, como $2900 \times 120 \times 70$ mm e $2900 \times 150 \times 100$ mm, podem ser usadas em molduras de portas, janelas ou como vigas estruturais. A madeira de bambu para uso externo está disponível em comprimentos de 2900 mm, 5800 mm ou até comprimentos maiores, como 9600 mm. A madeira de bambu para uso externo é usada principalmente como colunas em construções e edificações, sendo adequada para condições externas (ASIA Bamboo, 2024c).

5.4.8 Bambufy

O *website* da Bambufy apresenta uma ampla variedade de produtos de bambu engenheirado estrutural, destacando-os como uma alternativa renovável e leve para aplicações na construção civil. Os elementos estruturais de bambu oferecem resistência e durabilidade excepcionais, possibilitando práticas sustentáveis sem comprometer a integridade estrutural, além de proporcionar versatilidade em diversas aplicações, como *framings*, treliças e vigas. Todas as dimensões são personalizáveis conforme as necessidades específicas de cada projeto. Entre os produtos apresentados estão: “*VH Glue Laminated Beam*”, “*Glue Laminated Square Beam*”, “*Glue Laminated Rectangle Beam*”, “*Cross Lay Board Carbonized*”, “*Cross Lay Board Natural*”, “*M&T Joint*”, “*Miter Joint*”, “*Box Joint*”, “*Bridle Joint*”, “*Edge Cross Lap Joint*”, “*Dado Joint*” e “*Glue Laminated Round Beam*” (Bambufy, 2024c). Os produtos apresentados no *website* são ilustrados na Figura 67. No entanto, não são disponibilizadas informações específicas acerca das propriedades, características e aplicações de cada um desses produtos.

Figura 67 – Produtos de bambu disponíveis do *website* da Bambufy



VH Glue Laminated Beam



Glue Laminated Square Beam



Glue Laminated Rectangle Beam



Cross Lay Board Carbonized



Cross Lay Board Natural



M&T Joint



Miter Joint



Box Joint



Bridle Joint



Edge Cross Lap Joint



Dado Joint



Glue Laminated Round Beam

Fonte: Bambufy (2024c).

5.4.9 Jianzhu Green

No *website* da Jianzhu Green, são apresentadas oito de produtos: *bamboo veneer* (竹饰面板), *bamboo grille* (竹格栅), *bamboo sound-absorbing board* (竹吸音板), *bamboo floor* (竹地板), *integrated bamboo structural material* (集成竹结构材料) (Figura 68), *bamboo woven material* (竹编织材料), *integrated bamboo mildew-proof* (集成竹防霉), *integrated bamboo flame retardant* (集成竹阻燃) (Jianzhu Green, 2024a). No entanto, no *website*, não são disponibilizadas quaisquer informações acerca das características, propriedades físicas e mecânicas e aplicações desses produtos.

Figura 68 - Integrated bamboo structural materials



Fonte: Jianzhu Green (2024a).

Conforme apresentado pela empresa durante o BARC 2022, foram compartilhadas algumas informações acerca das características do bambu integrado. O bambu integrado apresenta dimensões variadas, com os tamanhos originais sendo de $2440 \times 1220 \times 12-50$ mm e podendo atualmente alcançar até 48 metros de comprimento. A largura e a espessura podem ser ajustadas conforme necessário, desde que dentro da faixa permitida pelos equipamentos utilizados no processamento. Além disso, o material pode ser moldado em diferentes formas, incluindo círculos e arcos, proporcionando maior flexibilidade para aplicações diversas (Yongjie, 2022).

Os tratamentos físico-químicos aplicados aos materiais incluem métodos para proteção contra mofo, que podem ser realizados por meios físicos ou químicos, contribuindo para maior durabilidade e resistência. Além disso, a modificação físico-química dos materiais permite a adição de propriedades retardantes de chama, classificadas como grau B1 e grau A2. A classificação de grau A2 é alcançada pela combinação de bambu com retardantes de chama de grau B1 e materiais de grau A, como placas de magnésio vidro e placas de alumínio. Em termos de resistência ao fogo, vigas e colunas estruturais de bambu podem alcançar até 3 horas,

superando amplamente os padrões nacionais. Já para pisos estruturais compostos de bambu com tratamento retardante de chama, a resistência ao fogo pode atingir até 2 horas (Yongjie, 2022).

5.4.10 Greezu

A Greezu fabrica o bambu estrutural denominado no *website* como “*Bamboo Beam and Structure*”. A viga estrutural de bambu da Greezu (Figura 69) possui uma ampla variedade de tamanhos e formatos, sendo uma opção versátil para múltiplas aplicações na construção civil, abrangendo tanto projetos residenciais quanto comerciais. Esses materiais podem ser empregados em *framing*, *roofing* e pisos, além de acabamentos decorativos. As vigas e estruturas de bambu também se destacam por sua estética única e natural, podendo ser utilizadas em seu estado original ou acabadas em diferentes tonalidades. Assim, os produtos da Greezu oferecem uma solução durável, sustentável e visualmente atrativa, que englobam uma ampla variedade de projetos de construção (Greezu, 2024c).

As vigas de bambu são leves e fortes, sendo ideais para uso em desde pequenas residências até grandes edifícios comerciais. São resistentes e podem suportar cargas pesadas, tornando-se ideais para uso em áreas propensas a terremotos ou outros desastres naturais. Elas também são flexíveis, o que significa que podem se dobrar sem quebrar, tornando-as mais resilientes que materiais de construção tradicionais, como madeira ou aço. Outra vantagem das vigas de bambu é seu apelo estético. A Greezu já trabalhou em muitos projetos usando vigas de bambu, incluindo residências, escolas e edifícios comerciais. As vigas de bambu são uma excelente escolha para construtores que desejam criar estruturas sustentáveis, duráveis e esteticamente agradáveis (Greezu, 2024d).

As vigas de bambu estrutural da Greezu atendem aos altos padrões internacionais de qualidade e gestão ambiental, conforme comprovado por certificações como CE (Conformité Européenne), ISO 9001 e ISO 14001. Com design moderno e tecnologia de prensagem a quente, as vigas curvas de bambu são projetadas para instalação simplificada, reduzindo os custos trabalhistas e otimizando os prazos de execução dos projetos. O produto oferece garantia de 5 a 10 anos, cobrindo eventuais defeitos e assegurando a durabilidade do investimento. Além disso, a Greezu disponibiliza suporte técnico online, serviços de instalação no local, treinamento especializado e fornecimento de peças sobressalentes gratuitas, garantindo uma experiência prática e eficiente para seus clientes (Greezu, 2024e).

Figura 69 – Vigas de bambu engenheirado estrutural



Fonte: Greezu (2024d).

5.4.11 BWG

No *website* da BWG, é apresentada uma categoria de produtos intitulada “*Bamboo Beams & Lumber*”. Dentro dessa categoria, foram identificados dois produtos com potencial de aplicação estrutural: as “*bamboo beams lumber*” (Figura 70a), correspondentes a vigas de *Laminated bamboo lumber* (LBL), e as “*bamboo lumber strand woven*” (Figura 70b), que consistem em vigas de *bamboo scrimber*.

As vigas de LBL são produzidas a partir de tiras de bambu tratadas, que passam pelos processos de carbonização, secagem e colagem. Podem ser fabricadas por meio de prensagem vertical ou horizontal das tiras, estando disponíveis em cores carbonizadas ou naturais. Essas vigas podem ser produzidas com dimensões personalizadas, sob encomenda, com dimensões máximas de $3000 \times 1280 \times 500$ mm. O comprimento padrão das vigas de bambu é de 3000 mm, no entanto, utilizando a tecnologia de juntas do tipo *finger joint*, é possível fabricar vigas de qualquer comprimento necessário (BWG, 2024).

Com densidade de 750 kg/m^3 , as vigas apresentam um módulo de elasticidade de 8963 MPa, resistência à flexão de aproximadamente 56.7 MPa e dureza Brinell superior a 4.5 kg/mm. O teor de umidade é mantido entre 8 e 10%, enquanto as emissões de formaldeído são de apenas 0.01 ppm. O produto está disponível em acabamento inacabado ou com revestimento UV (ultravioleta) e conta com certificações FSC e ISO 9001. As aplicações incluem projetos estruturais de uso interno, como vigas estruturais retas e curvas (BWG, 2024d).

Figura 70 – a) Bamboo beams lumber; b) High grade strand woven lumbers



Fonte: a) BWG (2024d); b) BWG (2024e).

As vigas de *bamboo scrimber* são produzidas usando o processo de prensagem a frio. Segundo o *website*, as vigas de *bamboo scrimber* podem ser empregadas na estruturação de edifícios. Conforme os dados, essas vigas apresentam densidade de aproximadamente 1100 kg/m³ e dureza Brinell superior a 9.7 kg/mm². Produzida com feixes de fibras prensados a frio, a madeira possui cor caramelo e dimensões máximas de 2900 × 100 × 155 mm.

Seu teor de umidade varia em torno de 10% sob condições de 20 °C e 65% de umidade relativa, com taxa de expansão ou absorção de água de 0.12% por cada 1% de variação no teor de umidade. A colagem utiliza resina fenólica resistente à água, importada da AICA Cingapura, com emissões de formaldeído de apenas 0.01 ppm. Os acabamentos incluem óleo mineral, revestimento NC (nitrocelulose) e revestimento UV. Com certificações FSC e ISO 9001, o produto destaca-se por suas características ecológicas, resistência a cupins, propriedades à prova de fogo, alta dureza, estabilidade, resistência à flexão e durabilidade em condições de uso exigentes (BWG, 2024e).

5.4.12 Exterior Bamboo

Os produtos apresentados no *website* são divididos em categorias e uma delas é denominada “*Bamboo Lumbers & Dowels*”. As vigas de bambu laminado são produzidas a partir do bambu mossô. As tiras estruturais de bambu que fazem os produtos são carbonizadas, fumigadas, antissépticas e antimoho, etc. Todas as vigas são finalizadas com óleo que evita que as vigas estruturais absorvam umidade e reduz o volume e a velocidade da troca de umidade com a atmosfera (Exterior Bamboo, 2024c).

Dentro da categoria “*Bamboo Lumbers & Dowels*” estão produtos como “*Bespoke Engineered Bamboo Lumbers For Structural Application*” e “*Bamboo Structure Beams*”, que

são ambos produtos de bambu laminado. No entanto, não são fornecidas informações específicas acerca das características e propriedades desses materiais.

De acordo com o *website*, o produto “*Large Size Solid Bamboo Beams*” (Figura 71b) pode ser personalizado em dimensões maiores para utilização como *framings* estruturais, com a possibilidade de personalização de formatos para atender às especificidades de cada projeto. Essas vigas geralmente apresentam coloração carbonizada e são compostas por lamelas coladas nas faces verticais (Exterior Bamboo, 2024d).

Outro produto é o “*Structural Bamboo Beams And Columns*” (Figura 71a). Conforme a descrição, esse produto apresenta resistência e estabilidade superiores a madeira disponível no mercado, sendo ideais para aplicações estruturais. Esses produtos podem ser personalizados para atender às necessidades específicas de cada projeto. Com a utilização de tecnologia de juntas do tipo “*finger joint*”, as vigas podem ser fabricadas sem limitações de comprimento, proporcionando maior flexibilidade para estruturas de grande escala (Exterior Bamboo, 2024e).

O produto “*Structure Laminated Bamboo Beams*” está disponível para personalizar os tamanhos e formas de vigas de bambu laminadas de estrutura. Essas vigas podem ser amplamente utilizadas para móveis, *framings* estruturais de construção, revestimentos de parede, decorações, entre outras aplicações (Exterior Bamboo, 2024f).

Figura 71 – a) *Structural Bamboo Beams and Columns*; b) *Large Size Solid Bamboo Beams*



Fonte: a) Exterior Bamboo (2024e); b) Exterior Bamboo (2024d).

De modo geral, informações detalhadas sobre as propriedades físicas e mecânicas das vigas de bambu engenheirado para uso estrutural, bem como exemplos de aplicações em estruturas reais, não estão disponíveis no *website* no momento desta pesquisa. Apenas algumas menções são feitas à possibilidade de utilização dessas vigas de bambu laminado em *framings* estruturais.

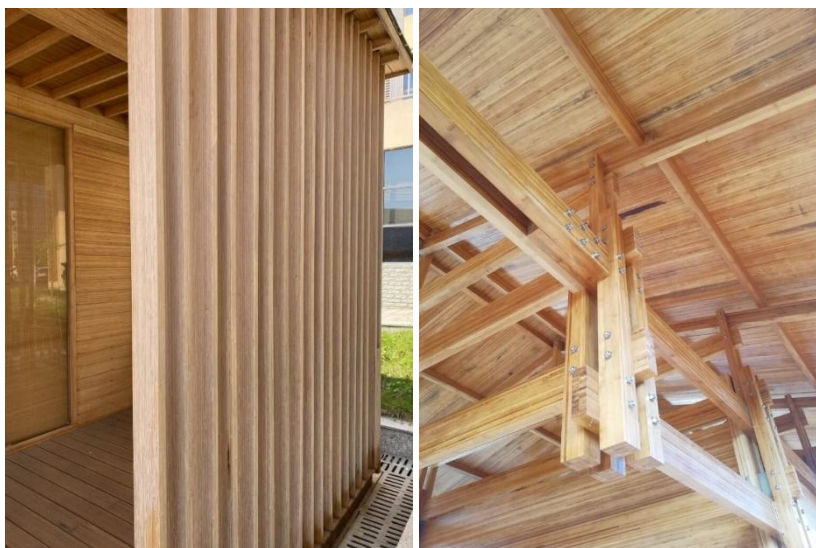
5.4.13 Anos Bamboo

As linhas de produtos de bambu ANOS® oferecem “*strand woven bamboo beams*” e “*engineered bamboo beams*”, que são vigas de bambu laminado, para construção pesada de madeira e aplicações *glulam*. Vigas de bambu podem ser usadas para criar vigas em vários formatos e comprimentos, e são adequadas para uso interno e externo. Vigas de bambu são usadas em muitos tipos diferentes de construção, como telhados, caixilhos de janelas e portas, painéis de parede, colunas e móveis. Também é usado em construção pesada, como pontes, edifícios e outros projetos de grande escala (Anos, 2024b).

As vigas de bambu laminado ANOS® são também denominadas no *website* por “*Laminated bamboo timber*” ou “*Engineered Bamboo Timber*”. De acordo com o *website*, o bambu laminado é um material de alta resistência, projetado para aplicações internas e externas, sendo ideal para móveis, pisos, revestimentos de parede e vigas estruturais. A madeira de bambu laminada é disponibilizada em dimensões padrão de 2900 mm e 6000 mm de comprimento, 100 mm de largura e 100 mm de espessura, com a possibilidade de personalização em todas as dimensões conforme a necessidade. Comparado à madeira tradicional, o bambu laminado apresenta maior resistência e rigidez, tornando-o uma escolha ideal para estruturas portantes (Anos, 2024c). Estruturas construídas com a madeira de bambu são ilustradas na Figura 72.

De acordo com o *website* da Anos, o *strand woven bamboo* é adequado para aplicações estruturais de menor porte, como gazebos. As dimensões padrão desses elementos incluem comprimentos de 1860 mm, 2000 mm e 2500 mm; larguras de 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm e 150 mm; e espessuras de 45 mm, 60 mm e 80 mm. Todas essas dimensões podem ser personalizadas conforme a necessidade (Anos, 2024d).

Figura 72 – Estruturas construída com madeira de bambu



Fonte: a) Anos (2024c); b) Anos (2024b).

5.4.14 Sunzo Bamboo

O *Bamboo Structural Lumber*, com especificações do produto Sunzo Bamboo (SKU: DB-01), consiste em vigas de bambu laminado, disponíveis em dimensões padrões de 1220 × 2440 mm, 915 × 2135 mm, 1250 × 2500 mm, ou sob medida. Fabricadas por meio de prensagem a quente, as vigas possuem acabamento em cor carbonizada, que pode ser personalizado. O produto é certificado por organizações como FSC, CE e ISO, apresentando contração/expansão de 0.14% para cada 1% de variação no teor de umidade, densidade de aproximadamente 680 kg/m³ e teor de umidade de 8 a 12%.

Os valores de resistência incluem resistência à ruptura de 65.4 MPa de acordo com a norma EN 408 (Estruturas de madeira — Madeira estrutural e madeira laminada colada — Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas) e resistência à flexão de 111.75 MPa, conforme a norma EN 310 (Painéis à base de madeira — Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão). Com durabilidade classificada entre Classe 1 e 2 segundo a norma EN 350 (Durabilidade da madeira e produtos à base de madeira — Testes e classificação da durabilidade contra agentes biológicos de madeira e materiais à base de madeira), as vigas demonstram alta qualidade e confiabilidade para aplicações estruturais (Sunzo Bamboo, 2024c).

A madeira estrutural de bambu da Sunzo apresenta uma relação resistência-peso notável, superando diversas opções tradicionais de madeira, o que a torna particularmente adequada para aplicações de suporte de carga, como vigas, colunas e pisos, onde alta resistência

e peso reduzido são fundamentais. Além disso, a madeira de bambu Sunzo mantém sua forma e estabilidade dimensional ao longo do tempo, minimizando problemas comuns, como empenamento e rachaduras, fator essencial para garantir a integridade estrutural em aplicações de longo prazo e alto desempenho (Sunzo Bamboo, 2024c).

Adicionalmente, em comparação com muitos tipos de madeira, o bambu apresenta um coeficiente de expansão térmica inferior, oferecendo maior estabilidade frente a variações de temperatura, o que o torna uma escolha confiável para ambientes sujeitos a condições climáticas variáveis (Sunzo Bamboo, 2024c). Na Figura 73, são ilustrados alguns elementos de bambu estrutural apresentados no *website* da Sunzo Bamboo.

Figura 73 – Estrutura e membros de bambu engenheirado apresentados no *website* da Sunzo Bamboo



Fonte: Sunzo Bamboo (2024c).

5.4.15 Lamboo

A linha de produtos Lamboo® Structure™ Series utiliza bambu engenheirado laminado em construções de madeira pesada e em aplicações de *glulam*. Este material pode ser empregado na fabricação de vigas retas, arqueadas e curvas, conforme os requisitos específicos de cada projeto, com comprimentos limitados apenas pelas restrições de transporte. O bambu laminado é tratado para uso tanto em aplicações internas quanto externas. As aplicações típicas incluem vigas laminadas coladas de bambu (retas, arqueadas ou curvas), estruturas de pilares e vigas, vigas de piso, treliças, grandes estruturas externas, coberturas, pérgolas e outras aplicações personalizadas, conforme solicitação (Lamboo, 2024c).

As vigas e elementos estruturais da série Lamboo® Structure™ apresentam características-chave que incluem a capacidade de atingir grandes vãos, adequação para aplicações internas e externas, curvaturas com raios mínimos de 8 pés (2.43 metros), além de opções de fabricação de extremidades e conectores de aço mediante solicitação. Esses produtos

são feitos sob medida, podendo ser fornecidos fabricados e acabados conforme as especificações do cliente. Toda a produção é personalizada e os serviços completos de fabricação e acabamento estão disponíveis para atender às necessidades específicas de cada projeto (Lamboo, 2024c).

Os produtos da Lamboo são fabricados a partir de bambu criteriosamente selecionado, combinado com adesivos, ligantes e tratamentos especializados, projetados para atender às demandas específicas de cada aplicação final (Lamboo, 2024a). A empresa utiliza materiais provenientes de diversas regiões globais e mantém parcerias estratégicas com fabricantes de bambu em países que atendem aos seus padrões de qualidade. A Lamboo prioriza o uso de materiais cultivados e adquiridos de forma sustentável, promovendo a preservação da qualidade de vida e dos recursos naturais. Os materiais da Lamboo possuem, como padrão, classificação de resistência ao fogo Classe B. No entanto, a empresa pode alcançar a classificação Classe A para produtos destinados a aplicações internas e externas, conforme a necessidade (Lamboo, 2024d).

A Lamboo atualmente mantém em estoque componentes dimensionais semelhantes às madeiras dimensionais típicas disponíveis no mercado da construção. Entre as dimensões disponíveis estão seções transversais de 89 mm × 89 mm, 38 mm × 140 mm, 38 mm × 89 mm, 38 mm × 38 mm, 25 mm × 140 mm, 25 mm × 89 mm, 19 mm × 184 mm, 19 mm × 140 mm e 19 mm × 89 mm. Os comprimentos típicos são de 2438.4 mm, 3657.6 mm e 4876.8 mm (Lamboo, 2024d).

5.4.16 Guadua Bamboo

A Guadua Bamboo desenvolve um produto denominado “*Crushed Bamboo Mats*” (também conhecido como “*esterillas*” em espanhol), que consiste em placas fabricadas a partir de colmos de bambu achatados. Essas placas de bambu achatado, também denominadas esteiras de bambu, são utilizadas em diversas aplicações, principalmente nas indústrias de móveis e construção. O *crushed bamboo* da Guadua Bamboo é fabricado com a *Guadua angustifolia* colombiana, reconhecida como uma das espécies de bambu mais resistentes do mundo. As esteiras passam por tratamento para prevenção contra infestação de insetos e mofo e são secas até alcançarem um teor de umidade em torno de 13%, com a possibilidade de atingir teores mais baixos mediante solicitação específica (Guadua Bamboo, 2024b).

A esteira de bambu apresenta ampla aplicabilidade em diversas áreas. Embora possa ser utilizado em sua forma natural, é frequentemente submetido a processos de manipulação, como

lixamento, trituração e prensagem, para melhor adequação ao uso final. Além disso, o bambu achatado oferece vantagens logísticas, sendo mais econômico para transporte em comparação aos colmos arredondados. Essas características tornam o material especialmente atrativo para fabricantes de produtos de bambu com valor agregado, como pisos, móveis, painéis de partículas e vigas compósitas (Guadua Bamboo, 2024b).

A Guadua Bamboo utiliza *crushed bamboo mats* para a produção de vigas estruturais. As vigas de *crushed bamboo* (Figura 74) constituem uma solução para a produção de elementos estruturais resistentes a cargas e placas espessas. Esse processo envolve a colagem e prensagem de múltiplos painéis de bambu achatado, seguidos de cortes em dimensões específicas. Testes laboratoriais confirmam que essas vigas apresentam propriedades mecânicas notáveis, destacando-se como alternativas promissoras para aplicações estruturais (Guadua Bamboo, 2024b). No entanto, no *website* não são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas e as demais características dessa viga de bambu.

Figura 74 – *Crushed Bamboo Beams*



Fonte: Guadua bamboo (2024b).

5.4.17 Run Zhun

Os produtos pré-fabricados de bambu desenvolvidos e produzidos pela Run Zhun incluem: vilas pré-fabricadas de bambu, banheiros públicos pré-fabricados, móveis pré-fabricados de bambu. Os produtos também incluem grades de bambu pré-fabricadas, perfis de bambu personalizados, bambu engenheirado de grande porte e outros novos materiais de bambu, promovendo o desenvolvimento e aplicação aprofundada de produtos de bambu (RunZhun, 2024a). Algumas das construções pré-fabricadas produzidas pela Run Zhu são ilustradas nas Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

Figura 75 – a) Pavilhão-3 ZD-ZG-LT003; b) Lounge de Golfe



(a)



(b)

Fonte: a) Run Zhun (2024b); b) Run Zhun (2024c).

Figura 76 – Sala de equipamentos grande; sala de equipamentos pequena



(a)



(b)

Fonte: a) Run Zhun (2024d); b) Run Zhu (2024e).

Figura 77 - Casa de bambu térrea de 35 metros quadrados



Fonte: Run Zhun (2024f).

Figura 78 – a) Villa de bambu de três andares com 700 metros quadrados; b) Villa de bambu de dois andares com 250 metros quadrados



(a)

(b)

Fonte: a) Run Zhun (2024g); b) Run Zhu (2024h).

5.4.18 Dasso

A dasso oferece dasso®FLOORING, dasso®ELEMENTS, dassoXTR®, dassoCTECH® como linha regular de produtos; também fornece soluções integradas e produtos de bambu personalizados para seus projetos específicos (Dasso, 2024b).

A Dasso® oferece uma ampla gama de produtos de bambu de alta qualidade e patenteados, incluindo pisos de bambu e elementos em diversas categorias, como folheado de bambu, painéis, placas acústicas, placas resistentes ao fogo e madeira linear. Esses produtos têm sido amplamente utilizados globalmente em aplicações como revestimentos de parede, tetos, divisórias e móveis. Como produtos personalizados, podem ser ajustados em termos de tamanho, estrutura, funções, cor, entre outros aspectos (Dasso, 2024b).

O DassoXTR® utiliza a tecnologia de fusão patenteada pela Dasso para fabricar produtos de bambu de alto desempenho, destinados a aplicações externas comerciais e residenciais. Os painéis externos são processados para usos como decks e revestimentos. Já o DassoCTECH® aplica a tecnologia patenteada CeramiX® para produzir produtos de bambu de cor natural e desempenho superior, também voltados para aplicações externas comerciais e residenciais. Por outro lado, o *Dasso Structural Bamboo* ainda está em desenvolvimento, e não há informações detalhadas sobre suas propriedades físicas e mecânicas disponíveis no *website* (Dasso, 2024b).

5.4.19 Widuz

A Widuz desenvolveu um material de bamboo engenheirado denominado BVL™ (*Bamboo Veener Lumber*) (Figura 79). A empresa produz vigas estruturais feitas de BVL, a partir de uma tecnologia patenteada que mistura tiras de bambu com uma resina especialmente

formulada usando uma tecnologia de processamento exclusiva. Além de ser sustentável, o BVL™ feito para aplicações de vigas estruturais tem uma relação resistência-peso excepcional em comparação com outros materiais de construção de alta resistência, sendo até três vezes mais forte que a madeira. Ele também tem excelente estabilidade dimensional, resistência às intempéries e resistência à deterioração e ao apodrecimento (Widuz, 2020).

Figura 79 – BVL™



Fonte: Widuz (2020).

5.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

5.5.1 altPlus

O processo começa com o cultivo do bambu *Phyllostachys Edulis* até atingir a maturidade ideal para a colheita. Após colhido, o bambu é cortado em seções e partido em tiras, que passam por tratamento térmico e secagem. Em seguida, as lamelas são avaliadas por classificação ultrassônica para garantir qualidade e uniformidade. As tiras aprovadas são unidas com adesivos de grau estrutural de baixa emissão de VOC, assegurando sua adequação para uso em aplicações estruturais. Após a colagem, o material passa por um processo de prensagem a quente ou a frio (altPlus, 2024g).

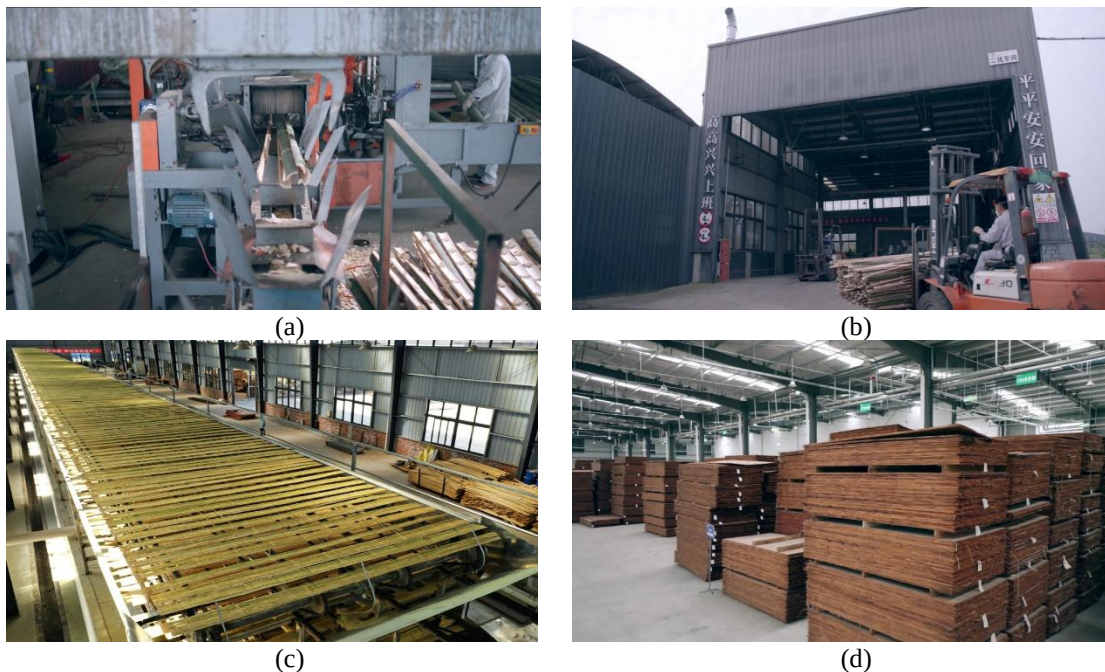
O material prensado é cortado nas dimensões finais especificadas e submetido a testes e classificações adicionais para garantir a conformidade com os padrões de qualidade. Após essas etapas, o produto final de bambu engenheirado é concluído, embalado para armazenamento ou transporte. Em algumas aplicações, ocorre uma pré-montagem parcial para facilitar a instalação no local de construção. Antes do envio, os produtos passam por um controle de qualidade final para assegurar que atendam às especificações de fabricação. Finalmente, os produtos aprovados são transportados ao cliente ou ao local de instalação (altPlus, 2024g).

5.5.2 Bamboo Era

O Bamboo Steel é um tipo de *bamboo scrimber*, também denominado pela Bamboo Era como “*reconstituted bamboo*”, ou bambu reconstituído. A fabricação do Bamboo Steel® utiliza o bambu *Neosinocalamus affinis* como matéria-prima, uma espécie de bambu de pequeno diâmetro e parede fina (Bamboo Era, 2024a). O processo de fabricação do Bamboo Steel emprega etapas como a preparação de lâminas de bambu em feixes de fibras por meio do desfibramento dos colmos de bambu partidos, a impregnação uniforme com resina fenólica, a secagem, o assentamento e moldagem sob prensagem à quente em altas pressões e temperatura. (Bamboo Era, 2024c). Algumas etapas do processo de fabricação são ilustradas na Figura 80.

A etapa principal na produção de aço de bambu é a máquina de descompressão. Por meio da prensagem a quente, pedaços de bambu com mais de 10 cm de espessura são prensados em placas de alta resistência variando de 1 cm a 3 cm, e depois lixados e, em seguida, cortados, emendados e reforçados de acordo com os requisitos de design do produto. A empresa possui uma capacidade anual de 4000 toneladas de produtos Bamboo Steel®, destinados tanto ao mercado interno quanto ao externo (Bamboo Era, 2024c; 2024d; 2024e).

Figura 80 – a) Equipamento para divisão de tiras de bambu, b) transporte de tiras de bambu, c) linha de produção de chips de bambu, e d) armazenamento de materiais



Fonte: Bamboo Era (2024a).

5.5.3 ReNüTeq

A matéria prima utilizada na produção dos produtos de bambu engenheirado da ReNüTeq é o bambu *Guadua angustifolia Kunth*, adquirido exclusivamente na Colômbia, e processado nas instalações da empresa no mesmo país. O processo realizado nas instalações da Colômbia inclui seleção por idade, colheita dos colmos, secagem, tratamentos externos e processo patenteado de processamento das tiras de bambu (ReNüTeq, 2024i). Parte das instalações na Colômbia se encontram ilustradas na Figura 81.

Figura 81 - ReNüTeq Columbia SA - Secagem de colmos



Fonte: ReNüTeq (2024i).

O processo de fabricação do RadLam® maximiza o desempenho das fibras do bambu, removendo as fibras de menor resistência localizadas a face interna do colmo antes da laminação, o que também aumenta a eficiência produtiva ao reduzir o desperdício (ArchDaily, 2023).

Para garantir durabilidade e resistência contra mofo e organismos, as tiras de bambu são tratadas com ácido bórico, um conservante natural e atóxico. As tiras passam por um processo de imersão e secagem até atingirem um teor de umidade de 9-11%, sendo então convertidas em componentes SEB. Este tratamento é seguro, comparável ao sal de cozinha, e comprovadamente preserva o material contra todas as formas de degradação, tornando-o adequado para aplicações internas e externas. Os produtos SEB finalizados recebem um acabamento de baixo VOC, que sela o material e garante durabilidade e estabilidade conforme as especificações da aplicação (ReNüTeq, 2024n).

5.5.4 Taohuajiang Bamboo

O processo de fabricação do *structural laminated bamboo timber* da Taohuajiang Bamboo consiste nas seguintes etapas. Primeiro, as tiras de bambu passam pela preparação inicial e tratamento de carbonização, que reduz a suscetibilidade a fungos e pragas. Em seguida, ocorre a fresagem das tiras, seguida pela seleção das tiras de bambu para assegurar que apenas

materiais com as propriedades adequadas sejam utilizados. Na etapa de laminação, as tiras de bambu são organizadas e pressionadas para formar o laminado compensado. Posteriormente, o material é cortado em tamanhos e formatos específicos, seguido de um processo de lixamento para obter uma superfície uniforme. Por fim, os produtos de bambu laminado são finalizados e preparados para distribuição, sendo destinados a aplicações estruturais ou outras finalidades específicas (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

Segundo o *website* da companhia, os produtos de bambu engenheirado são fabricados com o adesivo importado Dynea, que é anticorrosivo, resistente às intempéries e ambientalmente sustentável. Pode ser alongado e engrossado várias vezes, e é fácil de realizar o processamento e tratamento de anticorrosão e anti-mofo, resistência ao fogo e resistência a pragas (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

Adotando equipamentos avançados e tecnologia de produção avançada, os materiais de bambu são carbonizados em alta temperatura e alta pressão para remover nutrientes como ovos de insetos, mofo, açúcar, etc. Os produtos acabados são mais resistentes a insetos, traças, mofo e corrosão. Após ser tratado com tecnologia retardante de fogo, pode atingir o nível retardante de fogo B1 (Taohuajiang Bamboo, 2024h).

5.5.5 ASIA Bamboo

A ASIA Bamboo classifica as vigas de “*laminated bamboo lumber*” em duas categorias: “*indoor grade bamboo beams*” e “*outdoor grade bamboo lumber*”. As vigas de bambu para uso interno são fabricadas utilizando cola ureia-formaldeído e prensadas à quente a 100 °C, disponíveis nas cores carbonizada e natural. As opções de comprimento incluem: 2000 mm, 2440 mm ou emenda *finger joint* ou *edge joint* para comprimentos de até 5800 mm, 9600 mm, etc. As larguras variam de 12 mm a 200 mm e as espessuras de 12 mm a 100 mm (ASIA Bamboo, 2024c).

A madeira de bambu para uso externo é fabricada utilizando cola fenol-formaldeído. Após a aplicação da cola nas tiras de bambu, aguarda-se um período de 24 horas para a secagem antes da prensagem a quente. Durante este processo, a máquina de prensagem deve operar a uma temperatura superior a 130 °C, que é o mínimo necessário para ativar a cola e unir as tiras de bambu. Para vigas de bambu destinadas ao uso interno, a prensagem a quente é realizada imediatamente após a aplicação da cola ureia-formaldeído, enquanto a cola ainda está úmida. Caso se espere 24 horas, a cola endurece e perde sua funcionalidade. No caso da madeira de bambu para uso externo, é fundamental aguardar as 24 horas de secagem da cola fenol-

formaldeído antes da prensagem a quente, garantindo a união eficaz das tiras de bambu. Em geral, a madeira de bambu para uso externo apresenta uma tonalidade mais escura em comparação às vigas de bambu para uso interno. Além disso, a madeira de bambu para uso externo está disponível em comprimentos padrão de 2900 mm, 5800 mm e comprimentos maiores, como 9600 mm (ASIA Bamboo, 2024c).

5.5.6 Guadua Bamboo

No *website* da Guadua Bamboo, é descrito o processo de fabricação das *crushed bamboo mats*; contudo, não são detalhados os procedimentos subsequentes para a produção de vigas a partir dessas placas. O processo de fabricação das esteiras de bambu esmagado da Guadua Bamboo inicia-se com o achatamento dos colmos de bambu arredondados. O primeiro passo consiste em quebrar os nós do bambu utilizando um machado. Em seguida, uma incisão vertical é feita no colmo com uma pá, garantindo que todos os nós sejam completamente perfurados. Após essa etapa, o bambu é aberto e esmagado com um malho até formar um painel plano (Guadua Bamboo, 2024b).

Depois de achatado, o bambu passa por uma limpeza minuciosa, onde a camada branca interna, altamente atrativa para insetos, é removida. Essa etapa é essencial para garantir a durabilidade do material. Com as esteiras completamente limpas, elas são submetidas a um processo de preservação para protegê-las contra ataques futuros de insetos e mofo. O tratamento consiste em mergulhar o bambu em tanques contendo uma mistura de preservativos não tóxicos e água por vários dias. Por fim, após o tratamento, inicia-se o processo de secagem. As esteiras de bambu esmagado são secas ao ar, um processo que dura de 1 a 2 meses, garantindo que o material esteja completamente estabilizado e pronto para uso (Guadua Bamboo, 2024b).

5.6 FÁBRICAS E EQUIPAMENTOS

5.6.1 altPlus

A fábrica da altPlus é equipada com tecnologia avançada, incluindo prensas de aquecimento por micro-ondas, que reduzem significativamente o tempo de prensagem a quente, e sistemas de controle servo assistido para otimizar o carregamento, garantindo precisão e eficiência na produção de componentes estruturais de bambu. Pela primeira vez na indústria de bambu engenheirado, a altPlus possibilita a fabricação de componentes de grandes dimensões, atendendo às demandas específicas de projetos estruturais. Além disso, a unidade conta com o

maior equipamento de fabricação de compósitos por prensa estática do mundo no momento de sua inauguração, destacando sua capacidade de alta produtividade. A fábrica foi projetada como um marco inicial na transição para o processamento totalmente automatizado de materiais estruturais de bambu engenheirado (altPlus, 2024e).

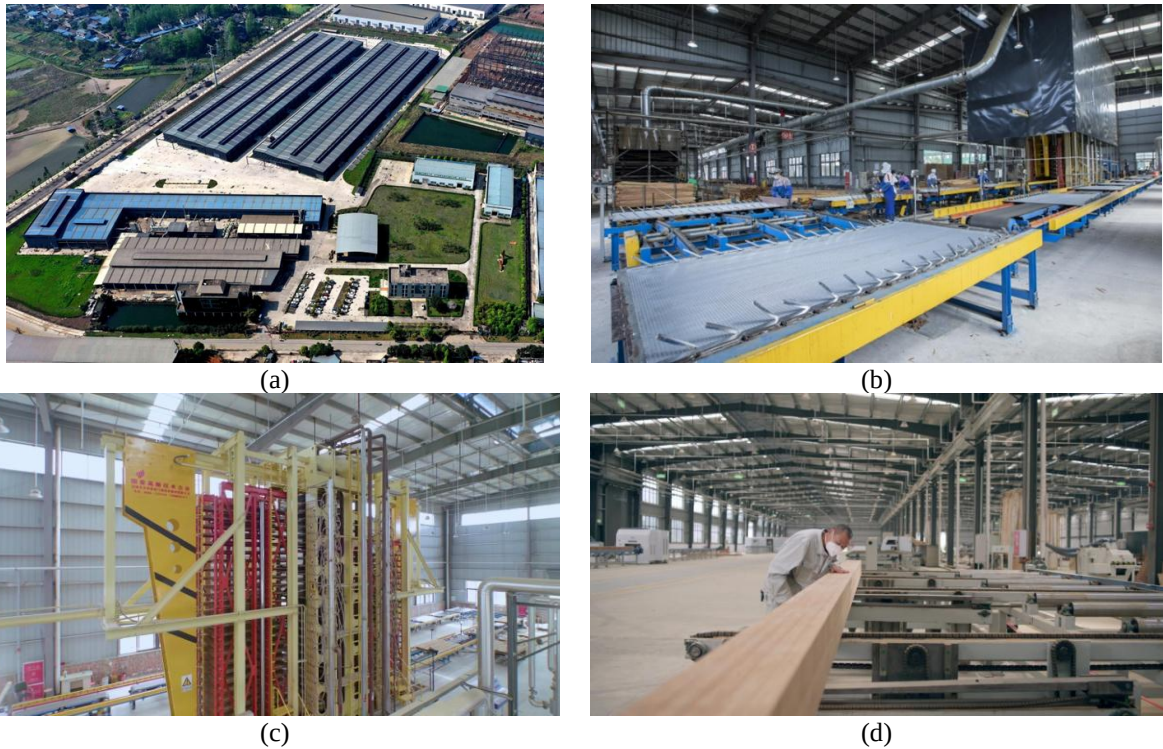
Recentemente, a altPlus investiu em uma instalação de fabricação e Pesquisa e Desenvolvimento de bambu engenheirado na cidade de Shaowu, província de Fujian, colaborando com o National Engineering Research Center of Biomaterials (NERC) e o governo municipal de Shaowu (altPlus, 2024e).

5.6.2 Bamboo Era

A fábrica da Bamboo Era, localizada na Zona de Desenvolvimento Econômico de Hongya, Sichuan, ocupa uma área de 210 acres e destaca-se por suas inovações em maquinário e infraestrutura. Entre os equipamentos, incluem-se uma avançada máquina de desfibramento contínuo e separação de feixes vasculares, exclusiva no setor, e uma prensa térmica especializada para a produção de painéis de *Bamboo Steel*®, garantindo eficiência no processo produtivo (Bamboo Era, 2024). O panorama da fábrica e alguns equipamentos são ilustrados na Figura 82.

A empresa investiu 500 milhões de yuans para construir as oito linhas, um instituto e um centro do *Bamboo Steel*® International Ecological Industrial Park. Ela construiu seis linhas de produção para a primeira fase dos painéis *Bamboo Steel*®, pisos externos moldados, componentes de construção, edifícios pré-fabricados, portas e janelas e móveis. Após a conclusão do parque industrial, 90% dos recursos de bambu do condado poderão ser convertidos no local (Bamboo Era, 2024a).

Figura 82 – a) Panorama da fábrica; b) linha de produção de termoformagem; c) equipamento de termoformagem e d) oficina de acabamento



Fonte: Bamboo era (2024a).

5.6.3 ReNüTeq

A sede da ReNüTeq conta com uma instalação de aproximadamente 8 mil metros quadrados, localizada em St. Charles, Missouri, EUA (ReNüTeq, 2024a). A ReNüTeq implementou a fabricação robótica para alcançar precisão e eficiência máximas em St. Louis, Missouri. A empresa possui o K3 Hundegger - Robotic CNC, que é um equipamento avançado de usinagem controlado por computador (CNC) desenvolvido pela empresa alemã Hundegger, especializada em tecnologias para a fabricação de estruturas de madeira (RenüTeq, 2024d). Instalações da fábrica são ilustradas na Figura 83.

Figura 83 – Fábrica da ReNüTeq



Fonte: RenüTeq (2024d).

5.6.4 Taohuajiang Bamboo

A Taohuajiang é uma das dez principais marcas da indústria de bambu na China. A empresa possui múltiplas bases de produção e fabricação, cobrindo uma área total de mais de 500 acres, e está dividida em duas produções e sistemas de fabricação: “madeira laminada de bambu” e “bambu anticorrosivo externo”. A área da fábrica existente é de mais de 120000 metros quadrados, com mais de 300 funcionários e uma produção anual de 1 milhão de metros quadrados de bambu anticorrosivo externo e madeira laminada de bambu (Taohuajiang Bamboo, 2024d). Um panorama das fábricas é ilustrado na Figura 84.

Figura 84 – a) Base de produção de Taohuajiang; b) Base de produção de Fujian Wuping



Fonte: Taohuajiang Bamboo (2024a).

A fábrica da Taohuajiang Bamboo implementou tecnologias avançadas, como o “Reagrupamento de Bambu e Madeira” e o “Tratamento Anticorrosivo de Alta Carbonização”, que contribuem para o aumento significativo do nível de mecanização da produção. Estas tecnologias são patenteadas e reconhecidas por diversos prêmios científicos e tecnológicos. A empresa está atualmente ampliando suas instalações e aplicando suas tecnologias patenteadas para alcançar a mecanização em larga escala (Taohuajiang Bamboo, 2024b).

As tecnologias aplicadas permitem o desenvolvimento de novos produtos de alta qualidade, aumentando a eficiência no uso do bambu e o valor agregado dos produtos. A fábrica é apoiada por três centros de pesquisa e desenvolvimento reconhecidos em nível provincial, o que reforça o desenvolvimento tecnológico e a aplicação de novos processos no maquinário (Taohuajiang Bamboo, 2024b). As instalações da fábrica são ilustradas na Figura 85.

Figura 85 – Instalações da fábrica



Fonte: Taohuaijiang Bamboo (2024k).

5.6.5 Greezu

A fábrica da Greezu ocupa uma área de 40000 metros quadrados em Ganzhou, com instalações de alto nível, cuja construção e condições de produção estão em conformidade com as normas ISO 14001, ISO 9001 e FSC. Além disso, a empresa lançou uma nova linha de processamento/técnica para produtos externos com classificação de resistência ao fogo. A companhia possui equipamentos para tratamento externo, linha de máquinas HOMAG, sistema de laminação sem limite de comprimento (Greezu, 2024a). Um panorama da fábrica é ilustrado na Figura 86.

Figura 86 – Panorama da fábrica da Greezu



Fonte: Greezu (2023a; 2023b).

5.6.6 BWG

A BWG possui um cluster industrial de 9 hectares. A fábrica atual é construída em uma área de 6 hectares e 3 hectares de terra reservada para expansão futura. Segundo o *website* da BWG, a empresa possui as máquinas e equipamentos mais modernos do Vietnã. As Máquinas e equipamentos são provenientes da Alemanha, Japão, Taiwan, China, Vietnã. As linhas de produção são continuamente atualizadas e automatizadas. As cinco máquinas de prensagem fornecem a maior capacidade do Vietnã: 120.000 m³/ano (BWG, 2024b). O panorama da fábrica é apresentado na Figura 87.

Figura 87 – Panorama da fábrica da BWG Mai Chau Joint Stock Company



Fonte: BWG (2024a).

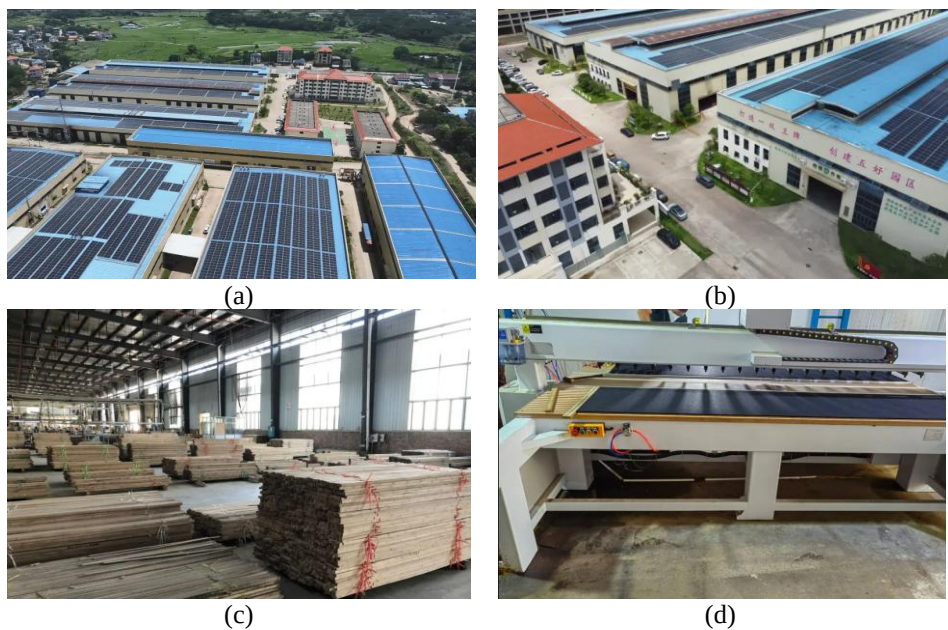
5.6.7 Anos Bamboo

De acordo com o *website* da Anos Bamboo, a empresa dispõe de equipamentos de produção de alta tecnologia, incluindo sistemas avançados de prensagem a quente e tratamento antifúngico. Essa infraestrutura permite à empresa exercer um rigoroso controle em cada etapa do processo produtivo, assegurando elevados padrões de qualidade na fabricação (Anos Bamboo, 2024a).

5.6.8 Sunzo Bamboo

A Sunzo Bamboo atua do gerenciamento das florestas de bambu até a entrega do produto final, possuindo uma cadeia de suprimentos totalmente integrada. A Sunzo Bamboo possui uma fábrica de 100 mil metros quadrados, equipados com linhas de produção inteligentes e tecnologias próprias, como a tecnologia patenteada de extensão de bambu e qualidade certificada pela União Europeia (Sunzo Bamboo, 2024b). Um panorama da fábrica e de suas instalações é ilustrado na Figura 88.

Figura 88 – Panorama da Fábrica da Sunzo Bamboo



Fonte: Sunzo Bamboo (2024b).

5.6.9 Run Zhun

A Run Zhu construiu uma nova fábrica em parceria com a Central China Green Valley. A nova fábrica ocupa uma área total de aproximadamente 46667 metros quadrados, com instalações fabris cobrindo 45000 metros quadrados. Sua capacidade de produção é projetada para fabricar 400 mil metros quadrados de materiais estruturais de bambu reconstituído para uso externo e 10000 metros quadrados de construções modulares de bambu por ano. A construção da fábrica de Taojiang aumentou significativamente a capacidade de produção da Run Zhu, permitindo que a empresa atenda de forma mais rápida e eficiente às demandas dos clientes, marcando um novo período de rápido desenvolvimento e avanço tecnológico para a empresa (Run Zhu, 2024h).

A fábrica é focada na produção de construções modulares de bambu, materiais de bambu reconstituído para uso externo, móveis de bambu para interiores e exteriores e elementos de paisagismo personalizados (Run Zhu, 2024h). Um panorama da fábrica e de suas instalações é ilustrado na Figura 89.

Figura 89 – a) Plano geral ilustrativo do projeto da Fábrica, b) Galpões de produção



Fonte: Run Zhu (2024h).

5.7 PROJETOS REAIS

5.7.1 altPlus

A equipe de design da altPlus desenvolveu uma cúpula de bambu curvada, projetada para aproveitar a resistência à tração e à flexão do bambu engenheirado (Figura 90). No início do projeto, não havia uma norma nacional específica para a indústria de bambu engenheirado; portanto, a equipe da altPlus adaptou e validou os padrões da ASTM D5456 e estabeleceu correlações com o padrão chinês de estrutura de madeira GB 50005-2003. Dado que o bambu engenheirado ainda não havia sido amplamente aplicado em estruturas dessa magnitude, a altPlus colaborou com equipes renomadas de estruturas de madeira do Japão e dos Estados Unidos para atender às complexas demandas de engenharia e metodologias de construção exigidas. Embora a construção desta cúpula não tenha sido realizada devido a restrições do projeto, a equipe concluiu com êxito o processo de aprovação pelas autoridades e a aceitação inicial do cliente (altPlus, 2024h).

Figura 90 – Projeto Sichuan Ya'an Mengding Mountain Blossom Boutique Resort



Fonte: altPlus (2024h).

A altPlus foi responsável pela consultoria, projeto, fabricação e construção do SQD Resort, localizado na Sandiequan Scenic Area da Montanha Lushan, na China. Nesta edificação, o SEB foi empregado como vigas, colunas e estruturas de telhado (Figura 91).

Figura 91 – SDW Resort



Fonte: altPlus (2024i).

A altPlus cooperou com a Xi'an Jiaotong-liverpool University para participar como um parceiro de material e consultor no projeto e construção de uma casa de alto desempenho com energia solar como única fonte de energia, localizada em Zhangjiakou, China (Figura 92). O bambu engenheirado estrutural foi selecionado como o principal material de construção, da coluna principal da casa até a parede interna e o piso. Este material apresenta um grande potencial para aplicações residenciais, pois pode ser usado em residências unifamiliares, residências de baixo a médio porte e uso misto e, no futuro, aplicações de alto padrão.

Figura 92 – Projeto Ideal Home of the Future

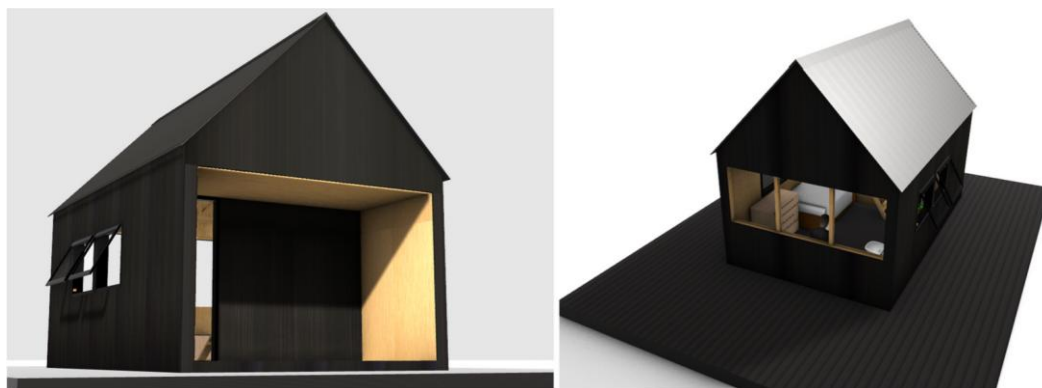


Fonte: altPlus (2024j).

A altPlus está desenvolvendo cabines modulares pré-fabricadas de compósitos de bambu e madeira, adaptadas para áreas remotas (Figura 93). Essas cabines oferecem uma solução de alto desempenho, econômica e ecológica para locais onde o acesso a estradas, infraestrutura e mão de obra qualificada é limitado. O projeto *Canadian Bamboo-Timber Cabin* exemplifica como a pré-fabricação pode atender aos desafios da construção remota (altPlus, 2024k).

A pré-fabricação possui a capacidade de agilizar o processo de construção e reduzir os desafios logísticos. Ao fabricar os componentes em um ambiente de fábrica controlado, o tempo de construção no local é reduzido e o processo de instalação é simplificado. As cabines modulares de bambu e madeira podem ser adaptadas para atender a necessidades e preferências específicas. Algumas das soluções de cabine modular são projetadas para montagem com apenas dois instaladores e equipamento mínimo. Para a cabine de bambu e madeira, são usados os produtos M Series™ LVB e M Series™ SWB. O M Series™ LVB fornece a resistência e a durabilidade necessárias para aplicações estruturais. O Série M™ SWB é utilizado como revestimento externo, os produtos Arc™ e Nova Bambu® são projetados para resistência às intempéries e estabilidade (altPlus, 2024k).

Figura 93 - altPlus® projeto render Cheetah Bunkie



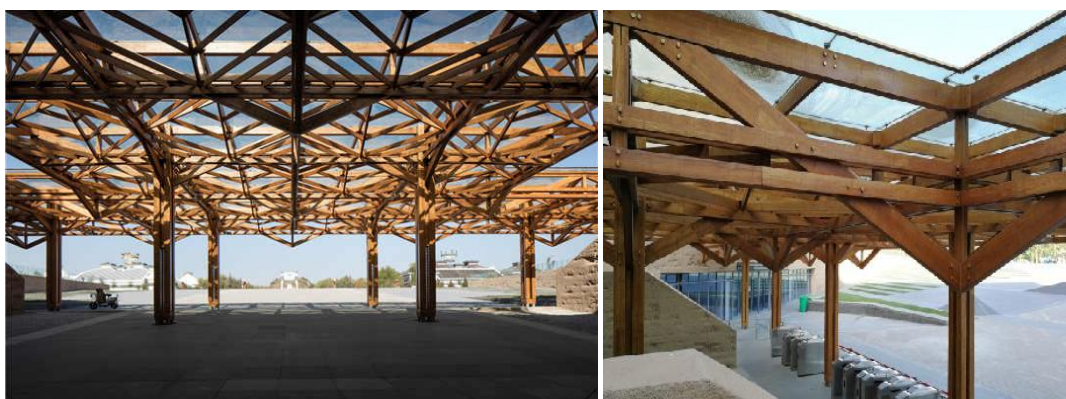
Fonte: altPlus (2024k).

5.7.2 Bamboo Era

Nesta seção, são destacados alguns dos projetos da Bamboo Era apresentados na área “Casos Clássicos” (经典案例) do *website* oficial da empresa.

O Museu de Zhaojun (Figura 94), projetado pelo Instituto de Design de Construção da China, é um destino turístico na região da Mongólia Interior. O projeto optou pelo uso do Bamboo Steel® como material estrutural para a cobertura de entrada, com um design simples e leve. A estrutura foi concebida com um formato de esqueleto de guarda-chuva e com estruturas treliçadas em cones positivos e negativos, o que aumentou a estabilidade geral da estrutura. Esta estrutura integrada de pilares e vigas em Bamboo Steel® marca um avanço pioneiro na incorporação de estruturas totalmente em Bamboo Steel® em grandes edifícios públicos (Bamboo Era, 2024f).

Figura 94 – Museu de Zhaojun



Fonte: Bamboo Era (2024f).

O Pavilhão Danjing (Figura 95) está localizado na área de demonstração do Parque Florestal Urbano Longquan, no topo do Monte Danjing. O edifício principal tem 39 metros de

altura, com cinco andares, sendo o último com uma estrutura em mezanino. As varandas externas e beirais utilizam suportes inclinados em formato de guarda-chuva feitos de Bamboo Steel®, com a carga sendo suportada pelo núcleo central de aço. A estrutura curva do Danjing demonstra a alta resistência à tração e compressão do Bamboo Steel®, evidenciando suas características “de aço” e alta durabilidade. A varanda externa foi construída majoritariamente com Bamboo Steel®, processado na fábrica e montado no local, proporcionando rapidez de construção e economia de mão-de-obra. Descendo do Pavilhão Danjing até o Terraço Danjing, encontra-se um outro pavilhão construído inteiramente em Bamboo Steel®. Graças ao desempenho estrutural robusto do Bamboo Steel®, os elementos estruturais são leves, proporcionando estabilidade sem perder a leveza visual (Bamboo Era, 2024g).

Figura 95 - Pavilhão Danjing



Fonte: Bamboo Era (2024g).

O Centro Comunitário de Inovação em Bambu da Swire Properties (Figura 96), localizado em Pengzhou, Sichuan, integrou materiais de Bamboo Steel® como componentes estruturais da construção (Bamboo Era, 2024h).

Figura 96 – Centro Comunitário de Inovação em Bambu



Fonte: Bamboo Era (2024h).

O Templo Baoguo foi fundado no segundo ano da era Kaihuang da dinastia Sui (582 d.C.), e está localizado no Condado de Lezhi, Ziyang, Sichuan. O Salão de Palestras (Figura 97), construído com material estrutural de Bamboo Steel®, tornou-se um dos edifícios principais do templo, harmonizando com sua atmosfera (Bamboo Era, 2024i).

Figura 97 – Salão de Palestras do Templo Baoguo no Condado de Lezhi, Sichuan



Fonte: Bamboo Era (2024i).

A Vila Antiga de Xingfu, localizada em Danling, Sichuan, conta com uma estrutura de Bamboo Steel®, ilustrada na Figura 98. O telhado é composto por treliças diagonais interconectadas que formam um padrão repetitivo, permitindo uma distribuição uniforme das cargas e proporcionando leveza e resistência à construção. Colunas estão dispostas ao longo do vão, conectando-se diretamente com as treliças e transferindo as cargas do telhado para o solo. A estrutura inclui amplos vãos abertos que facilitam a ventilação natural e a entrada de luz, características funcionais e estéticas do Bamboo Steel®, que permitem a integração da construção com o estilo arquitetônico tradicional e com a paisagem natural da vila (Bamboo Era, 2024j).

Figura 98 – Vila Antiga de Xingfu



Fonte: Bamboo Era (2024j).

O Novo Parque Jinsheng em Chengdu ocupa uma área de aproximadamente 171.3 metros quadrados. No parque, duas estruturas principais de serviços – a Casa de Telhas e a Casa de Waffle (Figura 99) – foram construídas com Bamboo Steel®. Por meio de técnicas de pré-fabricação, com telhados duplamente curvos e grandes vãos em estruturas de bambu laminado, o Bamboo Steel® foi aplicado nas vigas, colunas e coberturas das duas edificações. Atualmente, esses espaços tornaram-se locais populares para os cidadãos desfrutarem de momentos de lazer e degustarem chá (Bamboo Era, 2024k).

Figura 99 – Casa de Telhas e a Casa de Waffle



Fonte: Bamboo Era (2024k).

O Hotel Jinniu é um importante local de recepção em Sichuan. Sua galeria (Figura 100), com aproximadamente 600 metros quadrados, foi construída utilizando Bamboo Steel® em um design paramétrico para vigas, colunas e estrutura de cobertura pré-fabricadas. Os elementos estruturais incluem vigas curvas e retas personalizadas, com vãos de até 4.7 metros (Bamboo Era, 2024l).

Figura 100 – Galeria do Hotel Jinniu



Fonte: Bamboo Era (2024l).

O Vanke Purple County (Figura 101) está localizado no distrito de Wanbailin, em Taiyuan, província de Shanxi. Materiais estruturais de Bamboo Steel® foram utilizados nas colunas verticais visíveis na fachada do edifício. No entanto, não há informações mais específicas e detalhadas acerca dessa construção. Visualmente, por meio da imagem disponibilizada no *website* oficial da empresa, implica-se que essa a aplicação do Bamboo Steel® nessa edificação não consiste em uma aplicação como elemento estrutural do edifício (Bamboo Era, 2024m).

Figura 101 - Vanke Purple County



Fonte: Bamboo Era (2024m).

A Academia Shuangxi, situada no Condado de Pingjiang, Hunan, apresenta uma estrutura arquitetônica construída com Bamboo Steel® (Figura 102). O design da Academia Shuangxi preserva as formas tradicionais das residências da região de Pingjiang, com uma linha de beirais arqueada para baixo e linhas verticais na fachada. O salão de recepção possui beirais elevados em todas as direções, permitindo uma iluminação abundante e uma sensação de abertura. Esse design demonstra a resistência estrutural e a alta flexibilidade do Bamboo Steel®, utilizado na construção (Bamboo Era, 2024n).

Figura 102 – Academia Shuangxi



Fonte: Bamboo Era (2024n).

Em março de 2022, o Bamboo Steel® foi escolhido como material para o Luanqing Hutong (Figura 103), localizado em Pequim, com o objetivo de preservar o estilo e as características originais da área. O Bamboo Steel® foi selecionado por suas propriedades de alta resistência, tenacidade, resistência às intempéries e proteção contra insetos. Leve e robusto, com um arranjo dinâmico, o Bamboo Steel® tornou-se uma característica marcante do Hutong (Bamboo Era, 2024o).

Na parte central, o telhado foi reconstruído com vigas de Bamboo Steel® nas dimensões da estrutura de madeira original. As ripas foram combinadas com elementos de Bamboo Steel® cruzados, e o telhado de Bamboo Steel® transparente não só respeita a escala das telhas originais, mas também permite maior transparência no centro (ArchDaily, 2021). Apenas três telhados foram restaurados na sala ao sul, e os dois no centro utilizaram Bamboo Steel® sobreposto no tamanho da estrutura de madeira original para delinear a forma da cabaça diretamente sobre o pequeno pátio (Arch Position, 2021).

Figura 103 – Pátio nº 37 de Luanqing Hutong, Pequim



Fonte: Bamboo Era (2024o).

O Jovem Albergue Niu Bei Shan está localizado em Sichuan, Garzê (Figura 104). Este projeto é a obra final da temporada de 2014 do programa “Sonhos Transformadores” da Eastern Satellite TV. O design utiliza Bamboo Steel® como material estrutural para criar um telhado em forma orgânica. Este é o primeiro uso de uma estrutura curva de Bamboo Steel® na construção no país, estabelecendo um precedente para estruturas de forma irregular em Bamboo Steel® e oferecendo um exemplo de referência para arquitetos (Bamboo Era, 2024p).

Figura 104 – Jovem Albergue Niu Bei Shan está localizado em Sichuan



Fonte: Bamboo Era (2024p).

Em 2020, foi concluído o projeto de renovação da paisagem do campus da Universidade de Silvicultura de Pequim, intitulado “Coração da Floresta”. Localizado no “coração da floresta”, o Museu da Floresta é composto pelo Corredor Florestal, feito de Bamboo Steel® (Figura 105). O Corredor Florestal é constituído por uma série de vigas curvas de Bamboo Steel® na cor madeira, formando um corredor arqueado. O corredor é feito de vinte vigas curvas de grande escala, medindo 11 metros de comprimento cada, com um grande vão, alta densidade e peso considerável. Sob o corredor, foi construído um espaço de estudo e lazer. As vigas curvas

de Bamboo Steel® são transportadas para as posições finais por guindastes e, em seguida, instaladas no local (Bamboo Era, 2024q).

Figura 105 - Corredor Florestal, Universidade de Silvicultura de Pequim



Fonte: Bamboo Era (2024q).

Uma estrutura paisagística em forma de guarda-chuva (Figura 106) foi construída com Bamboo Steel® no Parque Nacional da Montanha Wawushan, Hongya, Sichuan. Localizada em uma área de turismo que enfrenta temperaturas baixas e umidade constantes, com neve durante todo o ano, essa estrutura destaca as características do Bamboo Steel®, como alta resistência, durabilidade e tenacidade (Bamboo Era, 2024r).

Figura 106 – Estrutura paisagística em forma de guarda-chuva

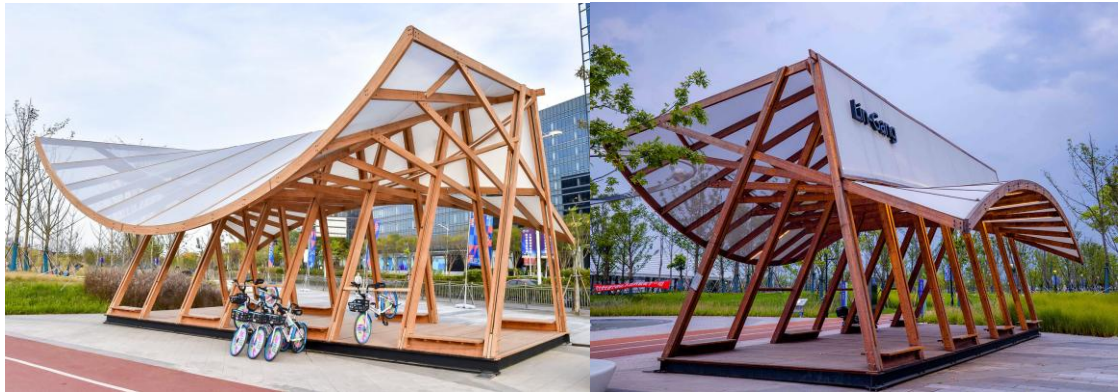


Fonte: Bamboo Era (2024r).

Em menos de 20 dias, desde o detalhamento dos desenhos até a concretização do projeto, a estação pré-fabricada de Bamboo Steel® chegou a Shanghai Lingang (Figura 107). Como uma das obras apresentadas na Exposição de Amostra do 2021 Shanghai Urban Space

Art Season. Este espaço foi concebido como um ponto de experiência que permite aos visitantes vivenciarem o futuro estilo de vida de Lingang (Bamboo Era, 2024s).

Figura 107 – Estação pré-fabricada de Bamboo Steel®



Fonte: Bamboo Era (2024s).

5.7.3 ReNüTeq

O primeiro projeto da Grande Área de St. Louis a integrar o SEB da ReNüTeq em uma estrutura de quatro andares iniciou sua construção em 2024. O projeto é uma estrutura de uso misto de quatro andares localizada em Wood River, Illinois, EUA (Figura 108), com conclusão estimada para maio de 2025. O edifício possui uma área total de 10400 pés quadrados (966 m²), com 2600 pés quadrados (241.5 m²) por andar e uma altura total de 52 pés (15.85 m). Para este projeto, a ReNüTeq forneceu diversos produtos, incluindo o ReNüTeq® Frame™ | Structural Series, composto por vigas, colunas e terças em SEB; o ReNüTeq® Frame™ | Structural Series | Open Web Joist - Hybrid, treliças de alma aberta híbridas que combinam SEB e aço; e o ReNüTeq® Glaz™ | Curtainwall Series, sistemas de fachada cortina em vidro. Além disso, a ReNüTeq forneceu serviços de assistência em design, suporte em engenharia estrutural, fornecimento de conectores de aço, soluções pré-fabricadas, gerenciamento e instalação no local (ReNüTeq, 2024o).

Figura 108 – Projeto render da estrutura de uso misto de quatro andares



Fonte: ReNüTeq (2024o).

O bambu engenheirado estrutural da ReNüTeq está sendo implementado em um projeto localizado em Jefferson City, Missouri, que será a futura sede da Missouri Primary Care Association (MPCA) e do Missouri Behavioral Health Council (MBHC) (Figura 109), com conclusão prevista para dezembro de 2025. O edifício foi inspirado no entorno local, resultando em uma arquitetura que incorpora um conector central em SEB, marquises de entrada, sistemas híbridos de vidro e SEB nas fachadas, além de privilegiar a entrada de luz natural e vistas amplas. A ReNüTeq forneceu vigas em SEB, sistemas de vidro para fachadas cortina, conectores de aço para soluções modulares, e suporte de design com assistência em engenharia estrutural e desenhos de oficina, além de gerenciar e instalar no local. Os produtos integrados incluem ReNüTeq® Frame™ | Série Estrutural (vigas, colunas e terças), conectores de aço em combinação com SEB, e o sistema de vidro ReNüTeq® Glaz™ | Série Estrutural.

Figura 109 – Missouri Primary Care Association (MPCA) e Missouri Behavioral Health Council (MBHC)



Fonte: ReNüTeq (2024p).

A estrutura de carregamento solar ReNüTeq – SoLiS (Figura 110) foi exibida durante a regata America’s Cup em Nova York, no America’s Cup Village, destacando a Estrutura de Carregamento iSolar de Bambu Engenheirado da BMW, projetada pela ReNüTeq.

A Estrutura de Carregamento Solar é composta por SEB, painéis solares e ferragens de aço inoxidável de grau marítimo, resultando em uma solução esteticamente atrativa, sustentável e funcional. Projetada para resistir a ventos de furacão de até 320 km/h, a estrutura utiliza ferragens de aço inoxidável que não enferrujam em ambientes com maresia costeira. O sistema “SoLiS MoD” da ReNüTeq pode ser instalado sem a necessidade de um sistema de fundação convencional, sendo estabilizado por ancoragens helicoidais ou parafusos epóxi que fixam a estrutura diretamente a uma laje de concreto em estacionamentos (ReNüTeq, 2016).

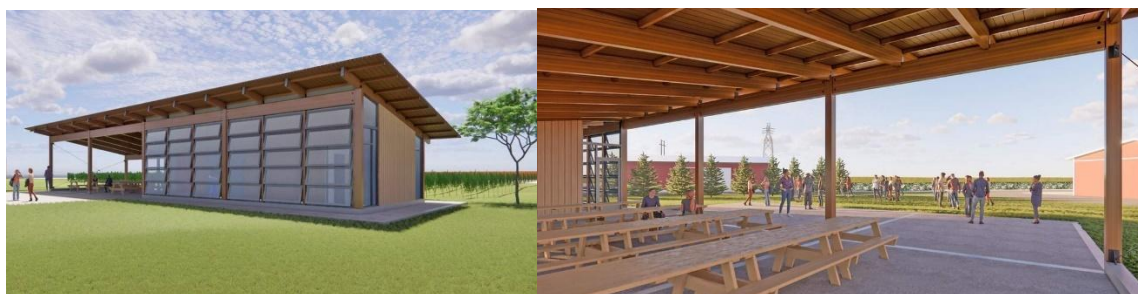
Figura 110 – A estrutura de carregamento solar ReNüTeq - SoLiS



Fonte: ReNüTeq (2016)

O projeto premiado “The Farm Pavilion” (Figura 111), localizado em St. Louis, é o primeiro na região a integrar o SEB da ReNüTeq, com conclusão prevista para dezembro de 2024. A ReNüTeq contribuiu para o empreendimento fornecendo SEB estrutural em vigas, sistemas de vidro como fachadas cortina e janelas oscilantes operáveis, assistência em design com suporte em engenharia estrutural, conectores de aço em soluções modulares, além de gerenciamento e instalação no local. Os produtos integrados incluem o ReNüTeq® Frame™ | Structural Series, com vigas, colunas e terças, conectores de aço combinados com SEB, e o ReNüTeq® Glaz™ | Structural Series para sistemas de vidro (ReNüTeq, 2024q).

Figura 111 – The Farm Pavilion



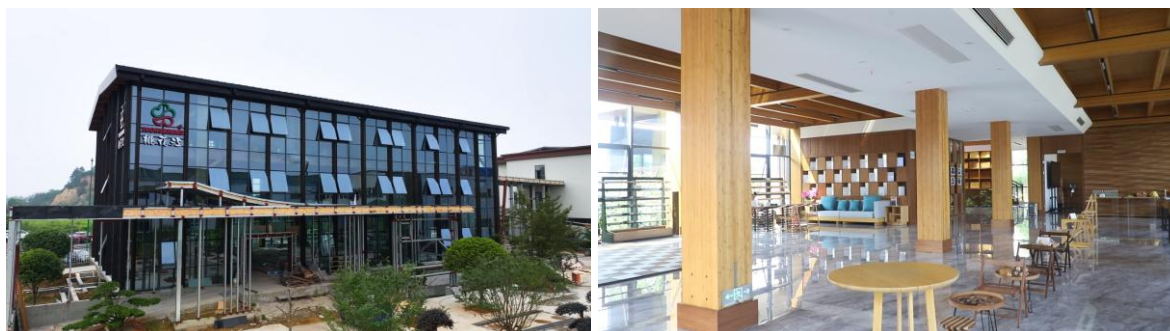
Fonte: ReNüTeq (2024q).

5.7.4 Taohuajiang Bamboo

Recentemente, o primeiro edifício de pesquisa científica e demonstração experimental de grande escala com três andares construído inteiramente com bambu engenheirado da Hunan Taohuajiang foi concluído e entrou em operação no país (Figura 112). Esse edifício não só se torna uma plataforma para promover novos produtos de bambu, como também preenche uma lacuna nos materiais de construção de bambu no mercado nacional (Taojiang, 2024). A estrutura principal do edifício demonstrativo de tecnologia de estrutura de bambu moderno é composta por componentes de bambu. Avaliado por especialistas, foi reconhecido como o maior edifício de bambu modular do mundo em termos de área, com tecnologia de ponta a nível global (Taohuajiang Bamboo, 2024j).

O edifício é uma construção em bambu de três andares destinada às atividades de pesquisa científica e escritórios da empresa, com 500 metros quadrados por andar. A seção transversal das colunas principais é de 400×500 mm, feitas de materiais de bambu, com altura de 10.6 a 11.5 metros, estendendo-se até o topo do terceiro andar. As vigas estruturais principais possuem dimensões de $240 \times 600 \times 7300$ mm, e as vigas secundárias, o piso e o telhado são todos feitos de painéis de bambu. As paredes externas são compostas por uma cortina de vidro com decoração de bambu ao ar livre (Taohuajiang Bamboo, 2024f).

Figura 112 – Edifício de três pavimentos da Hunan Taohuajiang



Fonte: Taojiang (2024).

O Projeto de Renovação da Rua Cao Zhuangyuan (Figura 113) é um projeto-chave no Distrito de Nanming, Cidade de Guiyang, para construir uma zona de demonstração de renovação urbana característica. O Edifício Zhuangyuan e o Pavilhão Zhuangyuan são o núcleo do projeto. No projeto, os produtos de bambu para exteriores da Taohuajiang Bamboo são usados como materiais decorativos e estruturais (Taohuajiang Bamboo, 2024m).

Figura 113 - Edifício Zhuangyuan



Fonte: Taohuajiang Bamboo (2024m).

O Projeto Taohuajiang Bamboo Sea e Bamboo Forest Secret Hotel está localizado no Parque Florestal Nacional de Taohuajiang, cidade de Yiyang, província de Hunan (Figura 114). Uma fileira de vilas de bambu e madeira em formato de romance está espalhada ao redor do mar de bambu. Esta é a primeira casa de família de férias de alto padrão de Hunan com casas de bambu na árvore como a operadora Bamboo Forest Secret Hotel, que também é a maior comunidade de casas na árvore na província de Hunan. O piso de tábuas de bambu e madeira, os painéis de parede externa de bambu pesado e as grades de bambu usados no projeto são todos de materiais de bambu de Taohuajiang (Taohuajiang Bamboo, 2024n).

Figura 114 – Taohuajiang Bamboo Sea e Bamboo Forest Secret Hotel



Fonte: Taohuajiang Bamboo (2024n).

5.7.5 Bamboo International

O projeto de entrada para um jardim de infância em Xangai (Figura 115), concluído em 2020, apresenta uma estrutura híbrida de bambu estrutural e aço que se funde com o telhado de vidro proporcionando uma entrada concisa para este jardim de infância, refletindo um design moderno e sustentável.

Figura 115 – Entrada para um jardim de infância em Xangai



Fonte: Bamboo International (2023d).

5.7.6 Jianzhu Green

No *website* da Jianzhu Green, na seção intitulada *Integrated bamboo structure case* (集成竹结构案例), são apresentados alguns projetos realizados com o bambu integrado estrutural. São apresentados edifícios com estrutura de bambu integrado (Figura 116 e Figura 117) e construções rurais com estruturas de bambu (Figura 118, Figura 119, Figura 120 e Figura 121). No entanto, não são disponibilizadas quaisquer informações sobre esses projetos ou sobre a atuação da Jianzhu Green.

Figura 116 - Zidong Creative Park (紫东创意园)



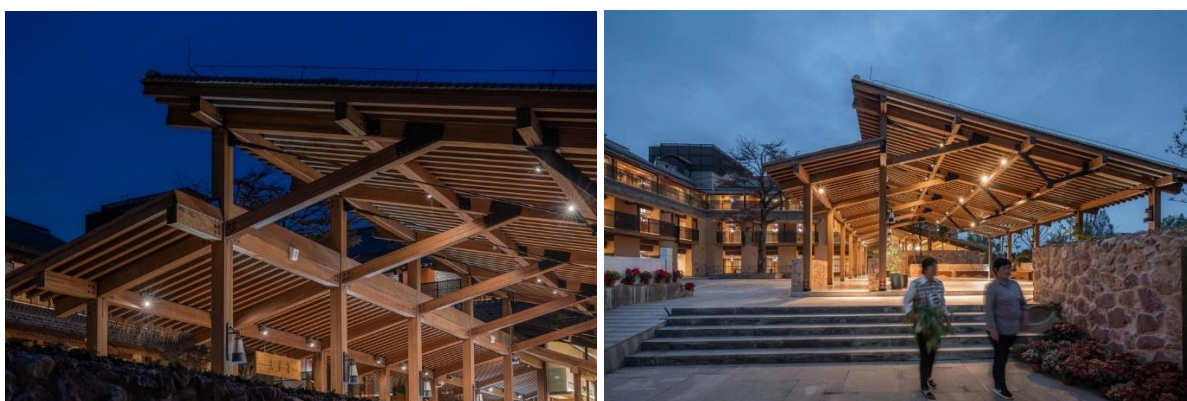
Fonte: Jianzhu Green (2024c).

Figura 117 – Feizi Village Urban (妃子村都市田园花房)



Fonte: Jianzhu Green (2024d).

Figura 118 – Lixiang Battalion Headquarters (李巷大队部)



Fonte: Jianzhu Green (2024e).

Figura 119 – Lijiashan Village Activity Center (里佳山村民活动中心)



Fonte: Jianzhu Green (2024f).

Figura 120 – China New Fourth Army History Research Museum (中国新四军历史研究馆)



Fonte: Jianzhu Green (2024g).

Figura 121 – Lijiashan Rongmajian Village Reconstruction (里佳山戎马间乡村改造)



Fonte: Jianzhu Green (2024h).

5.7.7 Greezu

De forma semelhante ao observado no *website* da Jianzhu Green, a Greezu também apresenta, em seu *website*, diversos projetos com aplicações de bambu engenheirado estrutural

(Figura 122 e Figura 123). Contudo, as únicas informações disponíveis são as imagens dos projetos, sem qualquer descrição adicional. Não são especificados os tipos de produtos de bambu empregados em cada aplicação, tampouco é esclarecido o papel da Greezu no desenvolvimento desses projetos, o que dificulta a identificação de sua participação ou contribuição nas obras apresentadas.

Figura 122 – Bamboo House, Saudi Arabia



Fonte: Greezu (2024e).

Figura 123 – Nanjing Hongli Lane



Fonte: Greezu (2024f).

Os abrigos de ônibus de bambu (Figura 124) são uma instalação urbana ecológica e prática. O uso de bambu para fabricar abrigos de ônibus não apenas reduz o impacto ambiental, mas também aumenta a vida útil dos abrigos. Os abrigos de ônibus de bambu oferecem vantagens como sensação de conforto devido à sua textura natural, propriedades de absorção sonora que reduzem a poluição sonora e isolamento térmico, mantendo o ambiente agradável tanto no inverno quanto no verão.

Figura 124 – Abrigos de ônibus de bambu



Fonte: Greezu (2024g).

Recentemente, foi inaugurado o novo edifício da Greezu, com três pavimentos, cuja construção está ilustrada na Figura 125.

Figura 125 – Construção do Edifício da Greezu



(a)

(b)

Fonte: Greezubamboo_official (2024).

5.7.8 Sunzo Bamboo

O ProMarket Community Commercial Complex em Zhengzhou (Figura 126) combina várias funções de moradia para aumentar a diversidade, conveniência, exclusividade e diversão do comércio comunitário. Ao integrar os produtos de bambu da Sunzo Bamboo com estruturas

de aço, os edifícios comunitários possuem uma qualidade estrutural leve, fornecendo possibilidades para criar espaços diversos.

Figura 126 – Zhengzhou ProMarket Community Commercial Complex



Fonte: Sunzo Bamboo (2024d).

5.7.9 Lamboo

A Lamboo apresentou alguns projetos reais em seu *website*. As vigas da série Lamboo® Structure™ foram empregadas em uma estrutura solar projetada pela Structure Solar, LLC (Figura 127).

Figura 127 – Novo Projeto com Lamboo® Structure™



Fonte: Lamboo (2021).

Na Residência Donner/Miller (Figura 128), localizada em Okatie, Carolina do Sul, a Lamboo trabalhou em colaboração com o designer e o construtor para desenvolver produtos personalizados que atendessem às exigências específicas do projeto. Além de fornecer os materiais, a empresa ofereceu suporte técnico, treinamento e assistência durante a construção, assegurando a correta instalação dos componentes. Os produtos da Lamboo foram aplicados em diversas áreas da residência, incluindo painéis de parede, vigas estruturais, sistema de teto, portas internas e externas, revestimento externo e uma pérgola/treliça ao ar livre, integrando funcionalidade, design e sustentabilidade ao projeto.

Figura 128 - Residência Donner/Miller



Fonte: Lamboo (2024e).

5.7.10 Run Zhu

No *website* da Runzhu, são apresentadas diversas construções em bambu engenheirado (Figura 129, Figura 130, Figura 131, Figura 132, Figura 133 e Figura 134). Entretanto, não são fornecidas informações detalhadas sobre os produtos de bambu engenheirado aplicados em cada projeto, nem sobre a função específica desempenhada por esses produtos em cada construção.

Figura 129 - Jingshan Flower Sea Bamboo Building



Fonte: Run Zhu (2019a).

Figura 130 - Xixi Impression City Rooftop Commercial Street



Fonte: Run Zhu (2019b).

Figura 131 - Bamboo Building



Fonte: Run Zhu (2019c).

Figura 132 - Renovation of Hangzhou Gongchenqiao Historic District



Fonte: Run Zhu (2019d).

Figura 133 - Qingtian Qianxia Lake Project



Fonte: Run Zhu (2019e).

Figura 134 - Toilet Revolution in Yunxi Township, Quzhou



Fonte: Run Zhu (2019f).

5.7.11 Dasso

No *website* da dasso, são apresentados projetos recentes que utilizam bambu estrutural da empresa. Entre esses projetos, destaca-se o Dalian Gulian Wetland Park (Figura 135), localizado em Liaoning, China, concluído em 2021. O parque abrange uma área total de 450 acres, sendo quase 200 acres de área aquática. Este projeto visa promover a cultura histórica do lótus e estimular o desenvolvimento do turismo na região. Além disso, o parque oferece um destino turístico que integra apreciação de lótus, gastronomia, entretenimento, lazer e hospedagem, criando um espaço multifuncional para visitantes (Dasso, 2024c).

Figura 135 – Dalian Gulian Wetland Park



Fonte: Dasso (2024c).

Outro projeto de destaque é o Jiangxi Bamboo SCI-TECH Museum (Figura 136), localizado em Jiangxi, China. O projeto combina bambu e vidro para criar uma estética leve e natural. O telhado levemente curvado, a abundância de luz natural e o interior espaçoso criam um ambiente confortável para os visitantes. O edifício faz uso de materiais estruturais de bambu e decks de bambu fornecidos pela Dasso®, contribuindo para a redução do consumo de materiais de construção e das emissões de carbono (Dasso, 2024d).

Além disso, o museu utiliza predominantemente madeira pesada de bambu proveniente da região, reforçando seu compromisso com práticas ambientalmente responsáveis e sustentáveis. Os avanços tecnológicos da dasso em inovação com bambu facilitaram o desenvolvimento de produtos engenheirados, como madeira laminada de bambu e painéis de bambu laminados cruzados. Esses produtos oferecem maior resistência e estabilidade, tornando-os ideais para uso como componentes estruturais (Dasso Group, 2024a).

Figura 136 – Jiangxi Bamboo SCI-TECH Museum



Fonte: Dasso (2024e).

As vigas de bambu estruturais da Dasso® também foram utilizadas em um projeto de reforma no Huanggang Honghua Zen Temple (Figura 137), na China, concluído em 2022. Os elementos estruturais de bambu foram empregados na construção da estrutura da cobertura do pavilhão central do templo (Dasso, 2024f).

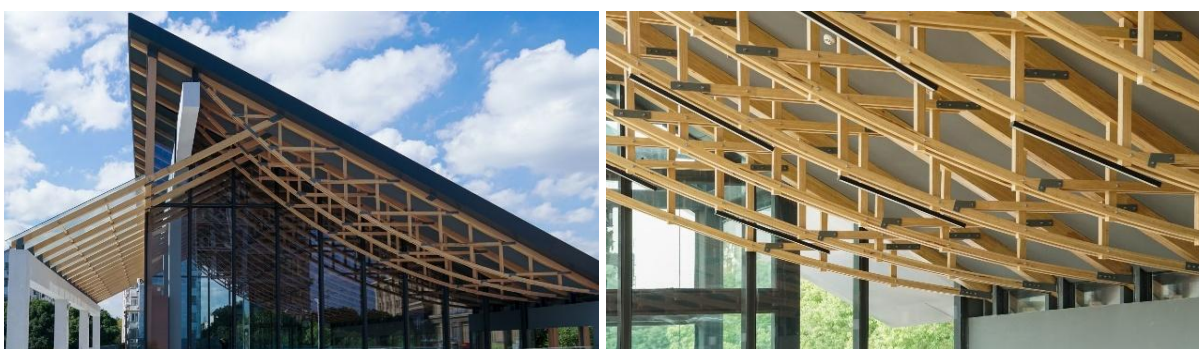
Figura 137 – Huanggang Honghua Zen Temple



Fonte: Dasso (2024g).

Outro projeto recentemente concluído é o Suzhou Chuihong Small Building (Figura 138), localizado em Suzhou, Jiangsu, China. Este edifício, concebido como um salão de casamento em estilo chinês, destaca-se por sua estrutura de treliça de bambu, cuidadosamente elaborada com materiais de bambu da Dasso®. A estrutura combina excelência em engenharia com uma estética natural e elegante. Os materiais de bambu da Dasso® oferecem um equilíbrio notável entre estética, sustentabilidade e desempenho, apresentando alta resistência, leveza e capacidade de suportar cargas sísmicas (Dasso Group, 2024b).

Figura 138 – Suzhou Chuihong small building



Fonte: Dasso Group (2024b).

5.8 NORMAS E CERTIFICAÇÕES

As empresas Bamboo Era, Taohuajiang Bamboo, Greezu e Dasso apresentam expressamente em seus *websites* que adotam e são certificadas pelo sistema de qualidade ISO 9001 e pelo sistema ambiental ISO 14001. A Sunzo Bamboo, BWG e a Feiyu Bamboo também

implementam a ISO 9001 (Bamboo Era, 2024a; Dasso, 2024h; Sunzo Bamboo, 2024e; Greezu, 2024a).

A ISO 9001 é uma norma internacional que especifica requisitos para um sistema de gestão da qualidade (SGQ). Seu objetivo é auxiliar organizações a demonstrar sua capacidade de fornecer produtos e serviços que atendam consistentemente às expectativas dos clientes, bem como aos requisitos regulamentares aplicáveis. Os requisitos da ISO 9001 são genéricos e podem ser aplicados a qualquer organização, independentemente do tipo, tamanho ou setor de atuação.

A ISO 14001 é uma norma internacional que estabelece os requisitos para um sistema de gestão ambiental (SGA), com o objetivo de ajudar as organizações a melhorarem seu desempenho ambiental de forma sistemática e alinhada às obrigações legais e outros requisitos aplicáveis. Aplicável a organizações de qualquer porte, tipo ou natureza, a norma busca abordar os impactos ambientais das atividades, produtos e serviços das organizações, adotando uma abordagem baseada no ciclo de vida.

Dessa forma, a certificação ISO 9001 indica que a empresa possui processos bem definidos e controlados para garantir a qualidade de seus produtos e serviços, atendendo consistentemente às expectativas dos clientes e às exigências regulamentares. Por outro lado, a certificação ISO 14001 demonstra que a empresa adota práticas e processos que minimizam os impactos ambientais de suas atividades, promovendo a sustentabilidade e o cumprimento das legislações ambientais aplicáveis.

Os produtos da dasso também estão em conformidade com a EUTR (European Union Timber Regulation). A EUTR é uma regulamentação da União Europeia implementada para combater o comércio de madeira ilegal. Essa legislação exige que todas as empresas que comercializam madeira ou produtos derivados no mercado europeu cumpram certos requisitos, incluindo a verificação de origem e a garantia de que os produtos não são provenientes de fontes ilegais. A dasso também indica que seus produtos possuem uma Declaração Ambiental de Produto (EPD), que fornece informações transparentes sobre o impacto ambiental dos produtos ao longo de seu ciclo de vida. A Lamboo também apresenta a EPD de seus produtos (Dasso, 2024h).

Em relação ao sistema de gestão ambiental, a Taohuajiang Bamboo também realizou a verificação da quantificação da pegada de carbono do produto de acordo com a ISO/TS 14067:2013 “Greenhouse Gas Product Carbon Footprint Requirements and Guidelines for Quantification and Communication” e PAS 2050:2011 “Specification for the Assessment of

Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle of Goods and Services”, com foco no design do produto, produção, consumo e outros processos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida do produto (Taohuajiang Bamboo, 2024m).

A Taohuajiang Bamboo também realizou um relatório de emissões de carbono e comércio de gases de efeito estufa para o ano de 2017. Foi adotada a norma internacional ISO14064 que especifica os princípios e requisitos para a quantificação e relato das emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) no nível organizacional. Ela abrange o design, desenvolvimento, gestão, relato e verificação de inventários de GEE de uma organização, sendo neutra em relação a programas específicos de GEE (Taohuajiang Bamboo, 2024n).

A ReNüTeq desenvolve seus produtos estruturais de bambu em conformidade com a ASTM 5456-2021. A norma D5456, originalmente aprovada em 1993, define procedimentos para avaliar produtos compósitos de madeira engenheirada em propriedades estruturais, permitindo seu uso como substitutos para madeira maciça e *glulam* em construções. Uma revisão incluiu a adição da definição de “*laminated veneer bamboo*” (LVB) e diretrizes sobre como o LVB deve ser avaliado para o desenvolvimento de valores de projeto estrutural (ReNüTeq, 2016).

Os produtos da ReNüTeq também estão em conformidade com o ICC-ES AC47 – *Acceptance Criteria for Structural Wood-based Products*. O ICC-ES AC47 é um critério técnico da International Code Council Evaluation Service (ICC-ES) que avalia a conformidade de produtos de *glulam* e materiais similares para uso seguro em construções. A ReNüTeq desenvolve seus produtos em conformidade com o IBC (International Building Code) nas edições de 2012 a 2023, um conjunto de regulamentos desenvolvido pelo International Code Council (ICC). Amplamente adotado nos Estados Unidos e em outros países, o IBC serve como referência para regulamentar construções seguras, sustentáveis e economicamente viáveis. Além disso, os produtos também atendem ao Eurocode 5 (EN, 1995), norma europeia que estabelece diretrizes para o projeto e construção de estruturas de madeira, incluindo critérios de segurança, durabilidade e desempenho estrutural (ReNüTeq, 2024e).

A certificação FSC (Forest Stewardship Council) também tem sido adotada pelas empresas fabricantes de bambu engenheirado. A altPlus, dasso, Greezu, BIL, Feiyu Bamboo, ASIA Bamboo, BWG e Sunzo Bamboo aderem a certificação FSC. A certificação FSC promove o uso sustentável e responsável dos recursos florestais, contribuindo para combater o desmatamento, conservar ecossistemas, regenerar florestas, respeitar direitos de trabalhadores, comunidades locais e povos indígenas, além de agregar valor socioambiental aos produtos

certificados. Reconhecida internacionalmente, a certificação identifica, por meio de sua logomarca, produtos madeireiros e não madeireiros provenientes de manejo florestal responsável (FSC, 2024).

As Greezu, Feiyu Bamboo, Sunzo Bamboo, ASIA Bamboo apresentam em seus *websites* a certificação CE (Conformité Européenne). A certificação CE é um padrão regulatório que verifica se os produtos são seguros para venda e uso na Área Econômica Europeia (AEE). A marcação CE não é concedida por um órgão regulador específico, embora certos produtos exijam uma avaliação de conformidade independente por um órgão notificado para garantir que atendam aos requisitos de certificação CE. Em última análise, os fabricantes são responsáveis pelo uso adequado da marcação CE em seus produtos (Assent, 2024).

ReNüTeq, BIL, ASIA Bamboo, Feiyu Bamboo, Greezu e Lamboo mencionam em seus *websites* a certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). O LEED é um sistema de certificação de edificações sustentáveis. Para obter a certificação LEED, um projeto ganha pontos ao cumprir pré-requisitos e créditos que abordam carbono, energia, água, resíduos, transporte, materiais, saúde e qualidade ambiental interna (Usgbc, 2024).

Dessa forma, quando uma empresa que fabrica produtos de bambu engenheirado menciona a certificação LEED em seu site, isso geralmente significa que seus produtos podem contribuir para que edifícios ou projetos obtenham créditos no sistema de certificação LEED. Em outras palavras, os produtos são reconhecidos como sustentáveis ou como atendendo aos critérios que promovem práticas de construção verde. Portanto, a inclusão da certificação LEED no site de uma empresa de bambu engenheirado demonstra um alinhamento com padrões globais de sustentabilidade e um posicionamento estratégico para atrair clientes do setor de construção verde.

Outra certificação identificada foi a BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), mencionada nos *websites* da Greezu, ASIA Bamboo, Feiyu Bamboo e BIL. BREEAM é um método de avaliação de sustentabilidade para o ambiente construído e infraestrutura. A estrutura BREEAM é usada para avaliar o desempenho de toda a vida útil, desde novos projetos de construção até reformas e ajustes (Breeam, 2024). Portanto, essas empresas indicam que seus produtos são compatíveis com os critérios do sistema de avaliação BREEAM e podem contribuir para que projetos obtenham pontuações mais altas nessa certificação. Essa estratégia ajuda a posicionar os produtos como uma escolha preferencial em projetos que buscam certificações de sustentabilidade.

As ASIA Bamboo, Feiyu Bamboo, Greezu e BIL também apresentaram em seus *websites* a certificação BEAM. O BEAM Plus é feito sob medida para o ambiente construído de arranha-céus e alta densidade do clima subtropical de Hong Kong, que abrange uma série de boas práticas em planejamento, design, construção, gerenciamento, operação e manutenção de edifícios, e está alinhado com regulamentações, padrões e códigos de prática locais (Beam, 2024). Dessa forma, essas empresas indicam que seus produtos são reconhecidos como adequados para uso em projetos que buscam obter ou atender aos critérios da certificação BEAM.

No aspecto de segurança contra incêndios, os produtos da BIL possuem a classificação Classe A, conforme a norma ASTM E84 – *Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials*, e Classe 1, de acordo com a norma BS 476 – *Fire Tests on Building Materials and Structures*, ambas indicando alta resistência à propagação de chamas. Além disso, atendem à classificação Bfl-s1, estabelecida pela EN 13501 – *Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*, demonstrando baixa combustibilidade e emissão mínima de fumaça. Os produtos também cumprem as certificações chinesas B-S1, t1 e A2-s1, t0, conforme a norma GB 8624 – *Classification for Burning Behavior of Building Products*, que confirmam baixo índice de combustibilidade, emissão reduzida de fumaça e ausência de toxicidade (Bamboo International, 2024c).

5.9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A diversidade de serviços fornecidos por empresas que atuam no setor de bambu engenheirado estrutural, abrangendo desde o gerenciamento de florestas de bambu até etapas finais de instalação e manutenção, é especificada no Quadro 23. Essa diversidade de atuação reflete a complexidade e a maturidade crescente do setor, evidenciando como o bambu engenheirado se insere em uma cadeia produtiva robusta, que combina pesquisa, desenvolvimento, fabricação e serviços personalizados.

A inclusão de atividades de design e engenharia em diversas empresas reflete a preocupação com o desenvolvimento de soluções inovadoras e adaptadas às necessidades específicas de cada cliente ou projeto. A integração de pesquisa e desenvolvimento como parte do portfólio de algumas empresas revela a ênfase em inovação tecnológica e na melhoria contínua dos materiais e processos. Essa abordagem é essencial para aumentar a competitividade do bambu engenheirado estrutural em relação a outros materiais estruturais,

como aço e concreto, e para expandir suas aplicações em mercados globais. Além disso, a personalização de soluções, evidenciada em parte dos serviços oferecidos, reforça a flexibilidade do setor em atender a demandas específicas.

Outro ponto relevante é a inclusão de atividades relacionadas ao gerenciamento de florestas de bambu e ao replantio. Esses serviços são estratégicos para assegurar uma cadeia de suprimentos sustentável, mantendo a disponibilidade de matéria-prima de alta qualidade e alinhando o setor às práticas de manejo responsável e à economia circular. Adicionalmente, os serviços de instalação e manutenção indicam que algumas empresas estão preocupadas não apenas em fornecer produtos, mas também em garantir sua aplicação correta e durabilidade ao longo do tempo. Isso demonstra um compromisso com a qualidade e a funcionalidade dos projetos que utilizam bambu engenheirado. Por fim, o compromisso com a entrega de soluções completas, que vão além do fornecimento de produtos e incluem instalação e manutenção, destaca a importância da qualidade e funcionalidade para a consolidação do bambu engenheirado como uma alternativa confiável, inovadora e sustentável na construção civil.

Quadro 23 – Serviços realizados pelas empresas

Empresas	Serviços
1	Design, engenharia, manufatura e soluções personalizadas
2	Pesquisa, desenvolvimento, produção e vendas
3	Manufatura, design, fornecimento de materiais, engenharia e instalação de soluções em kit integradas
4	Produção, venda, instalação
5	Design, produção, instalação e manutenção
6	Produção, comercialização, reflorestamento
7	Manufatura
8	Fabricação, design e construção
9	Pesquisa e desenvolvimento, design, produção e construção
10	Manufatura, design, construção, pesquisa e desenvolvimento
11	Manufatura, vendas
12	Manufatura, vendas
13	Manufatura, vendas
14	Gerenciamento das florestas de bambu, design, fabricação, vendas
15	Fabricação, design, construção, fresagem CNC, moldagem, marcenaria personalizada
16	Manufatura, vendas
17	Design, pesquisa e desenvolvimento, fabricação, vendas, instalação e manutenção
18	Pesquisa e desenvolvimento, manufatura, vendas
19	Manufatura, design, vendas
20	Manufatura, pesquisa e desenvolvimento, design

Legenda: 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz.

Fonte: Autora (2024).

A Tabela 13 reúne informações sobre a estrutura das fábricas, destacando a quantidade de colaboradores, a área ocupada pelas instalações e os tipos de maquinário utilizados. Esses dados permitem avaliar a escala operacional, no entanto, a ausência de informações completas limita uma análise mais abrangente.

A variação na quantidade de colaboradores entre as empresas é significativa. Essa ampla disparidade reflete diferenças na escala de operação, com algumas empresas se posicionando como pequenas e médias, enquanto outras apresentam características de grandes indústrias. Empresas com maior número de colaboradores tendem a operar em escalas industriais, permitindo maior volume de produção e diversificação de produtos, enquanto empresas menores podem focar em soluções personalizadas e nichos de mercado.

A área ocupada pelas fábricas varia entre 4200 e 850000 metros quadrados, indicando grande variação na infraestrutura disponível. A tabela destaca o uso de tecnologias avançadas em diversas empresas, como sistemas de controle servo-assistido, máquinas CNC, prensas térmicas, tecnologias de tratamento anticorrosivo e equipamentos para laminação sem limite de comprimento. O uso de maquinário sofisticado reflete o compromisso do setor com a automação e a melhoria contínua dos processos de fabricação, aumentando a eficiência, a precisão e a qualidade dos produtos. Linhas de produção inteligentes, mencionadas por algumas empresas, destacam a integração de automação e monitoramento digital, que são tendências globais em indústrias modernas.

A ausência de dados, especialmente no que diz respeito ao tipo de maquinário, limita a compreensão completa das capacidades de algumas empresas. Essa falta de transparência pode ser atribuída a diferentes fatores, como políticas internas de confidencialidade, falta de padronização na divulgação de dados ou menor investimento em infraestrutura tecnológica. Essa lacuna dificulta a comparação direta entre empresas e compromete a avaliação do nível de desenvolvimento tecnológico e organizacional do setor como um todo.

Tabela 13 – Informações acerca das instalações das fábricas

E	Quantidade de colaboradores	Área das instalações (m ²)	Maquinário
1	11-50		Prensas de aquecimento por micro-ondas; sistemas de controle servo assistido

BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

2		850,000.0	Avançada máquina de desfibramento contínuo e separação de feixes vasculares; prensa térmica
3		8,000.0	Fabricação robótica; K3 Hundegger - Robotic CNC (Controle Numérico Computadorizado)
4	>300	120,000.0	Tecnologias de “Reagrupamento de Bambu e Madeira” e “Tratamento Anticorrosivo de Alta Carbonização”
5			
6			
7	>150	4,200.0	
8	2-10		
9			
10	201-500	40,000.0	Equipamentos para tratamento externo, linha de máquinas HOMAG, sistema de laminação sem limite de comprimento
11	250	60,000.0	Linhas de produção são continuamente atualizadas e automatizadas; cinco máquinas de prensagem
12			
13	11-50		Equipamentos de produção de alta tecnologia, sistemas avançados de prensagem a quente e tratamento antifúngico
14		100,000.0	Linhas de produção inteligentes e tecnologias próprias, como a tecnologia de extensão de bambu
15	11-50		
16	2-10		
17		45,000.0	
18	1000-5000		
19	51-200		
20	2-10		

Legenda: 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz.

Fonte: Autora (2024).

O Quadro 24 sintetiza as principais normas e certificações mencionadas nos *websites* de empresas. As normas são explicitamente referenciadas, enquanto as certificações geralmente aparecem por meio de logomarcas destacadas. As normas listadas incluem padrões de gestão de qualidade, gestão ambiental, desempenho estrutural e sustentabilidade. Entre as mais recorrentes estão a ISO 9001, voltada para a gestão de qualidade, e a ISO 14001, que se refere à gestão ambiental. Essas normas são amplamente reconhecidas e indicam um compromisso das empresas com a qualidade dos processos e com a redução dos impactos ambientais, aspectos fundamentais para fortalecer a aceitação do bambu engenheirado em mercados globais.

Normas técnicas específicas, como a ASTM 5456, ICC-ES-AC47, IBC e Eurocode 5, são mencionadas para caracterizar propriedades mecânicas e o desempenho estrutural dos produtos. A presença dessas normas reflete o alinhamento de algumas empresas com padrões técnicos internacionalmente aceitos, o que contribui para a confiabilidade e a competitividade

do bambu engenheirado em aplicações estruturais. Adicionalmente, normas de sustentabilidade, como a ISO/TS 14067:2013 e a PAS 2050:2011, aparecem em menor número, mas indicam a preocupação de algumas empresas em medir e reduzir as emissões de carbono associadas aos seus produtos. Este aspecto é relevante no contexto atual, em que a sustentabilidade é um critério-chave para a escolha de materiais de construção.

As certificações destacadas na tabela incluem FSC, que garante o manejo sustentável das florestas; LEED, um sistema de certificação de construções sustentáveis amplamente reconhecido; e BREEAM, outra certificação importante para a avaliação ambiental de edifícios. Certificações como CE e EPD reforçam o compromisso das empresas com os requisitos regulamentares e a transparência ambiental. O setor de bambu engenheirado estrutural apresenta um nível crescente de adesão a normas de qualidade e ambientais, especialmente as normas ISO. Isso demonstra que as empresas estão se alinhando às exigências de mercados mais regulamentados, buscando maior aceitação e competitividade internacional. Além disso, a presença de certificações de sustentabilidade, como FSC, LEED e BREEAM, indica que o setor está respondendo às demandas globais por práticas construtivas mais sustentáveis.

No entanto, a adoção dessas certificações ainda não é uniforme entre as empresas, evidenciando uma oportunidade para ampliação de práticas sustentáveis e maior alinhamento com critérios ambientais. Além disso, algumas empresas não mencionam normas específicas ou certificações. Essa falta de padronização pode comprometer a competitividade do setor em mercados mais exigentes, onde conformidade técnica e sustentabilidade são fatores decisivos. A ausência de informações completas sugere que nem todas as empresas estão investindo na obtenção ou divulgação de certificações e normas, o que pode limitar sua credibilidade e alcance de mercado.

Quadro 24 – Normas e certificações identificadas nos *websites*

Empresas	Normas	Certificações
1		FSC
2	ISO 9001 / ISO 14001	
3	ASTM 5456 / ICC-ES-AC47 / IBC / Eurocode 5	LEED / BREEAM
4	ISO/TS 14067:2013 / PAS 2050:2011 ISO 14064 / ISO 9001 / ISO 14001	
5		CE / FSC / LEED / BREEAM / BEAM
6	ISO 9001	FSC / CE / LEED / BREEAM / BEAM
7		FSC / CE / LEED / BREEAM / BEAM
8		CE / FSC / BREEAM / LEED / BEAM
9		
10	ISO 9001 / ISO 14001	CE / LEED / BREEAM / FSC / BEAM
11	ISO 9001	FSC
12		

13	ISO9001 / ISO14001	CE / FSC
14	ISO 9001	FSC / CE
15		LEED / EPD
16		
17		
18	ISO 9001 / ISO 14001 / EUTR	EPD / FSC
19 ¹		
20		

Legenda: 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeg, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz, ¹ o website oficial da PT Indobamboo estava em construção no momento dessa pesquisa.

Fonte: Autora (2024).

O Quadro 25 apresenta uma ampla gama de aplicações do bambu engenheirado em estruturas arquitetônicas e de engenharia, revelando um panorama diversificado e promissor para o setor. O uso de bambu engenheirado estrutural tem demonstrado flexibilidade e adaptabilidade, sendo empregado em diferentes elementos estruturais e tipologias construtivas. Entre as principais aplicações observadas, destaca-se o uso do SEB como vigas e colunas, evidenciando sua versatilidade ao ser empregado em formatos retos e curvos, além de configurações diversas, como treliças e sistemas viga-pilar. Essa flexibilidade demonstra a capacidade do SEB de atender a demandas estruturais desafiadoras, combinando elevado desempenho técnico com atributos estéticos. Adicionalmente, seu uso em estruturas de telhado, incluindo elementos como terças, ripas e caibros, é amplamente destacado, reforçando sua adequação para compor coberturas e sistemas de proteção.

O desenvolvimento de estruturas híbridas, como sistemas que combinam bambu e aço, reflete ainda a exploração de novos limites para o material, aumentando seu potencial de aplicação em projetos que requerem maior desempenho estrutural. Além dos elementos básicos, a tabela mostra aplicações inovadoras, como sistemas de vidro estrutural integrados ao bambu e opções personalizáveis que atendem a requisitos específicos de design e funcionalidade. Essas iniciativas demonstram o compromisso do setor em explorar o bambu como um material competitivo e adaptável às necessidades do mercado contemporâneo. Por fim, o foco em treliças, *framings* e marquises indica o papel do bambu engenheirado em estruturas decorativas e de suporte. As aplicações relatadas demonstram que o SEB é capaz de atender a uma ampla gama de demandas estruturais e arquitetônicas, desde elementos básicos, como vigas e colunas, até soluções completas e inovadoras, como estruturas híbridas e sistemas pré-fabricados.

O Quadro 25 apresenta uma diversidade de projetos que empregam SEB, ilustrando as diferentes formas de aplicação desse material. Entre as tipologias identificadas, destaca-se o uso em edifícios residenciais e comerciais, que incluem tanto construções de um pavimento

como edificações de até três pavimentos. Esse fato demonstra o potencial do bambu engenheirado em atender a exigências de resistência e funcionalidade em construções mais complexas. Adicionalmente, o emprego do material em estruturas modulares, como abrigos, quiosques e sanitários, ressalta sua compatibilidade com sistemas construtivos pré-fabricados, conhecidos por sua eficiência e sustentabilidade.

As estruturas de telhado e coberturas aparecem frequentemente entre os projetos listados, evidenciando o uso do bambu engenheirado para elementos arquitetônicos que requerem leveza, durabilidade e estética. Coberturas treliçadas e beirais, em particular, destacam a flexibilidade do material para atender a diferentes demandas estruturais e visuais. Além disso, o SEB tem sido empregado em varandas, galerias, corredores e pavilhões, ilustrando a capacidade do bambu engenheirado de criar espaços funcionais e esteticamente agradáveis. Essas aplicações também indicam a adaptação do material a elementos que conectam áreas internas e externas, valorizando a integração arquitetônica com o meio ambiente.

Projetos mais emblemáticos, como museus e salões, demonstram o potencial do SEB para criar estruturas de grande porte e alto impacto arquitetônico. O uso do bambu engenheirado em estruturas mais simples, como abrigos de ônibus e coberturas de entrada de edificações, também merece destaque. Essas aplicações reforçam a versatilidade e acessibilidade do material, permitindo sua utilização em soluções cotidianas e de menor escala. Por fim, algumas iniciativas ainda estão em desenvolvimento, o que reflete o dinamismo do setor e a contínua busca por inovações e novas formas de aplicação do bambu engenheirado.

No entanto, a falta de informações completas para alguns projetos indica a necessidade de maior divulgação e documentação, fundamental para consolidar o uso desse material no mercado da construção. Portanto, o bambu engenheirado estrutural é aplicável em diferentes contextos, desde pequenas estruturas modulares até grandes edificações de múltiplos pavimentos. Contudo, para ampliar sua aceitação e impacto, é essencial investir em pesquisa, desenvolvimento e na disseminação de estudos de caso que evidenciem suas vantagens e possibilidades.

Quadro 25 – Aplicações e projetos reais dos produtos de SEB

E	Aplicação	Tipos de construção	Projetos reais

BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

1	vigas, painéis, vergas, colunas, sistemas viga-pilar, estruturas telhados (terças, ripas, caibros), cobertura e fachada híbridas com vidro estrutural, estruturas em kit, opções personalizáveis	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; residências pré-fabricadas e modulares	Edificações de 1pv e 2pvs; Residências modulares 1pv
2	Vigas, colunas, treliças, estruturas de telhados (terças, ripas, caibros), coberturas, lajes, opções personalizáveis	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; residências pré-fabricadas e modulares; estações pré-fabricadas	Coberturas treliçadas; Estruturas de telhado; Varandas; Salão de palestras 1pv; Edificações 1pv; Galeria/corredores; Estações pré-fabricadas
3	Vigas retas, curvas, arqueadas e cônicas, colunas, sistemas viga-pilar, coberturas, estruturas de telhado (terças, ripas, caibros), estruturas em kit, paredes cortina, sistemas de vidro estrutural, opções personalizáveis	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; estações pré-fabricadas	Edificações híbridas 3pvs; Estruturas de cobertura; Estações de carregamento de VE; Edificações 1pv
4	Vigas, pilares, painéis de parede, lajes de piso, treliças, estruturas de telhado, coberturas, edificações pré-fabricadas e modulares, opções personalizáveis	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; pavilhões; varandas	Edifício de 3pvs; Varandas; Estruturas de telhado; Edificações pré-fabricadas 1pv
5	Vigas, colunas, treliças, estruturas de telhado, coberturas, estruturas híbridas bambu-aço	Edificações de altura baixa e média, coberturas	Cobertura da entrada de uma edificação
6	Vigas, colunas, estruturas de telhado	Edificações de 2pvs; gazebos	
7	Vigas, colunas		
	Vigas, colunas		
8	<i>Framings</i> , treliças, vigas		
9	Vigas, colunas, treliças, sistemas viga-pilar, estruturas de telhado, estruturas híbridas bambu-aço	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; residências pré-fabricadas e modulares; estações pré-fabricadas	Edificações de 1pv (sistema viga-pilar, estrutura do telhado, estruturas híbridas bambu-aço)
10	Vigas retas, curvas, arqueadas, colunas, treliças, estruturas de telhado (terças, ripas, caibros), estrutura de bambu tipo guarda-chuva	Edificações altura baixa, média e alta; edificações comerciais e residenciais; edificações pré-fabricadas e modulares; estações de ônibus	Edifício 3pvs; Edificação 2pvs; Edificações 1 pv; Estações de ônibus
11	Vigas retas e curvas, colunas	Estações para carregamento de VE	
	Estruturação de edifícios	Edificações	
12			
13	Vigas, colunas, treliças, estruturas de telhados e coberturas		
	Vigas, colunas	Gazebos	
14	Vigas, colunas, lajes, estruturas de telhado, estruturas híbridas bambu-aço	Edificações 1pv ou mais pvs Galerias/corredores	Edifício comercial 2 pvs
15	Vigas retas e curvas, colunas, treliças, estruturas de telhados, marquises, coberturas	Edificações 1pv ou mais Estruturas de energia solar	Residência 2 pvs (coberturas, estrutura de telhados, colunas, estrutura de beirais)
16	Vigas		

BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

17	Edificações pré-fabricadas, vigas, colunas, paredes, estruturas de telhado	Edificações residências ou comerciais; edificações 1pv ou 2pvs; quiosques; sanitários públicos	Edificações modulares 1pv ou 2pvs; Edificações modulares pequenas; Quiosques; sanitários modulares
18	Vigas, colunas, estruturas de telhados e coberturas	Edificações de baixa e média altura; residências e comerciais;	Estruturas de beirais; Estrutura do museu do bambu; Estruturas de telhado; Estrutura treliçada de um salão
19	Vigas, colunas		
20	Vigas, colunas		

Legenda: E – Empresas; 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz.

Fonte: Autora (2024).

O Quadro 26 apresenta informações sobre as espécies de bambu, os tipos de produtos fabricados e algumas etapas dos processos de fabricação desses materiais. Essas informações são essenciais para compreender as práticas do setor e os fatores que influenciam as propriedades finais dos materiais.

O Quadro 26 evidencia a predominância da espécie *Phyllostachys edulis* (bambu mossô) como principal matéria-prima utilizada. Essa escolha reflete a ampla disponibilidade e as propriedades mecânicas favoráveis desta espécie, como alta resistência e rigidez, que a tornam adequada para aplicações estruturais. A predominância do *Phyllostachys edulis* também reflete o foco geográfico da produção e do consumo de bambu engenheirado. Para expandir para outros mercados, pode ser necessário explorar espécies locais de bambu, adaptando-se a diferentes ecossistemas e regulamentações. Outras espécies, como *Guadua angustifolia* e *Dendrocalamus asper*, também aparecem, indicando uma diversificação limitada, mas importante, na seleção de matéria-prima. A utilização de diferentes espécies pode ser uma estratégia para atender a especificidades regionais ou demandas específicas de desempenho.

Os tipos de adesivos utilizados nos processos de fabricação variam entre ureia-formaldeído, fenol-formaldeído e adesivos de baixo VOC (compostos orgânicos voláteis). Adesivos fenólicos, frequentemente associados a maior resistência e durabilidade, são amplamente utilizados, especialmente em produtos que requerem alta estabilidade em condições ambientais adversas. Por outro lado, a menção a adesivos de baixo VOC reflete uma preocupação com impactos ambientais e saúde ocupacional, alinhando-se às crescentes demandas por materiais mais sustentáveis. Os métodos de prensagem incluem o uso de calor, com temperaturas variando entre 100 °C e 130 °C, para ativar as resinas e consolidar as

estruturas do material. Essa etapa é crucial para garantir a adesão e a compactação das fibras ou lâminas de bambu, influenciando diretamente as propriedades mecânicas e a durabilidade dos produtos.

O tratamento químico aparece de forma limitada na tabela, sendo mencionados o uso de ácido bórico, bórax e preservativos não tóxicos. Esses tratamentos visam aumentar a resistência a agentes biológicos, como fungos e insetos, e prolongar a vida útil do material. As classificações de resistência ao fogo variam entre B1, A, e classificações europeias como Bfl-S1 e A2-S1, t0, indicando que algumas empresas investem em melhorar a segurança contra incêndios de seus produtos. Essa característica é fundamental para ampliar a aceitação do bambu engenheirado em projetos de construção civil, especialmente em regiões com regulamentações rigorosas sobre segurança contra incêndios.

A ausência de informações nos *websites* sobre etapas cruciais do processo de fabricação limita significativamente a compreensão das práticas adotadas pelo setor. Dados importantes, como a taxa de aplicação dos adesivos, o tempo e a pressão de prensagem, também não foram identificados, revelando lacunas na divulgação de detalhes técnicos. Essa falta de transparência pode refletir uma carência de padronização na apresentação de informações ou a ausência de práticas uniformes entre as empresas. Como consequência, essas omissões dificultam a comparação direta entre produtos e comprometem a confiança de projetistas, engenheiros e demais profissionais interessados na especificação e utilização de bambu engenheirado estrutural em projetos.

Quadro 26 – Espécies de bambu e etapas de fabricação dos produtos SEB

E	Espécie de bambu	TP	Tipo de adesivo	Prensagem	Tipos de tratamentos	Resistência ao fogo
1	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL	Adesivo de baixo VOC			
2	<i>Neosinocalamus affinis</i>	BS	Resina fenólica e adesivo dois componentes	À quente		B1
3	<i>Guadua angustifolia</i>	LBL			Ácido bórico	
4	<i>Phyllostachys edulis</i>	BS	Adesivo Dynea			B1
5						Class A / Class 1 / Bfl-S1 / B-S1, t1 / A2-S1, t0
7	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL	Uréia-formaldeído	À quente (100 °C)		
	<i>Phyllostachys edulis</i>	BS	Fenol-formaldeído	À quente (130 °C)		
8		LBL				
9		LBL				B1 A2

BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

10	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL				
11		LBL	Adesivos da marca AICA, SA, Dynea			
		BS	Resina fenólica			
12	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL				
13	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL				
	<i>Phyllostachys edulis</i>	BS	Resina fenólica	À quente		B-s1,d0
14		LBL		À quente		
15	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL				A B
16	<i>Guadua angustifolia</i>	Crushed bamboo mat beams			Preservativos não tóxicos e água	
17		Edifícios pré- fabricados				
18	<i>Phyllostachys edulis</i>	LBL				
19 ¹	<i>Dendrocalamus asper</i>	LBL CLB			Bórax	
20		BVL	Resina especialmente formulada			

Legenda: 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz, ¹ o website oficial da PT Indobamboo estava em construção no momento dessa pesquisa.

Fonte: Autora (2024).

A Tabela 14 sintetiza informações acerca dos produtos de bambu engenheirado estrutural comercializados pelas empresas identificadas. Em “Marca” são apresentados os nomes do bambu engenheirado estrutural conforme nomenclatura apresentada nos *websites*. Em “TP” (tipo de produto) é apresentado a nomenclatura usual da literatura para esses produtos, de acordo com a estrutura das lamelas de bambu.

Observa-se que o *laminated bamboo lumber* (LBL) é majoritariamente o produto SEB mais desenvolvido e comercializado pelas empresas prospectadas, seguido do *bamboo scrimber* (BSC). Vale ressaltar que para as empresas que não apresentam informações específicas acerca de seus produtos, como o tipo de SEB e processo de fabricação, a definição do tipo de SEB foi identificada com base nas imagens dos produtos disponibilizados nos *websites*. Além do LBL e BSC, em uma empresa foi identificado, por meio de imagens, vigas estruturais com a estrutura laminada cruzada. Esse produto de bambu é denominado na literatura por *cross-laminated bamboo* (CLB). Embora algumas empresas apresentassem produtos de bambu CLB para aplicações não estruturais, como bancadas, não foi observado a descrição de produtos CLB para aplicações estruturais em edifícios.

A Tabela 14 evidencia uma disparidade entre os nomes empregados pelas empresas em seus *websites* e os nomes usualmente utilizados na literatura técnica. Essa diferença reflete a ausência de uma padronização terminológica no setor de produtos de bambu engenheirado, com importantes implicações para o desenvolvimento do setor e para a adoção dos produtos no mercado de engenharia estrutural.

Os nomes apresentados pelas empresas muitas vezes têm um caráter comercial ou descritivo, buscando destacar características específicas dos produtos, como “*Bamboo Steel*” ou “*Structural Laminated Bamboo Timber*”. Por outro lado, os nomes usados na literatura, como LBL, CLB e BSC, têm origem em definições técnicas que classificam os produtos de acordo com suas configurações estruturais, processos de fabricação ou características de desempenho. Essa disparidade dificulta o reconhecimento imediato das propriedades e aplicações dos produtos. Enquanto os nomes comerciais podem ser mais atraentes para o público geral, eles podem gerar confusão em ambientes técnicos e acadêmicos, onde é essencial uma terminologia precisa e universalmente reconhecida.

Quanto às dimensões, é possível observar uma ampla variação entre os produtos, refletindo a flexibilidade dimensional do bambu engenheirado para atender diferentes aplicações estruturais. A espessura das camadas (E_c) varia de 10 mm a 30 mm, com maior uniformidade em produtos classificados como LBL, nos quais predominam espessuras entre 19 mm e 20 mm. Essa uniformidade pode estar associada a processos de fabricação padronizados para esse tipo de produto.

O comprimento (C) dos elementos apresenta variação significativa, entre 1219.2 mm e 48000 mm, abrangendo desde componentes curtos, possivelmente destinados a aplicações específicas ou modulares, até elementos extensos, projetados para uso em estruturas de grande porte, como vigas ou colunas. A largura (L) varia entre 12 mm e 1828.8 mm, enquanto a altura (A) apresenta valores entre 12 mm e 762 mm. Essa diversidade dimensional reflete a adaptabilidade do bambu engenheirado a diferentes aplicações, desde pequenos elementos internos até grandes componentes estruturais.

Vale destacar que as dimensões apresentadas na tabela se referem às características dos produtos de bambu engenheirado disponíveis para comercialização e não necessariamente às dimensões finais dos elementos estruturais. Isso se deve ao fato de que o mesmo tipo de material pode ser utilizado em uma ampla gama de aplicações, incluindo, mas não se limitando, às estruturais. Por exemplo, no caso de LBLs com altura de 19 mm, isso significa que o produto pode ser adquirido como uma única camada com essa altura. Essa camada pode ser considerada

a unidade básica do produto. A partir da junção de múltiplas camadas de LBL, é possível formar elementos estruturais maiores e mais robustos, como vigas ou colunas, adaptados às exigências de cada projeto.

Os produtos identificados como personalizáveis (indicados na tabela como “PS”) destacam-se por oferecer flexibilidade adicional nas dimensões, tornando-os mais adaptáveis a projetos que demandam especificações personalizadas. Essa característica pode representar uma vantagem competitiva, especialmente em aplicações inovadoras ou onde a customização é um requisito fundamental. Com base nessas informações, conclui-se que a variação dimensional dos produtos está diretamente relacionada à ampla gama de aplicações possíveis. Elementos com maiores comprimentos, larguras e alturas são mais indicados para estruturas robustas e de grande porte, enquanto os de dimensões menores atendem a necessidades específicas ou sistemas modulares. Além disso, a possibilidade de personalização amplia o potencial de uso do bambu engenheirado em projetos diversificados, reforçando a versatilidade desse material no setor da construção.

Em relação às conexões e emendas, verificou-se que as empresas frequentemente utilizam *finger joints* e *edge joints* para a extensão de elementos de bambu, enquanto as conexões entre elementos estruturais envolvem chapas metálicas e conexões metálicas aparafusadas. Essas opções de conexão sugerem um alinhamento com práticas usuais de engenharia, visando facilitar a montagem e garantir a segurança estrutural.

Outro aspecto relevante é a ausência de informações completas em *websites* de algumas empresas, indicando uma falta de transparência ou padronização na comunicação de especificações técnicas. Isso pode dificultar a comparação direta entre os produtos e impactar negativamente a adoção desses materiais em mercados internacionais.

Tabela 14 – Caracterização dos produtos de SEB

E	Marca	TP	E _c (mm)	C (mm)	L (mm)	A (mm)	Dm	Emendas	Conexões
1	LVB	LBL	19				PS		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
2	Bamboo Steel	BS	10-30	2500			PS	Ponta a ponta, sobreposição, junção escalonada, <i>finger joint</i>	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
3	RadLam RLB	LBL		1219.2 38100	88.9 - 762	88.9 - 1828.8	PS		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas Ferragens de aço

BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

								inoxidável de grau marítimo
	<i>Structural laminated bamboo timber</i>	LBL	20	10000	1200	PS	<i>Finger joint</i>	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
4	<i>Outdoor Lightly Carbonized Anti-Corrosion Bamboo Material</i>	BS	20	10000	1200			
5	<i>Structural bamboo</i>	-				PS		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
6	<i>Structural bamboo</i>							
				2000				
	<i>Indoor grade bamboo beams</i>	LBL		2440	12 - 100		<i>Finger joint, edge joint</i>	
				2900				
				5800				
				9600				
7				2000				
	<i>Outdoor grade bamboo lumber</i>	BS		2440	12 - 100		<i>Finger joint, edge joint</i>	
				2900				
				5800				
				9600				
8	<i>VH Glue Laminated Beam; Glue Laminated Beam; Cross Lay Board</i>	LBL				PS		
9	<i>Integrated bamboo structural materials</i>	LBL		48000		PS		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
10	<i>Structural bamboo</i>	LBL				PS		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
	<i>Bamboo Beams Lumber</i>	LBL		3000	1280	500	PS	<i>Finger joint</i>
11	<i>Bamboo Lumber Strand Woven</i>	BS		2900	155	100		
12	<i>Bamboo lumber</i>	LBL						
	<i>Laminated bamboo timber</i>	LBL		2900	100	100	PS	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
				6000				
13				1860	120	60		
	<i>Strand woven bamboo timber</i>	BS		2000	100	80	PS	
				2500	80	100		
					60			
14	<i>Bamboo Structural Lumber</i>	LBL		2440	1220		PS	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
				2135	915			
				2500	1250			
15	<i>Lamboo Structure</i>	LBL		2438.4	19	38	PS	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
				3657.6	25	89		
				4876.8	38	140		
					89	184		
16	<i>Crushed bamboo mat beams</i>							
17	Edificações pré-fabricadas e modulares							

18	Structural dasso bamboo	LBL	Metálicas aparafusadas Chapas metálicas
19 ¹	Structural bamboo	LBL CLB	
20	BVL		Metálicas aparafusadas Chapas metálicas

Legenda: E – Empresas; 1 – AltPlus, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 5 – Bamboo International, 6 – Feiyu Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 9 – Jianzhu Green, 10 – Greezu, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 13 – Anos Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, 17 – Run Zhu, 18 – Dasso, 19 – PT Indobamboo, 20 – Widuz, TP – tipo de produto, E_c – espessura da camada, C – comprimento, L – larguras, A – altura, Dm – dimensões, ¹ o website oficial da PT Indobamboo estava em construção no momento dessa pesquisa.

Fonte: Autora (2024).

A Tabela 15 reúne dados referentes às propriedades físicas e mecânicas de produtos de bambu engenheirado fornecidos pelas diferentes empresas em estudo. Esses dados incluem informações cruciais para avaliar o desempenho dos produtos em aplicações estruturais. As normas utilizadas para a obtenção dessas propriedades são indicadas entre parênteses, demonstrando a relevância de parâmetros padronizados para a validação de desempenho.

Dentre as normas utilizadas, a GB/T 50329 (Métodos de teste de estruturas de madeira) aparece associada ao módulo de elasticidade e à capacidade de carga, enquanto a GB/T 1927 (Requisitos gerais para testes físicos e mecânicos de madeira) é aplicada na determinação de propriedades fundamentais como resistência de ruptura, compressão e tração. Normas europeias, como a EN 408 (Estruturas de madeira – Madeira estrutural e madeira laminada colada – Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas) e a EN 310 (Painéis à base de madeira – Determinação do módulo de elasticidade na flexão e da resistência à flexão), foram empregadas para avaliar a resistência à flexão, reforçando a confiabilidade dos resultados apresentados.

Já as normas americanas ASTM D1037 (Métodos de teste padrão para avaliar propriedades de materiais de painéis de partículas e fibras à base de madeira), ASTM D198 (Métodos de teste padrão de testes estáticos de madeira serrada em tamanhos estruturais) e ASTM D3048 (Método de teste padrão para avaliar capacidades estruturais de painéis estruturais de chapa metálica) desempenharam papel relevante na caracterização do teor de umidade, módulo de elasticidade, resistência à flexão, compressão, tração e cisalhamento, indicando o alinhamento de algumas empresas com padrões amplamente aceitos globalmente.

A análise dos dados disponíveis evidencia algumas variações nas propriedades apresentadas pelos produtos, refletindo tanto as diferenças no tipo de bambu utilizado quanto nos métodos de processamento adotados pelas empresas. A densidade, por exemplo, varia entre

650 kg/m³ e 1200 kg/m³. Produtos com maior densidade tendem a oferecer maior resistência mecânica, como demonstrado pelos valores de resistência à compressão e à flexão relatados. No entanto, também estão associados a uma maior massa, o que pode impactar negativamente em aplicações onde o peso estrutural é um fator limitante. O teor de umidade varia entre 7% e 12%, faixa que está dentro dos limites recomendados para garantir a estabilidade dimensional do material. O controle desse parâmetro é fundamental, pois influencia diretamente a durabilidade e o desempenho mecânico do bambu ao longo do tempo.

Os valores de módulo de elasticidade variam de aproximadamente 8963 MPa a 30000 MPa, destacando a rigidez e o potencial do bambu engenheirado para resistir a deformações em aplicações estruturais. Empresas que apresentaram valores de módulo de elasticidade mais elevados reforçam a adequação de seus produtos para projetos que exigem maior desempenho estrutural. As propriedades de resistência, como resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração, apresentam valores variados que refletem a qualidade dos produtos e a adequação para diferentes aplicações. Por exemplo, os produtos com resistência à flexão superiores, como os que alcançam até 111.75 MPa, são indicados para aplicações que exigem alta resistência a esforços flexionais. A resistência à compressão, que alcança valores como 300 MPa, demonstra a eficácia do bambu engenheirado em suportar cargas verticais, sendo ideal para colunas e outros elementos de compressão. Já a resistência à tração, com valores que chegam a 108.08 MPa, evidencia o desempenho satisfatório em elementos sujeitos a esforços de tração, como vigas suspensas.

Contudo, a maior parcela das empresas não divulga expressamente em seus *websites* essas propriedades físicas e mecânicas básicas dos materiais. Essa ausência de dados aponta para um desafio importante no setor: a falta de padronização na divulgação de informações técnicas. Essa lacuna pode dificultar a comparação entre produtos e impactar a confiança dos projetistas e engenheiros ao especificar bambu engenheirado em projetos estruturais.

As implicações dessa lacuna de informações vão além da comparação direta entre produtos. Para o setor, a falta de transparência pode limitar a aceitação do bambu engenheirado em projetos estruturais de maior escala, especialmente em mercados que exigem documentação técnica rigorosa para atender a regulamentações de construção. Portanto, é essencial que as empresas priorizem a divulgação de dados técnicos completos e padronizados, garantindo que todas as propriedades relevantes sejam reportadas e embasadas em normas reconhecidas.

Tabela 15 – Propriedades físicas e mecânicas disponíveis nos *websites*

E	TP	ρ (kg/m ³)	TU (%)	MOE (MPa)	C _c (kN)	R _r (MPa)	R _f (MPa)	R _c (MPa)	R _t (MPa)	R _{cs} (MPa)
2	BS			30,000.0				300.0	350.0	20.0
3	LBL			27,579.0						
4	LBL			12116.9 (GB/T 50329)	95.3 (GB/T 50329)		110.0 (GB/T 1927)	70.0 (GB/T 1927)	108.08 (GB/T 1927)	
7	LBL	650.0								
8	LBL	1,200.0								
11	LBL	750.0	8 a 10	8,963.2			56.7			
12	BS	1,100.0	10 a 20							
14	BS	1,200.0	8 a 12							
15	LBL	680.0	8 a 12			65.4 (EN 408)	111.75 (EN 310)			
16	LBL	672.8	7 a 11 (ASTM D4442)	8963.2 (ASTM D1037)			77.29 (ASTM D198)	56.9 (ASTM D198)	60.74 (ASTM D198)	20.0 (ASTM D3048)

Legenda: E – Empresas, 2 – Bamboo Era, 3 – ReNüTeq, 4 – Taohuajiang Bamboo, 7 – ASIA Bamboo, 8 – Bambufy, 11 – BWG, 12 – Exterior Bamboo, 14 – Sunzo Bamboo, 15 – Lamboo, 16 – Guadua Bamboo, TP – tipo de produto, ρ – densidade, TU – teor de umidade, MOE – módulo de elasticidade, C_c – capacidade de carga, R_r – resistência de ruptura, R_f – resistência à flexão, R_c – resistência à compressão, R_t – resistência à tração e R_{cs} – resistência ao cisalhamento.

Fonte: Autora (2024).

**6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO *CROSS-
LAMINATED BAMBOO* (CLB)**

6 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CROSS-LAMINATED BAMBOO (CLB)

Este capítulo apresenta os resultados da revisão sistemática da literatura sobre CLB, abrangendo a análise bibliométrica dos documentos selecionados e a síntese das informações coletadas. O objetivo é fornecer uma visão abrangente do estado atual da pesquisa e do desenvolvimento nesse campo.

6.1 CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS

Os resultados obtidos a partir da busca realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS), utilizando a *string* definida, totalizaram 65 documentos identificados. Deste total, 36 documentos foram encontrados na base Scopus e 29 na base Web of Science, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados da *string* de busca para o CLB

<i>String</i>	Scopus	WoS
<i>“cross laminated bamboo” OR “cross-laminated bamboo”</i>	36	29

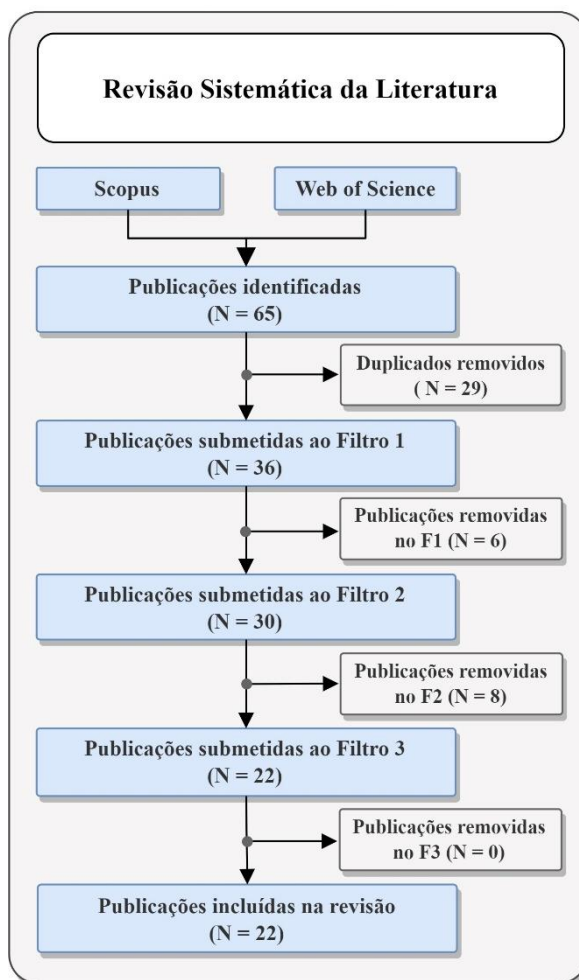
Fonte: Autora (2024).

O fluxograma apresentado na Figura 139 ilustra as etapas conduzidas durante a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), demonstrando o processo de identificação, triagem e seleção de publicações realizadas nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS).

Inicialmente, 65 publicações foram identificadas por meio da *string* de busca aplicada nas bases mencionadas. Em seguida, foi realizada a remoção de 29 publicações duplicadas entre as bases, resultando em 36 publicações únicas submetidas ao primeiro filtro (F1), leitura do título, resumo e palavras-chave. Este filtro teve como objetivo eliminar estudos que não atendiam aos critérios previamente definidos, levando à exclusão de 6 publicações.

As 30 publicações restantes foram submetidas ao segundo filtro (F2), leitura da introdução e conclusão, onde 8 publicações adicionais foram removidas após análise criteriosa. Por fim, 22 publicações foram consideradas adequadas e submetidas ao terceiro filtro (F3), que corresponde ao conjunto final de estudos incluídos para análise detalhada na revisão. Este fluxograma reflete a sistematização e o rigor metodológico aplicados na RSL, garantindo a seleção de estudos de alta relevância e qualidade para responder aos objetivos de pesquisa. A aplicação de múltiplos filtros assegura a exclusão de dados redundantes ou irrelevantes, conferindo maior confiabilidade ao processo.

Figura 139 - Fluxograma PRISMA da Revisão Sistemática da Literatura do CLB



Fonte: Autora (2024).

A Figura 140 apresenta o volume de publicações anuais identificadas a partir da *string* de busca utilizada na pesquisa (detalhada na Tabela 16) em duas bases de dados científicas, Scopus e Web of Science. O gráfico reflete a evolução do interesse acadêmico pelo tema ao longo dos anos.

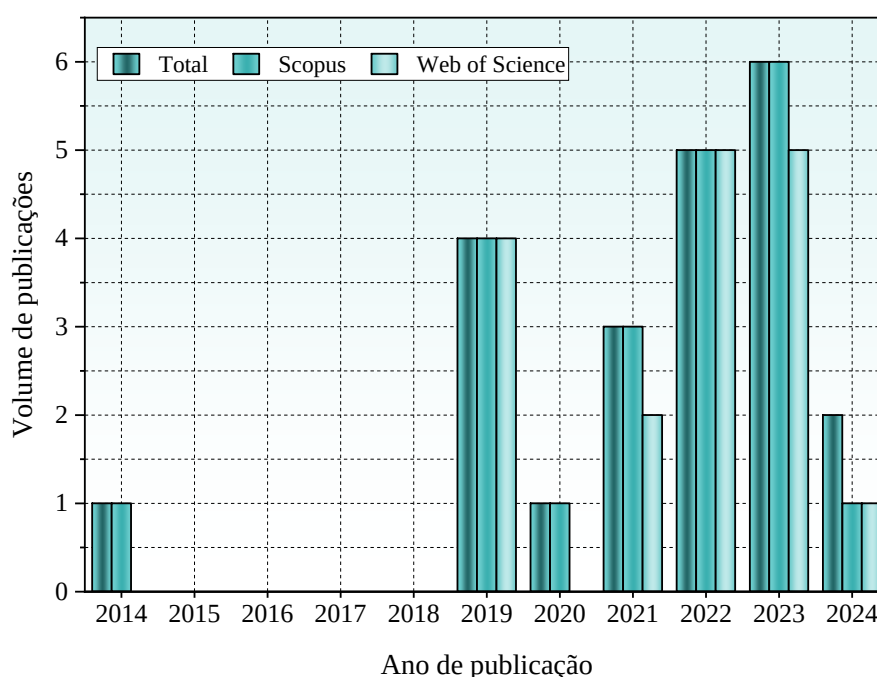
A primeira publicação foi registrada em 2014, marcando o início da pesquisa sobre CLB. Após um intervalo sem publicações significativas nos anos subsequentes, observa-se um aumento gradual a partir de 2019, com destaque para um crescimento mais consistente a partir de 2019. O ano de 2023 apresentou o maior número de publicações, totalizando 6, indicando um pico de interesse e produção científica nessa temática.

A partir de 2020, a contribuição das bases de dados Scopus e Web of Science torna-se mais evidente, com ambas apresentando volumes semelhantes de registros, o que sugere uma maior visibilidade e consolidação do tema nas principais plataformas de indexação científica.

A diminuição no número de publicações em 2024 pode ser atribuída à proximidade temporal da coleta dos dados, uma vez que o ano ainda não estava completo no momento da análise.

Conclui-se que a pesquisa sobre CLB está em franca expansão, com um aumento consistente na produção científica nos últimos anos. Este crescimento reflete o interesse crescente pela utilização do CLB como material estrutural sustentável e inovador, motivado pela busca por soluções mais eficientes e ambientalmente amigáveis na construção civil. Além disso, o pico de publicações em 2023 e a presença constante de registros em bases de dados renomadas indicam que o tema está ganhando destaque no cenário acadêmico global, embora ainda esteja em fase de consolidação. Essa tendência sugere que o campo está amadurecendo e que há potencial para uma expansão ainda maior nos próximos anos, à medida que mais pesquisadores se interessam por essa área.

Figura 140 - Volume de publicações por ano e base de dados



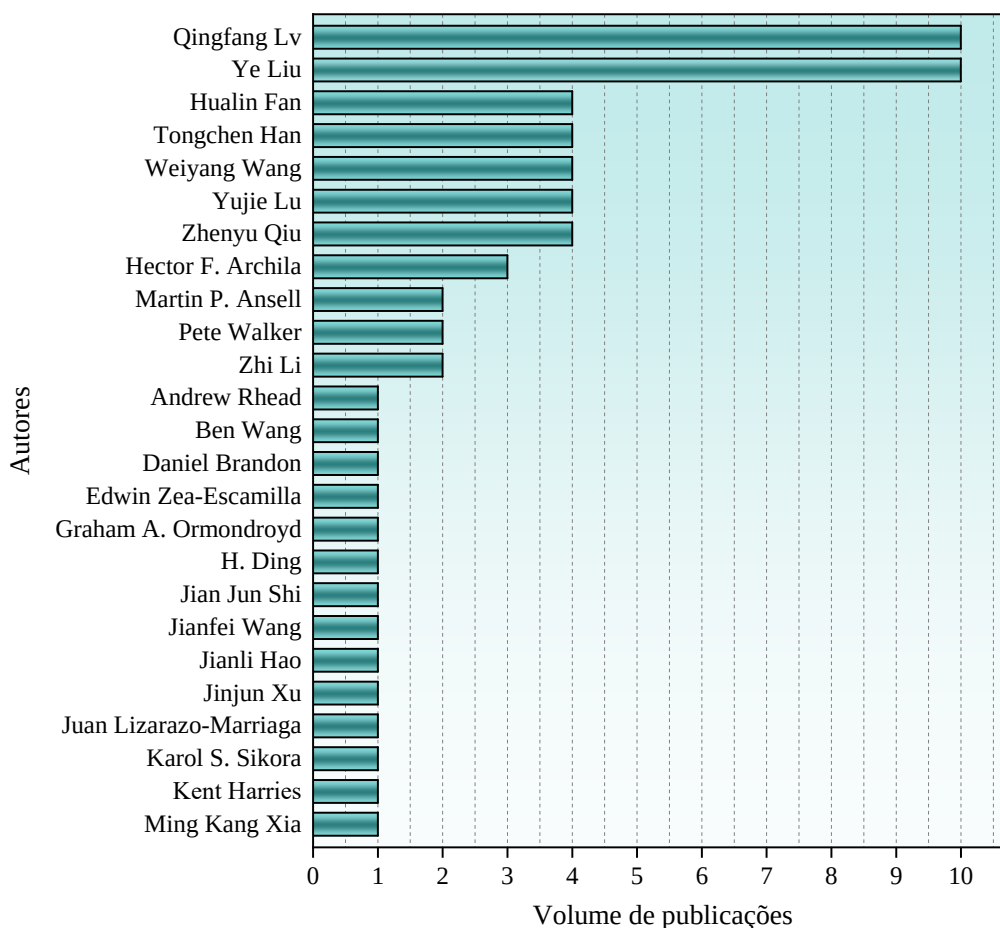
Fonte: Autora (2024).

No gráfico da Figura 141, é apresentado o volume de publicações por autor. Foram identificados, ao todo, 47 autores, dos quais 25 estão representados no gráfico. Destes, 11 autores se destacam por terem publicado dois ou mais artigos relacionados ao tema investigado.

Destaca-se que Qingfang Lv e Ye Liu lideram o volume de publicações, com 10 contribuições cada, indicando um papel central na produção de conhecimento sobre CLB. Estes autores, ao figurarem com um volume significativamente superior de trabalhos, sugerem que

estão na vanguarda dessa linha de pesquisa, provavelmente sendo responsáveis por estabelecer tendências e explorar os principais avanços na área.

Figura 141 – Volume de contribuições por autor



Fonte: Autora (2024).

Autores como Hualin Fan, Tongchen Han, Weiyang Wang e Yujie Lu aparecem com 4 publicações cada, indicando também um envolvimento ativo, embora menos destacado do que os principais líderes da área. Seguem-se outros pesquisadores, como Zhenyu Qiu e Hector F. Archila, com 3 publicações, demonstrando uma presença relevante no desenvolvimento de estudos sobre CLB.

A partir dos dados, é evidente que a produção científica sobre CLB está concentrada em um grupo seleto de autores, refletindo a relativa novidade e especialização do tema. No entanto, observa-se a maioria pesquisadores com uma ou duas publicações, como Jianfei Wang, Juan Lizáro-Marriaga e Karol S. Sikora, o que pode indicar um aumento no interesse por esta temática por parte de novos pesquisadores ou grupos de pesquisa emergentes.

Esta concentração de publicações entre poucos autores sugere que a área de CLB, embora promissora, ainda está em consolidação, com núcleos bem definidos de pesquisa. Isso pode refletir uma necessidade de maior disseminação do tema entre diferentes instituições e regiões geográficas, visando diversificar as abordagens e expandir a base de conhecimento. Além disso, os pesquisadores com maior número de contribuições podem ser considerados como referências e potenciais colaboradores para futuros trabalhos, dada a experiência acumulada na temática.

O gráfico da Figura 142 sintetiza as 10 afiliações com maior número de publicações sobre o CLB, identificadas durante a revisão sistemática. Essas instituições e centros de pesquisa participaram de pelo menos duas publicações cada, destacando-se entre as 30 afiliações identificadas no total. A análise dos dados permite compreender a distribuição institucional da produção científica nesse campo emergente.

O Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, lidera com 10 publicações, evidenciando seu papel central no avanço das pesquisas sobre CLB. Em seguida, o Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Sichuan University, contribuiu com 8 publicações, confirmando sua relevância na investigação de materiais estruturais inovadores.

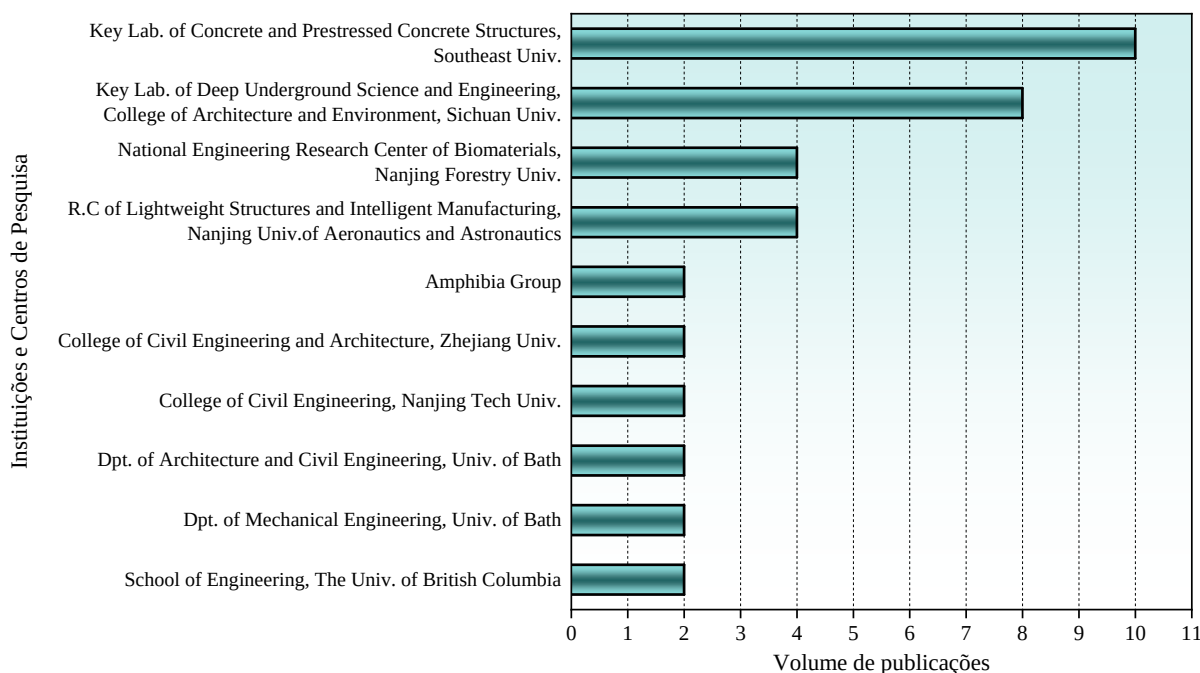
Outras instituições de destaque incluem o National Engineering Research Center of Biomaterials, Nanjing Forestry University, e o Research Center of Lightweight Structures and Intelligent Manufacturing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, ambos com 4 publicações, refletindo o papel ativo da China no desenvolvimento de tecnologias e pesquisas relacionadas ao CLB.

Os demais centros e universidades, como o Amphibia Group, o College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, e o Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, contribuíram com 2 publicações cada, indicando um interesse mais distribuído em diferentes regiões, como a Europa, que também figura na lista com a presença da University of Bath e da University of British Columbia.

A produção científica sobre CLB é dominada por instituições chinesas, o que reflete a relevância do material no contexto local, considerando a abundância de bambu e o foco do país em soluções sustentáveis para a construção civil. A presença de instituições de outras regiões, como Reino Unido e Canadá, sugere um crescente interesse global pelo tema, indicando a possibilidade de maior internacionalização da pesquisa no futuro. Além disso, a concentração de publicações em algumas instituições pode estar relacionada ao pioneirismo dessas

organizações no desenvolvimento de tecnologias e métodos para o estudo do CLB. Esses dados apontam para a importância de iniciativas colaborativas internacionais que possam ampliar a base de conhecimento e diversificar as abordagens de pesquisa nesse campo.

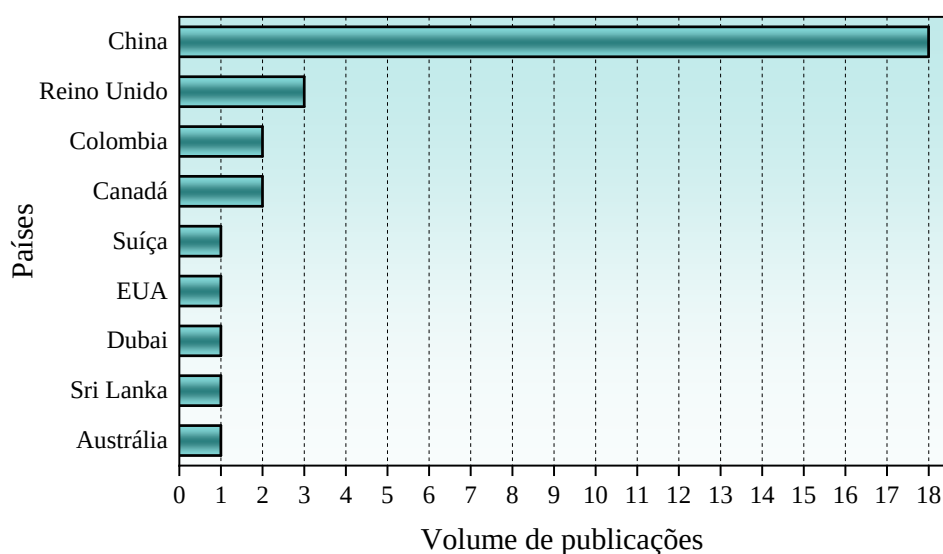
Figura 142 – Instituições e Centros de Pesquisa atuantes nas publicações



Fonte: Autora (2024).

A Figura 143 apresenta o volume de publicações por país. O gráfico demonstra uma distribuição geográfica da produção científica no campo de pesquisa investigado.

Figura 143 – Volume de publicações por país



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que a China domina significativamente o cenário de publicações, com 18 artigos, o que corresponde a uma parcela majoritária da produção científica analisada. Essa liderança pode ser atribuída à ampla disponibilidade de bambu no país, bem como aos esforços de pesquisa e inovação voltados para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis.

Seguindo a China, o Reino Unido apresenta um volume de 3 publicações, representando uma contribuição menor, mas ainda relevante, possivelmente relacionada à crescente preocupação com a sustentabilidade no setor da construção civil e ao interesse acadêmico em materiais de base biológica. Colômbia e Canadá aparecem com 2 publicações cada, sugerindo um envolvimento emergente desses países na temática, o que pode estar ligado ao uso potencial do bambu como recurso local (no caso da Colômbia) e ao interesse em inovação sustentável (no caso do Canadá).

Outros países, como Suíça, EUA, Dubai, Sri Lanka e Austrália, contribuíram com 1 publicação cada. Essa distribuição sugere que a pesquisa sobre CLB ainda está em sua fase inicial em muitas regiões, com esforços isolados em diversos países. Isso pode refletir o estado emergente do campo e a necessidade de maior colaboração e disseminação global sobre o tema.

Com base nos dados apresentados, conclui-se que a pesquisa sobre CLB está concentrada predominantemente na China, que desempenha um papel central no avanço dessa tecnologia. No entanto, a presença de publicações em outros países demonstra um interesse crescente e uma possível expansão da temática para diferentes contextos. Este cenário reforça a importância de iniciativas internacionais de colaboração e intercâmbio de conhecimentos para promover o desenvolvimento do CLB em uma escala global, aproveitando o potencial sustentável deste material em diferentes realidades econômicas e ambientais.

A Figura 144 sintetiza as metodologias predominantes adotadas nas publicações revisadas sobre o CLB, destacando a frequência com que cada abordagem é utilizada. Os resultados indicam que a Metodologia Experimental é a mais empregada, correspondendo a 17 publicações. Essa prevalência reflete a necessidade de validar as propriedades mecânicas, estruturais e físicas do CLB por meio de ensaios laboratoriais, considerando a natureza relativamente nova desse material no contexto de aplicações estruturais. A predominância da Metodologia Experimental reflete o estágio de desenvolvimento do CLB, no qual as propriedades fundamentais do material ainda estão sendo exploradas e validadas.

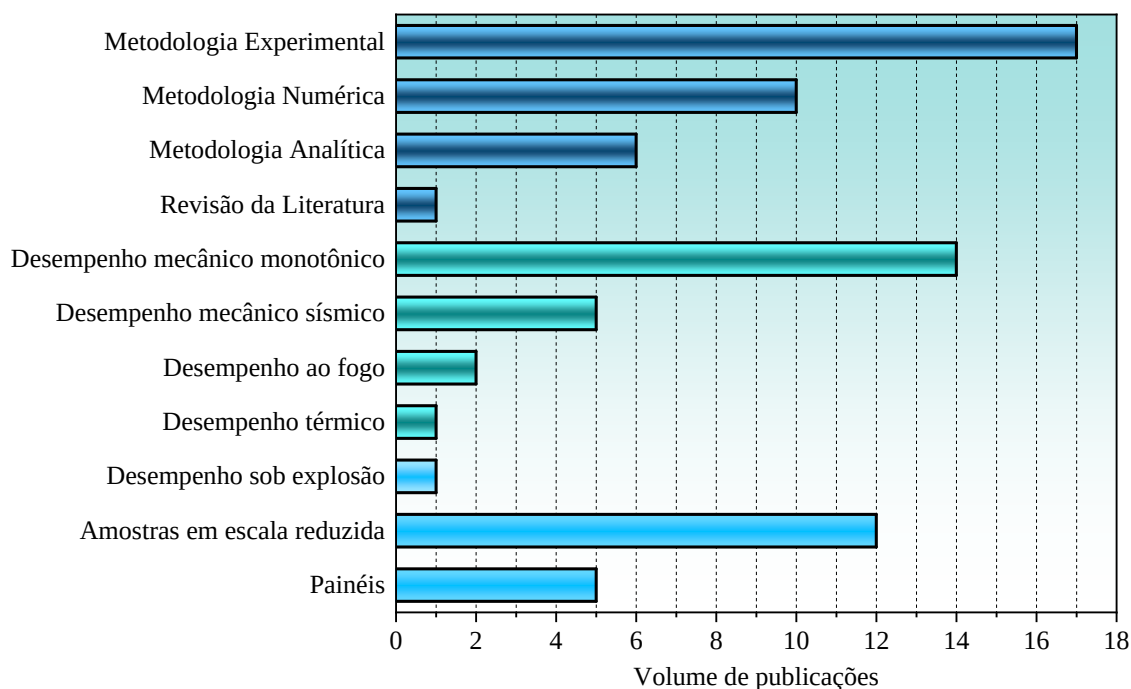
A Metodologia Numérica, com 10 publicações, também apresenta relevância, evidenciando o uso de simulações computacionais para prever o comportamento estrutural do

CLB. Essa abordagem complementa os estudos experimentais ao permitir a análise de cenários complexos e a otimização do desempenho estrutural.

A Metodologia Analítica, embora menos frequente, foi adotada em 6 estudos. Essa metodologia é geralmente utilizada para desenvolver modelos teóricos e equações simplificadas que auxiliam na caracterização do comportamento do CLB, servindo como base para validações numéricas e experimentais. Por fim, as Revisões da Literatura aparecem em apenas uma publicação, destacando uma lacuna na consolidação e síntese dos conhecimentos existentes.

A distribuição das metodologias destaca o caráter interdisciplinar da pesquisa sobre o CLB, combinando ensaios empíricos, modelagens numéricas e análises teóricas para explorar o potencial desse material.

Figura 144 – Distribuição do Volume de Publicações por Metodologias, Propriedades Investigadas e Tipos de Elementos Estudados em CLB



Fonte: Autora (2024).

A Figura 144 também categoriza os estudos revisados sobre CLB com base nas propriedades investigadas, evidenciando as áreas de maior interesse e lacunas na pesquisa científica. Entre os temas investigados, destaca-se o desempenho mecânico monotônico, com 14 publicações. Este número expressivo evidencia a importância de compreender o comportamento estrutural básico do CLB sob carregamentos estáticos, essencial para validar sua aplicação em construções e projetos que demandam resistência mecânica.

O desempenho mecânico sísmico aparece como o segundo tema mais investigado, com 5 publicações. Isso reflete a crescente preocupação com o uso do CLB em regiões sujeitas a atividades sísmicas, destacando a necessidade de avaliar sua capacidade de dissipação de energia e de suportar deslocamentos relativos sem comprometer a integridade estrutural.

O foco predominante em desempenho mecânico monotônico e sísmico indica que a pesquisa atual está amplamente voltada para estabelecer a confiabilidade estrutural do CLB, especialmente em condições de carregamento estático e dinâmico.

Outras áreas de pesquisa, como o desempenho ao fogo (2 publicações), desempenho térmico (1 publicação) e desempenho sob explosão (1 publicação), apresentam menor volume de estudos. Essas áreas são cruciais para garantir a segurança e a viabilidade do CLB em aplicações específicas, como construções de grande porte, edifícios públicos e instalações em ambientes extremos.

A Figura 144 categoriza os estudos de acordo com os tipos de elementos investigados, destacando suas escalas e aplicações. Essa classificação reflete a diversidade das abordagens utilizadas pelos pesquisadores para analisar o desempenho do CLB em diferentes níveis, desde ensaios com amostras simplificadas até estudos em escala real.

Os resultados revelam que as amostras em escala reduzida são o tipo de elemento mais investigado, com 12 publicações. Essa predominância pode ser atribuída à facilidade de manipulação, à redução de custos e à possibilidade de realizar ensaios controlados em laboratório para estudar propriedades fundamentais do material, como resistência mecânica e comportamento sob carregamento.

Os painéis em escala mais real aparecem como foco de 5 publicações. Esses estudos buscam replicar condições mais próximas das aplicações práticas, permitindo a análise de aspectos como desempenho estrutural global, comportamento à flexão e interações entre camadas de CLB. Outro elemento relevante são as paredes oscilantes protendidas, também investigadas em 5 publicações. Esses estudos se concentram no comportamento dinâmico e na capacidade de autocentramento dessas paredes, aspectos essenciais para o uso do CLB em regiões sujeitas a atividades sísmicas.

A escolha do tipo de elemento investigado reflete a etapa do desenvolvimento tecnológico do CLB. Amostras em escala reduzida predominam em estudos que buscam estabelecer fundamentos, enquanto painéis e paredes oscilantes protendidas são mais explorados para validar o desempenho em sistemas construtivos completos.

A Tabela 17 organiza as palavras-chave dos artigos da revisão, juntamente com suas respectivas frequências, permitindo identificar os principais temas abordados na pesquisa sobre o CLB. A palavra-chave mais frequente é “*cross-laminated bamboo (CLB)*”, mencionada 13 vezes. Em seguida, aparecem palavras-chave como “*rocking wall*”, com 4 ocorrências, e “*anisotropy*”, com 3 ocorrências, indicando a relevância de tópicos relacionados ao desempenho sísmico, representado pelas paredes oscilantes, e às propriedades anisotrópicas do bambu, características fundamentais para compreender e otimizar o comportamento estrutural do CLB.

Termos como “*self-centering*”, com 2 ocorrências, “*buckling-restrained*”, “*damper*” e “*posttensioned rebar*”, com uma ocorrência cada, também estão associados ao estudo de paredes oscilantes. Assim como, termos tais quais “*quasi-static test*” e “*seismic performance*”, com uma ocorrência cada, também reforçam o foco das pesquisas no desempenho sísmico do CLB.

Outras palavras-chave como “*charring rate*”, com 2 ocorrências, “*charring depth*”, “*one-sided fire*” e “*standard fire testing*”, com uma ocorrência cada, refletem o interesse dos pesquisadores em investigar o desempenho do CLB em situações de exposição ao fogo. Já termos como “*mechanical properties*”, com 2 ocorrências, “*bending properties*”, “*bonding shear strength*”, “*residual bearing capacity*”, “*structural performance*”, “*rolling shear*”, “*compression test*”, “*in-plane diagonal shear test*”, com uma ocorrência cada, evidenciam o foco no estudo das propriedades mecânicas e do desempenho estrutural do CLB.

Além disso, termos como “*numerical analysis*”, com 2 ocorrências, e “*finite element model*”, com uma ocorrência, revelam o interesse dos estudos na adoção de metodologias numéricas para avaliação do desempenho do CLB. No campo do desempenho térmico, palavras-chave como “*insulation performance*”, “*steady-state heat transfer*”, “*temperature profile model*”, “*temperature-controlled box-heat flow meter method*” e “*thermal*”, com uma ocorrência cada, demonstram o interesse em compreender o comportamento do material em relação à transferência de calor e isolamento térmico.

A análise das palavras-chave evidencia que os estudos sobre o CLB estão em expansão, com ênfase em suas propriedades mecânicas, desempenho em situações de incêndio e comportamento sísmico. A utilização de ferramentas computacionais tem desempenhado um papel fundamental no avanço deste campo. A dispersão das palavras-chave pode ser atribuída à recente emergência do tema, dado que as primeiras publicações sobre CLB surgiram em 2014.

Essa característica é típica de áreas de pesquisa em consolidação, onde os estudos abordam uma ampla variedade de aspectos fundamentais do material e suas aplicações.

Essa dispersão, no contexto do CLB, reflete a fase inicial de desenvolvimento do campo, marcada pela exploração de tópicos diversos, desde propriedades intrínsecas do material até seu desempenho estrutural, térmico e sísmico, além de metodologias analíticas e experimentais. Essa diversidade de enfoques demonstra o potencial do CLB como um material inovador, mas também destaca a necessidade de estabelecer uma base de conhecimento consolidada que norteie investigações futuras.

À medida que a pesquisa avança, espera-se que algumas subáreas recebam maior destaque, promovendo uma uniformidade no uso das palavras-chave e uma delimitação mais clara dos temas centrais. Esse processo contribuirá para o fortalecimento e a consolidação do campo, direcionando esforços para os tópicos mais promissores e relevantes no desenvolvimento do CLB.

Tabela 17 – Palavras chaves das publicações revisadas

Palavras-chave	Frequência	Palavras-chave	Frequência
<i>Cross-laminated bamboo (CLB)</i>	13	<i>Failure</i>	1
<i>Rocking wall</i>	4	<i>Finite element model</i>	1
<i>Anisotropy</i>	3	<i>Fracture</i>	1
<i>Bamboo</i>	3	<i>Fracture toughness</i>	1
<i>Charring rate</i>	2	<i>Friction dampers</i>	1
<i>Mechanical properties</i>	2	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	1
<i>Numerical analysis</i>	2	<i>Guarded hot plate method</i>	1
<i>Self-centering</i>	2	<i>In-plane diagonal shear test</i>	1
<i>Adhesives</i>	1	<i>Insulation performance</i>	1
<i>Analytical modelling</i>	1	<i>Laminate</i>	1
<i>Bamboo fibers</i>	1	<i>Laminated theory</i>	1
<i>Bamboo plate</i>	1	<i>One-sided fire</i>	1
<i>Bamboo scrimber</i>	1	<i>Parametric analyses</i>	1
<i>Bending properties</i>	1	<i>Plywood</i>	1
<i>Bonding shear strength</i>	1	<i>Posttensioned rebar</i>	1
<i>Buckling-restrained</i>	1	<i>Quasi-static test</i>	1
<i>Charring depth</i>	1	<i>R-curve</i>	1
<i>Compression test</i>	1	<i>Residual bearing capacity</i>	1
<i>Connections</i>	1	<i>Rolling shear</i>	1
<i>Crack simulation</i>	1	<i>Seismic performance</i>	1
<i>Cross-laminated panels</i>	1	<i>Shear analogy method</i>	1
<i>Cross-laminated timber</i>	1	<i>Standard fire testing</i>	1
<i>Damper</i>	1	<i>Steady-state heat transfer</i>	1

<i>Design procedure</i>	1	<i>Structural performance</i>	1
<i>Digital image correlation</i>	1	<i>Temperature profile model</i>	1
<i>Displacement-based design</i>	1	<i>Temperature-controlled box-heat flow meter method</i>	1
<i>Energy dissipater</i>	1	<i>Thermal</i>	1
<i>Energy release</i>	1	<i>Timber engineering</i>	1
<i>Engineered bamboo products</i>	1	<i>Time-location model</i>	1
<i>Explosion</i>	1	<i>Treatment</i>	1

Fonte: Autora (2024).

As tabelas a seguir (Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20) sintetizam as propriedades mecânicas obtidas em experimentos realizados em diferentes estudos sobre o CLB. Essas propriedades são fundamentais para compreender o comportamento estrutural do CLB e validar sua aplicação em projetos de engenharia.

A resistência e o módulo de elasticidade de flexão são consistentemente mais elevados na direção principal em comparação à direção secundária, como esperado devido à orientação das fibras de bambu. O CLB-8 BSC apresentou valores elevados de resistência à flexão (75.77 a 79.78 MPa) e módulo de elasticidade (8.31 a 10.04 GPa). Valores de rigidez à flexão variam amplamente, refletindo a influência da configuração e espessura das camadas. Esses dados destacam a importância da orientação das fibras e do número de camadas para o desempenho estrutural.

O CLB demonstra desempenho superior em todas as propriedades analisadas, incluindo carga máxima, resistência à flexão, módulo de elasticidade, capacidade de momento e rigidez à flexão efetiva, quando comparado ao CLT. A superioridade do CLB é mais evidente nas configurações com *bamboo scrimber* (BSC), que apresentam valores significativamente maiores do que as configurações típicas do CLT feitas com madeira como *Hem-fir*, Abeto Chinês ou Abeto Norueguês.

Tabela 18 – Propriedades de flexão do CLB

	TP	P _{máx} (kN)	R _{F,0} (MPa)	R _{F,90} (MPa)	E _{F,0} (GPa)	E _{F,90} (GPa)	M _{máx} (kN·m)	EI _{eff} N.mm ²	REF
CLB-8	BSC	-	79.78	64.26	8.31	5.50	-	-	1
CLB-8	BSC	31.57	75.77	49.79	10.04	5.50	-	-	2
CLB-5	BSC	137.40	51.86	-	17.95	-	37.79	7.11	3
CLB-7	BSC	145.70	46.01	-	17.95	-	40.07	7.43	
CLB-5	BSC	58.80	59.92	-	17.95	-	16.17	1.53	
CLB-3	LB	173.35	-	-	-	-	-	-	4
CLB-5	LB	138.80	-	-	-	-	-	-	5

CLB-7	LB	144.20	-	-	-	-	-	-	-
CLB-5	LB	58.00	-	-	-	-	-	-	-
CLT-3	HF	-	47.30	6.40	10.28	0.57	2.97	16.50	6
CLT-3	AC	-	10.69	-	-	-	11.04	-	7
CLT-3	AN	-	24.00	-	12.00	0.37	-	-	8

Legenda: TB – Tipo de bambu engenheirado; REF – Referência; BSC – *Bamboo scrimber*; LB – *Laminated bamboo*; HF – *Hem-fir*; AC – Abeto chinês; AB – Abeto norueguês; $P_{\max}$ – Carga máxima; $R_{F,0}$ – Resistência à flexão na direção principal; $R_{F,90}$ – Resistência à flexão na direção secundária; $E_{F,0}$ – Módulo de elasticidade de flexão na direção principal; $E_{F,90}$ – Módulo de elasticidade de flexão na direção secundária; $M_{\max}$ – Capacidade de momento; EI_{eff} – Rigidez à flexão efetiva; 1 – Qiu e Fan (2022); 2 – Qiu, Zhu e Fan (2023); 3 – Lv, Wang e Liu (2019); 4 – Qiu, Yang e Fan (2024); 5 – Ding e Lv (2020); 6 – Li *et al.* (2021); 7 – Zhang *et al.* (2023); 8 – Anwar-Us-saadat *et al.* (2022).

Fonte: Autora (2024).

Valores de resistência à compressão ($R_{C,0}$) e à tração ($R_{T,0}$) são maiores na direção principal, como evidenciado no CLB-8 BSC, que apresentou $R_{C,0}$ de 54.34 MPa e $R_{T,0}$ de 63.48 MPa. O módulo de elasticidade em compressão ($E_{C,0}$) variou entre 6.61 GPa (CLB-8 BSC) e 22.59 GPa (CLB-5 LB), enquanto para tração ($E_{T,0}$), os valores atingiram até 6.55 GPa no CLB-8 BSC.

O CLB apresenta vantagens claras em todas as propriedades analisadas, incluindo resistência e módulo de elasticidade tanto para compressão quanto para tração, em ambas as direções principal e secundária. O desempenho superior do CLB pode ser atribuído às propriedades do bambu engenheirado, que conferem maior rigidez e resistência em comparação à madeira sólida utilizada no CLT. Esses resultados reforçam o potencial do CLB como um material mais eficiente para aplicações estruturais onde são necessárias altas resistências e rigidez à compressão e tração.

Tabela 19 – Propriedades de compressão e tração do CLB

	TP	$R_{C,0}$ (MPa)	$R_{C,90}$ (MPa)	$E_{C,0}$ (GPa)	$E_{C,90}$ (GPa)	$R_{T,0}$ (MPa)	$R_{T,90}$ (MPa)	$E_{T,0}$ (GPa)	$E_{T,90}$ (GPa)	REF
CLB-8	BSC	54.34	53.45	6.61	7.48	63.48	71.78	6.55	6.40	1
CLB-3	LB	-	-	17.22	2.43	-	-	-	-	2
CLB-3	LB	-	-	14.86	7.43	-	-	-	-	
CLB-5	LB	-	-	15.67	9.46	-	-	-	-	
CLB-5	LB	-	-	12.48	8.74	-	-	-	-	3
CLB-3	LB	-	-	13.50	5.28	-	-	-	-	
CLB-5	LB	-	-	22.59	12.54	-	-	-	-	
CLT-5	SPF	18.43	-	-	-	-	-	-	-	4
CLT-5	SPF	16.30	-	-	-	-	-	-	-	5
CLT-5	SPF	20.40	12.00	6.72	5.10	-	-	-	-	6
CLT-3	AN	28.86	19.80	-	-	17.38	16.24	-	-	7

Legenda: TB – Tipo de bambu engenheirado; REF – Referência; BSC – *Bamboo scrimber*; LB – *Laminated bamboo*; SPF – Spruce-pine-fir; AN – Abeto norueguês; $R_{C,0}$ – Resistência à compressão na direção principal; $R_{C,90}$ – Resistência à compressão na direção secundária; $R_{T,0}$ – Resistência à tração na direção principal; $R_{T,90}$ – Resistência à tração na direção secundária; $E_{C,0}$ – Módulo de elasticidade de compressão direção principal; $E_{C,90}$ – Módulo de elasticidade de compressão direção secundária; $E_{T,0}$ – Módulo de elasticidade de tração na direção principal; $E_{T,90}$ – Módulo de elasticidade de tração na direção secundária; 1 – Qiu e Fan (2022); 2 – Archila *et al.* (2017); 3 – Archila *et al.* (2014); 4 – Fan *et al.* (Fan *et al.*, 2021); 5 – Li *et al.* (2024a); 6 – Li *et al.* (2023a); 7 – Anwar-Us-saadat *et al.* (2022).

Fonte: Autora (2024).

Valores da resistência da linha de colagem variam de 2.28 MPa (BSC) a 10.20 MPa (CLB-3 LB), indicando dependência do tipo de adesivo e da qualidade da linha de colagem. A resistência ao cisalhamento transversal apresentou maior variação, com valores de até 10.60 MPa (CLB-3 LB). Estudos mostraram diferenças significativas em função do tipo de bambu utilizado.

O CLB novamente demonstra desempenho superior. Por exemplo, o CLB-3 (LB) alcança valores de Resistência ao cisalhamento transversal de até 10.6 MPa, enquanto o CLT com abeto chinês apresenta apenas 1.75 MPa e o CLT com abeto norueguês, 1.29 MPa. Esses resultados indicam maior resistência ao cisalhamento transversal do CLB em relação ao CLT, independentemente do tipo de madeira utilizada no CLT.

Tabela 20 – Propriedades de cisalhamento do CLB

	TB	R_{LC} (MPa)	R_{CT} (MPa)	E_{CT} (MPa)	REF
CLB-3	LB	10.20	4.26	87.61	1
	LB	-	2.91	147.90	
CLB-3	LB	-	10.60	146.00	2
	LB	-	9.45	-	
	LB	-	9.40	-	
CLB-2	LB	2.37	-	-	3
	LB	2.36	-	-	
	LB	2.29	-	-	
	BSC	2.28	-	-	
CLT	AC	-	1.75	-	4
	AN	-	1.29	-	5

Legenda: TB – Tipo de bambu engenheirado; BSC – *Bamboo scrimber*; LB – *Laminated bamboo*; AC – Abeto chinês; AN – Abeto norueguês; REF – Referência; R_{LC} – Resistência da linha de colagem; R_{CT} – Resistência ao cisalhamento transversal; E_{CT} – Módulo de cisalhamento transversal; 1 – Li Z. *et al.* (2022); 2 – Wang *et al.* (2024); 3 – Xing, Hao e Sikora (2019); 4 – Zhang *et al.* (2023); 5 – Anwar-Us-saadat *et al.* (2022).

Fonte: Autora (2024).

6.2 PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS

6.2.1 Amostras de CLB em escala reduzida

Esta seção apresenta os principais resultados acerca dos estudos realizados em amostras de CLB em escala reduzida, ou seja, com dimensões significativamente inferiores às dimensões reais de um elemento estrutural.

6.2.1.1 Desempenho do CLB sob compressão

Archila *et al.* (2014) avaliaram as propriedades mecânicas de painéis de CLB por meio de ensaios de compressão. O método de correlação de imagem digital (DIC) foi utilizado para medir variações de deformação. Os painéis apresentaram capacidade de carga significativa, com melhores propriedades mecânicas em comparação com produtos de madeira engenheirada, como painéis de CLT. Os modos de falha observados nos testes experimentais incluem deformações localizadas nas áreas com lacunas devido a defeitos de fabricação.

Em particular, as lacunas nos painéis de CLB foram identificadas como responsáveis por deformações localizadas na direção radial, observadas nos mapas de deformação tridimensionais gerados por DIC. Este comportamento foi mais evidente nos painéis com três camadas, onde a presença de lacunas reduziu a rigidez compressiva geral em cerca de 10%. Além disso, os mapas de deformação indicaram áreas suscetíveis a deformações nessas regiões, destacando a influência dos defeitos na redução do desempenho mecânico dos painéis. Esses resultados foram corroborados por análises realizadas com o modelo de elementos finitos, que também demonstraram o impacto das lacunas na rigidez dos painéis. Não foram registradas deformações permanentes após os testes nos eixos de carga longitudinal e transversal.

Archila *et al.* (2017) também avaliaram as propriedades mecânicas do CLB em testes de compressão axial nas direções principal e secundária, utilizando métodos de medição de contato (LVDT) e não-contato (DIC). Os resultados dos testes com DIC e LVDT indicaram que os valores do módulo de elasticidade longitudinal foram de 50% a 70% superiores aos do módulo de elasticidade transversal em ambos os tipos de painéis. Os valores obtidos por meio do método DIC apresentaram maior variabilidade e superaram as previsões analíticas e os resultados dos LVDTs. Apesar do grande potencial dos métodos de medição sem contato para testes não destrutivos, são necessários ajustes no método DIC, como no padrão de pontos, para reduzir o coeficiente de variação.

A maior rigidez dos painéis na direção principal é atribuída à proporção relativamente maior de material orientado longitudinalmente na direção da carga. A menor razão de esbeltez dos painéis de cinco camadas reduziu os efeitos de flambagem, enquanto o CLB de três camadas, com maior esbeltez, apresentou deformação fora do plano e menores valores de módulo de elasticidade transversal. De modo geral, os painéis com um quinto da espessura da seção transversal e o dobro da densidade de painéis de CLT análogos, apresentaram um aumento de aproximadamente duas vezes em ambos os módulos de elasticidade.

Qiu e Fan (2022) investigaram o comportamento mecânico anisotrópico de amostras de CLB, com a orientação das fibras variando de 0° a 90° em intervalos de 15° . Os resultados experimentais mostram que a estrutura laminada cruzada atenua significativamente a anisotropia do compósito de bambu. Além disso, o CLB também apresenta boa resistência e rigidez, podendo ser um excelente material para estruturas planas. A resistência à compressão do PBSL varia significativamente com a orientação das fibras, apresentando uma razão máxima de 3.54 entre 0° e 90° . Em contraste, no CLB, essa variação é menos pronunciada, com uma razão máxima de 1.38 entre 15° e 45° e apenas 1.02 entre 0° e 90° . O mesmo padrão é observado no módulo de elasticidade, com o PBSL exibindo uma razão máxima de 4.65, enquanto no CLB essa razão é de 1.79.

Em compressão, as curvas de carga-deslocamento apresentam três estágios principais: deformação elástica, elasto-plástica e pós-falha. A capacidade de carga compressiva do CLB é semelhante em diferentes ângulos, exceto a 45° , onde é ligeiramente menor. Conforme Qiu e Fan (2022), as fissuras no CLB seguem a direção das fibras da camada externa, com delaminação interlaminar como padrão de falha predominante. Essa delaminação resulta da discrepância no módulo de elasticidade e na deformação entre camadas adjacentes com orientações ortogonais, caracterizando o comportamento do material sob compressão.

6.2.1.2 Desempenho do CLB sob tração

Em Qiu e Fan (2022), as curvas carga-deslocamento do CLB sob tração apresentaram uma deformação linear sem estágio plástico evidente, sendo caracterizadas por falha frágil. A capacidade de carga última em tração nas direções de 0° e 90° do CLB é maior do que em outras direções, enquanto há pouca diferença na capacidade de carga em outros ângulos. A resistência máxima do CLB é 71.78 MPa, 47.28% da resistência máxima do PBSL, correspondente ao ângulo de fibra de 90° . A resistência à tração no ângulo de 45° é a mínima, 21.56 MPa, 3.40 vezes o mínimo do PBSL. A resistência à tração em outros ângulos é aproximadamente

simétrica em relação ao ponto de simetria de 45°. A resistência no PBSL varia significativamente com o ângulo, alcançando razão máxima de 23.91 vezes entre 0° e 90°. No CLB, a variação é menor, com razões máximas de 3.33 entre 90° e T4 45° e 1.13 entre 90° e 0°. A mesma tendência é refletida no módulo elástico.

A fissura na camada externa segue a direção da fibra. Apenas um corpo de prova (à 0°) apresentou fissura transversal à fibra da camada externa. A maioria das fissuras ocorreu na região central da amostra, e a fissura apresenta uma linha ondulada irregular contínua e transversal. As fissuras iniciam em alguma camada e depois se estendem para todas as camadas instantaneamente. Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi observada falha da matriz e falha das fibras, que correspondem às fraturas das lâminas paralelas e transversais, respectivamente.

6.2.1.3 Desempenho do CLB sob flexão

Qiu e Fan (2022) investigaram o comportamento do CLB sob flexão, destacando diferenças em relação ao PBSL. Embora a orientação fora do eixo tenha algum impacto nas propriedades mecânicas do CLB, esse efeito é muito menos significativo quando comparado ao PBSL. As melhores propriedades de flexão do CLB são observadas na orientação de 15°, enquanto a orientação de 45° resulta no desempenho mais fraco em flexão. Os resultados mostram que o PBSL apresenta alta anisotropia, com a resistência à flexão variando em até 11.28 vezes entre 0° e 90°. Em contraste, o CLB exibe menor anisotropia, com uma variação máxima de apenas 2.10 vezes entre 15° e 45°. O módulo de elasticidade do CLB também se mostra mais estável, corroborando sua menor anisotropia em comparação ao PBSL.

As trincas nos CLBs seguem predominantemente a direção das fibras da camada externa, com apenas uma amostra apresentando trinca transversal. Na laminação frontal, observa-se um padrão de falha híbrido, combinando ruptura de fibras e delaminação local. Comparado ao CLT de três camadas, o CLB apresenta falhas camada por camada, com restrição da falha por cisalhamento no núcleo, o que contribui para sua excelente resistência à flexão. As curvas de deflexão dos CLBs dividem-se em três estágios: elástico, deformação não linear e pós-falha. No estágio pós-falha, após uma queda abrupta ao atingir cerca de 10 mm de deflexão, a carga reduz gradualmente, enquanto os corpos de prova mantêm uma capacidade residual de carga.

Posteriormente, Qiu, Zhu e Fan (2023) investigaram as propriedades do CLB por meio do ensaio de flexão de quatro pontos. As propriedades do CLB e do PBSL foram avaliadas nas

direções paralela e perpendicular às fibras, investigando o efeito da estrutura laminada cruzada na redução da anisotropia. No PBSL, a deformação no meio do vão foi de aproximadamente 12000 $\mu\epsilon$ na direção paralela e 4100 $\mu\epsilon$ na direção perpendicular às fibras. Para o CLB, a deformação foi de 8000 $\mu\epsilon$ com camadas externas na direção longitudinal e 4300 $\mu\epsilon$ na direção transversal. A razão entre a resistência paralela e a transversal diminuiu significativamente, de 8.32 no PBSL para 1.52 no CLB. Com propriedades mecânicas mais equilibradas em todas as direções, o CLB se destaca como uma solução promissora para aplicações em estruturas de placas na engenharia civil.

A falha dos PBSLs ocorre tipicamente por flexão, iniciando na parte inferior da placa, enquanto os CLBs apresentam falhas mais variadas, incluindo flexão, cisalhamento e falha interfacial. O PBSLh rompe-se instantaneamente em duas seções ao atingir a carga máxima, enquanto o CLBh apresenta um processo de dano progressivo. As curvas carga-deslocamento de CLB e PBSL na direção longitudinal mostraram comportamento quase linear até a falha. Na direção transversal, o CLB exibiu decréscimos de carga em degraus após o pico, enquanto o PBSL manteve comportamento quase linear até a falha.

Qiu, Yang e Fan (2024) investigaram o comportamento de falha de painéis de bambu laminado, PBSL e CLB sob cargas de flexão. Além disso, analisaram a capacidade residual de carga das placas após serem submetidas a explosões. De modo geral, a combinação ortogonal melhora as propriedades de flexão das placas, provavelmente porque a estrutura ortogonal inibe a fissuração inicial. A capacidade de carga do CLB é melhor que a do PBSL, mas a capacidade residual do PBSL é superior à do CLB. Isso revela que a estrutura de camadas ortogonais pode aumentar a capacidade de carga última ao atenuar a anisotropia do material, embora induza uma menor resistência interfacial após a explosão. Durante o processo de carregamento de placas de BFRc com estrutura de camadas ortogonais, a deformação da placa é consistente em todas as direções, dificultando a ocorrência de fissuração na matriz, o que reduz efetivamente a anisotropia. Além disso, o CLB apresentou falha frágil ao atingir a carga máxima, com queda brusca da carga para metade do pico, seguida por uma fase de platô plástico, e a fissuração inicial da matriz e a fratura das fibras ocorreram quase simultaneamente.

6.2.1.4 Desempenho do CLB sob cisalhamento

Xing, Hao e Sikora (2019) conduziram experimentos para avaliar a resistência ao cisalhamento da colagem de produtos de bambu, considerando a direção das fibras, o adesivo e a pressão de prensagem. Foram avaliados o bambu laminado e o BS, considerando a laminação

unidirecional e a laminação cruzada, resultando no CLB. Foram utilizados cinco adesivos diferentes: isocianato de polímero em emulsão (EPI), poliuretano (PUR), melamina-ureia-formaldeído (MUF), adesivo de polímero híbrido (HPA) e acetato de polivinila (PVA). O estudo observou que a pressão de prensagem de 0.6 MPa proporciona características de colagem suficientes para a produção do CLB com bambu laminado, enquanto diferentes pressões de prensagem não tiveram efeito significativo na resistência ao cisalhamento do CLB.

Para o CLB de bambu laminado, o adesivo MUF apresentou maior resistência ao cisalhamento, enquanto o EPI mostrou baixa adequação. HPA e PUR tiveram desempenho semelhante. Para o CLB de BS, o PVA apresentou melhor resistência ao cisalhamento, enquanto o MUF mostrou menor desempenho. O PUR teve resultados semelhantes em ambos os tipos de produtos de bambu. Quanto a configuração das camadas, as amostras coladas nas bordas apresentaram maior resistência ao cisalhamento de colagem em comparação com as amostras coladas nas faces, especialmente para as amostras com PUR e MUF. Para o bambu laminado com MUF, as amostras laminadas cruzadas verticalmente e horizontalmente exibiram valores de resistência ao cisalhamento semelhantes. Já para o CLB de BS, as amostras coladas horizontalmente tiveram uma resistência ao cisalhamento superior em comparação com as coladas verticalmente.

Li Z. *et al.* (2022) avaliaram as propriedades de cisalhamento dos painéis de CLB para uso estrutural por meio do teste de cisalhamento com duas placas e do método de cisalhamento em viga curta (SBS), além de avaliarem a resistência da linha de colagem entre as camadas externa e cruzada do CLB. Esses dois métodos também são adotados pela norma europeia de produtos EN 16351 para avaliar o módulo e a resistência ao cisalhamento por rolagem de produtos de CLT industrial. O teste de cisalhamento de colagem dos painéis de CLB mostrou bom desempenho entre as camadas de bambu, com falha observada nas camadas centrais. A resistência ao cisalhamento transversal obtida no teste de flexão foi menor, com maior coeficiente de variação, e apresentou danos localizados entre o cabeçote de carregamento e o apoio. Em contraste, o teste de cisalhamento de duas placas revelou um campo de tensões uniforme, sendo mais preciso para avaliar a resistência e o módulo dos painéis de CLB. O sistema DIC também se mostrou mais preciso que medidores tradicionais no cálculo do módulo de cisalhamento.

Wang *et al.* (2024) avaliaram as propriedades de cisalhamento transversal do CLB por meio de testes de cisalhamento planar (MPS) e métodos de teste de flexão em três pontos de viga curta (SBB). Além disso, desenvolveram modelos numéricos para testes de cisalhamento

transversal, levando em consideração as propriedades do bambu e dos adesivos por meio do modelo de material do usuário e do modelo de zona coesiva, a fim de apresentar a propagação de falhas nas amostras. Todos os espécimes testados no MPS e SBB apresentaram falha por cisalhamento transversal, com trincas na camada intermediária. À medida que a resistência coesiva no modelo MPS diminuiu, a falha inicial deslocou-se para uma região mais alta na camada intermediária. No modelo SBB, com maior relação vão/profundidade, ocorreu falha por flexão. Observou-se que, para vigas com relação menor que 7, é necessário considerar a degradação da resistência devido à falha por cisalhamento transversal.

Em Li Z. *et al.* (2022), as curvas de carga-deslocamento apresentaram comportamento quase linear até a falha dos corpos de prova no teste de cisalhamento da ligação. Nos testes de cisalhamento com duas placas, observou-se, na maioria dos casos, uma queda significativa na curva, atribuída à fratura frágil das fibras ao redor das fissuras. De maneira geral, ambos os testes evidenciaram um comportamento predominantemente frágil. Em contrapartida, nos corpos de prova submetidos à flexão, foi identificado um mecanismo de resistência dúctil. As curvas de carga-deslocamento desses ensaios revelaram um declínio em etapas à medida que as fissuras de cisalhamento se propagavam na região central dos corpos de prova. Em Wang *et al.* (2024), as curvas tensão-deformação dos testes de cisalhamento planar e de flexão em viga de curto vão apresentaram comportamento semelhante ao observado em Li Z. *et al.* (2022).

Nos testes de cisalhamento da linha de colagem, em Li Z. *et al.* (2022), foram observadas fissuras inclinadas nas camadas transversais centrais, iniciando nos cantos e propagando-se até causar falha frágil. Em Xing, Hao e Sikora (2019), a falha nos testes de cisalhamento da linha de colagem foram principalmente atribuídos a baixa penetração e desempenho do adesivo, ocasionando uma superfície de fratura lisa na interface.

Em Li Z. *et al.* (2022), no teste de cisalhamento planar com duas placas, as falhas ocorreram por cisalhamento transversal nas camadas de bambu, com fissuras inclinadas em torno de 45°, resultando em falha frágil devido à multiplicação de fissuras na camada cruzada e ao longo da linha de colagem. No teste de flexão, trincas leves com ângulo de 45° foram observadas na maioria dos corpos de prova, apresentando uma falha súbita, enquanto um único corpo de prova exibiu falha por descolamento, próximo ao suporte inferior do feixe de teste, devido ao elevado estresse de cisalhamento nessa região.

No teste de cisalhamento planar realizado por Wang *et al.* (2024), foram observadas simultaneamente delaminações e fissuras de cisalhamento transversal. As fissuras iniciaram-se na interface inferior entre a camada intermediária e a externa, propagando-se pela camada

intermediária até alcançar a interface oposta, com um ângulo aproximado de 45°. Nos testes de flexão, as fissuras surgiram na interface entre a camada externa e a intermediária, propagando-se pela camada intermediária. Além disso, delaminações foram identificadas entre a camada intermediária e a inferior, bem como entre as lâminas de bambu dentro da camada intermediária. A falha por cisalhamento transversal foi caracterizada por fissuras inclinadas localizadas na camada intermediária.

6.2.1.5 Desempenho do CLB em relação a fratura

Wu *et al.* (2023) investigaram as propriedades de fratura translaminar do CLB, incluindo os métodos para determinar a taxa de liberação de energia translaminar, o mecanismo de endurecimento e os efeitos da disposição das lamelas, a fim de estabelecer valores de projeto. De acordo com as curvas de carga-deslocamento e carga-CMOD (deslocamento da boca de abertura de fenda) do CLB, para amostras com maior volume de camadas a 90°, observou-se uma fase não linear mais pronunciada entre a etapa elástica linear e o ponto de pico, além de uma redução mais gradual da carga na fase descendente da curva. A taxa de liberação de energia translaminar no CLB é significativamente maior que no bambu laminado unidirecional, comprovando que a disposição bidirecional das fibras aumenta essa taxa. A propagação de trincas na direção das fibras a 90° é o principal mecanismo de endurecimento, e a taxa de liberação de energia aumenta com o volume de camadas a 90°. A sequência de disposição das lâminas a 0° e 90° tem pouco efeito na taxa inicial de liberação de energia, mas influencia significativamente a taxa crítica, pois afeta o desenvolvimento de trincas a 90°. Essas trincas provocam mais arrancamento de fibras, aumentando a taxa de liberação de energia devido à dissipação no processo de arrancamento.

6.2.1.6 Desempenho térmico do CLB

Lv, Wang e Liu (2019a) investigaram o desempenho de isolamento térmico das paredes de CLB e das paredes de CLB com placa de espuma EPS, por meio do método de medição de fluxo de calor em caixa controlada por temperatura. Foi avaliada a influência de diversos parâmetros, como a espessura da parede de CLB, diferentes combinações de camadas de bambu e placas de espuma EPS. Os resultados dos testes indicaram que o desempenho de isolamento térmico melhorou com o aumento da espessura, mas diferentes configurações de parede apresentaram pouca influência sobre o desempenho de isolamento térmico sob a mesma espessura da parede de CLB. As paredes de CLB apresentaram maiores coeficientes de

transferência de calor do que as paredes CLB com EPS. Foi observado que, a adição de uma camada de EPS reduz significativamente esse coeficiente (48.3% a 56.6%), enquanto a adição de uma segunda camada não apresenta redução significativa.

O estudo desenvolveu um modelo numérico de elementos finito para avaliar a transferência de calor em regime estacionário. Avaliando a distribuição de temperatura, foi observado que o calor flui predominantemente na direção da espessura da parede, validando a suposição de transferência unidimensional. As simulações apresentaram erros inferiores a 13% em relação aos resultados experimentais. A condutividade térmica do adesivo foi analisada dentro de um intervalo de 0.3 a 0.6 W/(m·K). Observou-se que sua variação teve um impacto mínimo no coeficiente de transferência de calor, sendo considerado desprezível. Similarmente, foi explorado o efeito da localização da placa de EPS no desempenho térmico, revelando que sua posição influencia minimamente a eficiência térmica.

Para as paredes sem EPS, o coeficiente de transferência de calor diminui com o aumento da espessura da parede. No entanto, é antieconômico atender aos requisitos de design para economia de energia apenas aumentando a espessura da parede CLB, pois a resistência térmica aumenta linearmente e o coeficiente de transferência de calor diminui a uma taxa mais baixa. Por outro lado, a configuração das camadas apresentou pouco efeito no desempenho da transferência de calor.

6.2.1.7 Desempenho do CLB sob explosões

Qiu *et al.* (2023) investigaram as propriedades de resistência à explosão de painéis de PBSL e CLB, por meio de experimentos de explosão em campo. As placas PBSL apresentam quatro padrões típicos de dano, variando de nenhum dano visível, fissuração da matriz, fratura de fibras e ruptura total, à medida que a distância escalonada diminui. Como a fissuração pura da matriz é evitada pela estrutura laminada cruzada, as placas CLB apresentam três padrões típicos de dano, variando de nenhum dano visível, fratura de fibras e lascamento, até ruptura total.

A distância crítica escalonada do PBSL está entre 1.293 m/kg³ e 1.086 m/kg³ para o PBSL, enquanto é significativamente reduzida para entre 0.543 m/kg³ e 0.407 m/kg³ para o CLB. Especialmente, quando o PBSL e o CLB são comparados na mesma distância escalonada de 0.543 m/kg³, foram observadas fraturas de fibras no primeiro, enquanto o segundo ainda permanecia em estado elástico, o que valida que o CLB melhora consideravelmente o desempenho anti-explosão da estrutura de bambu. Os painéis de PBSL e CLB resistem a

grandes deformações dinâmicas e possuem boa resistência à explosão, com danos localizados e manutenção da integridade estrutural. No entanto, a estrutura laminada cruzada do CLB supera o PBSL em resistência à explosão, com o coeficiente de anisotropia aumentando de 0.089 no PBSL para 0.805 no CLB.

6.2.2 Painéis de CLB

Esta seção apresenta os principais resultados dos estudos realizados em painéis de CLB, com dimensões aproximadas às de um elemento estrutural em tamanho real.

6.2.2.1 Desempenho à flexão dos painéis de CLB

Lv, Wang e Liu (2019b) investigaram o desempenho à flexão de três grupos de lajes unidirecionais de CLB e dois grupos de lajes unidirecionais de CLB reforçadas com grades de CFRP, considerando parâmetros como a espessura e o número de camadas do CLB e o posicionamento das grades de CFRP (grades de CFRP prensadas dentro da inferior do CLB e grades de CFRP entre a camada inferior e a penúltima camada). Os painéis sem malhas de CFRP apresentaram falha frágil por tração, iniciando com a fratura da camada inferior próxima ao ponto de carga, seguida pela propagação de fissuras e fratura sequencial das camadas até a falha completa. Já os painéis com CFRP integrado à camada inferior mostraram fissuras iniciais na camada inferior, com queda abrupta de força seguida por aumento devido ao reforço das grades de CFRP, culminando na fratura da camada superior e no rompimento do CFRP. Nos painéis CLB com CFRP entre as camadas, os modos de falha incluem delaminação progressiva entre as malhas de CFRP e as camadas de CLB e falha abrupta na ligação entre essas camadas.

As curvas de carga-deslocamento das lajes de CLB, com ou sem CFRP, foram quase lineares até o limite elástico. Nas lajes sem CFRP, surgiram comportamentos não lineares devido à compressão plástica do *bamboo scrimber*, reduzindo levemente a rigidez. Já o reforço com CFRP diminuiu os deslocamentos no vão médio e aumentou a rigidez da seção transversal em relação às lajes sem CFRP. De modo geral, as lajes de CLB apresentaram maior capacidade de carga com o aumento da espessura e do número de camadas. O reforço com CFRP aumentou significativamente a capacidade de carga, atingindo até 235.7% quando as grades foram pressionadas nas camadas de bambu, mas reduziu em 24.7% quando posicionadas nas interfaces das camadas.

Ding e Lv (2020) realizaram um estudo experimental para investigar o comportamento à flexão de três tipos de painéis CLB e os efeitos da espessura dos painéis e do número de

camadas. Os resultados mostram que os painéis de CLB possuem uma forte capacidade de resistência à flexão. Sob as mesmas condições, quanto maior a espessura dos painéis e maior o número de camadas, melhor é o desempenho à flexão. Painéis com a mesma espessura total, mas com maior número de camadas e maior proporção de laminação longitudinal, apresentaram maior rigidez à flexão e maior capacidade de carga.

Similarmente, painéis com o mesmo número de camadas, mas com espessura de camada e espessura total maiores, apresentaram maior rigidez à flexão e maior capacidade de carga. As curvas carga-deflexão mostram que à medida que a carga aumenta, a deflexão no ponto médio também aumenta, mas em taxas diferentes para cada tipo de painel, refletindo suas diferenças de rigidez e espessura. Além disso, as curvas tensão-deformação da seção transversal aumentam gradualmente com o aumento da carga, e o padrão de variação é semelhante, apresentando um comportamento aproximadamente linear completo.

6.2.2.2 Desempenho ao fogo dos painéis de CLB

Lv, Wang e Liu (2021) investigaram o efeito de métodos de proteção contra fogo e diferentes durações de exposição ao fogo no grau e na taxa média de carbonização de lajes de CLB. Foram avaliados três tratamentos: nenhum tratamento, revestimentos decorativos retardantes de chama JT-01 e solução de fosfato de amônio monobásico (MAP), aplicada antes de os filamentos de bambu serem prensados a quente em placas de BS. O grupo sem tratamento apresentou o maior grau de carbonização, seguido pelo grupo tratado com solução de MAP e, por último, pelo grupo com revestimento retardante de chama.

As lajes com revestimento retardante de chama tiveram menores profundidades e taxas de carbonização, indicando melhor desempenho ao fogo, enquanto a solução de MAP não reduziu significativamente a carbonização, possivelmente devido à menor aderência entre os filamentos de bambu impregnados com solução de MAP. A taxa de carbonização aumentou quando a duração da exposição ao fogo passou de 45 para 60 min, devido à maior penetração do fogo e ao desprendimento das lamelas transversais. No entanto, entre 60 e 75 min, a taxa nem sempre cresceu, dependendo da configuração das camadas e da interação com o fogo e o adesivo. Dessa forma, a taxa média de carbonização das camadas longitudinais foi menor, pois o fogo penetrou nas lacunas após a fusão do adesivo, facilitando o desprendimento das lamelas transversais.

Lü, Wang e Liu (2021) investigaram a degradação das propriedades mecânicas de lajes de CLB após exposição ao fogo em uma única face. Foi avaliada a influência de diferentes

durações de exposição ao fogo e métodos de tratamento resistente ao fogo sobre as propriedades de carbonização e a capacidade de carga residual das lajes de CLB, sob flexão de quatro pontos. A ordem decrescente da capacidade de carga residual foi: amostras com revestimento retardante de chamas, seguidas pelas amostras sem tratamento e, por último, pelas amostras imersas em solução retardante de chamas.

Sob o mesmo tratamento retardante de chamas, a capacidade de carga residual das lajes de CLB diminui com o aumento do tempo de exposição ao fogo. O coeficiente de capacidade de carga residual foi definido como a razão entre a capacidade de carga das lajes após exposição ao fogo e a capacidade de carga das lajes não danificados. A capacidade de carga das lajes de CLB diminui significativamente após exposição ao fogo, com coeficientes de capacidade de carga residual variando de 10.6% a 72.6%.

6.2.3 Paredes oscilantes de CLB (rocking walls)

Esta seção apresenta os principais resultados dos estudos realizados em paredes oscilantes de CLB, sejam eles experimentais, numéricos ou analíticos.

Lv *et al.* (2021) realizaram testes com paredes oscilantes de CLB, considerando parâmetros como a existência de amortecedores de fricção convencionais (CFD's), a razão de momento e o número de carregamentos. O comportamento da parede oscilante de CLB foi estável ao longo dos ciclos de carregamento e não ocorreu degradação da rigidez lateral.

Um comportamento bilinear foi observado em todos os testes e a parede de CLB permaneceu elástica durante o carregamento, indicando que a mudança de rigidez foi causada por uma diminuição no comprimento de contato entre a parede e a fundação. As paredes com CFD's exibiram curvas histeréticas em forma de bandeira, resultando da capacidade de dissipação de energia fornecida pelos CFD's. Além disso, os CFD's proporcionaram uma melhoria na capacidade de suporte. Em relação ao carregamento repetido, este apresentou pouco efeito na capacidade de suporte da parede, enquanto uma menor razão de momento melhorou a capacidade de suporte do sistema. Os valores da eficiência relativa de autocentrimento (RSE), nos casos sem amortecedores, foram 0.988 no deslocamento relativo de 1.3%, o que demonstrou uma capacidade de autossustentação quase completa. Em geral, os valores de RSE foram maiores que 0.96, o que confirmou a excelente capacidade de autocentrimento das paredes de CLB. Os CFD's enfraqueceram ligeiramente a capacidade de autocentrimento, pois a força de fricção afetou o processo de descarregamento. Além disso, uma maior razão de momento também reduziu a capacidade de autocentrimento do sistema.

Por outro lado, o número de ciclos de carregamento não afetou a capacidade de autocentramento.

A capacidade de dissipação de energia da parede sem CFD's foi fornecida principalmente pela deformação da própria parede. O emprego de CFD's resultou em um aumento da capacidade dissipação de energia da parede, fornecida principalmente pelos CFD's. A capacidade de dissipação de energia do sistema atingiu seu pico quando a razão de momento diminuiu para 0.8. Já o número de ciclos de carregamento afetou a capacidade de dissipação de energia do sistema, até certo ponto. Os cabos de protensão permaneceram elásticos durante os testes. Os CFD's, o número de ciclos de carregamento e a razão de momento não afetaram a perda de força de protensão. A força de protensão cresceu rapidamente após o deslocamento relativo de 0.2% devido ao levantamento na parede oscilantes de CLB.

Lv *et al.* (2021) propuseram estados limites para as paredes oscilantes de CLB sob carregamento lateral. Esses estados limites foram definidos com base nas tensões, deformações e níveis de dano no CLB e nos cabos de protensão. Três estados limites principais foram propostos. O primeiro estado é a descompressão da base da parede (DEC), no qual o momento de tombamento na base da parede, proporcionado pela força de protensão inicial dos cabos pós-tensionados e pela carga gravitacional, é superado pelo momento aplicado. Após esse ponto, uma abertura começa a se formar entre a base da parede e a fundação. Esse estado é identificado como o início do comportamento não linear.

O segundo estado é o limite efetivo de resposta linear-elástica (ELL), o qual ocorre quando o comprimento de contato reduzido devido à abertura crescente na base da parede ou o comportamento não linear do CLB em compressão próximo à base da parede reduz a rigidez lateral da parede. O terceiro estado é o escoamento dos cabos de protensão (YP), o qual acontece quando os cabos atingem sua deformação de escoamento devido à elongação causada pela abertura na base da parede e pela oscilação da parede.

Lv *et al.* (2021) também estabeleceram um modelo analítico da parede oscilante de CLB, com base nos estados limites propostos. O estudo apresentou as equações para o cálculo do momento de tombamento na base e da força de cisalhamento em cada um dos três estados limite, bem como, do deslocamento e rigidezes laterais. A força de cisalhamento e o deslocamento lateral em cada estado limite, calculados pelo modelo analítico, se ajustaram bem aos dados experimentais, sendo o erro de instalação dos CFD's o principal responsável pelas diferenças.

Os deslocamentos laterais no DEC calculados pelo modelo analítico apresentaram uma diferença de no máximo 4% em relação aos resultados experimentais, e a diferença entre as forças de cisalhamento obtidas pelo modelo analítico e os resultados experimentais foi menor que 2.67 kN. A maior diferença na força de cisalhamento e no deslocamento lateral no ELL foi de 4.23 kN, com erro relativo de 11.4%, e de 0.84 mm, com erro relativo de 12.7%, respectivamente. A diferença na força de cisalhamento entre o resultado experimental e analítico no índice de deslocamento relativo de 1.3% não foi maior que 4.2 kN, afirmando a precisão do cálculo no estado limite YP pelo modelo analítico. Portanto, o modelo analítico proposto é aplicável para a previsão do comportamento das paredes oscilantes de CLB sob carregamento cíclico.

Similarmente, Lu, Lv e Liu (2022) propuseram e testaram sob carregamento lateral cíclico uma parede oscilante de CLB com amortecedor acoplado de fricção e flexão (BFCD), no qual barras de aço foram acopladas a um amortecedor de fricção convencional (CFD) para fornecer dissipação adicional de energia por flexão. O efeito do protocolo de carregamento, a força de atrito fornecida pelo amortecedor, o tipo de amortecedor e o tipo da barra sobre o desempenho sísmico da parede foram discutidos. Além disso, um modelo de elementos finitos correspondeu bem aos resultados experimentais, mostrando claramente a distribuição de tensões na parede de CLB.

A recarga, a força de atrito, a presença e o tipo de amortecedor, bem como o tipo de barra de flexão, apresentaram pouco efeito na perda de força de protensão. Paredes com amortecedores mostraram forças máximas maiores que as sem amortecedores, devido aos momentos resistentes dos CFD's e BFCD's. Além disso, as barras de aço nos BFCD's aumentaram as forças médias máximas em relação aos CFD's. Ao ser recarregada sem reparo, a parede manteve sua rigidez, resistência, dissipação de energia e capacidade de autocentrimento, indicando que pode suportar carregamentos secundários sem danos estruturais visíveis. A instalação dos BFCD's aumentou a dissipação cumulativa de energia, e o uso de barras de flexão parcialmente enfraquecidas melhorou essa capacidade. Além disso, a dissipação de energia cresceu significativamente com o aumento da força de atrito.

A eficiência relativa de autocentrimento (ξ) ultrapassou 90%, indicando boa capacidade de autocentrimento. Os valores de ξ foram ligeiramente menores em casos com amortecedores, com maior força de atrito e em paredes com barras de flexão de seção reduzida, devido à maior deformação plástica nos segmentos enfraquecidos. Para avaliar a variação real na rigidez lateral, adotou-se a rigidez secante modificada (K'_{sec}). A análise mostrou que os amortecedores e o

aumento da força de atrito melhoram o $K'sec$ da parede oscilante de CLB, sendo o aumento com BFCD's ligeiramente superior ao com CFD's, devido à rigidez das barras de flexão.

Lu, Liu e Lv (2022) desenvolveram um dissipador de energia parcialmente contido (PRED) e avaliaram o efeito dos PRED's sobre a resistência, rigidez, dissipação de energia e capacidade de autocentrimento de paredes oscilantes de CLB pós-tensionadas por meio de simulação numérica. A parede com PRED's apresentou forças máximas positiva e negativa 49.3% e 48.8% maiores, respectivamente, em comparação com a parede sem PRED's. A rigidez lateral da parede, reconhecida como o aumento na inclinação da curva histerética, e a dissipação cumulativa de energia da parede, definida como a área fechada pela curva histerética, aumentaram com o uso de PRED's. No entanto, o deslocamento residual também aumentou.

Lu, Liu e Lv (2022) conduziram análises paramétricas para avaliar a influência da posição e do número de PRED's no comportamento histerético da parede oscilante de CLB. O caso básico consistiu na parede com um PRED em cada canto. No caso N, dois PRED's com um espaçamento de 70 mm foram instalados em cada canto da parede. Nos casos P1 e P2, cada canto da parede foi equipado com um PRED, enquanto a distância entre o PRED e a borda lateral da parede foi variada (35 mm e 105 mm). A capacidade de suporte, a rigidez lateral e a dissipação de energia aumentaram com o número de PRED's, mas mais PRED's elevaram a força de resistência, dificultando o restabelecimento da estrutura e ampliando o deslocamento residual.

No caso N (4 PRED's), o deslocamento residual máximo foi 115,7% maior que no caso básico (2 PRED's). A capacidade de suporte aumentou ligeiramente com a menor distância entre o PRED e a borda da parede, devido ao maior braço de alavanca, enquanto rigidez, dissipação de energia e autocentrimento foram pouco afetados pela posição do PRED. No entanto, a tensão nas placas de aço da conexão do PRED excedeu o limite de escoamento com a diminuição dessa distância, indicando a necessidade de otimização da posição dos PRED's para reduzir tensões locais.

Lv, Han e Liu (2022) desenvolveram um modelo de elementos finitos (FEM) e de um modelo analítico modificado (MAM) baseado em testes experimentais para prever o comportamento sísmico das paredes oscilantes de CLB. Além disso, um procedimento de projeto foi proposto com base no modelo numérico e no MAM. A influência do nível de protensão inicial, da área da seção transversal das barras de pós-tensionamento, da razão de aspecto da parede de CLB e da força de fricção do CFD foram investigadas usando o FEM calibrado. A capacidade lateral e o deslocamento relativo aumentaram com o nível de protensão

inicial, que teve pouco impacto na dissipação de energia até o escoamento das barras. As rigidezes inicial (S_d) e secundária (S_e) diferiram no máximo 8% e 2%, respectivamente, indicando baixa influência da protensão inicial sobre o S_e .

Com o aumento da seção transversal das barras protendidas, o deslocamento relativo e a capacidade lateral aumentaram, enquanto S_d cresceu cerca de 7%, e S_e e a rigidez de escoamento (S_y) cresceram significativamente, cerca de 135.08% e 171.86%, respectivamente. A capacidade lateral diminuiu com o aumento da razão de aspecto devido aos braços de momento mais longos, enquanto a dissipação de energia foi pouco afetada pelo comportamento plástico limitado do CLB. O deslocamento relativo em YP aumentou com a razão de aspecto, e a parede com menor razão de aspecto alcançou o escoamento em 1.38%, 17.37% menor que a parede mais esbelta (razão de 2.5). Paredes com menor razão de aspecto foram menos dúcteis, mas apresentaram maiores rigidezes (S_d , S_e e S_y).

O aumento da força de fricção do CFD fortaleceu a capacidade de dissipação de energia, elevando a capacidade lateral em 14.67% para 2% de deslocamento relativo, com pouca variação na rigidez da parede. Além disso, aumentou a força de cisalhamento até certo ponto. Contudo, forças de fricção maiores reduziram os RSE de 0,978 para 0,940, indicando menor capacidade de autocentramento.

Han *et al.* (2023) desenvolveram um método de projeto baseado em deslocamento (DBD) para paredes oscilantes de CLB, incorporando amortecedores de fricção (CFDs), com o objetivo de controlar a limitação do deslocamento relativo. O DBD visa controlar os principais parâmetros das barras de protensão e dos amortecedores de fricção, incluindo a determinação da força de cisalhamento em cada pavimento e o dimensionamento desses elementos. Configurações de paredes oscilantes segmentadas e monolíticas foram projetadas com base no método DBD e aplicadas aos edifícios.

O DBD assegurou que as paredes cumprissem a limitação de deslocamento relativo de 2% para o nível de perigo de prevenção de colapso (CP), conforme o código sísmico chinês. Modelos numéricos simplificados (SNM) para essas duas paredes foram estabelecidos usando conectores cartesianos. Em seguida, dois modelos de edifícios CLB de três andares, X-LamBR1 (com parede segmentada) e X-LamBR2 (com parede monolítica), foram desenvolvidos. Os resultados indicaram que o modelo X-LamBR2 apresentou melhor desempenho sísmico em relação ao modelo X-LamBR1. O X-LamBR2 demonstrou menor deslocamento relativo, menor força de cisalhamento entre pavimentos e maior rigidez lateral.

6.3 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DO CLB

A Tabela 21 apresenta uma síntese das principais informações padrão sobre os testes experimentais realizados na literatura relacionados ao CLB, abrangendo o estudo de suas propriedades mecânicas, desempenho estrutural, comportamento frente ao fogo e desempenho térmico.

Tabela 21 – Síntese dos testes experimentais realizados pelos estudos da revisão sistemática

RF	ρ (g/cm ³)	Teste	A	Normas	C (mm)	L (mm)	E (mm)	TC	PC	VC	CP
1		Teste de flexão de 3 pontos			600	500	50	M			Falha
		Teste de Explosão em Campo			800	800	50	M			
3		Teste de carregamento lateral	7		1500	1000	100	C	DR 0.2%, 0.27%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1%, 1.3%	0.2	21 ciclos
4		Testes de flexão de 4 pontos	12	ASTM D198				M			
5		Teste de fogo unilateral		Standard heating curve of ISO 834-1	1500	430	100				
7		Teste de compressão no plano			700 600	700 600	17.5 27.5	M		0.5 mm/min	Falha
8		Teste de compressão no plano		BS EN 789	600	600	16.5 27.5	M		0.5 mm/min	Falha
9		Teste de carregamento lateral	10					C	DR 0.2%, 0.27%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.3%		21 ciclos 3.5% DF
10		Flexão em 3 pontos	64		250	50	30	M		0.5 mm/min	Fratura completa
		Tração com entalhe duplo (DENT)	64		250	50	30	M		0.5 mm/min	Fratura completa
11		Flexão de 4 pontos	15		1800	600	100 60	M			Falha
12		Teste de fogo unilateral	12	ISO 834-1	1500	430	100				
		Teste de flexão de 4 pontos	12		1500	430	100	M		5.0 kN/min	Falha
13		Teste de flexão em placas	3		600	600	50	M		2.0 mm/min	Falha
14		Teste de flexão de 4 pontos	25		1800	600	100 60	M		0.5 kN/min	Falha
15	1.15	Teste de tração		ASTM D143	453	50	50 25	M			Falha
	1.15	Teste de compressão		ASTM D143	500	50	50	M			Falha

1.15	Teste de flexão de 3 pontos		ASTM D143	600	50	50	M		Falha
17	The modified planar shear tests (MPS) method	21	ASTM D2718	95	60	60	M	1.5 mm/min	Falha
	Teste de flexão em viga curta	22	ANSI/APA PRG 320	300	60 45	60	M	0.5 mm/min	Falha
18	Teste da linha de colagem		EN 392 Sikora <i>et al.</i> (2016b)	50	30	40	M	3.0 mm/min	Falha
0.63	Teste da linha de colagem	10		45	20	60	M	0.6 mm/min	
19	0.63 Teste de cisalhamento planar de duas placas	10		120	100	90	M	0.3 mm/min	
0.63	Teste de flexão em viga curta	5		540	50	90	M	2 mm/min	
21	Método de fluxo de calor em caixa controlada por temperatura	10	ISO 8990	980	980	88 120 121 145			

Legenda: RF – Referências; ρ – Densidade; A – Quantidade de amostras; Normas – Normas empregadas para a realização do teste; C – Comprimento; L – Largura; E – Espessura; TC – Tipo de carregamento; M – Monotônico; C – Cíclico; PC – Protocolo de carregamento; VC – Taxa de carregamento; CP – Critério de Parada do teste; 1 Qiu *et al.* (2023); 3 Lv *et al.* (2021); 4 Qiu, Zhu e Fan (2023); 5 Lv, Wang e Liu (2021); 7 Archila *et al.* (2017); 8 Archila *et al.* (2014); 9 Lu, Lv e Liu (2022); 10 Wu *et al.* (2023); 11 Ding e Lv (2020); 12 Lü, Wang e Liu (2021); 13 Qiu, Yang e Fan (2024); 14 Lv, Wang e Liu (2019b); 15 Qiu e Fan (2022); 17 Wang *et al.* (2024); 18 Xing, Hao e Sikora (2019); 19 Li Z. *et al.* (2022); 21 Lv, Wang e Liu (2019a).

Fonte: Autora (2024).

A diversidade de testes realizados demonstra um esforço da comunidade científica em avaliar as propriedades mecânicas, o desempenho estrutural, o comportamento frente ao fogo e as características térmicas do CLB, evidenciando sua relevância como um material engenheirado promissor. A tabela sintetiza uma ampla gama de metodologias experimentais empregadas, com destaque para os testes de flexão, compressão, cisalhamento e tração, conduzidos sob normas reconhecidas como ASTM, ISO e EN. Esses ensaios avaliam propriedades fundamentais como rigidez, resistência e estabilidade do material sob diferentes condições de carregamento, tanto monotônico quanto cíclico. Testes específicos, como aqueles relacionados à linha de colagem e ao desempenho térmico, indicam um interesse crescente em entender aspectos mais complexos do CLB, incluindo sua durabilidade e segurança em aplicações estruturais.

As normas mencionadas na Tabela 1 incluem: ASTM D198 - *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*, que avalia propriedades mecânicas de madeira em dimensões estruturais; ISO 834-1 - *Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements*, utilizada para ensaios de resistência ao fogo; EN 789 - *Timber Structures - Test Methods - Determination of Mechanical Properties of Wood Based Panels*,

que determina propriedades mecânicas de painéis de madeira; ASTM D143 - *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*, voltada para amostras pequenas de madeira sólida; ISO 8990 - *Thermal Insulation - Determination of Steady-State Thermal Transmission Properties - Calibrated and Guarded Hot Box*, que avalia propriedades térmicas de materiais; ANSI/APA PRG 320 - *Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber*, desenvolvida para painéis de CLT; EN 392 - *Glued Laminated Timber - Shear Test of Glue Lines*, que avalia a resistência da linha de colagem em madeira laminada; e ASTM D2718 - *Standard Test Method for Structural Panels in Planar Shear (Rolling Shear)*, para avaliação de cisalhamento planar.

O uso de normas originalmente destinadas à madeira ou ao CLT para a avaliação do CLB tem se mostrado eficaz até certo ponto, uma vez que os produtos de bambu compartilham características estruturais e mecânicas similares com esses materiais. No entanto, há limitações intrínsecas em aplicar normas projetadas para madeira a um material com comportamento diferenciado como o CLB, devido à sua maior densidade, anisotropia e à natureza fibrosa do bambu. Essas diferenças podem levar a resultados que não representam com precisão o desempenho do CLB em aplicações reais. Portanto, embora essas normas sirvam como uma base adequada e confiável para pesquisas iniciais, há uma necessidade crescente de desenvolver normas específicas para o CLB, que considerem suas propriedades únicas e assegurem avaliações mais precisas e representativas. A criação de normas dedicadas é essencial para promover maior uniformidade nos resultados, facilitar comparações entre estudos e apoiar a consolidação do CLB como um material viável e padronizado para a construção civil.

Os testes monotônicos aparecem como o tipo de carregamento mais estudado, o que sugere um foco inicial em caracterizar propriedades fundamentais do material sob condições estáticas. No entanto, a inclusão de ensaios cíclicos e protocolos específicos, como deslocamentos relativos variáveis e ciclos repetitivos, indica uma preocupação emergente com o desempenho do CLB em condições dinâmicas ou de fadiga, particularmente em estruturas sujeitas a eventos sísmicos ou cargas de vento.

Os dados evidenciam que o estudo do CLB está em uma fase de desenvolvimento no que diz respeito à caracterização básica do material. O uso de normas padronizadas e a diversidade de testes indicam um esforço para construir uma base robusta de conhecimento sobre as propriedades mecânicas e estruturais do CLB. A inclusão de testes específicos, como a análise de desempenho térmico e resistência ao fogo, reflete uma expansão para investigações mais aplicadas e voltadas à segurança e durabilidade em diferentes cenários de uso.

Portanto, os estudos experimentais sobre CLB estão em constante evolução, com avanços significativos no entendimento de suas propriedades. No entanto, ainda há lacunas a serem preenchidas, como a padronização de metodologias e a investigação de aspectos de longo prazo, como desempenho em ambientes agressivos e sob ciclos de carga repetitiva. Esses esforços são essenciais para consolidar o CLB como uma alternativa sustentável e eficiente em aplicações estruturais, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção mais inovadores e ambientalmente responsáveis.

6.4 METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA AVALIAR O CLB

Qiu, Zhu e Fan (2023) analisaram o comportamento de flexão do CLB utilizando três métodos teóricos: o método da analogia de cisalhamento, o método K e a teoria de compósito laminado. O primeiro prevê rigidez à flexão e ao cisalhamento em projetos de CLT. O método K, aplicado em compensados, calcula resistência e rigidez à flexão considerando camadas internas agrupadas. Já a teoria de compósito laminado avalia a distribuição linear de tensões e deformações, assumindo que a seção transversal permanece plana durante a deformação. Os métodos K e da analogia de cisalhamento preveem adequadamente a rigidez à flexão da viga de CLB, com valores experimentais consistentes. No entanto, para a resistência à flexão, o método K superestima os valores em relação aos experimentais, enquanto a teoria de compósitos laminados apresenta maior precisão, sendo esta última a mais confiável para prever a resistência à flexão.

Qiu, Yang e Fan (2024) desenvolveram um modelo analítico baseado na teoria de placas ortotrópicas e critérios de falha para prever o comportamento do CLB sob flexão. O modelo utiliza o método de Rayleigh-Ritz para minimizar a energia de deformação, considerando as rigidezes de flexão dependentes das propriedades mecânicas e da espessura da placa. A carga é representada como concentrada e uniformemente distribuída em um raio. As falhas, classificadas como ruptura da matriz ou das fibras, são avaliadas por critérios baseados em tensões normais e de cisalhamento, correlacionadas às resistências de tração e compressão. A carga de fissuração inicial é determinada pela falha da matriz, enquanto a carga máxima é definida pela ruptura das fibras. Um modelo bilinear é utilizado para ajustar a curva de carga-deslocamento em placas com degradação de rigidez após fissuração. Para placas de CLB, as previsões mostraram boa concordância entre as cargas de fissuração e máxima, explicando os mecanismos de falha progressiva observados nos ensaios.

Lv, Wang e Liu (2019) determinaram a capacidade de carga sob flexão do CLB com base na norma chinesa GB 50005-2017 (*Standard for design of timber structures*). Os cálculos da tensão de flexão e da rigidez efetiva da seção transversal baseiam-se na hipótese de seção transversal plana, comprovada pela distribuição da deformação ao longo da espessura da laje. A fórmula foi ajustada para considerar as propriedades específicas do CLB, como o módulo de elasticidade paralelo às fibras do bambu e a área e momento de inércia das camadas paralelas às fibras. Para simplificação, apenas as camadas paralelas às fibras foram consideradas. A precisão desse método analítico para o cálculo da capacidade de flexão da laje de CLB é aceitável.

Archila, Zea-Escamilla e Harries (2023) analisaram o desempenho estrutural dos painéis de CLB, aplicando métodos de projeto analítico desenvolvidos para painéis de CLT. O estudo previu as propriedades mecânicas desses painéis em flexão, compressão e cisalhamento, utilizando métodos de engenharia de madeira normatizados por padrões internacionais.

Archila, Zea-Escamilla e Harries (2023) analisaram o desempenho estrutural dos painéis de CLB, aplicando métodos de projeto analítico desenvolvidos para painéis de CLT. O estudo previu as propriedades mecânicas desses painéis em flexão, compressão e cisalhamento, utilizando métodos de engenharia de madeira normatizados por padrões internacionais. O método usado para prever as propriedades de compressão dos painéis de foi baseado em normas internacionais, como a BS EN 14272 (BSI, 2011). O módulo de elasticidade em compressão foi calculado como a soma das propriedades elásticas das camadas individuais que compõem o painel. Para isso, foi considerada uma unidade de largura, e a contribuição de cada camada foi ponderada pela sua espessura. Esse método assumiu uma ligação rígida entre as camadas, com uma composição simétrica do painel, considerando que as camadas transversais têm contribuição limitada para a rigidez geral em compressão. Os valores de elasticidade em compressão para cada camada foram obtidos em testes anteriores com amostras claras de bambu. Assim, os resultados previram as propriedades elásticas em compressão ao longo dos eixos longitudinal e transversal do painel.

O método utilizado para prever as propriedades de cisalhamento dos painéis de segue abordagens desenvolvidas para sistemas de CLT, baseando-se em normas como a BS EN 14272 (BSI, 2011). O módulo de cisalhamento no plano foi calculado levando em consideração as propriedades das camadas individuais do painel. Este método pressupõe que o painel é composto por camadas rigidamente conectadas, com uma composição simétrica. No cálculo, considerou-se que o módulo de cisalhamento paralelo às fibras de painéis de CLT varia entre

1/12 e 1/20 do módulo de elasticidade longitudinal, e que o módulo de cisalhamento perpendicular às fibras, também chamado de módulo de cisalhamento transversal, é aproximadamente 1/10 do módulo de cisalhamento paralelo às fibras. O método foi aplicado considerando a soma ponderada das propriedades de cisalhamento das camadas individuais, ignorando a influência significativa de deformações por cisalhamento nas camadas transversais devido à sua contribuição limitada para a rigidez geral do painel. Essa abordagem é amplamente utilizada na engenharia de madeira para prever as propriedades mecânicas de sistemas laminados cruzados, fornecendo uma estimativa razoavelmente precisa para o módulo de cisalhamento global do painel.

O método usado para prever as propriedades de flexão dos painéis de CLB baseia-se na teoria da seção transformada, amplamente empregada na análise de sistemas laminados cruzados, como CLT e compensado. Esse método considera a contribuição das camadas individuais para a rigidez à flexão e utiliza o momento de inércia equivalente da seção composta. A composição do painel é simétrica, com camadas alternadas orientadas longitudinalmente e transversalmente. As camadas transversais têm uma contribuição limitada para a rigidez global, pois o módulo de elasticidade longitudinal é significativamente maior. Foi considerada uma largura unitária para simplificar os cálculos. A resistência à flexão do painel foi prevista como a soma das resistências das camadas externas longitudinais, utilizando o módulo de ruptura obtido em testes de flexão em pequenas amostras. Neste cálculo, as camadas transversais não foram consideradas devido à sua contribuição limitada. Esse método fornece previsões razoavelmente precisas das propriedades de flexão do CLB, embora as estimativas possam superestimar a capacidade real devido às simplificações assumidas e às propriedades experimentais usadas nos cálculos.

Archila *et al.* (2014) empregaram métodos de cálculo baseados na norma BS EN 14272 (*Plywood – Calculation method for some mechanical properties*) para prever o módulo de elasticidade médio em compressão nas direções paralela e transversal dos painéis CLB. Os valores previstos pelo método analítico, geralmente superiores aos obtidos por métodos experimentais como o DIC, mostraram boa concordância com os resultados dos modelos numéricos, validando a precisão do modelo analítico. No entanto, os valores calculados indicam uma possível superestimação do desempenho em compressão, especialmente na direção longitudinal. A análise revelou que os painéis orientados longitudinalmente apresentaram capacidades de carga entre 1.5 e 2.5 vezes superiores às da orientação transversal, tanto nos resultados previstos quanto nos experimentais. Apesar de eficaz na previsão do comportamento

dos painéis, o método analítico não considera completamente fatores como lacunas entre lamelas ou defeitos de fabricação, que podem impactar os resultados experimentais.

Archila, Zea-Escamilla e Harries (2023) também analisaram o desempenho estrutural de painéis de CLB utilizando métodos analíticos desenvolvidos para CLT, conforme a BS EN 14272. As propriedades mecânicas dos painéis em compressão, cisalhamento e flexão foram previstas com base nas características individuais das camadas. Para compressão, o módulo de elasticidade foi calculado somando as contribuições elásticas ponderadas pela espessura das camadas, assumindo composição simétrica e ligação rígida entre as camadas, com valores obtidos de testes prévios. Para cisalhamento, o módulo foi estimado ponderando as propriedades das camadas individuais, ignorando a influência significativa das camadas transversais devido à sua contribuição limitada. Já para flexão, foi utilizada a teoria da seção transformada, considerando o momento de inércia equivalente e desconsiderando a contribuição das camadas transversais na rigidez global. A resistência foi prevista com base no módulo de ruptura obtido em testes de flexão em pequenas amostras. Os métodos forneceram previsões razoavelmente precisas, embora possam superestimar a capacidade real devido a simplificações e propriedades experimentais utilizadas.

Lv, Wang e Liu (2021) propuseram dois modelos para prever o comportamento de lajes de CLB expostas ao fogo. O primeiro modelo, de localização-tempo, calcula a profundidade de carbonização considerando diferenças nas taxas de carbonização entre camadas longitudinais e transversais, superando modelos como o da NDS, que desconsideram a anisotropia do CLB. Camadas longitudinais apresentam menores taxas de carbonização devido à maior integridade estrutural, enquanto camadas transversais têm taxas mais altas devido à penetração do fogo pelos espaços entre placas. O modelo inclui o parâmetro λ , determinado experimentalmente como 2.8, para ajustar as equações às diferentes camadas, melhorando a precisão da previsão.

O segundo modelo é um perfil de temperatura modificado que prevê a distribuição de temperatura ao longo da espessura das lajes durante a exposição ao fogo. Ele corrige limitações de modelos anteriores que subestimam temperaturas próximas à frente de carbonização e superestimam temperaturas em regiões afastadas. Este modelo fixa a profundidade de penetração térmica em 60 mm, baseada em dados experimentais, e introduz um coeficiente ajustado (3.80) para o gradiente de temperatura, obtido por ajustes de curva experimental. A fórmula combina o gradiente de temperatura com a profundidade medida a partir da frente de carbonização, aumentando a precisão. O modelo é adequado para CLB com densidade e umidade constantes, mas requer ajustes para materiais com propriedades diferentes.

Lv, Wang e Liu (2019) aplicaram métodos analíticos para calcular os coeficientes de transferência de calor e as resistências térmicas das paredes, utilizando equações fundamentadas nas propriedades térmicas dos materiais constituintes. Esses cálculos seguiram métodos padronizados, como os estabelecidos pela ISO 6946:1996, voltados para a análise de resistência térmica em paredes compostas por camadas homogêneas. As discrepâncias entre os valores teóricos e experimentais obtidos com a ISO 6946 resultam da heterogeneidade dos materiais, como variações internas nas placas de bambu laminado e EPS, da presença de vazios ou interfaces mal ajustadas que aumentam a resistência térmica, e das diferenças no teor de umidade entre os ensaios e os testes. Embora a norma ofereça uma metodologia confiável para análises preliminares, esses fatores destacam a necessidade de complementação com ensaios experimentais e modelos numéricos, especialmente para materiais compostos ou heterogêneos, como as paredes de bambu laminado.

Wang *et al.* (2024) utilizaram o método de analogia de cisalhamento para prever os modos de falha em vigas de CLB submetidas a flexão, analisando como a proporção entre vão e profundidade influencia falhas por cisalhamento transversal ou tração na camada inferior. Modelos numéricos desenvolvidos para proporções de 4 a 9 validaram as previsões: proporções menores que 7 resultaram em falhas por cisalhamento, enquanto proporções iguais ou maiores que 7 levaram à falha por tração. A capacidade de carga diminuiu e a capacidade de deslocamento aumentou com proporções maiores, confirmando a eficácia do método para orientar projetos estruturais de CLB.

Wu *et al.* (2023) investigaram três métodos para calcular a curva R de fratura translaminar do CLB: o método baseado na diferença de área da curva de carga-deslocamento, no qual a curva R é calculada como a diferença entre as áreas das curvas de carga-deslocamento dos dois espécimes sob o mesmo deslocamento; o método baseado no conceito de superposição assintótica linear, o qual utiliza fórmulas da LEFM para calcular os parâmetros de fratura com base na curva de carga-CMOD (deslocamento na abertura da boca da trinca); e o método da área, o qual calcula a curva R a partir de duas cargas e seus respectivos deslocamentos obtidos da curva carga-deslocamento. Os três métodos para determinar a taxa de liberação de energia translaminar produziram resultados semelhantes, validados pela comparação das relações tração-separação calculadas a partir das curvas R com aquelas obtidas em testes de tração com entalhes duplos. Apesar da boa estimativa das relações coesivas, estudos adicionais são recomendados para maior precisão.

A síntese das metodologias utilizadas para avaliar o desempenho do CLB evidenciou uma diversidade de abordagens analíticas, cada qual com aplicações específicas e limitações intrínsecas. As técnicas fundamentadas na analogia de cisalhamento, teoria de compósitos laminados e métodos normatizados como os desenvolvidos para CLT destacaram-se na previsão de propriedades mecânicas, enquanto modelos baseados em critérios de falha e análise térmica proporcionaram contribuições valiosas na compreensão de comportamentos complexos, como a degradação sob fogo e a resistência ao cisalhamento.

As propriedades mais frequentemente avaliadas com métodos analíticos incluem a rigidez à flexão, a resistência à flexão, a rigidez ao cisalhamento, a capacidade de carga sob compressão, as propriedades térmicas e o comportamento ao fogo, o módulo de elasticidade e a taxa de liberação de energia em fratura translaminar. A rigidez e a resistência à flexão foram analisadas por meio de abordagens como a analogia de cisalhamento, a teoria de compósitos laminados e a teoria da seção transformada, enquanto a rigidez ao cisalhamento foi estimada com base na analogia de cisalhamento e em métodos normatizados para sistemas CLT. A capacidade de carga sob compressão foi determinada considerando a soma ponderada das propriedades das camadas individuais, e as propriedades térmicas, como a resistência térmica e a profundidade de carbonização, foram analisadas com foco no desempenho ao fogo. Além disso, o módulo de elasticidade foi avaliado em flexão e compressão, utilizando métodos que ponderam as contribuições das camadas constituintes do CLB. Por fim, a taxa de liberação de energia em fratura translaminar foi investigada com base em métodos como a análise da curva carga-deslocamento e ensaios de tração com entalhes, demonstrando a relevância dessa propriedade para compreender o comportamento de falha do material.

De maneira geral, as previsões analíticas apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, validando sua aplicabilidade no dimensionamento preliminar de estruturas de CLB. No entanto, limitações relacionadas à simplificação de propriedades materiais, desconsideração de defeitos de fabricação e lacunas entre camadas evidenciam a necessidade de complementação com estudos experimentais e simulações numéricas para maior precisão. Além disso, os métodos desenvolvidos para materiais similares, como o CLT, requerem adaptações para capturar as características específicas do bambu laminado, como anisotropia e comportamento heterogêneo das camadas.

Dessa forma, o avanço no desenvolvimento de metodologias específicas para CLB é essencial para consolidar sua aplicação em projetos estruturais, especialmente no contexto de regulamentações normativas ainda incipientes. Estudos futuros devem priorizar a integração

entre métodos analíticos, experimentais e numéricos, ampliando o entendimento dos mecanismos de falha e desempenho estrutural do material em diferentes condições de uso.

6.4.1 Modelo analítico considerando as características dos estados limites

Os estados limites da parede oscilante de CLB sob uma força lateral foram propostos com base nas deformações, tensões e no nível de dano do material de CLB e das barras de protensão. Com base na hipótese de seção plana, a hipótese de momento no plano e a hipótese de elasticidade da parede, Lv *et al.* (2021) propuseram três estados limites da parede oscilante de CLB: descompressão da base da parede (DEC), limite efetivo de resposta linear-elástica (ELL), e escoamento dos cabos de protensão (YP).

A DEC ocorre quando a resistência ao tombamento na base da parede, fornecida pela força de protensão inicial das barras pós-tracionadas e pela carga gravitacional, é superada pelo momento de tombamento aplicado. Nesse estado, a tensão é distribuída linearmente na base, e o deslocamento lateral inclui apenas a deformação elástica da parede. O ELL é atingido quando a redução do comprimento de contato na base, causada pela abertura do vão ou pelo comportamento não linear do CLB em compressão, reduz a rigidez lateral da parede. Antes do ELL, a rigidez é constante, com deformação linearmente distribuída na borda de contato e deslocamento lateral resultante de deformação elástica e pequena rotação da parede. O YP ocorre quando as barras pós-tracionadas atingem sua deformação de escoamento devido ao alongamento causado pela abertura do vão e pelo movimento oscilante da parede. Nesse estado, o comprimento de contato com a fundação é ainda menor, a deformação permanece linearmente distribuída, e a rigidez entre o ELL e o YP é constante.

Posteriormente, Lv, Han e Liu (2022) sugeriram quatro estados limites: descompressão na base da parede (DEC), limite efetivo da resposta linear-elástica da parede (ELL), escoamento das barras pós-tensionadas (YP), e escoamento do CLB no canto da parede (YCC). O estado limite de YCC significa que o CLB no canto da parede atinge a resistência ao escoamento devido ao estresse de compressão concentrado.

No estudo experimental conduzido por Lu, Lv e Liu (2022), foram identificados três estágios no comportamento da parede: o estágio de descompressão, o estágio de redução da zona de compressão e o estágio de oscilação. No estágio de descompressão, não houve abertura do vão na interface entre a parede e a viga, com os amortecedores de fricção permanecendo em fricção estática. No estágio de redução da zona de compressão, foi observada a abertura inicial do vão na interface, resultando no estreitamento da zona de compressão na base. Os CFDs e

BFCDs resistiram ao momento de tombamento com forças de fricção estática, enquanto as barras de flexão dos BFCDs ainda não contribuíram devido à ausência de contato com a parede do orifício. No estágio de oscilação, a parede rotacionou em torno do ponto de rotação, com a zona de compressão restringindo-se ao entorno do ponto, enquanto forças de fricção foram superadas, os amortecedores deslizaram e as barras de flexão dos BFCDs dissiparam energia ao tocar a parede do orifício.

Ainda, com base nos estados limite propostos, Lv *et al.* (2021) desenvolveram um modelo analítico para avaliar o comportamento histerético de paredes oscilantes de CLB com amortecedores de atrito convencionais (CFDs). A resistência em cada estado-limite é determinada com base no equilíbrio de momentos e forças, considerando a força de fricção dos CFDs, a força gravitacional e a protensão inicial. O deslocamento lateral em cada estado limite é calculado separadamente, levando em conta deformações elásticas e rígidas, bem como parâmetros geométricos do sistema. A rigidez da parede antes e após o estado-limite elástico é calculada com base nas forças laterais e deslocamentos correspondentes.

Na DEC, o modelo de cálculo de deformação da parede de CLB é simplificado como uma viga em balanço e o deslocamento lateral na DEC é igual à deformação elástica da parede de CLB. Devido à pequena elevação da parede de CLB no ELL, o pequeno deslocamento rígido causado pela rotação da parede de CLB pode ser desprezado. No YP, o deslocamento final inclui a deformação elástica e o deslocamento rígido.

Posteriormente, Lv, Han e Liu (2022) desenvolveram um modelo analítico modificado (MAM) para paredes oscilantes de CLB, com ou sem CFD's, com o objetivo de estimar os pontos críticos dos estados limites, incluindo a DEC, ELL e YP. No modelo anterior (Lv *et al.*, 2021), as rigidezes iniciais das curvas analíticas eram menores do que as curvas experimentais devido à consideração insuficiente da força de atrito dos CFD's e da deformação por cisalhamento na DEC.

O MAM utiliza um método de cálculo modificado para a deformação por cisalhamento da parede de CLB e leva em conta a força de atrito dos CFD's na DEC. A deformação da parede de CLB na DEC foi modelada como uma viga em balanço. Além disso, o método da energia potencial mínima foi utilizado para calcular a deformação por cisalhamento. O método de cálculo da força de cisalhamento na ELL foi simplificado, considerando apenas a diminuição do comprimento de contato da parede, que é o principal fator de degradação de rigidez, como demonstrado nos testes.

O método da analogia de cisalhamento é adotado para o cálculo de da rigidez à flexão efetiva e da rigidez ao cisalhamento efetiva da parede. Para a parede oscilante com CFDs, a força de cisalhamento no ELL inclui a contribuição das forças de fricção. No estado YP, uma barra pós-tracionada atinge o escoamento enquanto a outra permanece elástica, com tensão linearmente distribuída ao longo do comprimento de contato.

6.4.2 Procedimento de projeto para parede de balanço CLB

Lv, Han e Liu (2022) desenvolveram um procedimento de projeto para garantir a capacidade lateral e a rigidez da parede oscilante no nível de perigo de prevenção de colapso (CP). As dimensões da parede de CLB são definidas pelo tamanho da construção, e as propriedades do bambu engenheirado são obtidas por testes de material. A carga gravitacional de cada pavimento é calculada, e a força de cisalhamento no nível de perigo CP sob ação sísmica é determinada por análise dinâmica. O limite de deslocamento relativo do CP é fixado em 2%. É considerado que as barras de protensão atingem o limite de escoamento, estão localizadas simetricamente e simplificadas como uma única barra posicionada na linha central da parede, e o comportamento plástico nos cantos da parede de CLB é desprezado.

O procedimento de projeto para a parede oscilante de CLB compreende os seguintes cinco passos: (1) determinação do alongamento das barras de protensão, (2) determinação da força de protensão inicial e da área da seção transversal, (3) determinação do número de camadas da parede de CLB, (4) verificação usando o MAM e cálculo iterativo, e (5) projeto do CFD.

O método de Projeto Baseado em Deslocamento (DBD) desenvolvido por Han *et al.* (2023) para paredes oscilantes de CLB tem como objetivo atender às limitações de deslocamento relativo entre pavimentos, com foco no nível de risco de prevenção de colapso (CP). O sistema estrutural de múltiplos pavimentos é transformado em um sistema de grau de liberdade único (SDOF) para simplificar os cálculos. As forças cortantes em cada pavimento são calculadas utilizando a rigidez equivalente, o amortecimento viscoso equivalente e o espectro de aceleração, conforme definido por normas sísmicas.

Inclui a determinação da protensão inicial, resistência ao escoamento e área da seção transversal das barras de protensão. O comportamento de autocentramento da parede é controlado por uma razão de momentos mínima de 1.15. A força de atrito é determinada por cálculos que consideram o número de superfícies de fricção, coeficiente de atrito e pré-carga dos parafusos. Após o projeto inicial, o deslocamento elástico da parede é reconsiderado para

ajustar os parâmetros até que a limitação de deslocamento seja atendida. O DBD inclui uma verificação contínua para ajustar os parâmetros de projeto, como a protensão inicial e as propriedades dos amortecedores de fricção, garantindo que o modelo atenda às limitações de desempenho sísmico.

6.5 METODOLOGIAS NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLB

Lu, Liu e Lv (2022) desenvolveram um modelo numérico da parede oscilante de CLB no ABAQUS. A parede de CLB foi simulada com elementos de casca contínua (SC8R), considerando sua composição em camadas de tiras de bambu. Devido ao comportamento quase elástico observado nos testes, adotou-se um modelo de material elástico e anisotrópico. Os componentes de aço, como a viga de base e as porcas de ancoragem, foram modelados com elementos C3D8R e propriedades bilineares elasto-plásticas. Para os tendões protendidos, utilizou-se o elemento de viga linear de 2 nós (B31) com o mesmo modelo bilinear elasto-plástico, embutidos nos canais reservados da parede e fixados às porcas e à viga de base via amarração MPC.

A análise incluiu a aplicação da força de protensão inicial, obtida por meio da redução de temperatura nos tendões, resultando no encurtamento necessário. Em seguida, foi aplicado o deslocamento lateral no lado direito da parede, replicando as condições observadas no teste experimental.

Lu, Lv e Liu (2022) investigaram a distribuição de tensões da estrutura da parede oscilante de CLB utilizando o software ABAQUS. A parede de CLB foi simulada com elementos de casca contínua em estado de tensão plana sob força lateral, desconsiderando as camadas de adesivo devido à ausência de danos observados nos testes. Um modelo elástico e anisotrópico foi adotado, considerando o comportamento quase elástico da parede. As barras de protensão, simuladas com elementos lineares de viga (B31), foram fixadas na viga de aço inferior e na ancoragem superior usando restrição de amarração MPC, aplicando a força de protensão por redução de temperatura. Componentes de aço e do BFCD foram modelados com elementos C3D8R; as barras de flexão usaram um modelo combinado de encruamento calibrado, enquanto os demais componentes foram considerados elásticos.

As funções de atrito “hard contact” e “penalty” foram adotados para os comportamentos de contato normal e tangencial entre a placa principal com ranhura e a placa de fricção, sendo o coeficiente de atrito de 0.3. Devido à folga entre a parede de CLB e o atuador, a parede apresentou um leve deslizamento antes de uma razão de deslocamento de 0.13%. Para

considerar a influência do deslizamento, molas não lineares foram utilizadas para simular o deslizamento. As placas de aço foram atribuídas a um modelo de material elástico.

O resultado da análise por elementos finitos correspondeu bem com o resultado do teste. Os contornos de tensão mostraram claramente a distribuição de tensões na parede de CLB em cada estágio. A zona de compressão na base da parede de CLB diminuiu com o aumento do deslocamento de carga, enquanto a tensão máxima no canto da parede aumentou.

Lv, Han e Liu (2022) desenvolveram um modelo de elementos finitos para paredes oscilantes de CLB utilizando o programa ABAQUS. Os parafusos de ancoragem foram considerados como uma amarração de restrição multiponto (MPC). O comportamento da parede de CLB sob carregamento lateral pode ser simplificado como um problema de tensão plana. Consequentemente, a parede de CLB foi desenvolvida o elemento de casca contínua SC8R. Um elemento de treliça termicamente acoplado em 2D (T2D2T) foi usado para simular as barras de protensão. O CFD, as placas de conexão, as placas de ancoragem e a viga de aço foram modelados usando um elemento sólido de 8 nós (C3D8R).

Para a parede de CLB, foi adotado o modelo constitutivo elástico-plástico ideal, considerado também para as barras de protensão, bem como para os componentes de aço e cobre. A interação da parede incluiu o contato e as restrições entre os componentes. Foi adotado o contato geral para o modelo. Para as propriedades de contato, foi selecionado o “hard contact” para o comportamento normal e “penalty” para o comportamento tangencial. O coeficiente de fricção foi considerado como 0.3 para o contato bambu-aço e para a interface aço-aço.

“MPC tie” foi usada como restrição de contato entre as barras de protensão e as placas de ancoragem e a fundação. A restrição “tie” foi aplicada entre o CFDs e a parede de CLB e o CFDs a fundação. A barra de protensão foi modelada como um único elemento (em vez de vários) no modelo de elementos finitos, a fim de simular o efeito de não aderência entre a barra e a parede. O método de resfriamento foi usado para aplicar a força de pré-esforço das barras de protensão. A pré-carga dos parafusos no CFD foi aplicada por meio de cargas aplicadas na seção transversal média do parafuso.

Han *et al.* (2023) propuseram um modelo numérico simplificado (SNM) para a parede oscilante de CLB. O elemento de casca sólida (S4R) foi utilizado para o desenvolvimento do painel da parede de cisalhamento e da parede oscilante. O conector cartesiano embutido foi considerado como molas em três direções. Dois tipos de conectores foram considerados no modelo de parede oscilante de CLB: conectores centrais e conectores de borda. No SNM, os

conectores centrais determinavam as curvas envoltórias da parede e os conectores de borda determinavam a dissipação de energia da parede.

A força de atrito dos amortecedores de fricção, foi definida por meio dos conectores de borda. Os conectores de cisalhamento e conectores rígidos também foram desenvolvidos utilizando o modelo de conector cartesiano para conectar as paredes oscilantes às paredes de cisalhamento adjacentes. Para simular os comportamentos mecânicos dos conectores de cisalhamento, as partes elástica-linear e plástica foram definidas no modelo, considerando um modelo tri-linear.

Archila *et al.* (2014) desenvolveram modelos de elementos finitos de painéis de CLB utilizando o Abaqus, para simular o comportamento elástico sob testes de compressão. Assumiu-se um comportamento ortotrópico para o modelo. As condições de contorno restringiram translações e rotações fora do plano nos planos de simetria. Os modelos foram carregados com elementos C3D8R, sendo aplicado o controle aprimorado de *hourglassing* do Abaqus para evitar deformações não físicas. A malha possuía quatro elementos na espessura das lamelas e tamanho de 3 mm nas demais direções, correspondendo ao tamanho das lacunas. O contato entre as lamelas foi modelado como contato rígido normal, enquanto a interface colada entre camadas cruzadas foi representada por restrições do tipo *tie*. O modelo de elementos finitos demonstrou boa correlação com os valores experimentais e preditos. Diferenças observadas foram atribuídas às lacunas presentes nos painéis, o que reduziu a rigidez à compressão em aproximadamente 10%.

Wang *et al.* (2024) desenvolveram modelos numéricos para os testes de cisalhamento planar modificados (MPS) e os testes de flexão de viga curta de três pontos (SBB) no Abaqus. A lei constitutiva do bambu sob compressão foi modelada como elasto-plástica, enquanto a tração/cisalhamento foi representada por um modelo linear-elástico frágil. Os módulos e resistências do CLB foram definidos no User Material (UMAT) com base em testes experimentais. Elementos sólidos C3D8R foram usados para as placas de aço, e elementos C3D8 para o CLB. O contato rígido foi aplicado na interação normal entre CLB e placas de aço, e o atrito penalizado com coeficiente 0.3 foi usado na direção tangencial. O modelo de zona coesiva (CZM) simulou a camada de cola entre as lâminas. O CZM adotou comportamento tração-separação, com rigidez inicial alta, resistência coesiva igual à da cola, e deslocamento de falha de 0.06 mm. Após a delaminação, no modelo MPS, ocorreu deslizamento com coeficiente de atrito de 0.3. O CZM seguiu uma lei linear-elástica frágil. Os tamanhos de malha foram 3 mm para o modelo MPS, 4 mm para o SBB, e o mesmo tamanho foi usado no CZM.

Os modelos reproduziram adequadamente as propagações de falha e os modos de falha coesiva observados experimentalmente.

Li X. *et al.* (2023) utilizaram o Abaqus para desenvolver modelos numéricos que analisam a transferência de calor em estado estacionário em paredes de CLB. O estudo investigou o impacto do coeficiente de condutividade térmica do adesivo no desempenho de isolamento térmico, bem como a influência da posição da placa de espuma de EPS. Para facilitar a análise por elementos finitos, foram adotadas suposições, incluindo: camadas homogêneas e isotrópicas com propriedades termofísicas constantes; interfaces em contato total, sem considerar resistência térmica; e temperatura atmosférica constante. Foram utilizados elementos hexaédricos lineares para transferência de calor com 8 nós (DC3D8). As diferentes camadas foram vinculadas entre si, garantindo que os dois materiais apresentassem a mesma temperatura na superfície de contato.

O modelo numérico demonstrou que a variação do coeficiente de condutividade térmica do adesivo teve influência desprezível no coeficiente de transferência de calor, com variação inferior a 0.139%, permitindo desconsiderar essa propriedade nos cálculos. A comparação entre os valores numéricos e experimentais do coeficiente de transferência de calor apresentou erro relativo inferior a 13%, validando a precisão do modelo. A simulação indicou que a posição da placa de EPS teve impacto mínimo no coeficiente de transferência de calor, e a melhor performance foi observada com a placa no meio. No entanto, para evitar pontes térmicas e garantir qualidade construtiva, recomendou-se posicionar a placa no lado frio.

Tabela 22 – Síntese das características de modelos numéricos do CLB

RF	EL	Teste	CLB		Conectores		Cabos PT		Amortecedor	
			EL	M	EL	M	EL	M	EL	M
1	Parede oscilante	Carregamento cíclico lateral	SC8R	Elástico e anisotrópico	C3D8R	Elásto-plástico	B31	Elásto-plástico	C3D8R	Plástico com endurecimento combinado
2	Edifício 3PVS	Carregamento cíclico lateral	S4R	Elástico	Cartesianos (mola)	Não-linear elástico + fricção			Cartesianos (mola)	
3	Painel	Compressão no plano nas duas direções	C3D8R	Elástico						
4	Parede oscilante	Carregamento cíclico lateral	SC8R	Elástico e anisotrópico	C3D8R	Elástico	B31		C3D8R	Modelo de endurecimento combinado calibrado

5	Amostras	Cisalhamento Flexão fora do plano	C3D8	Elástico- plástico Linear- elástico frágil	C3D8R					
6	Parede	Transferência de calor	DC3D8							

Legenda: RF – Referências; EL – Elementos; M – Modelo do material; 1 Lu, Liu e Lv (2022); 2 Han *et al.* (2023); 3 Archila *et al.* (2014); 4 Lu, Lv e Liu (2022); 5 Wang *et al.* (2024); 6 Lv, Wang, Liu (2019a).

Fonte: Autora (2024).

A síntese das metodologias numéricas aplicadas ao estudo do CLB evidencia avanços no entendimento do comportamento estrutural e funcional deste material inovador. Modelos desenvolvidos em softwares como ABAQUS têm demonstrado alta eficiência na simulação de diferentes aspectos mecânicos e térmicos, sendo capazes de replicar com precisão os resultados experimentais e identificar mecanismos relevantes, como distribuição de tensões, delaminação e transferência de calor.

As abordagens numéricas, como a utilização de elementos finitos para modelar componentes anisotrópicos e o emprego de interações complexas entre materiais e interfaces, têm permitido aprofundar o conhecimento sobre o desempenho estrutural do CLB, especialmente em aplicações como paredes oscilantes e painéis de cisalhamento. Adicionalmente, modelos constitutivos elástico-plásticos e o uso de leis coesivas para simular o comportamento das interfaces adesivas destacam-se como ferramentas indispensáveis para a avaliação de modos de falha.

Outro ponto relevante é a flexibilidade dos métodos numéricos em considerar diferentes condições de contorno e cenários de carregamento, o que potencializa sua aplicabilidade tanto no dimensionamento de elementos estruturais quanto na análise de desempenho térmico. No entanto, desafios como a representação precisa da heterogeneidade do material e a interação entre as camadas ainda requerem estudos adicionais para aprimorar a confiabilidade dos modelos.

Dessa forma, as metodologias numéricas têm se consolidado como um suporte fundamental para a validação experimental e o desenvolvimento de novas aplicações do CLB, contribuindo para sua utilização segura e eficiente em construções modernas. Estudos futuros devem focar na integração de modelos mais avançados, considerando aspectos como efeitos de longo prazo e variabilidade material, com vistas a expandir ainda mais as possibilidades de uso deste material sustentável.

6.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO CLB

Alguns estudos experimentais descreveram o processo de fabricação do CLB utilizado na pesquisa. Qiu e Fan (2022) utilizaram placas de PBSL fabricado pela Hunan Taohuajiang Bamboo Science & Technology Co., Ltd. como material base do CLB. O PBSL foi fabricado com resina fenólica. As placas foram submetidas a “aplainamento sob pressão” e lixamento para atingir a espessura final de 6.25 mm. As placas de PBSL foram assentadas no padrão $[0^\circ/90^\circ]_4$ e coladas com o adesivo Jowat 687.40, um adesivo de poliuretano monocomponente, sendo prensadas a frio por 4 horas sob 5 MPa. O painel final de CLB apresentou densidade média de 1.15 g/cm³ e espessura de 50 mm (8 camadas).

Qiu *et al.* (2023) também fabricaram o CLB a partir de PBSL. Placas de PBSL foram então dispostas e coladas com laminação de $[0^\circ/90^\circ]_4$. Após a solidificação da resina, o laminado foi prensado à frio por cerca de 4 horas sob uma pressão de 5 MPa. No estudo de Xing, Hao e Sikora (2019), as placas de bambu laminado colado também foram fornecidas pela Hunan Taohuajiang Bamboo Technology, e as placas de *bamboo scrimber* foram fornecidas pela Hangzhou Dasso Bamboo Technology. Ambos os painéis foram fabricados a partir de bambu Mossô com idade de 3 a 5 anos e um teor de umidade entre 8% e 12%. Li Z. *et al.* (2022) também utilizaram bambu laminado colado como material base para fabricação do CLB. O CLB foi produzido com adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), sob uma pressão de 0.2 MPa a 20 °C por mais de 24 horas.

Wang *et al.* (2024) produziram o CLB a partir de bambu Mossô com densidade de 1.15 g/cm³ e teor de umidade de 10%. O adesivo utilizado foi a cola de poliuretano GU305. O processo de prensagem a frio foi realizado por 5 horas a 25 °C, sob pressão de 2 MPa, seguido por um processo de isolamento de 24 horas. A espessura da camada coesa variou entre 0.1 mm e 0.3 mm. O painel de CLB fabricado tinha dimensões de 1200 mm × 1200 mm × 60 mm e não possuía colagem nas bordas.

Wu *et al.* (2023) utilizaram um CLB composto por camadas compostas por cinco lamelas de 5 mm de espessura e aproximadamente 20 a 25 mm de largura, cortadas de bambu Mossô. O painel de CLB possuía dimensões de 1200 mm × 1000 mm. As tiras de bambu foram carbonizadas (120 °C), submetidas à pressão de 3 MPa e temperatura de 105 °C por 3 minutos e coladas com resina ureia-formaldeído (UF) para formar os painéis de CLB. As proporções volumétricas entre lamelas longitudinais e transversais foi de 1:4 e 2:3. A densidade do bambu laminado foi de 862 kg/m³ e o teor de umidade médio de 8.9%.

Archila *et al.* (2014) fabricaram o CLB a partir do bambu *Guadua* e denominaram o material base de FGS (flat *Guadua* sheets). Para produzir o FGS, colmos de bambu foram cortados, lixados para remover camadas externas e seccionados em 6 a 8 tiras, com remoção da membrana interna. As tiras foram condicionadas a 12% de umidade, imersas em água por 24 horas e submetidas a um tratamento THM aberto por 20 minutos, com pressão radial de 50 kg/cm², temperatura de 150°C e compressão de 45%.

A modificação THM foi realizada em duas etapas: plastificação e densificação, resultando em FGS densificado com propriedades mecânicas aprimoradas. Os FGS foram organizados em camadas cruzadas (0°/90°) para formar CLBs de três e cinco camadas (com espessura de 5.5 ± 0.3 mm), colados com resina epóxi (4% do peso total) e taxa de espalhamento de 215 g/m². Após a aplicação de pressão a frio de 35 kg/cm², os painéis foram curados em ambiente controlado por 20 dias antes da usinagem.

No estudo de Lv, Wang e Liu (2019b), o CLB foi fabricado a partir do *bamboo scrimber* obtido da Hangzhou Dasuo Technology Co., Ltd., com uma densidade média de 1.2 g/cm³. O processo de fabricação do *bamboo scrimber* incluiu as etapas: (1) saturação dos feixes de fibras de bambu Mossô com adesivo de poliuretano bicomponente, (2) prensagem a quente a 140°C com uma taxa de prensagem de 1 minuto a 2 minutos por milímetro, e (3) cura a quente e polimento. A fabricação do CLB envolve o posicionamento ortogonal das camadas de *bamboo scrimber*, unidas com adesivo. O conjunto é prensado a mais de 25°C por 5 horas e curado sob pressão superior a 2 MPa. Lv, Wang e Liu (2019a) fabricaram um CLB reforçado com malha de CFRP posicionada na camada inferior do painel. As camadas e a malha também foram unidas com adesivo, prensadas a mais de 25°C por 5 horas e curadas sob pressão superior a 2 MPa.

Lv *et al.* (2021) estudaram um CLB fabricado a partir de *bamboo scrimber*, com teor de umidade de 9% e densidade de 1.15 g/cm³ (fornecido pelo fabricante). O CLB foi composto por cinco camadas de 20 mm espessura e colado com adesivo resorcinol, prensado a frio por 4 horas sob uma pressão de 1.5 MPa. As camadas externas e central estavam orientadas na direção principal da fibra, consistindo em 10 lamelas de *bamboo scrimber* com dimensões de 1500 mm × 100 mm × 20 mm. As demais camadas estavam na direção transversal, consistindo em 15 lamelas de *bamboo scrimber* com dimensões de 1000 mm × 100 mm × 20 mm. Lu, Lv e Liu (2022) também produziu CLB a partir de *bamboo scrimber*. O CLB foi composto por cinco camadas de 20 mm de espessura, coladas com adesivo resorcinol-formaldeído e prensadas a frio a 1.5 MPa por 4 horas.

A Tabela 23 apresenta uma síntese das características do painéis e amostras de CLB e algumas característica de seu processo produtivo identificadas nos artigos dessa revisão sistemática.

Tabela 23 – Dados característicos acerca do CLB e seu processo de fabricação

REF	TB	EP	C (mm)	L (mm)	E (mm)	NC (mm)	EC (mm)	ADES.	TA (g/m ²)	TP	TMP (h)	P (MPa)
1	BSC	Mossô	800	800	50	8	6.25			AF	4	5
2	BSC		1500	1000	100	5	20					
3	BSC		1500	1000	100	5	20	R		AF	4	1.5
4	BSC		1000		50	8	6.25					
5	BSC	Mossô	1500	430	100	5	20	PUR				
6			1500	1000	100	5	17					
7	ST	Guadua	700 600	700 600	17.5 27.5	3 5						
8	ST	Guadua	600	600	16.5 27.5	3 e 5		REM	215	AF		3.43
9	BSC	Mossô	1500	1000	100	5	20	RF		AF	4	1.5
10	ST	Mossô	1200	1000	30	5	5					
11	ST		1800	600	100 60	5 7	12 20			AF		
12	BSC	Mossô	1500	430	100	5	20	RF				
13	BSC	Mossô	600	600	50	8	6.25					
14	BSC	Mossô	1800	600	100 60	5 7	12 20				5	2
15	BSC		1200	600	50	8	6.25	PUR		AF	4	5
16			1500	1000	100	5	20					
17	LB	Mossô	1200	1200	60	3	20	PUR		AF	5	2
18	BSC	Mossô	50	30	40	2	20	PVA	175- 225	AF	2	
	BSC LB		50	30	40	2	20	MUF	200- 300		1	
	LB		50	30	40	2	20	HPA	200- 300		2	
	BSC LB		50	30	40	2	20	PUR	100- 180		2	
19	LB						30	PRF		AF	24	0.2
20	ST	Guadua				3 5		RET				
21	BSC	Mossô	980	980	88 120 121 145	3 5		1-K-PUR				

Legenda: REF – Referência; TP – Tipo de bambu; EP – Espécie; C – Comprimento; L – Largura; E – Espessura; NC – Número de camada; EC – Espessura da camada; ADE. – Adesivo; TA – Taxa de aplicação do adesivo; TP – Tipo de prensagem; TMP – Tempo de prensagem; P – Pressão de prensagem; R – Resorcinol; RF – Resorcinol-formaldeído; REM – Resina epóxi de madeira; RET – Resina epóxi termofixa; PVA – Acetato de polivinila; MUF – Melamina-ureia-formaldeído; HPA – Adesivo híbrido de polímero; PUR – Poliuretano monocomponente; PRF – Fenol-resorcinol-formaldeído; 1 Qiu *et al.* (2023); 2 Lu, Liu e Lv (2022); 3 Lv *et al.* (2021); 4 Qiu, Zhu e Fan (2023); 5 Lv, Wang e Liu (2021); 6 Han *et al.* (2023); 7 Archila *et al.* (2017); 8 Archila *et al.* (2014); 9 Lu, Lv e Liu (2022); 10 Wu *et al.* (2023); 11 Ding e Lv (2020); 12 Lü, Wang e Liu (2021); 13 Qiu, Yang e Fan (2024); 14 Lv, Wang e Liu (2019b); 15 Qiu e Fan (2022); 16 Lv, Han e Liu (2022); 17 Wang *et al.* (2024); 18 Xing, Hao e Sikora (2019); 19 Li Z. *et al.* (2022); 20 Archila, Zea-Escamilla e Harries (2023); 21 Lv, Wang e Liu (2019a).

Fonte: Autora (2024).

Com base na revisão sistemática da literatura realizada, foi possível identificar as principais características geométricas, os processos de fabricação e os materiais utilizados no desenvolvimento desse produto de bambu engenheirado. A síntese demonstra que o processo de fabricação do CLB é diversificado, refletindo a variedade de materiais, adesivos e parâmetros de fabricação empregados.

Os painéis de CLB são geralmente fabricados a partir de bambu engenheirado, como o *bamboo scrimber* e as tiras laminadas, ambos derivados do bambu Mossô. Em casos específicos, o bambu Guadua também foi utilizado, embora em menor escala. Entre os tipos de bambu engenheirado analisados, o *bamboo scrimber* foi o mais amplamente empregado, devido à sua elevada densidade e resistência mecânica. O processo de fabricação inclui a organização das lamelas em orientações cruzadas ($[0^\circ/90^\circ]$), resultando em painéis de alta estabilidade e desempenho estrutural. A quantidade de camadas varia tipicamente entre três e oito, sendo que, ao contrário do CLT, o número de camadas no CLB não é necessariamente ímpar. Observou-se, em alguns casos, camadas internas orientadas na mesma direção, uma configuração menos comum no CLT.

Quanto às dimensões das lamelas, estas variam de 6.25 mm a 20 mm de espessura, significativamente menores do que as utilizadas no CLT, que geralmente variam entre 16 mm e 51 mm. Essa menor espessura das lamelas no CLB está diretamente relacionada à espessura reduzida dos colmos de bambu em comparação aos troncos de madeira empregados na fabricação do CLT. Essa característica também influencia o número total de camadas, visto que as lamelas mais finas requerem um maior número de camadas para atingir espessuras comparáveis às dos painéis CLT.

Os adesivos utilizados na fabricação do CLB são diversos, sendo os mais empregados o poliuretano (PUR) e o resorcinol-formaldeído (RF). Esses adesivos se destacam pela sua alta resistência e durabilidade, fatores cruciais para o desempenho estrutural dos painéis. Além disso, a escolha do adesivo é frequentemente adaptada às condições específicas de fabricação, como a pressão e o tempo de cura. Os processos de colagem incluem principalmente prensagem a frio sob pressões variando de 0.2 MPa a 5 MPa, com tempos de cura que vão de 4 horas a mais de 24 horas.

Portanto, o CLB é um material altamente versátil e promissor para aplicações estruturais, apresentando características geométricas e mecânicas ajustáveis conforme as demandas específicas do projeto. A variedade de técnicas de fabricação, materiais e adesivos empregados reflete tanto a flexibilidade quanto os desafios enfrentados no desenvolvimento

desse produto engenheirado. No entanto, a ausência de padronização entre os estudos analisados destaca a necessidade de maior uniformização nos processos de fabricação e caracterização para possibilitar uma produção em larga escala e consolidar o uso do CLB em aplicações estruturais globais.

6.7 APLICAÇÕES DO CLB

O CLB tem sido amplamente investigado por sua versatilidade e desempenho mecânico em diferentes aplicações estruturais. Qiu e Fan (2022) destacaram seu uso em construções que requerem resistência uniforme nas direções paralela e transversal, como placas estruturais, enquanto Qiu, Zhu e Fan (2023) enfatizaram o potencial do CLB para componentes estruturais bidirecionais, capazes de resistir a diversas cargas.

Lv, Wang e Liu (2021) sugeriram o emprego do CLB em edifícios altos feitos de bambu, inspirando-se no uso do CLT em construções de madeira de múltiplos pavimentos. Lü, Wang e Liu (2021) complementaram essas propostas ao apontar os painéis de CLB como uma alternativa eficaz para melhorar a resistência mecânica e a estabilidade dimensional em componentes estruturais que exigem desempenho em duas direções, com especial atenção à segurança contra incêndios em edificações de múltiplos pavimentos.

Wu *et al.* (2023) ampliaram as possibilidades de aplicação do CLB, propondo seu uso em elementos estruturais como vigas e paredes de cisalhamento. Eles destacaram que o arranjo bidirecional das fibras do CLB melhora significativamente a resistência à fratura translaminar, aumentando a capacidade de absorver energia e resistir ao crescimento de trincas catastróficas, características cruciais para estruturas tolerantes a danos.

Além disso, Ding e Lv (2020) identificaram o CLB como um material preferido para paredes de cisalhamento, diafragmas de piso e coberturas, devido à sua excelente rigidez estrutural nas direções ortogonais, reforçando sua viabilidade em aplicações que demandam alta eficiência estrutural.

O CLB tem se destacado como um material promissor em diversas aplicações estruturais, especialmente em construções que demandam resistência a carregamentos planos e fora do plano. Qiu, Yang e Fan (2024) propuseram o uso do CLB em pisos e paredes, destacando sua eficácia em edifícios resilientes, onde sua estrutura multicamada melhora a capacidade de suportar cargas explosivas. Qiu *et al.* (2023) reforçam o potencial do CLB em estruturas de proteção contra explosões, destacando sua capacidade de equilibrar a anisotropia do bambu e aprimorar as propriedades mecânicas em comparação com placas unidirecionais.

Como elemento estrutural, o CLB apresenta alta resistência a deformações elásticas dinâmicas e limita os modos de falha a fraturas de fibras e delaminação, prevenindo rachaduras completas na matriz, sendo apontado como uma alternativa para construções que exigem alta resistência a impactos.

Lv, Wang e Liu (2019b) sugeriram a utilização do CLB como lajes e lajes reforçadas com malha de CFRP, ampliando suas aplicações em estruturas que demandam maior rigidez e resistência. Por outro lado, Xing, Hao e Sikora (2019) destacaram a viabilidade do CLB em painéis estruturais pré-fabricados e modulares, contribuindo para a sustentabilidade e reduzindo a pegada ambiental na construção civil.

Os painéis de bambu laminado cruzado (CLB) têm sido amplamente reconhecidos como elementos estruturais promissores em paredes e pisos, devido às suas propriedades de resistência ao cisalhamento transversal e ao desempenho mecânico geral. Li Z. *et al.* (2022) destacam essas características, reforçando o potencial do CLB nessas aplicações. Lv, Wang e Liu (2019a) complementam ao propor o uso do CLB em paredes, ressaltando, além de sua resistência estrutural, seu desempenho em isolamento térmico, o que o torna adequado para edificações energeticamente eficientes.

Archila *et al.* (2017) sugerem que os painéis de CLB podem ser utilizados em sistemas como painéis sanduíche e estruturas de pele tensionada (por exemplo, monocoques). Essas configurações combinam camadas finas e rígidas separadas por um núcleo ou estrutura interna, resultando em aumento do segundo momento de área e maior resistência à flambagem. Mais recentemente, Archila, Zea-Escamilla e Harries (2023) ampliaram as possibilidades de aplicação do CLB, propondo seu uso em paredes e pisos estruturais, sistemas pré-fabricados e construções híbridas. Eles enfatizam o potencial de combinar lamelas de bambu de alta densidade com materiais de núcleo de menor densidade, criando produtos híbridos que aliam eficiência estrutural e sustentabilidade.

Os estudos recentes exploram diversas aplicações do CLB em sistemas estruturais inovadores, com destaque para seu desempenho sísmico e eficiência na dissipação de energia. Lu, Lv e Liu (2022) propuseram o uso do CLB em paredes oscilantes combinadas com dissipadores de energia parcialmente restringidos (PREDS). De forma semelhante, Lv *et al.* (2021) sugeriram a aplicação de paredes oscilantes de CLB equipadas com amortecedores de fricção convencionais e capacidade de autocentrimento.

Han *et al.* (2023) destacaram o uso de paredes oscilantes de CLB com capacidade de autocentrimento em edifícios de três pavimentos, visando o controle de deslocamento relativo

e a dissipação eficiente de energia. Lv, Han e Liu (2022) complementaram esses avanços ao propor a aplicação de paredes oscilantes de CLB em edifícios, devido às suas propriedades sísmicas superiores, como alta capacidade de dissipação de energia, boa capacidade de autocentramento e comportamento estável sob carregamentos cíclicos. Além disso, Lu, Liu e Lv (2022) também propuseram o emprego do CLT em paredes oscilantes com amortecedores acoplados de fricção e flexão (BFCD), otimizadas para edificações resistentes a terremotos, com alta eficiência energética e autocentramento em estruturas de bambu de múltiplos andares.

Essas propostas evidenciam o papel do CLB como um material inovador e versátil para aplicações estruturais, especialmente em contextos que demandam desempenho mecânico superior, eficiência energética e soluções construtivas sustentáveis.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA RSL DO CROSS- LAMINATED BAMBOO AND TIMBER (CLBT)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO *CROSS-LAMINATED BAMBOO AND TIMBER* (CLBT)

Neste capítulo, são apresentados os resultados da revisão sistemática da literatura sobre o CLBT. A abordagem inclui a análise bibliométrica dos documentos selecionados e a síntese das informações obtidas, com o intuito de oferecer uma visão ampla sobre o estágio atual da pesquisa e do desenvolvimento na área.

7.1 CARACTERIZAÇÃO BIBLIOMÉTRICA E ASPECTOS TEMÁTICOS

A Tabela 24 apresenta os resultados da prospecção realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) utilizando a *string* definida. A busca resultou na identificação de 32 documentos, sendo 18 localizados na base Scopus e 15 na Web of Science.

Tabela 24 – Resultados da *string* de busca para o CLBT

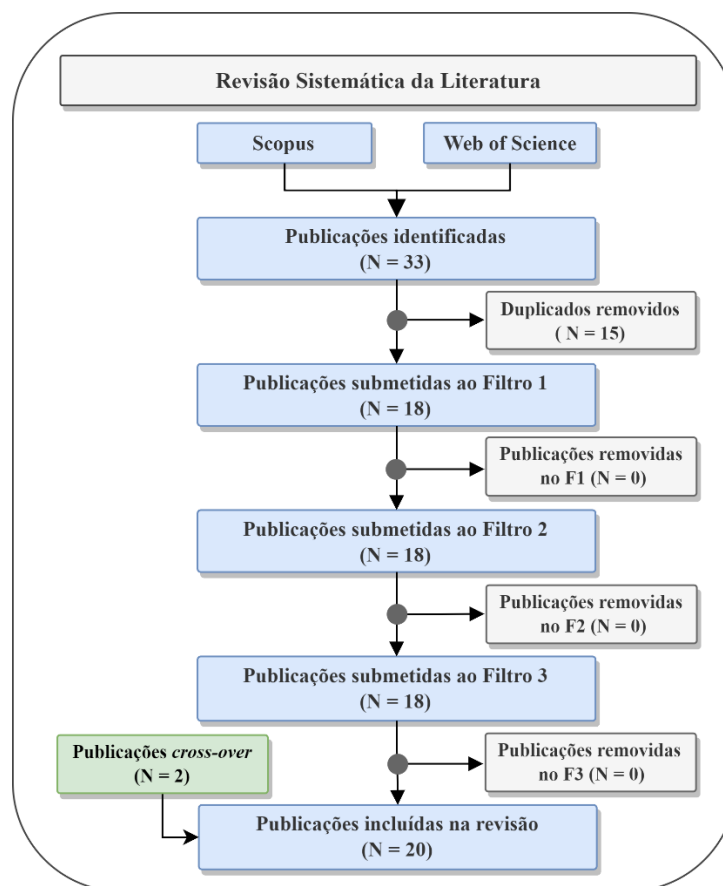
<i>String</i>	Scopus	WoS
<i>“cross-laminated bamboo and timber” OR “cross laminated bamboo and timber”</i>	18	15

Fonte: Autora (2024).

O processo de revisão sistemática descrito na metodologia desta pesquisa foi representado pelo fluxograma PRISMA, apresentado na Figura 145, que detalha as etapas de identificação, triagem e seleção das publicações. Inicialmente, 32 publicações foram identificadas por meio da *string* de busca aplicada nas bases de dados mencionadas. Após essa etapa, foram removidas 15 publicações duplicadas, resultando em 18 publicações únicas que avançaram para o primeiro filtro (F1), o qual consistiu na leitura do título, resumo e palavras-chave. Nesse filtro, bem como no filtro 2, que incluiu a leitura da introdução e da conclusão, nenhum documento foi excluído.

As 18 publicações remanescentes foram submetidas ao filtro 3, que envolveu a leitura completa dos artigos selecionados. Após essa etapa, todas as 18 publicações foram mantidas no processo de revisão. Adicionalmente, durante a aplicação do filtro 3, dois documentos relacionados ao CLBT foram identificados nas referências dos artigos analisados, sendo incluídos na revisão. Dessa forma, o compêndio final da revisão sistemática passou a contar com um total de 20 documentos relacionados ao CLBT.

Figura 145 – Fluxograma PRISMA da revisão sistemática da literatura sobre o CLBT



Fonte: Autora (2024).

A Figura 146 apresenta a distribuição temporal das 20 publicações identificadas sobre o CLBT ao longo dos anos, considerando o total de publicações e a separação entre as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS). O gráfico revela que o número de publicações sobre o tema tem aumentado gradativamente desde 2019, com picos nos anos de 2022 e 2023, sugerindo um crescimento do interesse e da produção científica na área.

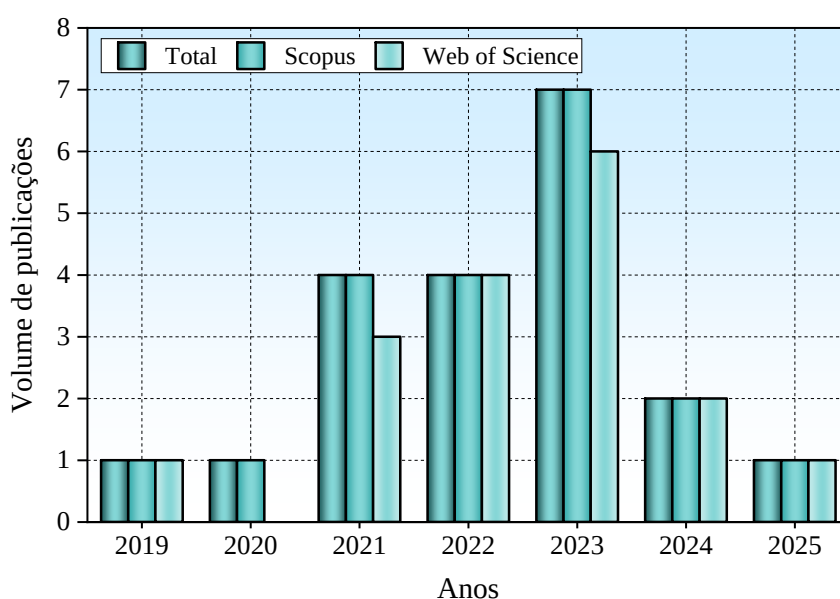
Em 2019 e 2020, o número de publicações foi reduzido, indicando que o tema era pouco explorado nesse período. A partir de 2021, observa-se um aumento expressivo no volume de publicações, especialmente em 2023, quando o total atingiu o maior número anual registrado, com destaque para contribuições oriundas da base Scopus. Em contrapartida, no ano de 2024, houve uma redução no número de publicações em ambas as bases, possivelmente indicando uma estabilização na produção científica ou o encerramento de alguns projetos iniciados nos anos anteriores.

Essa análise evidencia que o tema CLBT está em ascensão, especialmente a partir de 2021, refletindo a relevância crescente desse material no contexto da engenharia civil. Os picos de publicação em 2022 e 2023 podem estar associados ao maior reconhecimento de sua

aplicação em estruturas sustentáveis e inovadoras. A predominância de publicações na Scopus em relação à WoS sugere que a base Scopus possui uma cobertura mais ampla ou maior ênfase em tópicos relacionados à engenharia e materiais estruturais.

Essas informações destacam a evolução do interesse acadêmico e prático sobre o CLBT, indicando que os anos recentes marcaram uma fase de expansão significativa no campo. Este cenário reforça a importância de explorar mais profundamente os avanços tecnológicos e aplicações do CLBT, com potencial para futuras investigações e desenvolvimento de normas específicas.

Figura 146 – Volume de publicações por ano por base de dados e no total



Fonte: Autora (2024).

O gráfico apresentado na Figura 147 ilustra o volume de publicações por autor relacionado ao tema CLBT, considerando os autores que publicaram pelo menos dois artigos. O levantamento totalizou 47 autores identificados, dos quais apenas 18 atenderam ao critério mínimo de dois artigos.

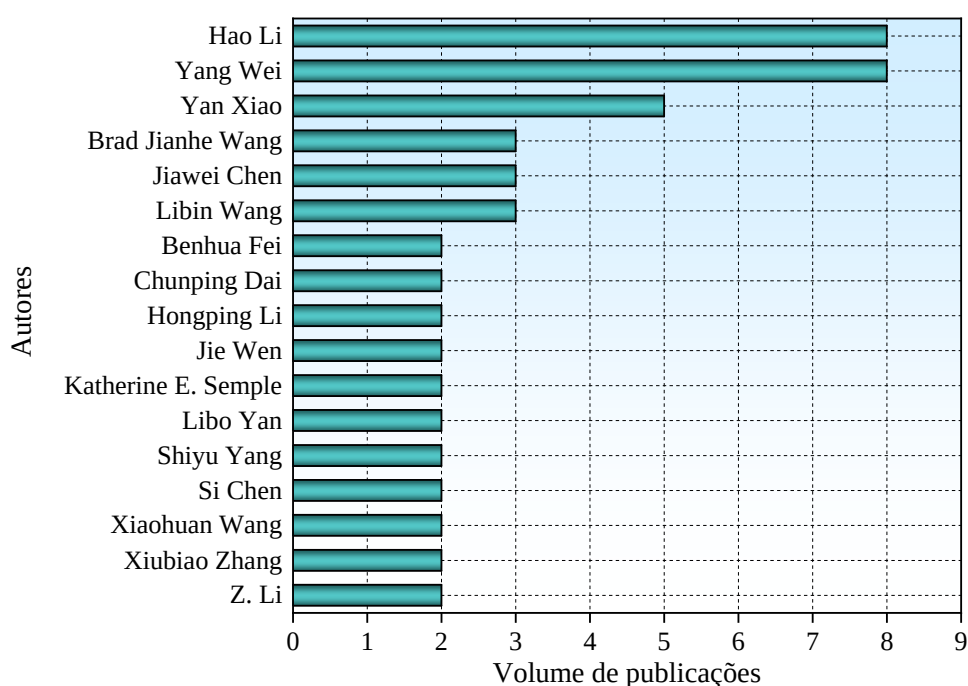
Entre os autores com maior contribuição para o tema, destacam-se Hao Li e Yang Wei, ambos com 8 publicações, seguidos por Yan Xiao, com 6 publicações. Brad Jianhe Wang, Jiawei Chen e Libin Wang aparecem em terceiro lugar, com 3 publicações cada. Os demais autores listados, incluindo nomes como Benhua Fei, Chunping Dai e Katherine E. Sample, contribuíram com 2 publicações cada.

Esses dados sugerem que a pesquisa sobre CLBT está concentrada em um grupo relativamente pequeno de autores com publicações mais frequentes, enquanto o restante dos

autores contribui com um volume menor de artigos. Esse padrão reflete uma tendência comum em áreas de estudo emergentes, nas quais poucos pesquisadores atuam como principais impulsionadores do desenvolvimento do conhecimento.

O gráfico fornece uma visão clara sobre a distribuição das contribuições entre os pesquisadores, auxiliando na identificação dos principais autores e potenciais colaboradores ou referências para futuras pesquisas sobre CLBT.

Figura 147 – Distribuição de autores por volume de publicações



Fonte: Autora (2024).

O gráfico da Figura 148 apresenta a distribuição do volume de publicações de acordo com os países dos autores. A China se destaca de maneira expressiva, com 18 publicações, representando a maior contribuição global para o tema. Esse resultado evidencia o papel de liderança da China nas pesquisas sobre o CLBT, provavelmente devido à sua forte tradição no uso de materiais à base de bambu e madeira, além dos investimentos significativos em inovação e desenvolvimento de produtos engenheirados.

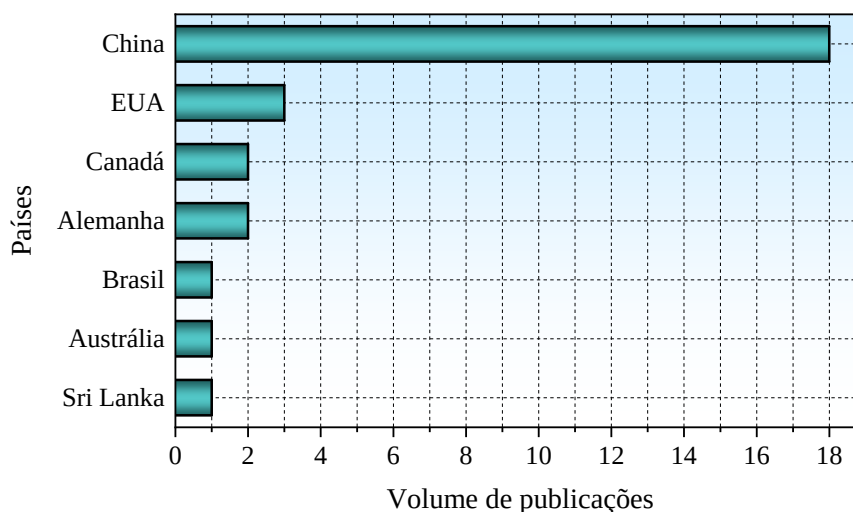
Os Estados Unidos aparecem em segundo lugar, com 3 publicações, seguidos pelo Canadá e Alemanha, ambos com 2 publicações cada. Outros países, como Brasil, Austrália e Sri Lanka, apresentaram uma contribuição mais modesta, com 1 publicação cada.

A concentração das publicações na China pode refletir a disponibilidade de matéria-prima, o interesse crescente em soluções sustentáveis na construção civil e a integração do bambu como alternativa viável em sistemas estruturais. A presença de países como Brasil e Sri

Lanka indica o potencial global do tema, principalmente em regiões onde o bambu é amplamente cultivado, mas onde a pesquisa ainda é incipiente.

O gráfico evidencia, portanto, a predominância de países asiáticos e a importância de ampliar os esforços de pesquisa em outras regiões, visando a internacionalização e a promoção do uso do CLBT em escala global.

Figura 148 – Distribuição dos países por volume de publicações

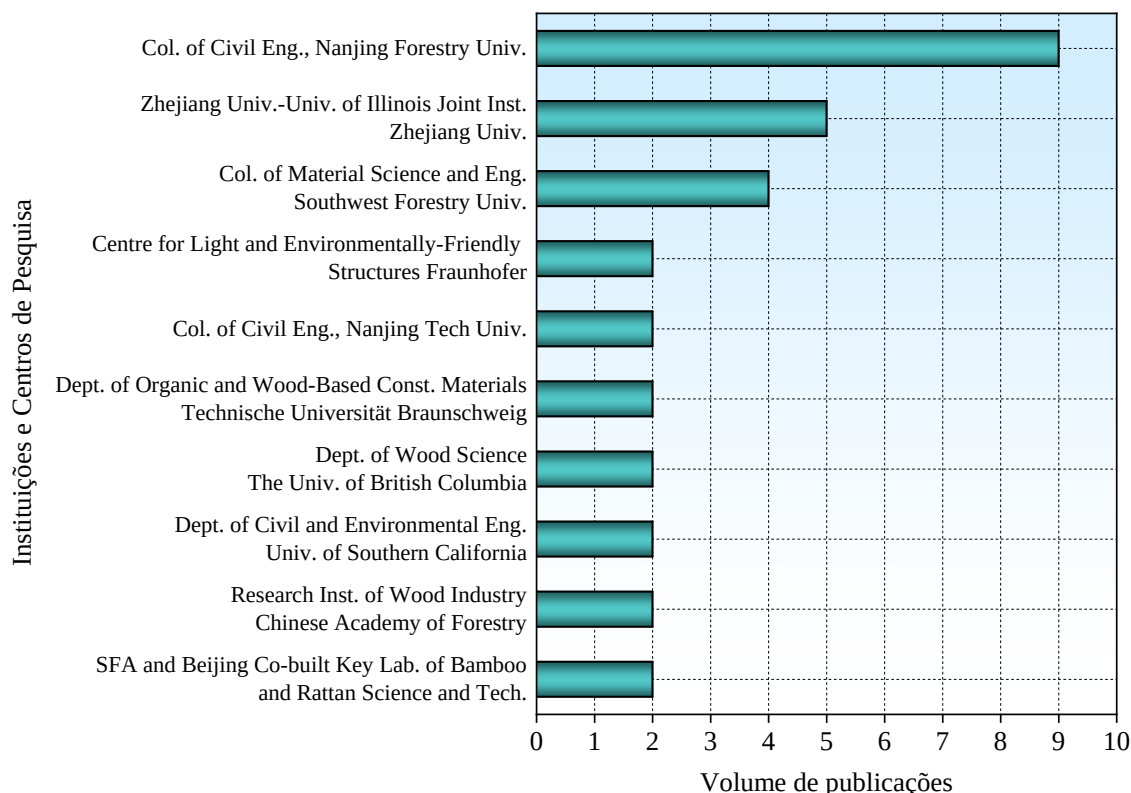


Fonte: Autora (2024).

A Figura 149 apresenta as instituições de ensino, centros de pesquisa e organizações que participaram de pelo menos duas publicações relacionadas ao CLBT, selecionadas a partir do conjunto de 33 afiliações identificadas no total das 20 publicações revisadas. O objetivo da seleção foi destacar as instituições que têm contribuído de forma mais significativa para o desenvolvimento da pesquisa sobre o tema.

Entre as instituições listadas, o *College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University* destaca-se como a mais produtiva, com 9 publicações identificadas, evidenciando sua liderança na pesquisa sobre CLBT. Em seguida, o *Zhejiang University-University of Illinois Joint Institute, Zhejiang University* aparece com 5 publicações, mostrando também um papel relevante no avanço do conhecimento sobre o tema. Outras instituições, como o *College of Material Science and Engineering, Southwest Forestry University* e o *Centre for Light and Environmentally-Friendly Structures, Fraunhofer Institute for Wood Research Wilhelm-Klauditz-Institut*, contribuíram com 4 e 2 publicações, respectivamente, indicando envolvimento ativo em estudos relacionados.

Figura 149 – Instituições e centros de pesquisa por volume de publicações



Fonte: Autora (2024).

A diversidade geográfica das instituições selecionadas demonstra que a pesquisa sobre CLBT tem caráter global, envolvendo colaborações entre universidades e centros de pesquisa de diferentes países. Além disso, a presença de instituições renomadas, como a *Technische Universität Braunschweig* e a *University of British Columbia*, reforça a relevância acadêmica e prática do tema.

As informações da tabela sugerem que o desenvolvimento da pesquisa sobre CLBT está concentrado em algumas instituições com expertise consolidada na área de engenharia de estruturas e materiais sustentáveis. Essa concentração reflete a importância dessas instituições na promoção de inovações e na disseminação de conhecimento sobre o CLBT. A análise também indica que há oportunidades para expandir colaborações entre instituições e ampliar a participação de outros centros de pesquisa no desenvolvimento do tema, contribuindo para um avanço ainda mais significativo da área.

A Tabela 25 apresenta as palavras-chave identificadas nos artigos incluídos na revisão, juntamente com a frequência de ocorrência de cada termo. No total, foram identificadas 52 palavras-chave, refletindo as principais temáticas abordadas nas pesquisas relacionadas ao tema.

A palavra-chave “cross-laminated bamboo and timber”, como esperado, é a mais recorrente, aparecendo 13 vezes, seguida por “cross-laminated timber”, com 9 ocorrências. Palavras-chave como “bending performance”, com 3 ocorrências, destacam o interesse no estudo do desempenho do CLBT sob flexão. Outros termos, como “structural performance”, com duas ocorrências, “axial compression”, “compressive behavior”, “in-plane compression”, “rolling shear”, “shear performance”, “stiffness” e “ultimate bearing capacity”, com uma ocorrência cada, reforçam o foco das investigações no desempenho estrutural e nas propriedades de compressão e cisalhamento do CLBT.

No que diz respeito ao desempenho térmico, o termo “thermal performance”, com 3 ocorrências, reflete o interesse na análise do comportamento do CLBT em condições de transferência de calor e isolamento térmico. Além disso, palavras-chave como “analytical solutions”, “experimental method”, “digital image correlation (DIC)” e “bonding shear test”, com 2 ocorrências cada, e “off-axis compressive test” e “two-plate shear test”, com uma ocorrência cada, destacam as abordagens metodológicas utilizadas nos estudos, evidenciando uma diversidade de técnicas experimentais e analíticas para avaliar o material.

Termos como “bamboo scrimber”, “flattened bamboo” e “glulam”, com 2 ocorrências cada, e “bamboo mat-curtain panel (BMCP)”, com 1 ocorrência, fazem referência aos produtos de bambu engenheirado empregados na fabricação do CLBT. Adicionalmente, palavras-chave como “chinese fir lumber”, com 2 ocorrências, e “hem-fir lumber” e “SPF”, com uma ocorrência cada, fazem referência às espécies de madeira utilizadas no CLBT.

A tabela evidencia que as pesquisas sobre CLBT estão concentradas em avaliar o desempenho estrutural e mecânico do material, com ênfase em testes de flexão, cisalhamento e compressão, além da exploração de diferentes tipos de bambu engenheirado e espécies de madeira. Esses resultados indicam uma abordagem multidisciplinar e um esforço para caracterizar o CLBT como uma solução viável e eficiente para a construção civil.

Tabela 25 – Palavras-chave das publicações revisadas

Palavras-chave	Frequência	Palavras-chave	Frequência
<i>Cross-laminated bamboo and timber</i>	13	<i>Finite element simulation</i>	1
<i>Cross-laminated timber</i>	9	<i>Four-point loading</i>	1
<i>Bending performance</i>	3	<i>Glued-laminated timber (GLT)</i>	1
<i>Thermal performance</i>	3	<i>Green building materials</i>	1
<i>Analytical solutions</i>	2	<i>Hem-fir lumber</i>	1
<i>Bamboo</i>	2	<i>In-plane compression</i>	1
<i>Bamboo scrimber</i>	2	<i>Lignocellulosic material</i>	1

<i>Bonding shear test</i>	2	<i>Off-axis compressive test</i>	1
<i>Chinese fir lumber</i>	2	<i>Out-of-plane</i>	1
<i>Digital image correlation (DIC)</i>	2	<i>Performance evaluation</i>	1
<i>Experimental method</i>	2	<i>Plane assumption</i>	1
<i>Flattened bamboo</i>	2	<i>Rolling shear</i>	1
<i>Glulam</i>	2	<i>Shear performance</i>	1
<i>Structural performance</i>	2	<i>Short wall specimen</i>	1
<i>Adhesive</i>	1	<i>Short-span shear</i>	1
<i>Axial compression</i>	1	<i>Slip</i>	1
<i>Bamboo mat-curtain panel (BMCP)</i>	1	<i>SPF</i>	1
<i>Capacity</i>	1	<i>Steel dowel</i>	1
<i>Composite bamboo and timber</i>	1	<i>Stiffness</i>	1
<i>Composite cross-laminated timber (CCLT)</i>	1	<i>Structural panels</i>	1
<i>Compressive behavior</i>	1	<i>Sustainable construction product</i>	1
<i>Connections</i>	1	<i>Treatment</i>	1
<i>Cross-laminated bamboo</i>	1	<i>Two-plate shear test</i>	1
<i>Cross-laminated flattened bamboo and timber</i>	1	<i>Ultimate bearing capacity</i>	1
<i>Delamination</i>	1	<i>Variable span</i>	1
<i>Engineering performance</i>	1	<i>Wood-bamboo construction</i>	1

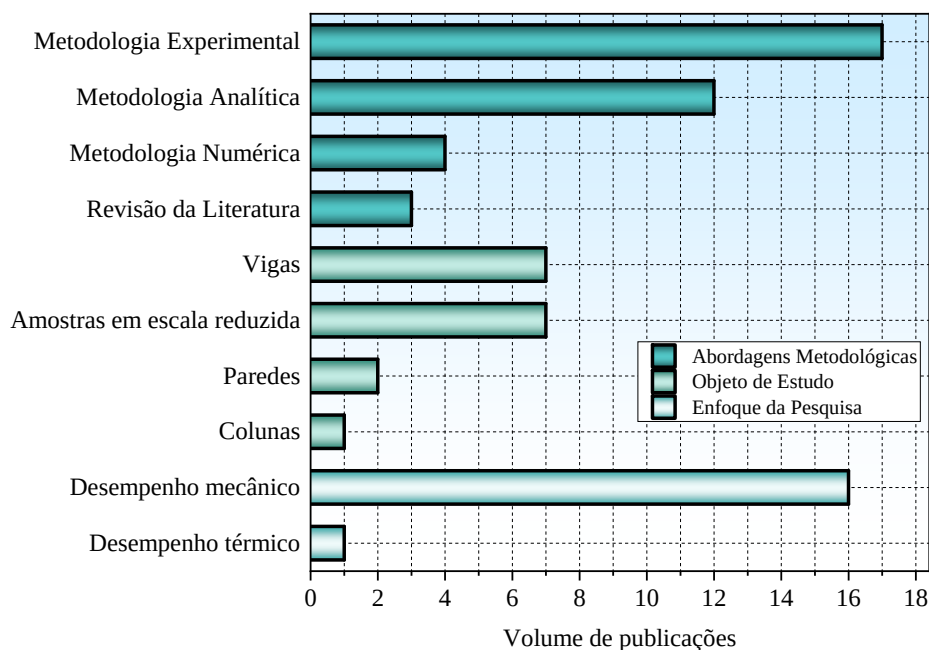
Fonte: Autora (2024).

A Figura 150 apresenta a distribuição do volume de publicações com base nas metodologias empregadas, tipos de elementos de CLBT estudados e área de enfoque principal da pesquisa.

A distribuição revela que as metodologias experimentais predominam, estando presentes em 17 das publicações. Essa prevalência indica o forte enfoque na validação prática das propriedades e do desempenho do CLBT por meio de ensaios experimentais. Esses ensaios são fundamentais para avaliar comportamentos específicos, como resistência, rigidez e desempenho térmico, que são cruciais para sua aplicação em estruturas reais.

As metodologias analíticas, utilizadas em 12 publicações, destacam-se pelo desenvolvimento de modelos teóricos que complementam os resultados experimentais e permitem prever o comportamento do CLBT em diferentes condições. As metodologias numéricas, presentes em 4 publicações, empregam ferramentas computacionais, como simulações por elementos finitos, para modelar o desempenho do material em cenários complexos. Já as revisões da literatura, adotadas em 3 estudos, são essenciais para compilar, analisar criticamente o estado da arte e orientar futuras pesquisas. Essas abordagens complementam a validação prática e teórica na investigação do CLBT.

Figura 150 – Distribuição do Volume de Publicações por Metodologias, Propriedades Investigadas e Tipos de Elementos Estudados em CLB



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que vigas e amostras em escala reduzida são os objetos de estudo mais frequentes, cada um representando 7 publicações. Essa predominância reflete o interesse inicial em investigar o desempenho estrutural de elementos fundamentais, especialmente em uma área de pesquisa ainda recente, cujos primeiros estudos datam de 2019. O uso de amostras em escala reduzida também evidencia a estratégia de simplificação experimental típica de campos em desenvolvimento, que busca explorar propriedades básicas antes de se avançar para aplicações mais complexas.

Considerando que a pesquisa sobre CLBT é recente, esses resultados apontam para um progresso lógico no desenvolvimento do campo, com um foco inicial em elementos primários, como vigas, e abordagens simplificadas, como amostras em escala reduzida. No entanto, a baixa frequência de estudos sobre outros elementos estruturais em maior escala sinaliza oportunidades para investigações futuras. À medida que o campo avança, espera-se um aumento no interesse por elementos estruturais mais complexos, como paredes e colunas, especialmente devido à importância desses componentes na estabilidade global de estruturas.

As tabelas a seguir (Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28) apresentam as propriedades mecânicas do CLBT, conformes os estudos da revisão.

Observa-se diferenças significativas entre as propriedades de flexão do CLBT e do CLT. Em termos de rigidez à flexão, o CLBT, composto por camadas de bambu engenheirado, como

o BMCP e o BS, apresenta valores elevados na direção principal, embora inferiores aos do CLT em algumas configurações específicas. Por exemplo, o BMCP com *Hem-fir* alcança $10.30 \text{ N.mm}^2 \times 10^9$, enquanto o CLT com a mesma espécie de madeira atinge $16.50 \text{ N.mm}^2 \times 10^9$.

O módulo de elasticidade também demonstra uma vantagem para o CLT, que apresenta valores superiores em ambas as direções principal e secundária. No caso do BMCP com *Hem-fir*, o E_f na direção principal é de 6270.40 MPa, enquanto o CLT alcança 10284.70 MPa. A resistência à flexão segue a mesma tendência, com o CLT apresentando valores superiores em comparação ao CLBT. Por exemplo, o BMCP com *Hem-fir* na direção principal atinge 31.31 MPa, enquanto o CLT com a mesma configuração alcança 47.30 MPa.

O momento máximo do CLBT é geralmente menor do que o do CLT, embora em alguns casos os valores sejam comparáveis. No BMCP com *Hem-fir*, o momento máximo é de 32.60 kN.m, enquanto o CLT atinge 6.40 kN.m. De forma semelhante, a carga máxima do CLBT também é inferior, com o BMCP com *Hem-fir* apresentando 2.07 kN em comparação aos 4.07 kN do CLT.

Em resumo, o CLT demonstra um desempenho superior nas propriedades de resistência à flexão, módulo de elasticidade, momento máximo e carga máxima. Por outro lado, o CLBT, especialmente em configurações que utilizam bambu engenheirado, apresenta boa rigidez à flexão, embora ainda fique aquém do CLT em termos de desempenho geral. Essas diferenças podem ser atribuídas às características intrínsecas dos materiais que compõem cada tipo de painel, como as propriedades do bambu engenheirado em comparação à madeira sólida utilizada no CLT.

Tabela 26 – Propriedades de flexão do CLBT

RF	TP	EM	CF	EI ($\text{N.mm}^2 \times 10^9$)		E_f (MPa)		R_f (MPa)		M_f (kN.m)		$C_{m\text{áx}}$ (kN)
				P	S	P	S	P	S	P	S	
1	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB	10.30	9.80	6270.40	6012.50	31.31	32.60	1.99	2.07	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT	16.50	0.90	10284.70	569.90	47.30	6.40	2.97	0.41	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	7.89	-	-	-	-	-	41.71	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	18.00	-	-	-	-	-	82.10	-	-
2	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	6.98	-	-	-	-	-	46.10	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	16.00	-	-	-	-	-	95.70	-	-
	<i>glubam</i>	Álamo	B3MB	7.72	-	-	-	-	-	67.90	-	-
	<i>glubam</i>	Álamo	B3MB	23.30	-	-	-	-	-	116.80	-	-
	<i>glubam</i>	Álamo	B3MB	7.93	-	-	-	-	-	76.40	-	-
	<i>glubam</i>	Álamo	B3MB	19.00	-	-	-	-	-	143.40	-	-
	BSC	SPF	B3MB	-	-	4799.00	-	-	-	34.20	-	152.10
	BSC	SPF	B3MB	-	-	6511.60	-	-	-	39.30	-	130.90
3	BSC	SPF	B3MB	-	-	7806.30	-	-	-	42.10	-	112.10
	BSC	SPF	B3MB	-	-	9456.60	-	-	-	52.90	-	117.60
		SPF	CLT	-	-	2922.30	-	-	-	25.80	-	114.50

		SPF	CLT	-	-	4107.70	-	-	-	28.50	-	95.00
		SPF	CLT	-	-	5274.50	-	-	-	30.60	-	81.70
		SPF	CLT	-	-	5674.00	-	-	-	34.20	-	76.00
4	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	3.08	-	-	-	-	-	16.52	-	47.20
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB	4.48	-	-	-	-	-	38.73	-	110.67
		SPF	CLT	2.97	-	-	-	-	-	16.33	-	46.67
		SPF	CLT	3.30	-	-	-	-	-	25.33	-	73.43
5	BSC	SPF	B3MB	-	-	4799.00	-	-	-	34.20	-	152.10
	BSC	SPF	B3MB	-	-	6511.60	-	-	-	39.90	-	130.90
	BSC	SPF	B3MB	-	-	7806.30	-	-	-	42.10	-	112.10
	BSC	SPF	B3MB	-	-	9456.60	-	-	-	52.90	-	117.60
		SPF	CLT	-	-	2922.30	-	-	-	25.80	-	114.50
		SPF	CLT	-	-	4107.70	-	-	-	28.50	-	95.00
		SPF	CLT	-	-	5274.50	-	-	-	30.60	-	81.70
		SPF	CLT	-	-	5674.00	-	-	-	34.20	-	76.00
6	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB	10.30	9.80	6270.40	6012.50	31.30	32.60	1.99	2.07	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM	15.90	0.80	9596.00	494.80	45.00	6.80	2.85	0.43	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT	16.50	0.90	10284.70	569.90	47.30	6.40	2.97	0.41	-
7	FBB	Abeto chinês	BMB	-	-	-	-	2.08		4.60	-	-
	FBB	Abeto chinês	2BM2B	-	-	-	-	6.51		9.26	-	-
	FBB	Abeto chinês	3BM3B	-	-	-	-	14.06		13.54	-	-
		Abeto chinês	CLT	-	-	-	-	10.69		11.04	-	-

Legenda: RF – Referências, TP – Tipo de bambu engenheirado, EM – Espécie de madeira, CF – Configuração das camadas, P – Direção principal de resistência, S – Direção secundária de resistência, EI – Rigidez à flexão, Ef – Módulo de elasticidade, Rf – Resistência à flexão, Mf – Momento máximo, Cmáx – Carga máxima, BSC – *Bamboo scrimber*, BMCP – Bamboo mat curtain panel, FBB – Flattened bamboo board, 1 – Li *et al.* (2022a), 2 – Xiao, Cai e Dong (2021), 3 – Li *et al.* (2024b), 4 – Wen e Xiao (2023), 5 – Li *et al.* (2023b), 6 – Li *et al.* (2021), 7 – Zhang *et al.* (2023) .

Fonte: Autora (2024).

Em relação à carga máxima de compressão, o CLBT apresenta valores superiores em várias configurações, como na configuração B3MB-800, que atinge 870.05 kN, em comparação ao CLT-800, que alcança 624.7 kN. Essa tendência também é observada em configurações mais espessas, como B3MB-2800, com carga máxima de 919.6 kN, em contraste com CLT-2800, que registra 543 kN.

Em termos de resistência à compressão, o CLBT também demonstra melhor desempenho em diversas situações. Por exemplo, na configuração B3MB-2800, o *bamboo scrimber* alcança resistência à compressão de 23.6 MPa na direção principal, enquanto o CLT com configuração equivalente apresenta resistência à compressão de apenas 13 MPa. Um exemplo adicional pode ser observado na configuração BMB-90°, onde o BMCP com *Hem-fir* atinge resistência à compressão de 32.90 MPa, superando o CLT na mesma configuração, que alcança apenas 16 MPa.

Além disso, o módulo de compressão do CLBT é consistentemente superior ao do CLT. Na configuração B3MB, por exemplo, o *Bamboo scrimber* apresenta um módulo de compressão

de 8056.6 MPa na direção principal, enquanto o CLT alcança apenas 6718.4 MPa. Essa vantagem também é evidente na configuração BMB-90°, onde o BMCP com *Hem-fir* registra um módulo de compressão de 8171.5 MPa, quase o dobro do valor do CLT, que apresenta aproximadamente 4177.9 MPa na mesma orientação.

Esses resultados indicam que o CLBT possui vantagens em termos de resistência e rigidez em compressão, o que pode ser atribuído às propriedades superiores do bambu engenheirado em comparação à madeira sólida utilizada no CLT. Essa superioridade é particularmente evidente em orientações específicas, como 90°, e em configurações mais espessas, destacando o potencial do CLBT para aplicações estruturais que demandam alta resistência e rigidez.

Tabela 27 – Propriedades de compressão do CLBT

RF	TP	EM	CF	C _{máx} (kN)	R _c (MPa)		E _c (MPa)	
					P	S	P	S
1	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-480	658.40	25.38	-	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-480	697.10	27.06	-	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-480	745.58	28.76	-	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-800	870.05	-	-	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-1600	727.41	-	-	-	-
	<i>glubam</i>	SPF	B3MB-2400	688.82	-	-	-	-
		SPF	CLT-525	502.22	16.59	-	-	-
		SPF	CLT-525	472.05	15.59	-	-	-
		SPF	CLT-525	558.03	18.43	-	-	-
		SPF	CLT-800	540.38	-	-	-	-
		SPF	CLT-1600	517.77	-	-	-	-
		SPF	CLT-2400	465.65	-	-	-	-
2	BSC	SPF	B3MB-400	1386.06	35.60	-	-	-
	BSC	SPF	B3MB-800	1343.50	34.40	-	-	-
	BSC	SPF	B3MB-1800	1251.00	32.10	-	-	-
	BSC	SPF	B3MB-2800	919.60	23.60	-	-	-
	BSC	SPF	B3MB-3800	702.30	18.00	-	-	-
		SPF	CLT-400	637.10	16.30	-	-	-
		SPF	CLT-800	624.70	16.00	-	-	-
		SPF	CLT-1800	593.10	15.20	-	-	-
		SPF	CLT-2800	543.00	13.90	-	-	-
		SPF	CLT-3800	440.70	11.30	-	-	-
3	BSC	SPF	B3MB	-	38.90	23.70	8056.60	6220.50
		SPF	CLT	-	20.40	12.00	6718.40	5098.80
4	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-0°	-	29.00	6012.00	-	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-45°	-	20.30	3014.10	-	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-90°	-	32.90	8174.50	-	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-0°	-	34.50	9022.90	-	-

	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-45°	-	13.00	2794.80	-	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-90°	-	16.20	3021.50	-	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-0°	-	23.60	6857.40	-	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-45°	-	9.00	1928.30	-	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-90°	-	11.80	4177.90	-	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-0°	-	29.00	-	6015.00	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-15°	-	25.30	-	3926.30	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-30°	-	21.90	-	3105.80	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-45°	-	20.30	-	3014.10	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-60°	-	23.10	-	3505.10	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-75°	-	29.10	-	5664.80	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	BMB-90°	-	32.90	-	8171.50	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-0°	-	34.50	-	9022.90	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-15°	-	28.30	-	6299.70	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-30	-	17.80	-	3329.90	-
5	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-45°	-	13.00	-	2794.80	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-60°	-	12.90	-	2121.80	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-75°	-	13.20	-	2323.20	-
	BMCP	<i>Hem-fir</i>	MBM-90°	-	16.20	-	3021.50	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-0°	-	23.60	-	6857.40	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-15°	-	19.50	-	4821.60	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-30°	-	11.40	-	2298.90	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-45°	-	9.00	-	1928.30	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-60°	-	9.20	-	1566.70	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-75°	-	9.90	-	2662.90	-
		<i>Hem-fir</i>	CLT-90°	-	11.80	-	4177.90	-

Legenda: RF – Referências; TP – Tipo de bambu engenheirado; EM – Espécie de madeira; CF – Configuração das camadas; P – Direção principal de resistência; S – Direção secundária de resistência; C_{máx} – Carga máxima; R_c – Resistência à compressão; E_c – Módulo de compressão; BSC – *Bamboo scrimber*; BMCP – Bamboo mat curtain panel; FBB – Flattened bamboo board; 1 – Fan *et al.* (2021); 2 – Li *et al.* (2024a); 3 – Li *et al.* (2023a); 4 – Li *et al.* (2023c); 5 – Li *et al.* (2022b).

Fonte: Autora (2024).

A rigidez ao cisalhamento do CLBT, especialmente em configurações que utilizam *bamboo scrimber* (BSC), apresenta valores consistentemente superiores ao CLT. Por exemplo, na referência 1, o BSC com configuração B3MB alcança GA de 10.27×10^6 N, enquanto o CLT com configuração equivalente apresenta valores entre 5.50 e 6.33×10^6 N. Esse padrão reflete a maior rigidez do material de bambu engenheirado em comparação à madeira sólida.

A resistência ao cisalhamento interlaminar também demonstra um desempenho superior do CLBT em algumas configurações. O BMCP com *Hem-fir*, por exemplo, apresenta resistência ao cisalhamento interlaminar de 3.30 MPa na direção principal (P) na referência 2, enquanto o CLT com a mesma espécie de madeira atinge 2.40 MPa. Essa vantagem do CLBT é ainda mais evidente em direções secundárias (S), como no BMCP, que alcança 3.80 MPa em comparação a 1.00 MPa do CLT.

O módulo de cisalhamento transversal também é superior no CLBT em diversas configurações. Na referência 4, o *glubam* com configuração BMB atinge valores de ECST de 47.68 MPa na direção principal, enquanto o CLT apresenta valores menores em outras configurações. Essa diferença indica uma maior rigidez ao cisalhamento do bambu engenheirado.

Por fim, a resistência da linha de colagem do CLBT é superior em várias configurações. Por exemplo, na referência 5, o FBB com Pinho chinês atinge 5.29 MPa na direção secundária, em comparação a 4.48 MPa do CLT. No geral, o CLBT demonstra desempenho superior ao CLT nas propriedades de cisalhamento, como rigidez, resistência interlaminar e transversal, além da linha de colagem, devido às propriedades do bambu engenheirado. Essas vantagens tornam o CLBT uma alternativa promissora para aplicações estruturais que demandam alto desempenho ao cisalhamento.

Tabela 28 – Propriedades de cisalhamento do CLBT

[illegible]

FBB	Pinho chinês	BMB	-	-	-	-	-	-	1.53	5.29
FBB	Pinho chinês	BMB	-	-	-	-	-	-	1.31	2.66
FBB	Pinho chinês	BMB	-	-	-	-	-	-	2.47	4.48
FBB	Pinho chinês	BMB	-	-	-	-	-	-	2.00	4.85

Legenda: RF – Referências; TP – Tipo de bambu engenheirado; EM – Espécie de madeira; CF – Configuração das camadas; P – Direção principal de resistência; S – Direção secundária de resistência; GA – Rigidez ao cisalhamento; R_{CS1} – Resistência ao cisalhamento interlaminar; R_{CST} – Resistência ao cisalhamento transversal; E_{CST} – Módulo de cisalhamento transversal; R_{LC} – Resistência da linha de colagem; BSC – *Bamboo scrimber*; BMCP – Bamboo mat curtain panel; FBB – Flattened bamboo board; 1 – Li *et al.* (2023b); 2 – Li *et al.* (2021); 3 – Zhang *et al.* (2023); 4 – Wang *et al.* (2021); 5 – Yang *et al.* (2022).

Fonte: Autora (2024).

7.2 PANORAMA DOS DOCUMENTOS ANALISADOS

7.2.1 Amostras de CLBT em escala reduzida

Esta seção apresenta os principais resultados acerca dos estudos realizados em amostras de CLBT em escala reduzida, ou seja, com dimensões significativamente inferiores às dimensões reais de um elemento estrutural.

7.2.1.1 Desempenho do CLBT ao cisalhamento

Wang *et al.* (2021) avaliaram o cisalhamento transversal de painéis CLBT por meio de testes de cisalhamento na linha de colagem, cisalhamento de duas placas e flexão em vigas curtas. O módulo de cisalhamento transversal foi semelhante entre os métodos, enquanto a resistência foi maior nos testes de flexão de pequeno vão em comparação aos de cisalhamento planar. Recomenda-se calcular a resistência ao cisalhamento com base na força da primeira fissura e usar os valores de resistência e módulo obtidos nos testes de duas placas para o projeto de painéis CLBT. A maioria dos danos ocorreu no núcleo de madeira, e a deformação equivalente de von Mises mostrou-se eficaz para identificar falhas, sendo recomendada para avaliação de danos nesses painéis.

Em Wang *et al.* (2021), no teste de cisalhamento de ligação, fissuras quase paralelas à linha de ligação foram observadas nas camadas centrais de madeira. Nos testes de cisalhamento planar com duas placas, todas as amostras apresentaram falhas de cisalhamento transversal nas camadas centrais, com fissuras inclinadas em cerca de 45°, mostrando um comportamento dúctil devido às propriedades da madeira balsa. Já nos testes de flexão, ocorreram fissuras inclinadas em 45° em relação à direção de carregamento e delaminação próximo aos apoios.

Em Wang *et al.* (2021), no teste de cisalhamento da linha de ligação, a resposta foi linear até o início das fissuras, apresentando comportamento não linear em seguida, sem quedas abruptas. No teste de cisalhamento de duas placas, algumas amostras tiveram falhas frágeis, enquanto outras demonstraram deformabilidade e ductilidade. Nos testes de vigas de pequeno vão, a propagação de fissuras nas camadas centrais e na linha de ligação resultou em quedas de carga nas curvas carga-deslocamento.

Li *et al.* (2021) também avaliaram o comportamento de cisalhamento do CLBT composto por BMCP e madeira de *hem-fir*. No início dos testes de cisalhamento, a carga e o deslocamento apresentaram correlação linear. Com o aumento da carga, a relação tornou-se não linear, com redução contínua da inclinação das curvas. Na direção principal de resistência, o deslizamento entre camadas evidenciou deformação de cisalhamento interlaminar, resultando em curvas carga-deslocamento com formato escalonado.

O MBM-CLBT apresentou falhas por tração e delaminação em ambas as direções de resistência. O BMB-CLBT exibiu, na direção principal, falhas por tração, cisalhamento transversal, delaminação e compressão, enquanto na direção secundária apresentou todas essas falhas, exceto por cisalhamento transversal. O CLT apresentou falhas por tração em ambas as direções, além de cisalhamento transversal e delaminação na direção principal de resistência.

Yang *et al.* (2022) investigaram a resistência da linha de colagem do CLBT. A resistência ao cisalhamento na direção principal foi de um terço a metade da resistência na direção secundária, influenciada pela resistência perpendicular às fibras do abeto chinês. O tipo de adesivo e a pressão de colagem não afetaram a resistência na direção principal, mas o adesivo influenciou o percentual de falha na madeira (WFP), a delaminação e a resistência na direção secundária. Amostras com adesivo PUR apresentaram melhor cisalhamento, porém menor durabilidade em comparação ao PRF, tornando o PUR inadequado para colagem entre placas de bambu achatado.

As diferentes formas de falha na madeira explicam as diferenças entre a resistência ao cisalhamento na direção principal e secundária do CLBT. Na direção principal, o CLBT apresentou falha de cisalhamento perpendicular às fibras, semelhante ao CLT, mas com resistência inferior. Na direção secundária, o modo de falha foi cisalhamento paralelo às fibras.

Zhang *et al.* (2023) investigaram as propriedades de flexão e cisalhamento de CLBT com placas de bambu achatado e madeira de abeto chinês, variando de 1 a 3 camadas externas de bambu. O desempenho ao cisalhamento transversal dos CLBT foi influenciado pelo número de camadas de bambu e pela resistência da madeira nas camadas transversais. Menos camadas

de bambu melhoraram o cisalhamento, enquanto o momento fletor máximo e a rigidez à flexão aumentaram com o número de camadas. O composto bambu-madeira conferiu ao CLBT maior resistência e módulo de flexão em relação ao CLT. Os modos de falha dos CLBT e CLT foram os mesmos, incluindo cisalhamento transversal, falha por delaminação na camada intermediária e falha por compressão.

As curvas carga-deslocamento apresentaram uma seção linear inicial seguida de uma não linear. No início dos testes de flexão e cisalhamento, as cargas aumentaram proporcionalmente aos deslocamentos, mas a relação tornou-se não linear com o aumento do deslocamento. Similarmente, as curvas carga-deformação e a relação deformação-profundidade no meio vão foram lineares. Após 40% da carga máxima, o deslizamento entre camadas afetou a linearidade nas extremidades, mas o meio do vão manteve o comportamento linear, validando a suposição de seção plana nos três conjuntos de CLBT.

7.2.1.2 Desempenho do CLBT à compressão

Li *et al.* (2022b) investigaram o comportamento de compressão fora do eixo do CLBT, com ângulos de 0° a 90°. O CLBT foi fabricado com painéis de BMCP (*bamboo mat-curtain panel*) e as configurações analisadas incluíram estruturas BMB-CLBT (bambu-madeira-bambu) e MBM-CLBT (madeira-bambu-madeira). Comparado ao grupo BMB-CLBT de 3 camadas, o grupo MBM-CLBT de 3 camadas apresentou melhor desempenho compressivo geral. Nas faces largas das amostras, as falhas ocorreram como fissuras ao longo das fibras nas camadas externas de madeira e ao longo da largura nas camadas externas de BMCP. Nas faces estreitas, os modos de falha incluíram fissuras nas fibras de *hem-fir* e delaminação entre elementos de bambu ou entre bambu e madeira.

A direção das fibras internas de madeira ou bambu e suas proporções influenciam as curvas carga-deslocamento, divididas em etapas linear e não linear. Na etapa linear, as diferenças entre as séries foram associadas à carga limite proporcional e ao deslocamento correspondente. Na etapa não linear, diferenças mais significativas foram observadas. No MBM-CLBT com 0°, houve maior deformação após a capacidade máxima, enquanto no BMB-CLBT com 0°, o deslocamento correspondente ao pico foi o maior, com comportamento semelhante ao bambu engenheirado. No MBM-CLBT com 90°, a camada interna de BMCP foi dominante, com menor contribuição das camadas externas de *hem-fir*. Para CLT e CLBT com ângulos de 45° a 90°, o deslocamento correspondente à carga máxima variou pouco.

Li *et al.* (2023c) analisaram o desempenho à compressão no plano de CLBT em ângulos de 0°, 45° e 90°, comparando-o ao CLT. Os elementos de BMCP melhoraram significativamente o desempenho à compressão do CLBT, apresentando forte dependência do ângulo. No MBM-CLBT, a resistência média à compressão a 0° foi 2.6 vezes maior que a registrada a 45° e 2.1 vezes maior que a 60°. Já no BMB-CLBT, esses valores foram 1.4 e 0.9 vezes maiores, respectivamente.

As curvas carga-deslocamento apresentaram comportamento linear elástico inicial. Após o pico de carga, CLT e MBM-CLBT com 0°, e CLT com 90°, mostraram redução lenta na capacidade de carga, com maior inclinação na fase descendente do MBM-CLBT a 0°. As curvas dos grupos BMB-CLBT a 0° e MBM-CLBT e BMB-CLBT a 90° foram semelhantes às de bambu engenheirado, refletindo o pleno aproveitamento das propriedades do bambu.

No BMB-CLBT, os modos de falha a 0° e 90° envolveram enrugamento e saliência na largura, enquanto a 45° predominou o cisalhamento. No CLBT, a delaminação na interface bambu-madeira foi o principal modo de falha em todos os ângulos, com delaminação entre tiras de bambu devido à estrutura ortogonal do BMCP. A 90°, o cisalhamento foi frequente após grandes deformações. No CLT, os modos de falha incluíram: divisão na direção das fibras de madeira, cisalhamento a 45° devido à inclinação das fibras das camadas externas de *hem-fir*, falha em cunha e esmagamento nas extremidades a 0°, separação das fibras transversais com grande deformação a 90°, delaminação e esmagamento nas extremidades, além de cisalhamento nas camadas internas, predominando a 90°.

Li *et al.* (2023a) observaram que o CLBT apresentou resistência e módulo de compressão 90% e 20% superiores aos do CLT na direção principal, com o efeito do *bamboo scrimber* sendo mais significativo na resistência do que no módulo. A substituição das camadas externas de SPF por *bamboo scrimber* aumentou a ductilidade e a tenacidade do CLBT, com a absorção de energia sendo uma representação mais eficaz das características de tenacidade. A delaminação foi comum em ambas as amostras, com fraturas no CLBT progredindo das camadas internas de SPF para as externas de *bamboo scrimber*. O CLBT mostrou encruamento seguido de amolecimento após o ponto máximo, enquanto o CLT apresentou encruamento curto antes do amolecimento, fenômenos mais evidentes na direção principal de resistência.

7.2.1.3 Desempenho do CLBT à flexão

Barreto *et al.* (2019) investigaram o desempenho de painéis de CLBT em testes de flexão em quatro pontos. Para avaliar a qualidade da adesão, foram realizados testes de colagem

com corpos de prova pequenos, utilizando três adesivos: melamina-ureia-formaldeído (MUF), emulsão polimérica de isocianato (IPE) e resina à base de óleo de mamona (COR). A resina melamina-ureia-formaldeído (MUF) apresentou o melhor desempenho estrutural. Nos testes de flexão, os painéis de CLBT superaram os requisitos estabelecidos pela norma ANSI/APA PRG 320, demonstrando grande potencial para aplicações estruturais. O modo de falha foi uniforme em todas as amostras, caracterizado pela ruptura por tensão paralela na camada de bambu tracionada.

7.2.2 Vigas de CLBT

Xiao, Cai e Dong (2021) investigaram o comportamento à flexão de vigas de CLBT com diferentes combinações de camadas internas de madeira (SPF ou álamo) e externas de bambu engenheirado (*glubam* de tiras finas e grossas). As curvas carga-deflexão indicaram comportamento elasto-frágil para todas as amostras. As amostras com camadas internas de SPF apresentaram comportamento descendente mais suave após o pico no carregamento no plano, tendência também observada para madeira de álamo. Amostras com *glubam* de tiras grossas exibiram maior capacidade de flexão, devido à orientação longitudinal das fibras. De modo geral, desempenho foi consistentemente influenciado tanto pelo tipo de madeira quanto pela configuração das camadas de *glubam*, destacando a importância da seleção de materiais e do design no desempenho estrutural.

As amostras de CLBT apresentaram comportamento quase elástico até a ruptura frágil na carga máxima. As com camadas internas de SPF falharam por cisalhamento transversal, enquanto as com madeira de álamo apresentaram ruptura por flexão do *glubam* próximo ao vão médio. Sob carregamento no plano, todas falharam por ruptura da metade inferior. Além disso, a distribuição de deformação no CLBT é linear nos estágios iniciais, mas ultrapassando 40% da carga de pico, ocorre desvio devido ao deslizamento entre camadas. Na flexão no plano, a distribuição permanece linear e em conformidade com a suposição de seção plana durante quase todo o carregamento.

Li *et al.* (2021) investigaram o desempenho de flexão de CLBT com madeira *hem-fir* e bambu BMCP. Na fase inicial dos testes de flexão, a relação carga-deslocamento apresentou uma correlação linear. À medida que a carga aumentava, as curvas exibiram uma correlação não linear, com a inclinação diminuindo continuamente. Após atingir a carga máxima, a amostra de flexão perdeu imediatamente sua capacidade de suporte.

Em relação ao CLT, o MBM-CLBT apresentou melhor equilíbrio entre as direções principal e secundária de resistência, com os valores de momento fletor máximo, rigidez à flexão, módulo de elasticidade e resistência à flexão na direção secundária correspondendo a 15.1%, 5.1%, 5.2% e 15.1% dos valores na direção principal, respectivamente. Já o BMB-CLBT apresentou desempenho quase isotrópico, com esses valores na direção secundária sendo 104.1%, 94.6%, 95.9% e 104.0% dos valores na direção principal, demonstrando maior uniformidade entre as direções.

O MBM-CLBT apresentou falhas por tração e delaminação em ambas as direções de resistência. O BMB-CLBT, na direção principal de resistência, apresentou falhas por tração, cisalhamento transversal, delaminação entre camadas de madeira, delaminação entre camadas de madeira e bambu, além de falha por compressão. Na direção secundária, o BMB-CLBT apresentou as mesmas falhas, exceto a de cisalhamento transversal. Já o CLT apresentou falhas por tração em ambas as direções, além de falhas por cisalhamento transversal e delaminação na direção principal de resistência.

Em Li *et al.* (2022a), para o CLT, os valores de rigidez aparente à flexão, módulo aparente de flexão, momento fletor máximo e resistência à flexão na direção de menor resistência corresponderam, respectivamente, a 5.6%, 5.5%, 13.7% e 13.6% dos valores obtidos na direção de maior resistência. Em contraste, para o CLBT, esses mesmos parâmetros foram 94.6%, 95.9%, 104.1% e 104.0%, respectivamente. Embora o CLBT tenha apresentado desempenho inferior ao CLT na direção de maior resistência, o oposto ocorreu na direção de menor resistência.

No início do teste, carga e deslocamento apresentaram relação linear, tornando-se não linear após o limite proporcional, com redução de rigidez até a falha na carga máxima. O CLBT apresentou deslocamentos semelhantes nas direções de maior e menor resistência, enquanto o CLT mostrou diferenças significativas entre essas direções. Os modos de falha típicos do CLBT incluíram compressão, tração e delaminação em ambas as direções ortogonais de resistência. No CLT, os modos de falha na direção de maior resistência foram cisalhamento transversal, tração e delaminação, enquanto na direção de menor resistência a falha predominante foi a ruptura por tração da camada transversal, que suportou a maior parte da carga aplicada.

Li *et al.* (2023b) avaliaram o comportamento de flexão de vigas de CLBT reforçadas com cavilhas de aço. O CLBT sem cavilhas apresentou propriedades mecânicas superiores às do CLT devido ao reforço das camadas externas de *bamboo scrimber*. A adição de cavilhas de aço melhorou a resistência e rigidez ao cisalhamento, o momento fletor máximo e a capacidade

de suporte última, embora tenha reduzido ligeiramente a rigidez à flexão. O índice de ductilidade do CLBT com cavilhas aumentou, especialmente em vãos pequenos, com maior absorção de energia e falhas mais progressivas. As cavilhas também reduziram falhas de cisalhamento precoce e instável, além de minimizar delaminações, melhorando a integração entre as camadas de *bamboo scrimber* e SPF.

As amostras de CLBT sem cavilhas perderam capacidade de suporte após o ponto máximo, mas apresentaram aumento lento nas curvas carga-deflexão. No CLT, houve redução contínua na capacidade de carga. Com cavilhas, o CLBT mostrou aumento contínuo nas curvas carga-deflexão após o escoamento, mantendo a capacidade de suporte mesmo com falhas nas camadas transversais de SPF. No CLT, as cavilhas conectaram as camadas, mas a curva exibiu descida mais gradual.

As curvas carga-deformação da face lateral no vão médio foram, em sua maioria, simétricas ao longo do eixo neutro, considerando a variação do vão. No CLBT com cavilhas, as distribuições de deformação ao longo da profundidade da amostra foram predominantemente lineares durante todo o processo de carregamento. A relação carga-deformação da face lateral no quarto do vão apresentou comportamento distinto. Embora as curvas das laminações longitudinais fossem majoritariamente simétricas, as camadas transversais exibiram variações significativas devido à tensão de cisalhamento no plano.

Wen e Xiao (2023) investigaram o comportamento de flexão do CLBT com o uso de métodos de correlação de imagem digital (DIC) e métodos convencionais para medições de deformação. No geral, as vigas de CLBT possuem rigidez e capacidade de flexão similares ou até maiores do que as vigas de CLT com mesma configuração de camadas, feitas com as mesmas espécies de madeira. As vigas de CLT e CLBT apresentaram falhas por flexão de natureza frágil, com redução acentuada da capacidade após o pico de carga. No entanto, as vigas de CLT demonstraram certa ductilidade sob carregamento fora do plano. Antes da falha, ambas as vigas exibiram comportamento elástico, com deflexões no vão médio variando linearmente com o aumento da carga.

As vigas de CLBT e CLT apresentaram falhas por cisalhamento transversal nas camadas internas sob flexão fora do plano. Sob flexão no plano, as falhas ocorreram por ruptura por flexão no vão médio da metade inferior, com comportamento semelhante para ambas. As vigas de CLBT e CLT sob flexão fora do plano apresentaram deformações não lineares devido à ligação imperfeita entre camadas, com desvios mais evidentes nas camadas superficiais conforme a carga aumenta. Já sob flexão no plano, as deformações foram linearmente

distribuídas. Assim, a interação incompleta entre camadas afeta significativamente a flexão fora do plano, mas é irrelevante para flexão no plano.

Li T. *et al.* (2024) investigaram as características de flexão e cisalhamento fora do plano de vigas de CLBT com diferentes vãos. As amostras de CLBT apresentaram propriedades mecânicas superiores às de CLT com o mesmo vão, embora tenham exibido menor ductilidade devido ao efeito do cisalhamento interlaminar. Com o aumento do vão, a capacidade de suporte diminuiu, enquanto o momento fletor máximo e o módulo de flexão aumentaram. O reforço das laminações externas de *bamboo scrimber* proporcionou maior absorção de energia nas amostras de CLBT, especialmente em vãos mais altos.

No estágio inicial de carregamento, tanto CLBT quanto CLT apresentaram comportamento elástico com deflexões lineares em função da carga, mas o CLBT exibiu valores superiores. Com o aumento do vão, os picos e inclinações das curvas carga-deflexão diminuíram. Após o pico, o CLBT manteve maior capacidade residual com a deflexão, especialmente em vãos menores no caso do CLT. As curvas carga-deformação no vão médio mostraram simetria entre as zonas de tração e compressão, com deformação linear na profundidade da seção. No quarto do vão, as camadas paralelas mantiveram simetria, enquanto as camadas transversais apresentaram deformações irregulares devido a seus baixos módulos de flexão e cisalhamento.

Nas amostras de CLBT, ocorreram falhas por cisalhamento transversal e delaminação entre camadas de madeira e de bambu. Nas amostras de CLT, foram observadas falhas por cisalhamento transversal, delaminação intercamadas e ruptura por tração nas laminações inferiores. Em ambos os casos, o cisalhamento transversal e a delaminação intercamadas resultaram em deslizamento entre as camadas.

Li *et al.* (2025) investigaram o comportamento à flexão e cisalhamento fora do plano de vigas de CLBT submetidas a carregamento em quatro pontos com diferentes vãos. O reforço das camadas externas de *bamboo scrimber* aumentou significativamente a capacidade de suporte das amostras de CLBT em relação às de CLT, mas também resultou em maiores tensões interlaminares, intensificando as falhas de cisalhamento transversal nas camadas de SPF.

O aumento da razão entre vão de cisalhamento e profundidade teve o maior impacto, elevando a capacidade de suporte e a resistência à flexão do CLBT em até 190%, enquanto a rigidez à flexão apresentou aumentos mais moderados: cerca de 70% para a rigidez local e 55% a 70% para a global. Na zona de flexão pura, ambos os materiais exibiram perfil de deformação linear, validando a hipótese da seção plana. No entanto, na zona de flexão-cisalhamento, a

menor rigidez das camadas transversais sob cisalhamento interlaminar causou deformações irregulares no CLBT.

7.2.3 Colunas de CLBT

Fan *et al.* (2021) analisaram o comportamento de colunas de CLBT e CLT sob compressão axial, destacando que o coeficiente de estabilidade é fundamental para diferenciar o comportamento de colunas curtas e longas. Colunas curtas falham por resistência, enquanto colunas longas falham por instabilidade. A capacidade de carga e a deformação diminuem com o aumento do índice de esbeltez. As colunas de CLBT apresentam capacidade de carga 40,5% a 61,0% superior e deformação longitudinal 30,5% a 56,1% maior em relação às colunas de CLT.

A relação carga-deformação de colunas curtas de CLBT e CLT segue três fases: elástica, elasto-plástica e de queda de carga, sendo linear na fase elástica até a carga máxima. Nas colunas de CLT, ocorre encurvamento após a carga máxima, com deformação contínua até a falha. Já nas colunas de CLBT, a falha é súbita devido ao rachamento do *glubam* externo. Em colunas longas, a fase plástica é ausente, e a capacidade de carga diminui após a carga máxima por instabilidade de flexão.

Para colunas curtas, a deflexão lateral em CLT permanece baixa até 80%-90% da carga limite, aumentando rapidamente após esse ponto. Em CLBT, a deflexão lateral também cresce significativamente após 80%-90%, acompanhada por uma redução na rigidez da curva carga-deflexão. Já nas colunas longas, em CLT, a deflexão lateral começa a aumentar lentamente a partir de 30% da carga limite e acelera após 90%. Em CLBT, a deflexão lateral cresce gradualmente até 80% da carga limite, acelerando em ambas as faces até a falha final. Nos modos de falha de colunas curtas, observou-se esmagamento do material próximo ao centro nas colunas de CLT e nas extremidades nas colunas de CLBT. Para colunas longas, a falha foi dominada pela instabilidade global em ambos os casos, caracterizada por deslocamento lateral progressivo antes da ruptura. Nas colunas de CLBT, a ruptura súbita do *glubam* devido à instabilidade resultou em um comportamento mais frágil em comparação às colunas de CLT.

7.2.4 Paredes de CLBT

7.2.4.1 Desempenho do CLBT sob compressão

Li *et al.* (2024a) analisaram o comportamento compressivo de paredes de CLBT com alturas variáveis, destacando desempenho superior ao CLT. A resistência à compressão do CLBT foi 65% maior em paredes de 3,0 m e 40% maior em paredes de 6,0 m. A capacidade de carga última em compressão do CLBT superou consistentemente a do CLT, com maior diferença conforme a largura da parede aumentava. No entanto, com o aumento da altura, a contribuição das camadas externas de bambu diminuiu, e os deslocamentos verticais, deflexões laterais e padrões de deformação de CLBT e CLT tornaram-se gradualmente similares.

As curvas de carga-deslocamento vertical para CLBT e CLT mostraram que, com o aumento da altura, a fase de deformação não linear antes da capacidade última de suporte diminuiu gradualmente, indicando a transição de falhas por resistência para falhas por instabilidade, mais evidente nos espécimes de CLBT. Além disso, a fase de declínio após a capacidade última tornou-se mais curta, com os espécimes submetidos à flambagem exibindo quedas súbitas e significativas após o pico de carga.

Os modos de falha do CLBT e CLT variaram com a altura dos espécimes. Aos 400 mm, ambos apresentaram delaminação interlaminar, flambagem local nas camadas externas e protuberância na espessura. Aos 800 mm, a protuberância evoluiu para deformação unilateral, mais evidente no CLBT, com falhas por cisalhamento transversal. Aos 1800 mm, ocorreu maior deformação lateral no centro, com falhas por tração nas camadas externas (*bamboo scrimber* no CLBT e *finger joint* no CLT) e flambagem para dentro em compressão. Em alturas maiores (2800 e 3800 mm), a falha foi dominada por flambagem, com delaminação e cisalhamento no CLT e falhas nas extremidades no CLBT, preservando a integridade das camadas externas de *bamboo scrimber*.

7.2.4.2 Desempenho térmico do CLBT

Shan *et al.* (2023b) avaliaram o desempenho de isolamento térmico entre paredes de CLT e CLBT utilizando três abordagens diferentes: método experimental, abordagem ISO 6946 e análise por elementos finitos. Os testes GHP (*Guarded Hot Plate method*) das condutividades térmicas dos materiais mostraram que o *glubam* possui propriedades térmicas semelhantes ao CLT, com a condutividade térmica do *glubam* sendo apenas cerca de 5% maior que a do CLT para os espécimes testados neste estudo.

Os resultados indicaram que ambas as paredes de CLT e CLBT apresentam bom desempenho térmico na faixa de temperatura de -5 a 25°C . O desempenho térmico da parede de CLBT é muito próximo ao da parede de CLT correspondente, sugerindo que o CLBT tem potencial para substituir o CLT em componentes de parede ou telhado. Além disso, as paredes de CLBT com diferentes configurações apresentam alta resistência térmica e baixa transmitância térmica, atendendo aos requisitos de isolamento térmico para certas regiões climáticas na China e nos Estados Unidos.

7.3 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT

A análise experimental do desempenho do CLBT apresenta-se como um campo de estudo emergente e multidisciplinar, com ênfase na avaliação das propriedades mecânicas e no comportamento estrutural do material. A Tabela 29 sintetiza os principais estudos realizados, destacando os tipos de ensaios, normas aplicadas e parâmetros experimentais, como dimensões das amostras, taxas de carregamento e critérios de parada.

Dentre os testes experimentais descritos, destacam-se os de compressão no plano, os quais seguem majoritariamente normas como a ASTM D198 (*Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*), variando as dimensões das amostras e as taxas de carregamento. Esses ensaios fornecem informações fundamentais sobre a resistência à compressão do material, um dos principais critérios para aplicações estruturais. Ensaios semelhantes, como o de compressão axial e de compressão oblíqua ao cisalhamento, revelam a busca por uma caracterização abrangente das propriedades de resistência do CLBT em diferentes condições de carregamento.

Os ensaios de cisalhamento, realizados com diferentes configurações (vigas curtas, linha de colagem e cisalhamento com duas placas), são críticos para avaliar a integridade das interfaces do material, como as linhas de adesão entre camadas. As normas ASTM D2344 (*Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*), ASTM D905 (*Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading*) e ANSI/APA PRG 320 (*Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber*) são frequentemente citadas, evidenciando a padronização internacional na condução desses testes.

Ensaios de flexão, tanto de três pontos quanto de quatro pontos, constituem outra categoria importante. Eles permitem uma avaliação precisa das propriedades flexurais do CLBT, como o módulo de elasticidade e a resistência última. O emprego de normas como a

ASTM D198 e a NBR 7190 demonstra o esforço em adotar padrões consolidados. Além disso, a diversidade nos comprimentos e espessuras das amostras reflete o objetivo de entender o impacto da geometria nas propriedades mecânicas.

Um aspecto notável nos estudos é o foco nos critérios de falha, frequentemente determinados pela ruptura ou por deslocamentos máximos. Essa abordagem reforça a relevância de se investigar não apenas o desempenho elástico, mas também o comportamento pós-falha do CLBT, crucial para o dimensionamento e segurança estrutural.

A análise da tabela revela um avanço na padronização e diversificação dos métodos experimentais aplicados ao CLBT. No entanto, ainda há lacunas importantes a serem preenchidas, como a exploração de condições ambientais extremas, que poderiam influenciar a durabilidade do material, e a avaliação de conexões estruturais. Esses fatores são determinantes para ampliar as aplicações práticas do CLBT, especialmente em construções sustentáveis e de grande escala.

Em síntese, os dados apresentados na tabela apontam para um crescente interesse e esforço na caracterização técnica do CLBT. As metodologias empregadas têm contribuído para consolidar as bases científicas necessárias para a validação desse material como uma alternativa viável e sustentável em sistemas construtivos contemporâneos. Entretanto, a continuidade de estudos, com foco em aspectos ainda subexplorados, será essencial para fortalecer sua adoção no mercado global de engenharia civil.

Tabela 29 – Metodologia experimentais empregadas para avaliação do desempenho do CLBT

RF	Teste	A	Normas	C (mm)	E (mm)	L (mm)	TC (mm/min)	CP
1	Testes de compressão no plano	12	ASTM D 198	300	150	150	1.0	Falha ou 30mm deslocamento
2	Testes de compressão no plano			400 800 1800 2800 3800	150	260	1.5	Falha
3	Teste de compressão	224		145	51	51		Falha
4	Teste de compressão	96		145	51	51	0.8	Falha
	Teste de compressão oblíqua ao cisalhamento	5		50	60	45	0.6	
5	Teste de cisalhamento com duas placas	6		210	90		0.3	
	Teste de cisalhamento em vigas curtas	6	ASTM D2344	630	90		2.0	
6	Teste de cisalhamento da linha de colagem	72	ASTM D905	60	57	50	5.0	Falha

	Teste de delaminação		ANSI/APA PRG 320	60	57	60		
				580	32			
	Teste de flexão de 4 pontos		ASTM D198	775	45		5.0	Falha
				910	54			
7				970	58			
	Teste de cisalhamento em vigas curtas		ASTM D2718	292	32			
				370	45		2.0	Falha
				424	54			
				448	58			
8	Teste de compressão axial	9	GB/T 1935 ASTM D143	480 525 800 1600 2400	200	160	0.5	Falha
9	Teste de cisalhamento da linha de colagem	312	ASTM D905 NBR 7190	50	9	50		Falha
	Teste de flexão de 4 pontos	8	NBR 7190 ASTM D198	900	25	320		Falha
10	Teste de flexão de 4 pontos	24	GB/T 50329	2000 2400	150 160	260 300	4.0	Falha
11	Teste de flexão de 4 pontos		ASTM D198 ANSI/APA PRG-320	1630	51	145	5.0	Falha
	Teste de cisalhamento em vigas curtas		ASTM D198 ANSI/APA PRG-320	406	51	145	5.0	Falha
12	Teste de flexão de 4 pontos	4	ASTM D198 ANSI/APA PRG 320	1630	51	145	5.0	Falha
13	Teste de flexão de 3 pontos	32	ASTM D198	1050 1350 1650 1950	150	300	5.0	Falha
14	Teste de flexão de 3 pontos	12	GB/T 50329	2400	156 159 193.5 195 19.5	194 196 195.5 161 160		
15	Teste de flexão de 3 pontos	16	ASTM D 198	1050 1350 1650 1950	150	300	5.0	Falha
16	Teste de flexão de 4 pontos	18		1950 2850 3750	150	300	5.0	Falha

Legenda: RF – Referências; A – Quantidade de amostras; C – Comprimento; E – Espessura; L – Largura; TC – Taxa de carregamento; CP – Critério de parada; ASTM D198 – Métodos de Ensaio Padrão para Ensaio Estáticos de Madeira em Tamanhos Estruturais; ASTM D143 – Métodos de Ensaio Padrão para Pequenas Amostras Claras de Madeira; ASTM D2344 – Método de Ensaio Padrão para Resistência ao Cisalhamento Curto de Materiais Compostos com Matriz Polimérica e seus Laminados; ASTM D905 – Método de Ensaio Padrão para Propriedades de Resistência de Ligações Adesivas ao Cisalhamento por Compressão; ASTM D2718 – Método de Ensaio Padrão para Painéis Estruturais em Cisalhamento de Viga Curta; ANSI/APA PRG 320 – Norma para Desempenho Classificado de Madeira Laminada Cruzada; NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira; GB/T 1935 – Método de Ensaio de Compressão Paralela às Fibras da Madeira; GB/T 50329 – Norma para Métodos de Ensaio de Estruturas de Madeira; 1 – Li *et al.* (2023a); 2 – Li *et al.* (2024a); 3 – Li *et al.* (2022b); 4 – Li *et al.* (2023c); 5 – Wang *et al.* (2021); 6 – Yang *et al.* (2022); 7 – Zhang *et al.* (2023); 8 – Fan *et al.* (2021); 9 – Barreto *et al.* (2019); 10 – Xiao, Cai e Dong (2021); 11 – Li *et al.* (2021); 12 – Li *et al.* (2022a); 13 – Li *et al.* (2023b); 14 – Wen e Xiao (2023); 15 – Li *et al.* (2024b); 16 – Li *et al.* (2025).

Fonte: Autora (2024).

7.4 METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT

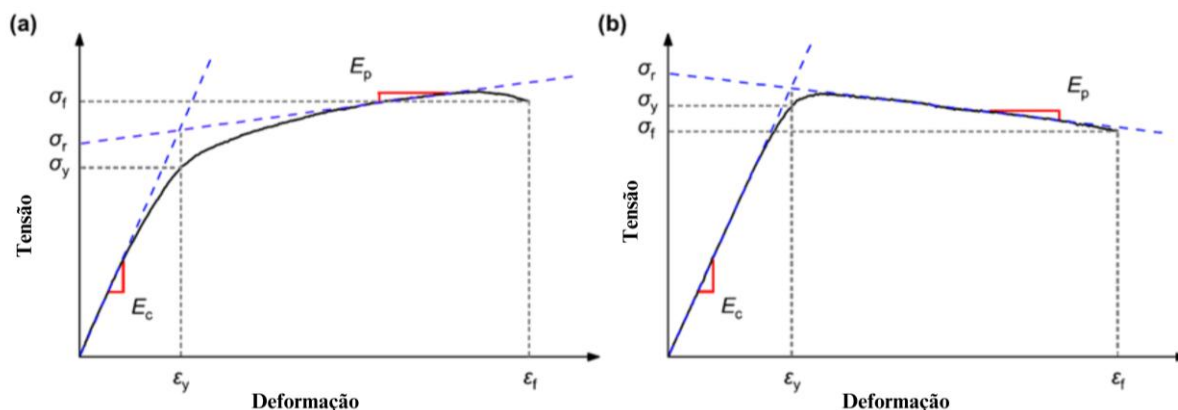
Esta seção apresenta uma visão abrangente das metodologias analíticas empregadas na avaliação do CLBT, destacando avanços na caracterização do comportamento mecânico e térmico do material.

Li *et al.* (2023c) compararam dois modelos segmentados (linear e linear-quadrático) e três modelos contínuos (Popovics, Ramberg–Osgood e Wu-Wei) para descrever o comportamento de compressão do CLBT. O modelo linear foi eficaz na faixa elástica, mas subestimou o comportamento no segmento não linear, enquanto o modelo linear-quadrático apresentou maior precisão nesse segmento ao incluir funções quadráticas, embora ainda com erros significativos. Apesar de poderem ser aprimorados com funções de maior grau, os modelos segmentados são menos eficientes.

Entre os modelos contínuos, Popovics foi o menos preciso devido ao uso de um único coeficiente para ajustar a curva, resultando em previsões menos consistentes. O modelo de Ramberg–Osgood teve boa precisão até a tensão última, mas não além. O modelo de Wu-Wei, incorporando mais coeficientes para ajustar variações, apresentou a melhor concordância geral. Em ambos os tipos de modelo, o aumento do número de coeficientes melhora a precisão, mas os modelos contínuos se mostraram mais eficientes.

Li *et al.* (2023a) utilizaram o modelo de Richard-Abbott para caracterizar as relações não lineares tensão-deformação obtidas experimentalmente para os espécimes de CLBT sob compressão no plano. O CLBT na direção de maior resistência foi considerado como tendo falhado quando a tensão aplicada foi inferior a 95% da tensão de compressão correspondente à capacidade última de carga e 90% na direção de menor resistência. As relações de tensão-deformação de compressão para o CLBT exibiram um ponto de inflexão principal, que pode ser descrito com precisão pelo modelo Richard-Abbott. O erro absoluto foi pequeno na fase inicial e tornou-se mais variável à medida que a deformação aumentava. Os erros relativos apresentaram valores altos na fase inicial da curva prevista, mas estabilizaram com o aumento da deformação. No geral, o modelo Richard-Abbott pode descrever com precisão as relações de tensão-deformação de compressão no plano de elementos de parede curta de CLBT e CLT.

Figura 151 –Relações tensão-deformação previstas pelo modelo de Richard-Abbott: (a) tipo de endurecimento por deformação e (b) tipo de amolecimento por deformação.



Fonte: Li *et al.* (2023a).

Li *et al.* (2022b) investigaram as propriedades mecânicas de testes fora do eixo, utilizando critérios de falha compressiva no plano e modelos teóricos para prever o módulo aparente de compressão fora do eixo. As equações empregadas basearam-se em critérios de falha amplamente reconhecidos, como Hill, Tsai-Hill, Norris, Hankinson, além de modelos empíricos. O estudo também desenvolveu um modelo simplificado de força exponencial para prever a resistência compressiva fora do eixo, adaptando os modelos teóricos às características dos materiais analisados (CLBT, GLT e CLT).

Os modelos propostos demonstraram alta precisão na previsão da resistência compressiva e da resistência compressiva específica fora do eixo, com exceção do modelo de Hankinson. Além disso, o módulo compressivo aparente e o módulo compressivo específico aparente fora do eixo foram melhor representados pelos modelos de Jones e Ashkenazi, destacando a relevância de ajustes específicos para descrever adequadamente o comportamento mecânico dos materiais testados.

Li T. *et al.* (2024) investigaram o fator de estabilidade em compressão axial do CLBT utilizando quatro modelos teóricos: NDS, CSA O86, Eurocode 5 e GB 50005. Os cálculos consideraram o módulo de flexão efetivo, derivado da rigidez à flexão efetiva, ou o módulo de flexão da camada mais externa. Ambos os métodos apresentaram tendências semelhantes em relação à razão de esbeltez, mas os fatores baseados no módulo de flexão efetivo mostraram maior precisão em relação aos resultados experimentais, enquanto os valores baseados no módulo da camada mais externa foram ligeiramente superiores.

As resistências à compressão previstas pelas normas foram consistentes com os dados experimentais, exceto pelo Eurocode 5 combinado ao módulo da camada mais externa, que apresentou maior erro percentual absoluto médio. Nos demais casos, os erros permaneceram

abaixo de 15 %. Para previsões mais precisas, recomenda-se o uso do módulo de flexão efetivo no cálculo do fator de estabilidade de CLBT.

Com base nas normas GB 50005-2017 (*Standard for design of timber structures*) e *National Design Specification (NDS) for Wood Construction* e no comportamento observado durante experimentos conduzidos, Fan *et al.* (2021) desenvolveram uma fórmula para calcular a capacidade de carga última de colunas de CLBT. Combinando as normas e a teoria da superposição, três suposições foram adotadas: as fibras transversais da madeira não contribuem para a capacidade de carga, não ocorre delaminação entre o bambu e a madeira, e o bambu e a madeira são tratados como uma unidade integrada.

Os cálculos de capacidade de carga das colunas CLT baseados na GB 50005-2017 mostraram resultados conservadores, especialmente para colunas longas, subutilizando o material à medida que o índice de esbeltez aumenta. Usando a norma NDS para madeira, o erro entre os valores calculados e experimentais foi inferior a 4%, demonstrando boa precisão. A fórmula aprimorada para colunas CLBT apresentou um erro inferior a 8%, indicando sua adequação para calcular a capacidade de carga dessas colunas.

Zhang *et al.* (2023) utilizaram a teoria da analogia de cisalhamento e o método gama para calcular a rigidez à flexão de vigas de CLBT, considerando as placas de bambu como duas camadas paralelas. A analogia de cisalhamento produziu resultados mais próximos dos experimentais, exceto para vigas com três camadas de bambu, enquanto a teoria gama apresentou estimativas mais conservadoras devido ao fator de eficiência de conexão. Os erros relativos da analogia de cisalhamento permaneceram abaixo de 20% e aumentaram com o número de camadas de bambu, enquanto a teoria gama apresentou o comportamento inverso. Apesar dos avanços, ambas as teorias requerem melhorias para aumentar a precisão na previsão da resistência à flexão.

Li *et al.* (2025) utilizaram a teoria da analogia de cisalhamento e o método Gamma para prever a rigidez à flexão de amostras de CLBT e CLT. A rigidez local à flexão baseada na deflexão mostrou maior compatibilidade com a rigidez efetiva à flexão, enquanto os dados de extensômetros apresentaram valores superiores à rigidez efetiva. Para o CLBT, a rigidez prevista pela teoria da analogia de cisalhamento foi maior do que pelo método Gamma, enquanto no CLT os métodos apresentaram resultados similares. Além disso, para o CLBT e CLT, a rigidez experimental que considera o cisalhamento foi maior que a prevista pelos modelos teóricos, enquanto a rigidez experimental sem o cisalhamento se aproximou dos valores calculados pela teoria da analogia de cisalhamento.

Xiao *et al.* (2021) analisaram vigas de CLBT utilizando dois modelos teóricos. O modelo parcialmente colado considera deslizamento parcial entre camadas de *glulam* e madeira, enquanto o modelo totalmente colado assume a inexistência de deslizamento, baseado na hipótese de seção plana. Ambos os modelos foram avaliados quanto à rigidez e capacidade de momento em comparação com resultados experimentais.

O modelo parcialmente colado subestimou a rigidez do CLBT em carregamentos fora do plano e a capacidade de momento em cerca de 25%. Já o modelo de seção plana apresentou maior precisão na previsão de rigidez para flexão fora e no plano, mas superestimou alguns resultados em até 10%. Para capacidade de momento em carregamento no plano, o modelo de seção plana forneceu estimativas razoáveis, com erro de aproximadamente 12%, enquanto para carregamento fora do plano mostrou superestimativas significativas. Ambos os modelos oferecem contribuições úteis, mas requerem ajustes para maior precisão.

Li *et al.* (2022a) desenvolveram uma abordagem para caracterizar os módulos de flexão aparentes de painéis de CLBT, fundamentada na classificação das camadas e suas propriedades. Foram definidas expressões matemáticas que relacionam os módulos de flexão das camadas paralelas, transversais, externas e internas, utilizando coeficientes que representam as características dos materiais e são determinados por testes de flexão. Essa classificação permite avaliar a influência das camadas no comportamento global do painel. Baseando-se no *CLT Handbook*, é empregada uma equação teórica para calcular a rigidez à flexão aparente e o módulo de flexão aparente teórico do painel sob condições sem cisalhamento transversal, onde a soma dos módulos aparentes nas direções de maior e menor resistência é expressa em função dos módulos das diferentes camadas.

Li *et al.* (2022a) propuseram uma abordagem para caracterizar os módulos de flexão aparentes de painéis de CLBT com base nas propriedades e classificações das camadas. Eles definiram expressões matemáticas que relacionam os módulos de flexão das camadas paralelas, transversais, externas e internas, considerando coeficientes que refletem as características dos materiais. A análise revelou que a soma dos módulos aparentes nas direções de maior e menor resistência possui um limite superior, determinado pelas propriedades dos materiais e independente do número de camadas.

Além disso, Li *et al.* (2022a) desenvolveram um modelo para quantificar as contribuições específicas de cada tipo de camada (paralela, transversal, externa ou interna) no módulo de flexão aparente global. A contribuição é expressa como a fração dos módulos de

flexão ortogonais de camadas de um mesmo tipo em relação ao total, permitindo avaliar de forma detalhada a influência de cada componente na rigidez global do painel.

Ainda, Li *et al.* (2022a) propuseram um modelo para quantificar as contribuições das direções de maior e menor resistência no módulo de flexão aparente global dos painéis CLBT e CLT, a fim de entender como as propriedades das camadas influenciam as contribuições relativas das duas direções de resistência no comportamento global do painel. O modelo confirma que, em sistemas anisotrópicos como CLT e CLBT, a direção de maior resistência contribui mais significativamente para o módulo de flexão aparente global.

Li *et al.* (2021) calcularam o módulo de elasticidade efetivo do CLBT utilizando a teoria da analogia de cisalhamento e a teoria gama modificada. O módulo teórico apresentou boa concordância com os valores experimentais, especialmente na direção principal de resistência, sendo mais preciso para CLT e MBM-CLBT. Essa precisão é atribuída à teoria gama modificada, que desconsidera a camada interna na direção secundária, e à analogia de cisalhamento, que superestima a camada externa.

Alterações na estrutura do CLBT permitem ajustar o módulo de elasticidade entre as direções de resistência, com reduções em uma direção podendo resultar em aumentos proporcionais na outra, dependendo das características das camadas. Os resultados evidenciam que a espessura das camadas, particularmente com a inclusão de BMCP, tem um impacto significativo no desempenho mecânico, permitindo ajustes no equilíbrio do módulo de elasticidade entre as direções de resistência.

Li *et al.* (2023b) analisaram a rigidez ao cisalhamento efetiva do CLBT utilizando a analogia de cisalhamento e os métodos de Timoshenko, observando que ambas as abordagens subestimaram a rigidez em relação aos valores experimentais. A rigidez experimental foi 219% e 239% da calculada pela analogia de cisalhamento e 194% e 212% pela metodologia de Timoshenko para CLBT com e sem cavilhas, respectivamente. Essas discrepâncias foram atribuídas às variações significativas nas propriedades mecânicas das camadas. Para prever a rigidez à flexão “aparente”, os métodos de analogia de cisalhamento e teoria gamma foram avaliados, sendo mais precisos quando a rigidez ao cisalhamento experimental foi utilizada, seguida pela teoria gamma. Recomenda-se determinar a rigidez ao cisalhamento experimentalmente e aplicá-la à teoria gamma para obter previsões mais confiáveis da rigidez à flexão do CLBT.

Adicionalmente, o módulo de elasticidade à flexão efetivo foi comparado ao módulo sem cisalhamento, revelando que furos e cavilhas reduzem levemente este último. O método de

medição do módulo sem cisalhamento foi considerado viável para o CLBT, demonstrando sua aplicabilidade prática.

Wen e Xiao (2023) analisaram vigas de CLBT sob flexão no plano e fora do plano usando modelos analíticos exatos baseados na elasticidade bidimensional. Para flexão fora do plano, o modelo considera deslizamento intercamadas e trata as vigas como sistemas de múltiplas camadas de materiais ortotrópicos. A carga é aplicada no topo da viga, e o problema de tensão plana no plano x-y inclui equilíbrio de forças, continuidade das tensões e deslocamentos. As relações tensão-deformação dependem dos módulos de elasticidade, cisalhamento e coeficientes de Poisson, enquanto o deslizamento é modelado por uma rigidez de ligação. As variáveis de deslocamento e tensão são resolvidas com séries de Fourier, e as distribuições de tensões são descritas por funções exponenciais que consideram a rigidez interfacial e as propriedades dos materiais.

Para flexão no plano, o modelo assume interação perfeita entre as camadas, sem deslizamento interfacial, devido à orientação paralela da carga. A viga é tratada como uma única camada equivalente, com propriedades médias para os módulos de elasticidade, cisalhamento e coeficientes de Poisson. Nessa condição, os deslocamentos verticais e longitudinais são uniformes na seção transversal, permitindo uma simplificação das equações de equilíbrio e continuidade, o que reduz a complexidade do sistema.

Shan *et al.* (2023b) aplicaram o método da ISO 6946 (2007) para estimar a resistência térmica e a transmitância térmica de componentes e elementos de construção. As expressões para uma parede contendo camadas termicamente homogêneas e heterogêneas são utilizadas para prever a resistência térmica das paredes de CLT e CLBT. O método de cálculo da ISO 6946 considera apenas a condutividade térmica dos materiais na direção da espessura da parede, assumindo materiais isotrópicos. Os resultados calculados são consistentes com os dados medidos.

O capítulo evidencia a evolução de modelos analíticos para a avaliação do CLBT, abrangendo desde a compressão e flexão até propriedades térmicas. Apesar do progresso, os modelos requerem ajustes e validações experimentais para maior precisão. A integração de abordagens normativas, teorias avançadas e medições experimentais é essencial para consolidar o CLBT como um material versátil e eficiente na construção civil.

7.5 METODOLOGIAS NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DO CLBT

Em Li *et al.* (2025), o Abaqus/CAE foi utilizado para desenvolver um modelo de elementos finitos para painéis de piso de CLBT, realizando uma análise das características de falha, deflexão no meio do vão, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento interlaminar, com variações no vão e na largura dos painéis. A anisotropia das propriedades mecânicas do *bamboo scrimber* e da madeira SPF foi considerada utilizando o critério de Hill. As propriedades do adesivo entre as camadas foram incluídas no modelo, com parâmetros definidos como rigidez inicial e resistências interfaciais normais e tangenciais. O tipo de elemento C3D8R foi utilizado para simular as camadas de *bamboo scrimber* e SPF. As propriedades mecânicas, como módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson, resistências à compressão e cisalhamento, foram baseadas em dados experimentais.

Shan *et al.* (2023b) desenvolveram um modelo numérico para avaliar o desempenho térmico dos painéis de CLBT utilizando análise térmica em estado estacionário no software ANSYS. Inicialmente, as camadas dos painéis, compostas por materiais como *glubam*, madeira SPF, XPS (poliestireno extrudado), estuque e gesso, foram modeladas, sendo representadas com condutividades térmicas específicas para cada camada e considerando anisotropia térmica quando aplicável. Para a análise numérica, foram utilizados elementos hexaédricos de 8 nós (SOLID 70) para as camadas sólidas e elementos de barra de 2 nós (LINK33) para os parafusos, enquanto a malha foi refinada com tamanho de elemento de 0.005 m. As condições de contorno foram definidas com temperaturas internas e externas e os coeficientes de convecção lateral especificados como zero, simulando isolamento térmico perfeito nas laterais do painel. Os parafusos, por sua vez, foram modelados separadamente para considerar o efeito de ponte térmica causado por sua alta condutividade térmica.

Zhang *et al.* (2023) desenvolveram um modelo de elementos finitos elasto-plástico utilizando a sub-rotina USDFLD no software Abaqus para analisar placas de bambu achatado e madeira de abeto chinês como materiais anisotrópicos tridimensionais. O critério de resistência adotado foi o de Tsai–Wu, adequado para materiais anisotrópicos. Entre o corpo de prova e o dispositivo de carregamento, foi aplicado contato superfície a superfície, com um coeficiente de atrito tangencial de 0,2. Na direção normal (YY), considerou-se um contato rígido e sem atrito.

Para a discretização, utilizaram-se elementos contínuos C3D8R. O contato coesivo definiu as interações entre as camadas coladas, assumindo uma relação tração-separação linear

elástica com rigidezes iniciais. No entanto, o contato de colagem entre as camadas de bambu dos painéis foi desconsiderado, pois as camadas paralelas do corpo de prova CLBT permaneceram intactas após os testes experimentais. O modelo de elementos finitos demonstrou maior precisão na previsão da rigidez e da resistência à flexão dos corpos de prova em comparação com dois modelos teóricos analisados, evidenciando sua eficácia na simulação do comportamento estrutural.

Li *et al.* (2024a) desenvolveram um modelo de elementos finitos utilizando o software Abaqus para investigar o comportamento de painéis de CLBT sob compressão no plano. Os materiais empregados, bambu engenheirado e Spruce-Pine-Fir (SPF), foram modelados como ortotrópicos e seu comportamento não linear foi capturado pelo critério de Hill. Os modelos constitutivos adotados foram do tipo elasto-plástico, considerando parâmetros como módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson e resistências. As propriedades adesivas entre as camadas foram incorporadas por meio de parâmetros como rigidez inicial, forças interfaciais e deslocamento plástico equivalente.

A simulação utilizou elementos finitos C3D8R, com tamanhos de malha definidos em 20 mm para análises comparativas com resultados experimentais e 50 mm para casos que demandaram maior eficiência computacional. As condições de contorno incluíram apoios articulados que permitiram deflexão no eixo fraco, enquanto imperfeições geométricas foram simuladas pelo formato do primeiro modo de flambagem. A validação do modelo foi realizada com dados experimentais de painéis, apresentando um erro absoluto médio de 7%. Os resultados mostraram uma boa concordância entre as simulações e os experimentos, indicando a precisão do modelo para prever o comportamento dos painéis.

A síntese das metodologias numéricas aplicadas ao estudo do CLBT demonstra avanços relevantes na compreensão do comportamento estrutural e térmico desse material inovador. No entanto, a literatura sobre o tema ainda é limitada, conforme evidenciado pela abrangência da revisão sistemática realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, que considerou todos os artigos disponíveis sobre o assunto.

Os estudos existentes empregaram metodologias sofisticadas, como modelos de elementos finitos elasto-plásticos e análises térmicas detalhadas, para abordar aspectos específicos do CLBT, como compressão no plano, flexão, cisalhamento interlaminar e desempenho térmico. A utilização de ferramentas como Abaqus e ANSYS permitiu modelar com precisão a anisotropia do bambu engenheirado e da madeira SPF, incorporando critérios avançados, como Hill e Tsai–Wu, além de propriedades adesivas entre camadas.

Apesar da boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, com erros médios inferiores a 10%, o número reduzido de estudos *restringe* uma visão abrangente sobre o potencial do CLBT. Questões importantes, como durabilidade, comportamento em condições extremas e dinâmica estrutural, permanecem pouco exploradas. Além disso, a diversidade limitada de variáveis investigadas nos modelos sugere a necessidade de abordagens mais abrangentes que contemplem diferentes combinações de materiais, geometrias e condições de contorno.

Portanto, enquanto os estudos existentes fornecem uma base promissora para o desenvolvimento e aplicação prática do CLBT, há uma clara lacuna de pesquisas que explorem de forma mais ampla e aprofundada as múltiplas facetas desse material. Essa limitação ressalta a necessidade de esforços futuros para expandir a literatura e consolidar o CLBT como uma alternativa sustentável e eficiente na engenharia estrutural.

7.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO CLBT

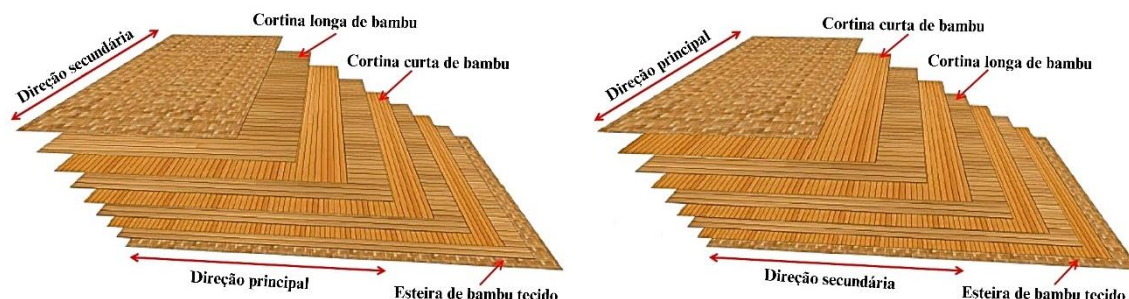
Diversos processos de fabricação do CLBT foram identificados nos estudos. Yang *et al.* (2022) fabricaram painéis CLBT utilizando pranchas de bambu mossô achatado e madeira de *Chinese fir*. O teor de umidade de ambos os materiais atendeu à norma ANSI/APA PRG 320 ($12\% \pm 3\%$). Os testes de cisalhamento foram realizados conforme as normas GB/T 15780-1995 (madeira) e ASTM D143 (2014) (bambu). As pranchas de bambu foram cortadas em 500 mm de comprimento e lixadas até 6,5 mm de espessura, enquanto a madeira foi desbastada até 18 mm de espessura e cortada em 375 mm de comprimento.

Dois adesivos estruturais foram empregados: poliuretano monocomponente (PUR) e fenol-resorcinol-formaldeído (PRF). A taxa de aplicação foi de 200 g/m² para o PUR (tempo de prensagem de 2 horas) e 300 g/m² para o PRF (tempo de prensagem de 4 horas). Três pressões de colagem (0.6, 0.8 e 1.0 MPa) foram adotadas. Painéis de 500 mm × 375 mm foram fabricados em laboratório. A montagem seguiu uma sequência em camadas: três camadas inferiores de bambu foram coladas primeiro, seguidas pela camada intermediária de madeira e, por fim, as três camadas superiores de bambu.

Li *et al.* (2022a) produziram painéis CLBT utilizando madeira serrada de *hem-fir* e BMCP de bambu mossô. O BMCP comercial tem dimensões padrão de 2440×1220 mm, com possibilidade de personalização. Suas camadas externas são feitas de esteira de bambu tecido, composta por tiras entrelaçadas em padrão ortogonal, enquanto as camadas internas consistem

em cortinas de bambu longas e curtas. As cortinas de bambu são fabricadas conectando tiras de bambu na mesma direção com fios (Li *et al.*, 2021).

Figura 152 – A estrutura de camadas do BMCP



Fonte: Li *et al.* (2021)

A madeira serrada apresentava teor de umidade de 11,4% e densidade média de 0,431 g/cm³, enquanto o BMCP possuía densidade média de 0,787 g/cm³. A fabricação utilizou um adesivo de poliuretano monocomponente, aplicado a 160,0 g/m², com prensagem a frio a 1,2 MPa por 2 horas. Os painéis finais, com dimensões de 2300 × 1250 × 51 mm, não apresentaram emendas dentadas, colagem nas bordas ou lacunas visíveis entre as laminações de *hem-fir*. Os painéis CLBT de 3 camadas foram configurados com camadas externas de BMCP e camada interna de *hem-fir*.

Zhang *et al.* (2023) fabricaram painéis CLBT utilizando placas de bambu achatado, derivadas de bambu mossô, e madeira serrada de pinheiro-chinês. As tábuas de bambu, com densidades entre 750 e 850 kg/m³ (média de 782 kg/m³) e teor de umidade de 8,4%, tiveram suas propriedades determinadas conforme a norma GB/T 15780–1995. A madeira serrada foi classificada pela norma GB/T 50708–2012, apresentando densidade média de 368 kg/m³ e teor de umidade de 12,9%. Os painéis CLBT, compostos por três camadas, incluíam duas camadas paralelas de bambu achatado e uma camada transversal de madeira serrada. Um adesivo de poliuretano monocomponente (PUR) foi aplicado a 200 g/m², com prensagem a 0,6 MPa por 2,5 horas, à temperatura ambiente. O processo não exigiu colagem nas bordas, prensagem lateral ou emendas dentadas.

Em Li *et al.* (2023b) e (2025), painéis CLBT de 5 camadas foram pré-fabricados pela Jiangsu Global CLT Co., Ltd., conforme a norma ANSI/APA PRG-320, com dimensões de 2400 × 150 × 7600 mm. Cada camada, de 30 mm de espessura, foi colada com adesivo de poliuretano monocomponente, aplicado a 160 g/m², com tempo aberto de 20–25 minutos. As laminações não receberam adesivo nas faces laterais ou extremidades e foram prensadas a frio a 1,0 MPa por 3 horas. As camadas externas eram feitas de *bamboo scrimber*, enquanto as três

camadas internas consistiam em SPF (*Spruce-Pine-Fir*) classe Nº 2, dispostas de forma ortogonal entre si. As densidades a seco ao ar do *bamboo scrimber* e do SPF foram de 1.177 g/cm³ e 0.445 g/cm³, com teores de umidade de 7.59% e 9.94%, respectivamente.

Li *et al.* (2021) fabricaram painéis CLBT utilizando madeira *hem-fir* ocidental classificada como Nº 2 e Btr nos sistemas canadense e norte-americano. O teor de umidade médio foi de 11.8% e a densidade de 0.427 g/cm³. O material de bambu utilizado foi o BMCP, derivado de bambu-mossô, com densidade média de 0.787 g/cm³. O BMCP apresentava camadas externas de esteiras de bambu trançado, confeccionadas com tiras de bambu trançadas ortogonalmente, e camadas internas formadas por cortinas longas e curtas de bambu, conectadas por fios na mesma direção. Antes da colagem, os painéis de BMCP foram lixados para atingir 17 ± 0.2 mm de espessura. Quando utilizados como camada interna, ambos os lados foram lixados; já como camada externa, apenas o lado a ser colado à madeira *hem-fir* foi lixado.

O adesivo aplicado foi um poliuretano monocomponente (PUR), com uma taxa de 160.0 g/m². A prensagem a frio foi realizada sob uma pressão de 1.2 MPa por 2 horas. Após o acabamento e corte, os painéis finais apresentaram dimensões de 2300 × 1250 × 51 mm. Não foram utilizadas emendas dentadas na madeira *hem-fir* ou no BMCP, nem colagem nas bordas.

Barreto *et al.* (2019) produziram painéis CLBT utilizando bambu *Dendrocalamus giganteus* e madeira *Pinus* spp., tratados com inseticida à base de Cipermetrina. A classificação visual do bambu seguiu normas internacionais (ISO 22156, NSR 10 e IS 6874), e o teor de umidade foi ajustado para 12% conforme a NBR 7190 (1997). O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado por testes não destrutivos com ultrassom, seguindo as diretrizes da ASTM D4761 (2013). As tiras de bambu e de pinho foram cortadas de acordo com a ASTM D198 (2009). Após a classificação, as tiras foram ordenadas pelo módulo de elasticidade dinâmico e agrupadas para formar painéis homogêneos, compostos por três camadas (bambu-madeira-bambu) com dimensões finais de 27 × 320 × 900 mm. A montagem foi realizada na Madeplak Comércio de Compensado de Madeiras, utilizando resina melamina-ureia-formaldeído (MUF). A prensagem foi feita a 1.0 MPa, com aplicação de 400 g/m² e tempo total de 18 horas em condição a frio, evitando emissões de formaldeído, conforme as prescrições do fabricante e a ASTM D198 (2009).

A Tabela 30 fornece uma síntese abrangente dos produtos de bambu e das espécies de bambu e madeira empregadas na fabricação de CLBT. Além disso, apresenta as dimensões dos elementos, as configurações das camadas, as principais etapas do processo de fabricação e os tipos de adesivos utilizados. A síntese dos processos de fabricação do CLBT apresentados na

literatura revela a diversidade de materiais, adesivos e métodos utilizados, refletindo a adaptabilidade e a inovação dessa tecnologia. Os estudos destacaram o uso de diferentes combinações de bambu e madeira, além de variados parâmetros de processamento, que impactam diretamente as propriedades dos painéis.

Os materiais empregados incluem bambu Mossô, em formas como pranchas achatadas, *bamboo scrimber* e BMCP, além de madeiras como *hem-fir*, Chinese fir, pinus e SPF. A densidade e o teor de umidade foram controlados, seguindo normas específicas, como ANSI/APA PRG 320, GB/T 15780-1995 e outras. Os adesivos estruturais mais comumente utilizados foram o poliuretano monocomponente (PUR), fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e melamina-ureia-formaldeído (MUF), aplicados em taxas que variaram de 160 g/m² a 400 g/m². Os tempos e pressões de prensagem também variaram, dependendo do adesivo e das condições de colagem. A prensagem a frio foi predominante, com pressões de até 1.2 MPa e tempos que chegaram a 18 horas, demonstrando a importância de ajustar os processos às características dos materiais e adesivos.

As configurações de camadas dos painéis CLBT mostraram-se versáteis, alternando bambu e madeira de forma estratégica para atender às demandas estruturais e normativas. A disposição ortogonal das camadas foi uma constante, contribuindo para melhorar o desempenho mecânico. Por fim, o uso de normas internacionais para a classificação, controle de qualidade e testes dos painéis assegura a confiabilidade dos resultados e promove a disseminação do CLBT como solução sustentável na construção civil. A continuidade de estudos para otimização de processos, redução de custos e aumento da eficiência produtiva é essencial para consolidar o CLBT no mercado global.

Tabela 30 – Características e dimensões dos CLB e processos de fabricação

RF	TP	ESP		CF	C (mm)	L (mm)	E (mm)	NC	EC	Adesivo	TA (g/m ²)	TP	TMP (hr)	PP (MPa)
1	<i>glubam</i>	Mossô	SPF álamo	B3MB	2000 2400	260 300	150 160	5	30					
2	BMCP	Mossô	<i>hem-fir</i>	BMB	2300	1250	51	3	17	PUR	160	À frio	2	1.2
3	FB	Mossô	abeto chinês	BMB 2BM2B 3BM3B	1030 1100	600	32 45 54 58	3 5 7	6.5	PUR	200	À frio	2.5	0.6
4	FB	Mossô	pinho- chinês	BMB	500	375	57	3	3(6.5)	PUR PRF	200 300		2 6	0.6 0.8 1.0
5	<i>glubam</i>		SPF	B3MB	480 525 800	200	160	5	32					

				1600										
				2400										
				400										
				800										
6	BSC		SPF	BMB	1800	260	150	30	5					
					2800									
					3800									
7	BSC		SPF	B3MB	7600	2400	150	5	30	PUR				
8	BMCP	Mossô	hem-fir	BMB MBM					3	17				
9	BSC		SPF	B3MB	7600	2400	150	5	30	PUR	160	À frio	3	1
					1050									
10	BSC		SPF	B3MB	1350	300	150	5	30					
					1650									
					1950									
11	glubam		Balsa	BMB			90	3	30	PRF	200	À frio	4	0.2
12	BSC	Mossô	SPF		7600	2400	150	5	30	PUR	160	À frio	3	1
13	Tiras	<i>D. giganteus</i>	Pinus	BMB	900	320	27	3	9	MUF	400	À frio	18	1
14	BMCP	Mossô	Hem-fir	BMB MBM	145	51	51	3	17					
15	glubam	Mossô	SPF	B3MB	2400	161 194	156 195.5	5	31.2 39.1					
16	glubam		SPF	B3MB	1830 1500	1830 1500		5						
17	BMCP	Mossô	Hem-fir	BMB MBM	2300	1250	51	3	17	PUR	160 g/m2	À frio	2	1.5

Legenda: RF – Referências; TP – Tipo de produto de bambu; EB – Espécie de bambu; EM – Espécie de madeira; CF – Configuração das camadas; C – Comprimento; L – Largura; E – Espessura; NC – Número de camadas; EC – Espessura das camadas; TA – Taxa de aplicação; TP – Tipo de prensagem; TMP – Tempo de prensagem; PP – Pressão de prensagem; PUR – Poliuretano monocomponente; PRF – Fenol-resorcinol-formaldeído; MUF – Melamina-ureia-formaldeído; *D. giganteus* – *Dendrocalamus giganteus*; B – Bambu; M – Madeira (por exemplo, BMB – Bambu-madeira-bambu); 1 – Xiao, Cai e Dong (2021); 2 – Li et al. (2022a); 3 – Zhang et al. (2023); 4 – Yang et al. (2022); 5 – Fan et al. (2021); 6 – Li et al. (2024a); 7 – Li et al. (2023a); 8 – Li et al. (2022b); 9 – Li et al. (2025); 10 – Li et al. (2024b); 11 – Wang et al. (2021); 12 – Li et al. (2023b); 13 – Barreto et al. (2019); 14 – Li et al. (2023c); 15 – Wen e Xiao (2023); 16 – Shan et al. (2023b); 17 – Li et al. (2021).

Fonte: Autora (2024).

7.7 APLICAÇÕES DO CLBT

Diversos estudos têm explorado as aplicações potenciais do CLBT em diferentes componentes estruturais, destacando sua versatilidade e eficiência em construções modernas. Xiao et al. (2021) propuseram o uso do CLBT em lajes e painéis de paredes, uma aplicação reforçada por Li et al. (2023c), que identificaram o material como particularmente adequado para paredes estruturais e outros componentes que requerem resistência e rigidez em múltiplas direções.

Li et al. (2022b) sugeriram a utilização do CLBT como membros de parede, enfatizando sua capacidade de resistir a cargas compressivas tanto no plano quanto fora do eixo. Eles também propuseram sua aplicação em paredes de tamanho real em edifícios inovadores. Em

complemento, Li *et al.* (2024b) apontaram o uso de painéis de CLBT em pisos e telhados sujeitos a cargas fora do plano, enquanto Barreto *et al.* (2019) destacaram a viabilidade do material em pisos e telhados estruturais devido à sua robustez e alta capacidade de suportar e transferir cargas bidimensionalmente. Esses autores também indicaram o potencial do CLBT para paredes ou divisórias verticais.

Fan *et al.* (2021) ampliaram as possibilidades de aplicação ao propor o CLBT para pilares, além de reafirmarem seu uso em paredes, pisos e telhados, citando a alta capacidade de carga e rigidez comprovada em experimentos. De maneira semelhante, Li *et al.* (2024a) apresentaram o CLBT como uma alternativa superior ao CLT para elementos de parede, destacando o aumento significativo na capacidade de compressão em alturas típicas de edifícios.

Shan *et al.* (2023b) sugeriram o CLBT como um substituto potencial ao CLT para paredes e telhados, ressaltando seu desempenho térmico adequado para diversas condições climáticas. Além disso, Li *et al.* (2022a) identificaram a vantagem do CLBT em situações que demandam melhorias no cisalhamento transversal das camadas cruzadas e no módulo de flexão das camadas paralelas, como em painéis submetidos a cargas fora do plano.

Li *et al.* (2021) propuseram o uso do CLBT como componentes principais de carga em vigas, colunas e paredes de cisalhamento em construções leves, além de pisos internos e externos. De maneira complementar, Li *et al.* (2025) destacaram o desempenho superior do CLBT em rigidez e resistência à flexão, bem como em capacidade de cisalhamento, sugerindo seu uso em pisos estruturais, tetos e paredes.

Li *et al.* (2023b) investigaram o desempenho de painéis de CLBT reforçados com cavilhas de aço, demonstrando sua adequação para cargas fora do plano em condições de altas tensões de cisalhamento no plano, tornando-os ideais para vigas e painéis estruturais. Wen e Xiao (2023) corroboraram essas descobertas ao propor o uso do CLBT em vigas estruturais sujeitas a flexão no plano e fora do plano.

Zhang *et al.* (2023) e Yang *et al.* (2022) destacaram a resistência e sustentabilidade do CLBT, reafirmando seu potencial como material estrutural em diversas aplicações. Por fim, Li *et al.* (2023a) e Wang *et al.* (2021) propuseram o CLBT para painéis estruturais leves, paredes e pisos em edifícios de média e grande altura, consolidando sua versatilidade em projetos contemporâneos.

8 CONCLUSÕES DA PESQUISA

8 CONCLUSÕES DA PESQUISA

Este capítulo apresenta as principais conclusões desta pesquisa, organizadas em três tópicos principais para facilitar a compreensão: “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura e da Caracterização da Indústria de Bambu Engenheirado Estrutural”, “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura sobre CLB” e “Conclusões da Revisão Sistemática da Literatura sobre CLBT”. Essa estrutura busca proporcionar clareza e organização na apresentação dos resultados.

8.1 CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E DA CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BAMBU ENGENHEIRADO ESTRUTURAL

8.1.1 Conclusões da revisão sistemática da literatura da indústria de bambu engenheirado estrutural

A revisão sistemática da literatura apresentou os avanços no desenvolvimento e na aplicação de produtos de bambu engenheirado estrutural, destacando as metodologias de fabricação, os adesivos utilizados, as propriedades mecânicas investigadas e as aplicações potenciais desses materiais. No entanto, apesar do crescente interesse acadêmico e industrial, a pesquisa revelou lacunas na compreensão das características globais da indústria e do mercado de bambu engenheirado.

Os processos de fabricação analisados abrangem uma ampla gama de técnicas, como laminação, prensagem à frio e à quente, tratamentos e o uso de adesivos específicos, incluindo fenol-formaldeído (PF) e alternativas sustentáveis, como mecanismos de bioadesão e adesivos baseados em sangue de porco. A diversidade de espécies de bambu, como *Mossô*, *Dendrocalamus asper* e *Gigantochloa levis*, reflete a riqueza de recursos disponíveis, enquanto métodos inovadores de preparação, como fibrilação e modificação térmica, demonstram o esforço para otimizar as propriedades mecânicas e a durabilidade. No entanto, a falta de padronização nos processos e materiais adotados constitui um desafio à sua aceitação em mercados globais.

No âmbito experimental, os estudos concentraram-se na caracterização das propriedades mecânicas de produtos como *bamboo scrimber*, *glubam* e laminados de bambu (LBL), utilizando normas amplamente reconhecidas, como ASTM e GB/T. Testes de flexão, tração, compressão e cisalhamento destacam-se como os mais frequentes, refletindo o foco no

desempenho estrutural básico. Apesar disso, houve uma menor atenção a testes avançados e em escala real, como análises de desempenho dinâmico, térmico e resistência ao fogo, indicando a necessidade de maior abrangência metodológica para validar sua aplicação em condições práticas.

As aplicações propostas pelos estudos revisados incluem vigas, pilares, treliças, paredes de contraventamento e sistemas híbridos para edifícios residenciais, industriais e públicos, bem como estruturas de grande vão, como pontes e coberturas. A leveza, a resistência mecânica e a sustentabilidade do bambu engenheirado tornam-no adequado para construções modulares e temporárias, especialmente em cenários de desastres naturais. No entanto, a transição para aplicações em larga escala exige maior integração entre pesquisa e mercado, além de estratégias de normatização e certificação para consolidar sua competitividade no setor da construção.

Uma das principais lacunas identificadas nesta revisão é a ausência de estudos que investiguem de forma abrangente a produção, distribuição, consumo e tendências de mercado do bambu engenheirado estrutural. Essa falta de informações detalhadas dificulta o planejamento de estratégias para expandir sua adoção em escala global, bem como sua integração em cadeias produtivas estabelecidas.

Em conclusão, embora a pesquisa em bambu engenheirado estrutural esteja em estágio avançado em termos de caracterização e inovação de materiais, esforços adicionais são necessários para superar desafios relacionados à padronização, sustentabilidade e integração de mercado. O fortalecimento de colaborações internacionais e o desenvolvimento de políticas públicas favoráveis podem desempenhar um papel crucial no avanço desse setor promissor, consolidando o bambu engenheirado como uma solução estratégica para uma construção civil mais sustentável.

8.1.2 Conclusões da caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural

A caracterização da indústria de bambu engenheirado estrutural revelou um panorama diverso, com significativa concentração geográfica na China, onde estão localizadas a maioria das empresas analisadas. Este domínio reflete a ampla disponibilidade de matéria-prima, o avanço tecnológico e a capacidade industrial instalada nesse país. Por outro lado, mercados como os Estados Unidos, Índia, Colômbia, Indonésia, Vietnã e Singapura demonstram presença emergente, embora ainda limitada, indicando potenciais oportunidades de crescimento.

A análise dos *websites* demonstrou que, apesar do número maior que o esperado de empresas atuantes no setor, muitas delas carecem de informações detalhadas sobre seus

processos de fabricação, propriedades mecânicas e físicas dos produtos, e conformidade com normas técnicas e ambientais. Esses fatores comprometem a transparência e dificultam a especificação técnica dos materiais para aplicações estruturais. Adicionalmente, a limitada divulgação de projetos reais e a baixa adesão ao desenvolvimento de normas técnicas refletem uma lacuna no engajamento do setor com iniciativas de padronização e inovação.

Por outro lado, algumas empresas têm investido em certificações de qualidade e parcerias com universidades e centros de pesquisa, evidenciando um esforço para alinhar-se às demandas globais por sustentabilidade e desempenho técnico. A presença de escritórios regionais em mercados prioritários, como Estados Unidos, Israel e Tailândia, demonstra uma estratégia de expansão global em mercados emergentes.

Portanto, embora o setor apresente avanços importantes, ainda enfrenta desafios relacionados à transparência, padronização e comunicação técnica. Para consolidar sua posição global, é essencial um maior engajamento das empresas na divulgação de informações técnicas, no desenvolvimento de normas e na ampliação de colaborações acadêmicas e industriais. Essas ações podem fortalecer a confiança dos consumidores e profissionais do setor, promovendo o bambu engenheirado como uma solução estrutural competitiva e sustentável.

A análise do nível de industrialização e tecnologia nas empresas do setor de bambu engenheirado estrutural revelou uma indústria em constante modernização, com investimentos em infraestrutura tecnológica e automação. Empresas como a AltPlus, Bamboo Era e ReNüTeq destacam-se pelo uso de tecnologias avançadas, como prensas de aquecimento por micro-ondas, controle servo-assistido e máquinas CNC robóticas, que garantem alta precisão e eficiência no processamento. Outras, como a Taohuajiang Bamboo e a Greezu, adotam tecnologias patenteadas e linhas de produção inteligentes.

A variação na escala das operações é evidente, com áreas de fábrica variando de 4200 m² a 850000 m². Isso reflete a coexistência de pequenas empresas focadas em soluções personalizadas e grandes indústrias voltadas à produção em larga escala. Adicionalmente, o uso de equipamentos sofisticados, como máquinas de laminação sem limite de comprimento e sistemas de tratamento anticorrosivo, reforça o papel da tecnologia na otimização de processos e no aumento do valor agregado dos produtos.

Quanto aos serviços prestados, algumas empresas abrangem todo o ciclo produtivo, desde o manejo florestal até a instalação final, enquanto outras concentram-se em etapas específicas, como design, fabricação ou manutenção. Serviços personalizados, incluindo design e soluções em kit, destacam a flexibilidade do setor em atender às demandas específicas de

projetos estruturais. A integração de pesquisa e desenvolvimento em várias empresas demonstra um esforço contínuo para aprimorar materiais e processos, consolidando o bambu engenheirado como uma alternativa competitiva a materiais tradicionais.

Por outro lado, a análise revelou lacunas como a falta de informações completas sobre equipamentos e processos na maioria das empresas. Essa limitação compromete a avaliação detalhada do nível de desenvolvimento tecnológico do setor e pode dificultar comparações diretas entre empresas.

A análise das normas e certificações evidenciou o compromisso de diversas empresas do setor de bambu engenheirado estrutural com padrões de qualidade, sustentabilidade e desempenho técnico. A certificação ISO 9001, voltada para sistemas de gestão da qualidade, e a ISO 14001, que estabelece requisitos para sistemas de gestão ambiental, foram amplamente mencionadas, indicando a busca por processos produtivos eficientes e ambientalmente responsáveis. Além disso, a certificação FSC, que promove o manejo florestal sustentável, destaca-se como um padrão essencial, sendo adotada por várias empresas.

Em relação às normas técnicas, a ASTM D5456 e o ICC-ES AC47 foram identificados como referências para a avaliação e certificação de produtos de bambu engenheirado, assegurando conformidade com critérios de segurança e desempenho estrutural. O alinhamento com o Eurocode 5 e o IBC reforça a inserção do bambu engenheirado em mercados globais exigentes.

No campo da sustentabilidade, normas como a ISO/TS 14067 e a PAS 2050 foram empregadas para quantificar e reduzir a pegada de carbono, enquanto certificações como LEED e BREEAM posicionam o bambu engenheirado como uma alternativa estratégica para construções verdes. A certificação EPD, que fornece informações transparentes sobre os impactos ambientais dos produtos, também foi mencionada, refletindo o crescente interesse em práticas construtivas mais sustentáveis.

No entanto, a análise revelou uma adoção não uniforme dessas normas e certificações entre as empresas. Algumas destacam amplamente suas credenciais em sustentabilidade e desempenho técnico, enquanto outras não divulgam informações suficientes, comprometendo sua credibilidade e competitividade em mercados mais regulamentados. Essa falta de padronização e transparência pode limitar a aceitação do bambu engenheirado em escala global.

Entre as espécies de bambu, *Phyllostachys edulis* (bambu mossô) destaca-se como a principal matéria-prima devido à sua ampla disponibilidade e propriedades mecânicas favoráveis, especialmente em regiões asiáticas. Outras espécies, como *Guadua angustifolia* e

Dendrocalamus asper, são utilizadas em menor escala, indicando uma diversificação moderada na escolha de materiais para atender a especificidades regionais e demandas de desempenho.

Os tipos de adesivos empregados refletem diferentes exigências de desempenho e preocupações ambientais. Adesivos fenólicos, como o fenol-formaldeído, são amplamente utilizados devido à sua alta resistência e durabilidade, especialmente em aplicações externas e condições adversas. A ureia-formaldeído é preferida para produtos internos, enquanto adesivos de baixo VOC evidenciam um esforço para alinhar os processos de fabricação às demandas por materiais mais sustentáveis e seguros para a saúde.

Tratamentos químicos, embora limitados, são essenciais para aumentar a durabilidade e a resistência do bambu. Substâncias como ácido bórico e bórax são utilizadas para proteger o material contra fungos, insetos e outras formas de degradação biológica. Adicionalmente, a carbonização em alta temperatura é empregada para reduzir nutrientes que favorecem o ataque de pragas, enquanto tratamentos retardantes de fogo garantem a conformidade com classificações como B1, Classe A e padrões europeus como Bfl-S1.

Embora os processos analisados demonstrem avanços tecnológicos e uma diversificação nos métodos produtivos, a ausência de informações detalhadas em alguns casos, como taxas de aplicação de adesivos e parâmetros específicos de prensagem, limita a transparência e a capacidade de comparação entre os produtos. Essa lacuna reflete a necessidade de maior padronização e divulgação técnica para fortalecer a confiança no uso do bambu engenheirado estrutural em larga escala.

A análise dos tipos de produtos de bambu engenheirado estrutural revelou uma ampla diversidade de materiais disponíveis no mercado, destacando-se o *Laminated Bamboo Lumber* (LBL) e o *bamboo scrimber* (BSC) como as opções mais comuns. Essa predominância reflete a maturidade tecnológica do LBL e BSC em termos de produção e desempenho estrutural.

Os produtos de bambu engenheirado abrangem dimensões variadas e personalizáveis, atendendo a múltiplas necessidades de projeto, desde pequenos elementos internos até componentes de grande porte. Suas aplicações incluem vigas, colunas, treliças, painéis de parede, lajes de piso e estruturas híbridas bambu-aço. Esses materiais são utilizados em construções de baixa e média altura, edificações residenciais e comerciais, estruturas modulares, estações pré-fabricadas, entre outros.

Além de sistemas tradicionais viga-pilar, os produtos de bambu engenheirado estão sendo explorados em soluções mais complexas, como sistemas híbridos bambu-aço, coberturas de grandes vãos e elementos arquitetônicos personalizados. As aplicações abrangem desde

estruturas residenciais até projetos emblemáticos, como museus e galerias, demonstrando a flexibilidade e a capacidade de adaptação desse material a diferentes contextos construtivos.

Por outro lado, a falta de padronização na nomenclatura dos produtos, observada nas discrepâncias entre os termos comerciais e técnicos, dificulta a comparação direta entre as ofertas do mercado e pode criar barreiras para a aceitação no setor de engenharia estrutural. A limitada disponibilidade de informações detalhadas sobre propriedades físicas, mecânicas e os processos de fabricação dos produtos de bambu engenheirado em alguns *websites* reflete uma lacuna na comunicação técnica.

Dessa forma, embora o bambu engenheirado estrutural ofereça uma ampla gama de produtos e aplicações, é essencial investir em maior padronização terminológica, detalhamento técnico e disseminação de estudos de caso para fortalecer sua presença no mercado global e promover sua aceitação como material competitivo e sustentável na construção civil.

A pesquisa evidenciou a versatilidade e o potencial do bambu engenheirado estrutural em diversas aplicações. Identificaram-se projetos que abrangem desde edificações residenciais e comerciais de um a três pavimentos até estruturas modulares, como quiosques, abrigos e sanitários públicos, demonstrando sua adaptabilidade para diferentes contextos e escalas construtivas.

Projetos de grande porte, como museus e salões, ilustram a capacidade do bambu engenheirado para atender a exigências estruturais e arquitetônicas mais complexas, enquanto aplicações menores, como abrigos de ônibus e coberturas de entrada, demonstram sua acessibilidade e funcionalidade em soluções cotidianas. Estruturas híbridas bambu-aço representam um avanço na busca por eficiência estrutural e estética, consolidando o bambu como um material competitivo e inovador.

Embora o panorama seja promissor, a análise revelou uma carência de informações detalhadas sobre alguns projetos e aplicações, o que limita a compreensão plena do desempenho e das possibilidades do bambu engenheirado. Essa lacuna aponta para a necessidade de maior documentação e divulgação de estudos de caso, fundamentais para ampliar a confiança no material e fomentar sua adoção no mercado.

Em síntese, o bambu engenheirado estrutural demonstra-se aplicável a uma ampla gama de construções, desde pequenas estruturas modulares até edifícios de múltiplos pavimentos. Para consolidar seu uso e expandir seu impacto, é essencial investir em pesquisa, desenvolvimento e disseminação de conhecimento técnico e prático sobre as vantagens e aplicações desse material sustentável na construção civil.

8.2 CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CLB

A análise do volume de publicações sobre o *cross-laminated bamboo* (CLB) revelou um campo de pesquisa em crescimento, com predominância de metodologias experimentais voltadas à validação das propriedades mecânicas e estruturais do material. Métodos numéricos e analíticos, embora menos utilizados, complementam os estudos ao possibilitar simulações de condições estruturais complexas. As investigações têm focado no desempenho mecânico monotônico, comportamento sísmico e, pontualmente, em aspectos térmicos, resistência ao fogo e comportamento sob explosão. Elementos como amostras em escala reduzida e painéis em escala real, especialmente paredes oscilantes protendidas, são os mais estudados, destacando o potencial do CLB para aplicações em regiões sujeitas a sismos. As palavras-chave refletem o interesse nos aspectos estruturais e sísmicos, mas a dispersão indica que o campo ainda está em consolidação, abrangendo desde propriedades fundamentais até aplicações práticas.

As propriedades do CLB, em comparação ao CLT, demonstraram desempenho superior em diversos aspectos estruturais. O CLB apresentou maior resistência à flexão, compressão e cisalhamento transversal, além de módulos de elasticidade mais elevados. Essa superioridade pode ser atribuída às características do bambu engenheirado, que proporciona maior rigidez e resistência em comparação às madeiras tradicionalmente utilizadas no CLT. A resistência da linha de colagem e a capacidade de momento também foram destacadas como superiores no CLB, reforçando seu potencial como material estrutural de alto desempenho.

Portanto, o CLB é um material promissor, com desempenho técnico superior ao CLT em várias propriedades fundamentais para aplicações estruturais. Contudo, o campo de estudo ainda requer maior consolidação. A combinação de metodologias experimentais, numéricas e analíticas, aliada a colaborações internacionais, pode impulsionar o desenvolvimento e a aceitação do CLB como um material sustentável e eficiente para a construção civil.

As metodologias experimentais para avaliação do CLB destacam a investigação de propriedades mecânicas, térmicas e de resistência ao fogo, com predominância de testes monotônicos, como flexão, compressão, tração e cisalhamento. Esse enfoque evidencia a prioridade em caracterizar propriedades fundamentais em condições estáticas, indispensáveis para sua validação em projetos estruturais. Adicionalmente, testes cíclicos, como os de deslocamento relativo e ciclos repetitivos, indicam um interesse emergente no desempenho do CLB sob cargas dinâmicas, especialmente em regiões sujeitas a sismos e ventos.

No campo normativo, foram amplamente empregadas normas como ASTM D198, ISO 834-1, EN 789 e ASTM D143, que abordam propriedades estruturais e térmicas de materiais similares, como madeira e CLT. A norma EN 392, para resistência da linha de colagem, e a ASTM D2718, para cisalhamento planar, também tiveram destaque, evidenciando a importância de aspectos como adesão e comportamento ao cisalhamento transversal. Apesar da utilidade dessas normas, originalmente projetadas para madeira ou CLT, algumas limitações foram observadas, dado o comportamento único do bambu engenheirado, que apresenta maior densidade, anisotropia e características fibrosas específicas.

A aplicação de normas existentes permitiu o avanço inicial na caracterização do CLB, mas os resultados destacam a necessidade de desenvolvimento de normas específicas para o material. Isso garantiria maior precisão nas avaliações, padronização dos métodos e comparabilidade entre estudos. O desenvolvimento de diretrizes normativas dedicadas é crucial para consolidar o CLB como uma alternativa confiável e padronizada na construção civil.

As metodologias analíticas aplicadas demonstraram ampla diversidade, abrangendo abordagens teóricas e normas adaptadas de materiais similares, como CLT e madeira laminada. Técnicas como a analogia de cisalhamento, a teoria de compósitos laminados e o uso de modelos baseados na teoria de placas ortotrópicas foram fundamentais para prever propriedades mecânicas e térmicas do CLB. Modelos específicos também foram desenvolvidos para analisar o comportamento ao fogo e o desempenho histerético de paredes oscilantes de CLB, considerando estados limites e critérios de falha.

Entre as propriedades mais frequentemente avaliadas destacam-se a rigidez à flexão, resistência à flexão, rigidez ao cisalhamento, capacidade de carga sob compressão e propriedades térmicas. A resistência à flexão foi modelada com maior precisão utilizando a teoria de compósitos laminados, enquanto a analogia de cisalhamento foi eficaz para prever rigidez ao cisalhamento e identificar modos de falha em vigas e painéis. Propriedades térmicas, como profundidade de carbonização e resistência térmica, foram analisadas com base em modelos ajustados para o CLB, superando limitações de normas convencionais, como a ISO 6946.

As metodologias baseadas em critérios de falha, como os métodos de Rayleigh-Ritz e perfis de temperatura modificados, ampliaram o entendimento dos mecanismos de degradação e resistência ao fogo. Para paredes oscilantes, modelos analíticos integraram hipóteses de elasticidade e seções planas para prever rigidez, comportamento histerético e autocentrimento,

com abordagens como o Método Analítico Modificado (MAM) e o Design Baseado em Deslocamento (DBD).

Embora as previsões analíticas apresentem boa concordância com resultados experimentais, limitações foram identificadas, como simplificações que ignoram lacunas ou defeitos de fabricação. Além disso, métodos desenvolvidos para CLT requerem ajustes para capturar características únicas do CLB, como anisotropia e comportamento heterogêneo das camadas. A integração dessas abordagens com simulações numéricas e testes experimentais é essencial para melhorar a precisão dos modelos e consolidar o uso do CLB em projetos estruturais.

A análise das metodologias numéricas aplicadas ao estudo do CLB revelou avanços significativos na compreensão do comportamento estrutural e funcional desse material inovador. Os modelos desenvolvidos, em sua maioria utilizando o software ABAQUS, destacaram-se pela capacidade de replicar com precisão os resultados experimentais, proporcionando insights valiosos sobre distribuição de tensões, modos de falha e desempenho térmico.

Entre as abordagens numéricas, o método dos elementos finitos foi amplamente utilizado para modelar componentes anisotrópicos, como as lamelas de bambu, e para representar interações complexas entre materiais e interfaces adesivas. Elementos de casca (SC8R e S4R) foram aplicados na modelagem de painéis e paredes, enquanto elementos sólidos (C3D8R) foram empregados para componentes como placas de aço e elementos de cisalhamento. Para barras de protensão, utilizaram-se elementos de viga (B31), com modelos constitutivos elasto-plásticos que simularam com precisão o comportamento de componentes metálicos e materiais compósitos.

Os modelos constitutivos adotados variaram conforme o comportamento do material e as condições de carregamento. Para as lamelas de bambu, predominaram modelos elásticos anisotrópicos e elasto-plásticos, enquanto as interfaces adesivas foram representadas por leis coesivas baseadas em comportamento tração-separação. Em análises térmicas, os elementos hexaédricos (DC3D8) foram utilizados para investigar a transferência de calor e o desempenho de isolamento térmico de paredes compostas.

Os estudos numéricos focaram principalmente em paredes oscilantes, elementos submetidos a flexão e compressão. Modelos simplificados, como o Modelo Numérico Simplificado (SNM) para paredes oscilantes, demonstraram eficácia em prever comportamento histerético e dissipação de energia. Além disso, modelos avançados consideraram efeitos

específicos, como delaminação, deslocamento relativo e falhas coesivas, ampliando o entendimento sobre o desempenho do CLB em diferentes aplicações.

Apesar dos avanços, desafios persistem na representação precisa da heterogeneidade do material e nas interações entre camadas, especialmente em condições extremas ou de longo prazo. A integração de modelos numéricos com resultados experimentais e simulações mais avançadas é essencial para melhorar a confiabilidade e ampliar as aplicações do CLB.

A síntese dos processos de fabricação do CLB revelou que os painéis de CLB são majoritariamente fabricados a partir de bambu engenheirado, sendo o *bamboo scrimber* o material base mais empregado, devido à sua alta densidade e resistência mecânica. Embora em menor escala, tiras de bambu e o bambu laminado também foram utilizados em alguns estudos.

A espécie de bambu mais utilizada é o bambu mossô, amplamente adotado devido à sua disponibilidade e propriedades mecânicas favoráveis. Em casos específicos, o bambu guadua foi empregado, especialmente para aplicações regionais.

As dimensões das lamelas variam de 6.25 mm a 20 mm de espessura, significativamente menores em comparação às lamelas do CLT, que podem alcançar até 51 mm. Essa menor espessura está relacionada à geometria dos colmos de bambu, exigindo um maior número de camadas nos painéis de CLB, que tipicamente possuem de três a oito camadas. Diferentemente do CLT, no CLB o número de camadas não é necessariamente ímpar, e, em alguns casos, camadas internas são orientadas na mesma direção.

Os adesivos mais utilizados incluem poliuretano (PUR) e resorcinol-formaldeído (RF). Outros adesivos, como fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e melamina-ureia-formaldeído (MUF), também foram empregados. Os métodos de colagem mais comuns envolvem prensagem a frio, com pressões que variam de 0.2 MPa a 5 MPa, e tempos de cura que vão de 4 horas a mais de 24 horas. Processos de prensagem a quente também foram registrados, especialmente para painéis reforçados.

Apesar da diversidade nas técnicas de fabricação, a ausência de padronização entre os estudos analisados representa um desafio para a consolidação do CLB como material amplamente aceito no mercado e para a sua produção em escala industrial. A padronização dos processos de fabricação, dimensões, adesivos e critérios de desempenho é essencial para facilitar a produção em larga escala e promover o uso do CLB em aplicações estruturais globais.

As aplicações do CLB destacam sua versatilidade como material estrutural, com ampla gama de usos em elementos de construção. Sua capacidade de equilibrar resistência e estabilidade bidirecional posiciona o CLB como uma alternativa eficiente e sustentável em

diversas estruturas. Estudos apontaram o uso do CLB em paredes, pisos, vigas, paredes de cisalhamento e diafragmas de piso, evidenciando sua alta resistência ao cisalhamento transversal e ao desempenho em cargas fora do plano.

O CLB tem sido proposto como solução para edifícios resilientes, incluindo construções de múltiplos pavimentos e sistemas híbridos. Elementos como paredes oscilantes equipadas com amortecedores de fricção e sistemas de autocentramento destacam-se por sua eficiência na dissipação de energia e comportamento estável sob cargas cíclicas, especialmente em contextos sísmicos. Adicionalmente, a combinação com materiais como CFRP, formando lajes reforçadas, amplia as aplicações do CLB em estruturas que demandam maior rigidez e resistência.

Painéis pré-fabricados e modulares de CLB têm sido promovidos por sua sustentabilidade, contribuindo para reduzir a pegada ambiental no setor da construção. Aplicações inovadoras incluem sistemas de painéis sanduíche e estruturas tensionadas, que aliam eficiência estrutural e estética, além de soluções para isolamento térmico, reforçando o potencial do CLB em edificações energeticamente eficientes.

As propriedades mecânicas superiores do CLB, como alta resistência à fratura translaminar, fazem dele um material adequado para construções que demandam tolerância a danos, incluindo proteção contra explosões. Além disso, seu uso em componentes como lajes e painéis híbridos evidencia a flexibilidade de design e a possibilidade de integração com outros materiais, criando produtos mais eficientes e sustentáveis.

Em síntese, o CLB é um material inovador e promissor, capaz de atender a diferentes demandas estruturais e energéticas, promovendo sustentabilidade e eficiência em construções modernas. Para consolidar sua aplicação em larga escala, futuros estudos devem explorar ainda mais seu desempenho em cenários práticos e validar suas vantagens em projetos reais. Dessa forma, este estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas, consolidando o CLB como alternativa sustentável na construção civil.

8.3 CONCLUSÕES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO CLBT

A revisão sistemática sobre o *cross-laminated bamboo and timber* (CLBT) demonstrou o crescimento recente do interesse acadêmico pelo tema, especialmente a partir de 2019. A predominância de metodologias experimentais reflete a necessidade de validar as propriedades estruturais e mecânicas do material, enquanto abordagens analíticas e numéricas complementam a compreensão teórica e simulações de comportamento. A maior parte das

investigações concentrou-se em vigas e amostras em escala reduzida, ressaltando o foco inicial em elementos fundamentais antes de avançar para componentes mais complexos, como paredes e colunas.

Em comparação ao CLT, o CLBT apresenta vantagens notáveis em termos de resistência e rigidez à compressão e cisalhamento, devido às propriedades superiores do bambu engenheirado. O CLBT demonstrou maior resistência ao cisalhamento transversal, módulo de compressão e resistência interlaminar em várias configurações, destacando seu potencial para aplicações estruturais que demandam alto desempenho. No entanto, o CLT apresentou desempenho superior em propriedades de flexão, como rigidez à flexão e resistência à flexão em algumas orientações, evidenciando que o desempenho do CLBT pode variar de acordo com a configuração e os materiais empregados.

Portanto, o CLBT é um material promissor, com desempenho técnico competitivo em relação ao CLT, especialmente em propriedades de compressão e cisalhamento. No entanto, o campo ainda carece de estudos aprofundados em elementos estruturais de maior escala e sob condições extremas, além da necessidade de maior padronização nos processos e diretrizes específicas para sua aplicação.

A análise das metodologias experimentais revelou um enfoque na caracterização de propriedades mecânicas fundamentais, refletindo a crescente relevância do material em sistemas construtivos. Entre os testes mais realizados, destacam-se os ensaios de compressão no plano, flexão e cisalhamento, abrangendo diferentes configurações e condições de carregamento. Esses ensaios são essenciais para avaliar a resistência, rigidez e desempenho estrutural do CLBT, fornecendo dados essenciais para aplicações em escala real.

Os testes de compressão no plano são amplamente conduzidos, seguindo normas como a ASTM D198, a ASTM D143 e a GB/T 1935. Esses ensaios caracterizam a resistência à compressão e o comportamento estrutural em orientações principais e secundárias, sendo fundamentais para a validação de elementos submetidos a cargas axiais. Os ensaios de flexão foram realizados sob normas como a ASTM D198, ANSI/APA PRG 320 e NBR 7190, permitindo a avaliação do módulo de elasticidade e da resistência última. Esses testes destacam o impacto de variáveis geométricas, como espessura e número de camadas, nas propriedades flexurais do CLBT.

No campo do cisalhamento, métodos como ASTM D2344 e ASTM D905 são utilizados para avaliar a resistência das linhas de adesão e o desempenho em configurações de vigas curtas.

Esses ensaios são críticos para compreender a estabilidade das camadas de bambu e madeira sob cargas de corte.

A análise destaca a predominância de normas internacionalmente reconhecidas, como ASTM D198, ASTM D905 e ANSI/APA PRG 320, que padronizam a condução dos ensaios e promovem a comparabilidade dos resultados. No entanto, a ausência de normas específicas para o CLBT limita a adaptação de alguns métodos e a abrangência de estudos sobre condições extremas, como exposição ao fogo ou umidade.

Estudos futuros devem se concentrar na ampliação de normas específicas e na integração de novas condições de teste, fortalecendo a confiabilidade e a aplicabilidade do CLBT em sistemas estruturais modernos.

As metodologias analíticas aplicadas ao CLBT têm avançado na caracterização de suas propriedades mecânicas, térmicas e estruturais, oferecendo uma base teórica essencial para sua aplicação prática. Modelos como Wu-Wei e Richard-Abbott destacaram-se na previsão de comportamento compressivo, enquanto critérios de falha, como Hill e Tsai-Hill, foram eficazes para desempenho fora do eixo.

No âmbito das propriedades flexurais, a analogia de cisalhamento e a teoria gamma foram aplicadas para prever a rigidez à flexão aparente, demonstrando boa correlação com os resultados experimentais, especialmente quando integradas a medições de rigidez ao cisalhamento. Para elementos de flexão fora do plano, modelos baseados na elasticidade bidimensional capturaram as interações interlaminares, com deslizamento parcial entre camadas de bambu e madeira.

Os estudos sobre estabilidade de colunas CLBT utilizaram fórmulas baseadas em normas como GB 50005 e NDS, demonstrando boa precisão para prever a capacidade última de carga. Modelos teóricos adaptados, como o desenvolvido por Fan *et al.*, integraram as características anisotrópicas e a interação bambu-madeira, com erros inferiores a 8%, indicando seu potencial para aplicações práticas.

As propriedades térmicas foram analisadas pela ISO 6946, mas requerem ajustes devido à anisotropia do CLBT. Apesar dos avanços, a integração com validações experimentais mais amplas e a exploração de cenários extremos são necessárias para consolidar o CLBT como um material sustentável e eficiente para a construção civil.

As metodologias numéricas aplicadas ao estudo do CLBT têm sido fundamentais para prever seu comportamento estrutural e térmico, utilizando ferramentas como Abaqus e ANSYS. Modelos de elementos finitos elasto-plásticos e constitutivos ortotrópicos, como os critérios de

Hill e Tsai-Wu, foram empregados para simular propriedades anisotrópicas e comportamentos não lineares, com elementos específicos para camadas de bambu e madeira, parafusos e interações adesivas. Análises térmicas em estado estacionário representaram condutividades térmicas e anisotropia, com resultados alinhados a dados experimentais, apresentando erros médios inferiores a 10%. Apesar da eficácia dessas metodologias, lacunas permanecem, como o estudo da durabilidade, desempenho sob condições extremas e comportamento dinâmico, indicando a necessidade de ampliar a abrangência e diversificar variáveis de investigação.

Os processos de fabricação do CLBT revelam uma abordagem diversificada e adaptável, com diferentes adesivos e configurações para atender às exigências estruturais e normativas. Entre os tipos de produtos de bambu utilizados, destacam-se o *bamboo scrimber*, o *bamboo mat composite panel* (BMCP) e o bambu achatado (*flattened bamboo*). O bambu Mossô é a espécie predominante, escolhido por sua alta densidade e resistência mecânica. Outras espécies de bambu, como *Dendrocalamus giganteus*, também foram empregadas, dependendo das condições regionais e específicas dos estudos. As madeiras mais frequentemente utilizadas incluem *Spruce-Pine-Fir* (SPF), *hem-fir*, pinheiro-chinês (*Chinese fir*) e pinus. Essas madeiras são selecionadas com base na disponibilidade, propriedades mecânicas e compatibilidade com o bambu, garantindo a eficiência estrutural do CLBT.

Os adesivos estruturais mais empregados foram o poliuretano monocomponente (PUR), o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e a melamina-ureia-formaldeído (MUF). As taxas de aplicação variaram de 160 g/m² a 400 g/m², com tempos de prensagem que foram de 2 horas até 18 horas, dependendo do adesivo e do método de colagem. A prensagem a frio foi o método predominante, com pressões que variaram de 0.6 MPa a 1.2 MPa, assegurando a integridade das camadas e a estabilidade dimensional dos painéis.

Os painéis de CLBT analisados apresentaram uma variedade de dimensões, com comprimentos de até 7600 mm, larguras de até 2400 mm e espessuras de camadas variando de 6.5 mm a 30 mm. O número de camadas variou de 3 a 7, sendo as configurações ortogonais uma constante para garantir estabilidade e desempenho mecânico. Camadas externas de bambu e camadas internas de madeira foram as disposições mais comuns, refletindo a busca por um equilíbrio entre rigidez e flexibilidade.

A síntese dos processos de fabricação demonstra o potencial do CLBT como uma solução versátil e eficiente para a construção civil. No entanto, desafios como a otimização dos processos e padronização de métodos ainda precisam ser enfrentados para consolidar o CLBT como uma alternativa competitiva no mercado global.

As aplicações do CLBT demonstram sua versatilidade como material estrutural, sendo empregado em diferentes componentes de construções modernas. A principal característica do CLBT é sua capacidade de combinar a rigidez e resistência do bambu engenheirado com a leveza e flexibilidade da madeira, o que amplia suas possibilidades de uso em projetos estruturais diversos.

Entre as aplicações mais recorrentes, destacam-se os pisos, paredes estruturais e de cisalhamento, telhados e divisórias. O material tem sido amplamente sugerido para elementos de carga, como vigas e colunas, devido à sua alta capacidade de compressão e cisalhamento. A disposição ortogonal das camadas confere ao CLBT excelente desempenho bidimensional, essencial para elementos que necessitam de resistência tanto no plano quanto fora do plano.

Os estudos também destacaram o CLBT como alternativa superior ao CLT em situações que exigem maior resistência ao cisalhamento transversal e ao módulo de flexão, tornando-o adequado para aplicações em pisos estruturais e telhados submetidos a cargas elevadas. Além disso, seu desempenho térmico, analisado por Shan *et al.* (2023b), reforça seu potencial como substituto em condições climáticas variadas, especialmente em sistemas de isolamento térmico.

Painéis reforçados com cavilhas de aço demonstraram excelente desempenho em cargas fora do plano, indicando o CLBT como uma solução eficaz para vigas e painéis submetidos a altas tensões. Essa característica expande seu uso em projetos de médio e grande porte, incluindo edifícios de múltiplos pavimentos.

A sustentabilidade do CLBT, aliada à sua alta resistência e rigidez, posiciona o material como uma escolha promissora para a construção civil contemporânea. No entanto, a expansão de suas aplicações requer maior padronização e validação de desempenho em condições extremas e de longo prazo. A continuidade de pesquisas sobre durabilidade, desempenho dinâmico e otimização de processos produtivos é essencial para consolidar o CLBT como uma solução estrutural sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- AICHER, Simon; CHRISTIAN, Zachary; HIRSCH, Maren. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. **Holzforschung**, [s. l.], v. 70, n. 8, p. 773–781, 2016.
- AKINLABI, Esther Titilayo; ANANE-FENIN, Kwame; AKWADA, Damenortey Richard. **Bamboo: The Multipurpose Plant**. Switzerland: Springer, 2017. *E-book*. DOI: 10.1007/978-3-319-56808-9.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024a. altPlus Company. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/altplus-company>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024b. altPlus Projects. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/altplusprojects>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024c. Home. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024d. altPlus EB. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/altpluseb>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024e. Introducing the Versatile Engineered Bamboo Material from altPlus Technologies!. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/post/introducing-the-versatile-engineered-bamboo-material-from-altplus-technologies>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024f. Building Technologies: Performance Systems. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/building-technologies>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024g. Engineered Bamboo: Always The New Darling of Construction Materials - Could 24' be the Year?. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/post/engineered-bamboo-always-the-new-darling-of-construction-materials-could-24-be-the-year>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024h. “Breathing Life into Sustainability”: The Ya'an Amphitheater Designed with Engineered Bamboo. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/post/breathing-life-into-sustainability-the-ya-an-amphitheater-designed-with-engineered-bamboo>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024i. A resort in a cozy mountain town uses local bamboo materials to build a vision of a sustainable future. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/projects-sdq-resort>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024j. Partnering for the Ideal Home of the Future with altPlus Engineered Bamboo. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/y-project>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALTPLUS. **altPlus**, 2024k. altPlus: Developing Prefabricated Bamboo-Timber Modular Cabins. Disponível em: <https://www.altplus.xyz/post/altplus-developing-bamboo-timber-composite-modular-prefabricated-cabins>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- AMEDE, Ermias A. *et al.* A Review of Codes and Standards for Bamboo Structural Design. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2021, 2021.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/APA PRG 320: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Tacoma: APA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM D5456**: Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM D143**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM D198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM D1037**: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2020.

ANOS BAMBOO. **Anos@**, 2024a. About us. Disponível em: <https://anos-bamboo.com/about/>. Acesso em: 18 set. 2024.

ANOS BAMBOO. **Anos@**, 2024b. Bamboo Beams. Disponível em: <https://anos-bamboo.com/product-category/bamboo-beams/>. Acesso em: 18 set. 2024.

ANOS BAMBOO. **Anos@**, 2024c. Laminated Bamboo Timber Solid Engineered Bamboo Jacking Beams. Disponível em: <https://anos-bamboo.com/product/bamboo-timber/>. Acesso em: 18 set. 2024.

ANOS BAMBOO. **Anos@**, 2024d. Bamboo Post Light Brown Durable Strand Woven Bamboo Block. Disponível em: <https://anos-bamboo.com/product/bamboo-post/>. Acesso em: 18 set. 2024.

ANWAR-US-SAADAT, Mohammad *et al.* Comparative Study on Various Strength Parameters of Structural Elements Made from Cross-Laminated Timber. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 1575–1606, 2022.

ARCHDAILY. **Archdaily**, 18 fev. 2023. Materials Innovations: What is Structural Engineered Bamboo (SEB)?. Disponível em: <https://www.archdaily.com/991835/materials-innovations-what-is-structural-engineered-bamboo-seb>. Acesso em: 16 jun. 2024.

ARCHDAILY. **Archdaily**, 4 maio, 2021. 北京蓆庆胡同37号“葫芦院” / URBANUS 都市实践 (Quad of Gourd - No.37 Luanqing Hutong / URBANUS). Disponível em: <https://www.archdaily.cn/cn/961028/bei-jing-luan-qing-hu-tong-37hao-hu-lu-yuan-urbanusdu-shi-shi-jian>. Acesso em: 26 jul. 2024.

ARCHILA, H.F. *et al.* Elastic response of cross-laminated engineered bamboo panels subjected to in-plane loading. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, [s. l.], v. 172, n. 6, p. 284–295, 2017.

ARCHILA, H.F. *et al.* Evaluation of the mechanical properties of cross laminated bamboo panels by digital image correlation and finite element modelling. *In:* , 2014. **WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings**. [S. l.: s. n.], 2014.

ARCHILA, Hector F.; ZEA-ESCAMILLA, Edwin; HARRIES, Kent. Structural Analysis of Cross-Laminated Guadua-Bamboo (G-XLam) Panels Using Design Methods for CLT. *In:* AMZIANE, Sofiane; MERTA, Ildiko; PAGE, Jonathan (org.). **Bio-Based Building Materials: Proceedings of ICBBM 2023**. Switzerland: Springer Science and Business Media B.V., 2023. v. 45, p. 937–945.

ARCH POSITION. **Arch Position**, 30 abr., 2021. 葫芦院：北京蓑庆胡同37号院 / URBANUS都市实践 (Hulu Courtyard: Quad of Gourd - No.37 Luanqing Hutong / URBANUS). Disponível em: <https://www.archiposition.com/items/20210430032929>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ASIA BAMBOO. **Asia Bamboo**, 2024a. About us. Disponível em: <https://www.acbambooflooring.com/aboutus.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ASIA BAMBOO. **Asia Bamboo**, 2024b. Bamboo Lumber. Disponível em: <https://www.acbambooflooring.com/Bamboo-Lumber-pl3569749.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ASIA BAMBOO. **Asia Bamboo**, 2024c. Bamboo Lumber. Disponível em: <https://www.acbambooflooring.com/bamboo-lumber.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ASSENT. **Assent**, 2024. What Is CE Certification?. Disponível em: <https://www.assent.com/resources/knowledge-article/what-is-ce-certification/>. Acesso em: 06 set. 2024.

BABBIE, Earl. **Métodos de pesquisas de survey**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003.

BAHRIN, N A *et al.* Mechanical Characterization of Bamboo Pole for Building Engineering : A Review. [s. l.], v. 18, 2023.

BAIDU. **Baidu**, 2024. 重组竹 (Bambu reconstruído). Disponível em: <https://baike.baidu.com/item/%E9%87%8D%E7%BB%84%E7%AB%B9/2300658>. Acesso em: 02 maio 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024a. 关于我们 (Sobre nós). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/aboutus/>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024b. 网站首页 (Página Inicial do Site). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024c. 竹钢®的诞生 (O nascimento do Bamboo Steel®). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/cpgg/>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024d. 竹钢景观：让更多异形结构设计得以实现 (Paisagem de bambu e aço: permitindo a realização de projetos estruturais com formatos mais especiais). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/yyxw/138.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024e. 一根竹子变成“钢”需要经过哪些步骤呢? (Que passos são necessários para transformar um pedaço de bambu em “aço”?). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/questio/163.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024f. 建筑结构 (Estrutura do edifício). 2024f. Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/108.html>. Acesso em: 05 jun. 2024f.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024g. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/218.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024h. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/223.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024i. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/220.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024j. 经典案例 (Caso Clássico). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/case/304.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024k. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/168.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024l. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/zpsjzl/282.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024m. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/225.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024n. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/221.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024o. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/219.html>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024p. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/110.html>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024q. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jgl/212.html>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024r. 建筑结构 (Estrutura do edifício). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/jg/250.html>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BAMBOO ERA. **Bamboo Era**, 2024s. 装配式建筑 (Edifícios pré-fabricados). Disponível em: <http://zhuyuankeji.cn/zpsjzl/97.html>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BAMBOO INTERNATIONAL. **Bamboo International**, 2024a. About us. Disponível em: <https://bambooint.com/about-us/>. Acesso em: 21 ago. 2024.

BAMBOO INTERNATIONAL. **Bamboo International**, 2024b. SPECIAL ELEMENT: Structural Bamboo. Disponível em: <https://bambooint.com/products-and-materials/product-materials-special-elements/structural-bamboo/>. Acesso em: 21 ago. 2024.

BAMBOO INTERNATIONAL. **Bamboo International**, 2024c. THE BAMBOO: Certifications. Disponível em: <https://bambooint.com/the-bamboo/certifications/>, Acesso em: 21 ago. 2024.

BAMBUFY. **Bambufy**, 2024a. About us. Disponível em: <https://bambufy.com/about-us/>. Acesso em: 07 set. 2024.

BAMBUFY. **Bambufy**, 2024b. Home page. Disponível em: <https://bambufy.com/>. Acesso em: 07 set. 2024.

BAMBUFY. **Bambufy**, 2024c. Structural. Disponível em: <https://bambufy.com/structural/>. Acesso em: 07 set. 2024.

BARRETO, Maria I M *et al.* Structural Performance Analysis of Cross-Laminated Timber-Bamboo (CLTB). [s. l.], v. 14, p. 5045–5058, 2019.

BEAM. **BEAM**, 2024. About us. Disponível em: <https://www.beamsociety.org.hk/en/About-Us/About-BEAM-Society-Limited>. Acesso em: 06 set. 2024.

BENAVIDES, Andrea Salomé Jaramillo. **Proposta de Sistema Construtivo para Habitação de Interesse Social com Bambu Guadua**: Um Estudo de Caso no Equador. 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/99326>. Acesso em: 8 mai. 2023.

BONILLA, Silvia H. *et al.* Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labour, time and space. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 83–91, 2010.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 74, n. 3, p. 331–351, 2016.

BRANDNER, Reinhard *et al.* Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 147, p. 312–327, 2017.

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 171, p. 944–960, 2018.

BRANDNER, Reinhard; SCHICKHOFER, G. Properties of Cross Laminated Timber (CLT) in Compression Perpendicular to Grain. In: , 2014. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270574651>.

BRASIL. Lei Nº 12.484, de 8 de setembro de 2011. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 373**: Methods of testing small clear specimens of timber. London: BSI, 1957.

BREEAM. **BREEAM**, 2024. About BREEAM. Disponível em: <https://breeam.com/>. Acesso em: 06 set. 2024.

BWG. **BWG**, 2024a. Introduction. Disponível em: <https://bwg.vn/en/introduction.html>. Acesso em: 21 maio. 2024.

BWG. **BWG**, 2024b. Company resources. Disponível em: <https://bwg.vn/en/company-resources.html>. Acesso em: 21 maio. 2024.

BWG. **BWG**, 2024c. Home. Disponível em: <https://bwg.vn/>. Acesso em: 21 maio. 2024.

BWG. **BWG**, 2024d. Bamboo Beams Lumber – Vietnam. Disponível em: <https://bwg.vn/en/bamboo-beams-lumber-vietnam-p14.html>. Acesso em: 21 maio. 2024.

BWG. **BWG**, 2024e. Bamboo Lumber - Strand Woven – Vietnam. Disponível em: <https://bwg.vn/en/bamboo-lumber-strand-woven-vietnam-p15.html>. Acesso em: 21 maio. 2024.

CAI, Xiongfeng *et al.* A novel braided bamboo composite material with balanced strength and good energy absorption capacity inspired by bamboo. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 421, n. February, 2024.

CANDELA, G. *et al.* Image-based 3d reconstruction of a *glulam*-steel spatial truss structure using mini-uav. **Modern Engineered Bamboo Structures - Proceedings of the Sustainable Bamboo Building Materials Symposium of BARC 2018 and 3rd International Conference on Modern Bamboo Structures, ICBS 2018**, [s. l.], n. January 2020, p. 217–222, 2020.

CHEN, Yue *et al.* Experimental evaluation of the dowel-bearing strength of laminated flattened-bamboo lumber perpendicular to grain. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 350, 2022.

CHEN, G. *et al.* Experiments on laminated bamboo lumber nailed connections. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 269, 2021.

CHEN, Fuming *et al.* Impact properties of bamboo bundle laminated veneer lumber by preprocessing densification technology. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 421–427, 2014.

CHEN, Guo *et al.* Mechanical behavior of laminated bamboo lumber for structural application: an experimental investigation. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 78, n. 1, p. 53–63, 2020.

CHEN, Lin *et al.* Properties and bonding interface characteristics of an innovative bamboo flattening and grooving unit (BFGU) for laminated bamboo lumber. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 676, n. July, 2023.

CHEN, Fuming *et al.* The bending properties of bamboo bundle laminated veneer lumber (BLVL) double beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 119, p. 145–151, 2016.

CHERRY, Rebecca *et al.* Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 858–868, 2019.

CHINIFORUSH, A. A. *et al.* Dimensional stability and moisture-induced strains in spruce cross-laminated timber (CLT) under sorption/desorption isotherms. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 356, n. October, 2022.

CONBOY, Kieran. Agility from first principles: Reconstructing the concept of agility in information systems development. **Information Systems Research**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 329–354, 2009.

CONFEDERATION OF TIMBER INDUSTRIES. **The CLT Handbook: CLT structures – design and detailing**. United Kingdom: Swedish Wood, 2022.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; DA SILVA, Sérgio Luis. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: , 2011, Porto Alegre. **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Porto Alegre: [s. n.], 2011. p. 1–12.

CORREAL, Francisco F. Bamboo design and construction. In: HARRIES, Kent A.; SHARMA, Bhavna (org.). **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020. p. 521–559.

CORREAL, Juan F. *et al.* Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua angustifolia Kunth. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 73, p. 105–112, 2014.

CORREAL, J F; RAMIREZ, F. Adhesive bond performance in glue line shear and bending for glued laminated guadua bamboo. **Journal of Tropical Forest Science**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 433–439, 2010.

DA SILVA, Alessandro José *et al.* Método de pesquisa survey-estudo do método e aplicações na engenharia de produção. In: , 2019. **XIV WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO PAULA SOUZA**. [S. l.: s. n.], 2019.

DASSO. **Dasso**, 2024a. Introduction. Disponível em: <https://www.dassogroup.com/about/introduction.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024b. Product. Disponível em: <https://www.dassogroup.com/product.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024c. 大连古莲湿地公园 (Dalian Gulian Wetland Park). Disponível em: <https://www.dassochina.com/productinfo/2413084.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024d. Jiangxi Bamboo SCI-TECH Museum, China. Disponível em: <https://www.dassogroup.com/project/show-165.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024e. 资溪竹博馆 (Jiangxi Bamboo SCI-TECH Museum). Disponível em: <https://www.dassochina.com/productinfo/3086604.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024f. 结构竹材 (Bambu estrutural). Disponível em: <https://www.dassochina.com/jgzc>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024g. 黄冈弘化禅寺 (Templo Zen Huanggang Honghua). Disponível em: <https://www.dassochina.com/productinfo/2413065.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

DASSO. **Dasso**, 2024h. Qualification. Disponível em: <https://dassogroup.com/about/qualification.html>. Acesso em: 04 set. 2024.

Dasso Group. **Have you ever wondered how to utilise bamboo in modern architecture?**. Hangzhou, 29 nov., 2024a. LinkedIn: dasso Group. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/dasso-group_sustainableconstruction-bambooinnovation-activity-7217814457513652224-1VJX/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop. Acesso em: 29 nov. 2024.

Dasso Group. **Why dasso's Bamboo Structure?**. Hangzhou, 22 dez., 2024b. LinkedIn: dasso Group. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/dasso-group_dassogroup-architecture-sustainability-activity-7275466146965811201-cjV3/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop. Acesso em: 22 dez. 2024.

DAULETBEEK, Assima *et al.* A review of mechanical behavior of structural laminated bamboo lumber. **Sustainable Structures**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2021.

DAULETBEEK, Assima; LI, Haitao; LORENZO, Rodolfo. A review on mechanical behavior of laminated bamboo lumber connections. **Composite Structures**, [s. l.], v. 313,

2023.

DE ARAUJO, Victor Almeida. **Casas de madeira e o potencial de produção no Brasil**. 2017. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

DE ARAUJO, Victor Almeida *et al.* Caracterização Dos Pólos Comerciais De Casas De Madeira No Brasil. **Mercator**, [s. l.], v. 20, 2021.

DE ARAUJO, Victor *et al.* Is Cross-Laminated Timber (CLT) a Wood Panel, a Building, or a Construction System? A Systematic Review on Its Functions, Characteristics, Performances, and Applications. **Forests**, [s. l.], v. 14, n. 264, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/forests>.

DE ARAUJO, Victor *et al.* Is the Timber Construction Sector Prepared for E-Commerce via Instagram®? A Perspective from Brazil. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 8683, 2022.

DE ARAUJO, Victor *et al.* Wood consumption and fixations of carbon dioxide and carbon from timber housing techniques: A Brazilian panorama. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 216, 2020.

DE ARAUJO, Victor; CHRISTOFORO, André. The Global Cross-Laminated Timber (CLT) Industry: A Systematic Review and a Sectoral Survey of Its Main Developers. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 10, 2023.

DESALEGN, Getachew; TADESSE, Wubalem. Resource potential of bamboo, challenges and future directions towards sustainable management and utilization in Ethiopia. **Forest Systems**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 294, 2014.

DI, Jing; ZUO, Hongliang. Lateral loading performance of end narrow panel reinforced light wood frame shear walls. **International Journal of Structural Integrity**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 729–742, 2021.

DING, H.; LV, Q. F. Experimental study on bending behavior of CLB panels. In: , 2020. **The Third International Conference on Modern Bamboo Structures** . [S. l.: s. n.], 2020.

DONG, Xuan *et al.* Experimental study of partially encased *bamboo scrimber* columns under axial compression. **Wood Material Science and Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 644–659, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2286457>.

DONGSHENG, Huang; AIPING, Zhou; YULING, Bian. Experimental and analytical study on the nonlinear bending of parallel strand bamboo beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 44, p. 585–592, 2013.

DU, Chun Gui; SONG, Jian Gang; CHEN, Yong Xing. The effect of applying methods of fire retardant on physical and mechanical properties of *bamboo scrimber*. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 1048, p. 465–468, 2014.

ESCAMILLA, Edwin Zea *et al.* Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 9, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 384**: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels: CEN, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408**: Timber structures: Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. Brussels: CEN, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 16351**: Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. Brussels: CEN, 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 14081-1**: Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. Brussels: CEN, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 301**: Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements. Brussels: CEN, 2006.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024a. Home. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024b. About us. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/factory/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024c. Bamboo Lumbers & Dowels. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/product-categories/bamboo-lumbers-and-dowels/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024d. Large Size Solid Bamboo Beams. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/product/large-size-solid-bamboo-beams/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024e. Structural Bamboo Beams And Columns. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/product/structural-bamboo-beams-and-columns/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

EXTERIOR BAMBOO. **Exterior Bamboo**, 2024f. Structure Laminated Bamboo Beams. Disponível em: <https://www.exteriorbamboo.com/product/structure-laminated-bamboo-beams/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

FAHIM, Muhammad *et al.* Bamboo as a Construction Material: Prospects and Challenges. **Advances in Science and Technology Research Journal**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 165–175, 2022.

FAN, Yunlei *et al.* Experimental study of cross-laminated bamboo and timber columns under axial compression. **China Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 68–76, 2021.

FEIYU BAMBOO. **Feiyu Bamboo**, 2024a. 飞宇竹材 (About us). Disponível em: <https://www.feiyuc.com/about-us>. Acesso em: 05 jun. 2024.

FEIYU BAMBOO. **Feiyu Bamboo**, 2024b. 竹结构材 (Material estrutural de bambu). Disponível em: <https://www.feiyuc.com/product-center>. Acesso em: 05 jun. 2024.

FLAIG, Marcus; BLASS, H. J. Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane. In: , 2013. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/346942816>.

FSC. **Forest Stewardship Council**, 2024. Tipos de Certificação. Disponível em: <https://br.fsc.org/br-pt/certificacao/tipos-de-certificacao>. Acesso em: 06 set. 2024.

GAO, W. C.; XIAO, Y. Seismic behavior of cold-formed steel frame shear walls sheathed with ply-bamboo panels. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 132, p. 217–229, 2017.

GATÓO, A. *et al.* Sustainable structures: Bamboo standards and building codes. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability**, [s. l.], v. 167, n. ES5, p. 189–196, 2014.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 4074-1**: Strength grading of wood - Part 1: Coniferous sawn timber. Berlin, Germany: DIN, 2012.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 16351**: Timber structures - Cross laminated timber – Requirements. Berlin, Germany: DIN, 2021.

GHAVAMI, Khosrow. Introduction to nonconventional materials and an historic retrospective of the field. In: HARRIES, Kent A.; SHARMA, Bhavna (org.). **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020. p. 37–61.

GONG, Yingchun *et al.* Behaviour of hybrid cross laminated timber in compression perpendicular to grain in different layup structure, support conditions, and loading configurations. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 200, 2023.

GREEZU. **Greezu**, 2024a. About us. Disponível em: <https://www.GREEZU.cn/cms/en/about.html>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024b. Why us. Disponível em: <https://www.GREEZU.com/why-us/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024c. Bamboo beam and structure. Disponível em: <https://www.GREEZU.com/product/bamboo-beam-and-structure/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024d. Bamboo Beams: Sustainable and Multipurpose. Disponível em: <https://www.GREEZU.com/1051-2/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024e. Bamboo House (Saudi Arabia). Disponível em: <https://www.GREEZU.cn/cms/en/casesd.html?id=25>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024f. Nanjing Hongli Lane. Disponível em: <https://www.GREEZU.cn/cms/en/casesd.html?id=68>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Greezu**, 2024g. Green Travel, Start with Bamboo Bus Shelters. Disponível em: <https://www.GREEZU.com/green-travel-start-with-bamboo-bus-shelters/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZUbamboo_official. **Bamboo laminated beams for building!**. Ganzhou, 29 nov., 2024. LinkedIn: GREEZUbamboo_official. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/GREEZUbamboo-official_laminatedbamboo-bamboobeams-bamboopost-activity-7265286726615449601-5oAP?utm_source=share&utm_medium=member_desktop. Acesso em: 30 nov. 2024.

GREEZU. **Fotos do usuário GREEZU**. Ganzhou, 10 nov., 2023a. Facebook: GREEZU. Disponível em: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=786477116825294&set=pb.100063890380518.-2207520000&type=3&locale=pl_PL. Acesso em: 12 jul. 2024.

GREEZU. **Fotos do usuário GREEZU**. Ganzhou, 10 nov., 2023b. Facebook: GREEZU. Disponível em: https://www.facebook.com/photo/?fbid=786477066825299&set=pb.100063890380518.-2207520000&locale=pl_PL. Acesso em: 12 jul. 2024.

GUADUA BAMBOO. **Guadua Bamboo**, 2024a. About Guadua Bamboo. Disponível em: <https://www.guaduabamboo.com/about-guadua-bamboo>. Acesso em: 04 jun. 2024.

GUADUA BAMBOO. **Guadua Bamboo**, 2024b Crushed bamboo. Disponível em: <https://www.guaduabamboo.com/crushed-bamboo>. Acesso em: 04 jun. 2024.

GUAN, M. *et al.* Alkali- and glutaraldehyde-modified pig blood as renewable adhesives for engineered bamboo products. **Journal of Adhesion Science and Technology**, [s. l.], v. 35, n. 8, p. 791–806, 2021.

GUAN, Shanyue *et al.* Static and dynamic mechanical behaviors of *bamboo scrimber* under combined tension-bending. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 242, n. July, 2023.

HAN, Tongchen *et al.* Design and numerical analysis of Cross-Laminated bamboo (CLB) buildings with different rocking wall configurations. **Structures**, [s. l.], v. 56, 2023.

HAND, D. J. Sampling. In: ADÈR, H. J.; MELLENBERGH, G. J. **Advising on research methods: a consultant's companion**. Huizen: Johannes van Kessel, 2008. p. 183-210.

HAYES, Benjamin N.; KOLIOU, Maria; VAN DE LINDT, John W. Seismic Behavior of Balloon Frame Cross-Laminated Timber Connections. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 149, n. 9, 2023.

HE, Minjuan *et al.* Bending, shear, and compressive properties of three- and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 66, n. 1, 2020.

HE, Sheng *et al.* Effect of bamboo bundle knitting on enhancing properties of *bamboo scrimber*. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 1071–1078, 2018.

HE, Minjuan *et al.* Experimental investigations on mechanical properties and column buckling behavior of structural bamboo. **Structural Design of Tall and Special Buildings**, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 491–503, 2015.

HE, Minjuan; SUN, Xiaofeng; LI, Zheng. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 185, p. 175–183, 2018.

HEMATABADI, Hojat *et al.* Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 265, 2020.

HONG, Chaokun *et al.* Axial compressive behavior of laminated bamboo lumber columns with a chamfered section. **Structures**, [s. l.], v. 33, p. 678–692, 2021.

HONG, Chaokun *et al.* Review of connections for engineered bamboo structures. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 30, 2020.

HU, Y. A. *et al.* Influence of dyeing treatment on the performance of bamboo-based

fibre composites. **Journal of Tropical Forest Science**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 112–120, 2016.

HU, Y. *et al.* Manufacturing and Characterization of Wide-Bundle *Bamboo scrimber*: A Comparison with Other Engineered Bamboo Composites. **Materials**, [s. l.], v. 15, n. 21, 2022.

HUANG, Dongsheng *et al.* Experimental study on stress-strain relationships and failure mechanisms of parallel strand bamboo made from phyllostachys. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 77, p. 130–138, 2015.

HUANG, Yuxiang; JI, Yaohui; YU, Wenji. Development of *bamboo scrimber*: a literature review. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 65, n. 25, 2019.

IDO, Hirofumi *et al.* Effects of the width and lay-up of sugi cross-laminated timber (CLT) on its dynamic and static elastic moduli, and tensile strength. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 101–108, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Efficiency 2022. IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. Acesso em: 20 mai. 2023.

INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. **Bamboo and Rattan Update**. v. 2, n. 4, 2021b. Disponível em: https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2022/01/BRU_V2I4_INBAR_Building-Future-With-Bamboo.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. **Bamboo: A strategic resource for countries to reduce the effects of climate change**. China: INBAR, 2014. Disponível em: https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/policy-synthesis-report-1-bamboo-a-strategic-resource-for-countries-to-reduce-the-effects-of-climate-change/. Acesso em: 20 mai. 2023.

INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. **Trade overview 2019: bamboo and rattan commodities in the international market**. 2021a. Disponível em: https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2021/11/Trade-Overview-2019_INBAR-1.pdf. Acesso em: 10 mai. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22156**: Bamboo structures – Bamboo culms – Structural design. Geneva, Switzerland: ISO, 2021a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22157-1**: Bamboo – Determination of Physical and Mechanical Properties – Part 1: Requirements. Geneva, Switzerland: ISO, 2004b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22157-2**: Bamboo – Determination of Physical and Mechanical Properties – part 2: laboratory manual. Geneva, Switzerland: ISO, 2004c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 23478**: Bamboo structures – Engineered bamboo products – Test methods for determination of physical and mechanical properties. Geneva, Switzerland: ISO, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5257**: Bamboo structures – Engineered bamboo products – Test methods for determination of mechanical properties using small size specimens. Geneva, Switzerland: ISO, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7567:** Bamboo structures — Glued laminated bamboo — Product specifications. Geneva, Switzerland: ISO, 2024.

JANSSEN, J. A. J. **Designing and building with bamboo**. Beijing: INBAR, 2000. Disponível em: https://humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/INBAR_technical_report_no20.pdf. Acesso em: 14 jun. 2023.

JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD. **JAS 3079:** Cross Laminated Timber. Tokyo, Japan: JAS, 2019.

JELEČ, Mario; VAREVAC, Damir; RAJČIĆ, Vlatka. Cross-laminated timber (CLT) –a state of the art report. **Građevinar**, [s. l.], v. 70, n. 2, p. 75–95, 2018.

JIANG, Z.-H. *et al.* Manufacture technology of the bamboo building wall. **Journal of Beijing Forestry University**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 155–158, 2006.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024a. Green Bamboo. See-Bamboo. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024b. Contact us. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page6>. Acesso em: 26 nov. 2024b.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024c. Creative Structure. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page149>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024d. Indoor Case. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page172>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU. GREEN. **Jianzhu Green**, 2024e. Creative Structure. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page91>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024f. Creative Structure. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page174>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024g. Creative Structure. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page157>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIANZHU GREEN. **Jianzhu Green**, 2024h. Creative Structure. Disponível em: <http://www.jianzhugreen.com/page160>. Acesso em: 02 set. 2024.

KANG, Shao Bo *et al.* Cyclic behaviour of exterior *bamboo scrimber* beam-to-column connections. **Structures**, [s. l.], v. 62, n. February, 2024.

KARACABEYLI, Erol; DOUGLAS, Brad. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. US: FPInnovations, 2013.

KARACABEYLI, Erol; GAGNON, Sylvain. Introduction to cross-laminated timber. In: KARACABEYLI, Erol; GAGNON, Sylvain. **Canadian CLT Handbook 2019 Edition**. Canada: FPInnovations, 2019.

KASUNIC, Mark. **Designing na Effective Survey**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2005.

KEWEI, Liu *et al.* Create an Enabling Environment for Bamboo Construction Sector in Africa, Asia and Latin America. In: , 2022. **International Conference on Non-conventional Materials and Technologies**. [S. l.: s. n.], 2022.

- KUMAR, A. *et al.* Engineered *bamboo scrimber*: Influence of density on the mechanical and water absorption properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 127, p. 815–827, 2016.
- KUMAR, Deepak; MANDAL, Apurba. Review on manufacturing and fundamental aspects of laminated bamboo products for structural applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 348, 2022.
- LADAPO, H. L.; OYEGOKE, O. O.; BELLO, R. O. Utilization of vast nigeria's bamboo resources for economic growth: a review. **Journal of Research in Forestry, Wildlife & Environment**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2017. Disponível em: <http://www.ajol.info/index.php/jrfwe>.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2024a. About us. Disponível em: <https://www.lamboo.us/about>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2024b. Services. Disponível em: <https://www.lamboo.us/services>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2024c. Lamboo Stuctural Grade Product Systems: Architectural Engineered Bamboo Solutions. Disponível em: <https://www.lamboo.us/structure>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2024d. Frequently Asked Questions. Disponível em: <https://www.lamboo.us/faq>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2024e. Donner/Miller Residence. Disponível em: <https://www.lamboo.us/donnermillercasestudy>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAMBOO. **Lamboo**, 2021. New Lamboo® Structure™ Project. 2021. Disponível em: <https://www.lamboo.us/post/new-lamboo-structure-project>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- LAME, Guillaume. Systematic literature reviews: An introduction. *In:* , 2019, Delft. **Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED19)**. Delft: Cambridge University Press, 2019. p. 1633–1642.
- LI, Yanjun *et al.* A dry-wet process to manufacture sliced bamboo veneer. **Forest Products Journal**, [s. l.], v. 62, n. 5, p. 395–399, 2012.
- LI, Hao *et al.* An experimental and modeling study on apparent bending moduli of cross-laminated bamboo and timber (CLBT) in orthogonal strength directions. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, n. July 2021, p. e00874, 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00874>.
- LI, Z. *et al.* Bending performance of *glulam* beams made with different processes. **Advances in Structural Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 535–546, 2018.
- LI, Hao *et al.* Characterizing engineering performance of bamboo-wood composite cross-laminated timber made from bamboo mat-curtain panel and *hem-fir* lumber. **Composite Structures**, [s. l.], v. 266, n. February, 2021.
- LI, T. Y. *et al.* Experimental investigation and evaluation of metal-plate-connected laminated bamboo lumber joints. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 411, n. August 2023, 2024.
- LI, Zhi *et al.* Experimental study of an unsymmetrical prefabricated hybrid steel-bamboo roof truss. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 201, n. April, 2019.

- LI, Hai-Tao *et al.* Flexural Performance of Laminated Bamboo Lumber Beams. **BioResources**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 929–943, 2016a.
- LI, Hao *et al.* In-plane compressive behavior of cross-laminated bamboo and timber with variable heights. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], v. 204, n. July, 2024a.
- LI, Hao *et al.* In-plane compressive behavior of short cross-laminated bamboo and timber. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 200, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116807>.
- LI, Haitao *et al.* Length and orientation direction effect on static bending properties of laminated Moso bamboo. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 547–557, 2019.
- LI, Haitao *et al.* Mechanical properties and stress strain relationship models for *bamboo scrimber*. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 13–27, 2020.
- LI, Hai Tao *et al.* Mechanical properties of laminated bamboo lumber column under radial eccentric compression. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 121, p. 644–652, 2016b.
- LI, Hao *et al.* Off-axis compressive behavior of cross-laminated bamboo and timber wall elements. **Structures**, [s. l.], v. 35, n. June 2021, p. 452–468, 2022b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.009>.
- LI, Hao *et al.* Out-of-plane bending and shear behavior of cross-laminated bamboo and timber under four-point loading with variable spans. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 323, n. April 2024, 2025.
- LI, Hao *et al.* Out-of-plane characteristics of cross-laminated bamboo and timber beams under variable span three-point loading. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 411, n. December 2023, 2024b.
- LI, Z. *et al.* Shear properties of composite cross-laminated bamboo panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 80, n. 3, p. 635–646, 2022.
- LI, Hao *et al.* Structural behavior of steel dowel-reinforced cross-laminated bamboo and timber beams. **Composite Structures**, [s. l.], v. 318, 2023b.
- LI, Hao *et al.* Study on in-plane compressive performance of cross-laminated bamboo and timber (CLBT) wall elements. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 81, n. 2, p. 343–355, 2023c.
- LI, Xiazhen *et al.* The physical, mechanical and fire performance of *bamboo scrimber* processed with thermal-treated bamboo bundles. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 205, n. 498, 2023.
- LI, Haitao *et al.* Ultimate bending capacity evaluation of laminated bamboo lumber beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 160, p. 365–375, 2018.
- LI, Jiqing; YUAN, Yuan; GUAN, Xin. Assessing the Environmental Impacts of Glued Laminated Bamboo Based on a Life Cycle Assessment. **BioResources**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1941–1950, 2016.
- LIESE, Walter. **The anatomy of bamboo culms**. China: INBAR, 1998.

LIESE, Walter; TANG, Thi Kim Hong. Properties of the Bamboo Culm. *In*: LIESE, Walter; KÖHL, Michael (org). **Bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer, 2015. p. 227-256.

LIESE, Walter; WELLING, J.; TANG, Thi Kim Hong. Utilization of bamboo. *In*: LIESE, Walter; KÖHL, Michael (org). **Bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer, 2015. p. 299–346.

LIN, Qiuqin *et al.* Mechanism analysis of thermal treatment for the mechanical properties of bamboo veneer composites from the perspective of cellulose skeleton. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 195, n. December 2022, 2023.

LIU, K. W. *et al.* An overview of global modern bamboo construction industry: A summary report of ICBS2018. *In*: XIAO, Y.; LI, Z.; LIU, K.W. (org.). **Modern Engineered Bamboo Structures**. London: Taylor & Francis Group, 2020. p. 33–49. Disponível em: l.

LIU, X. *et al.* Nomenclature for engineered bamboo. **BioResources**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1141–1161, 2016.

LÓPEZ-HIDALGO, O. **Bamboo: The gift of the gods**. Bogotá: Bamboscar, 2003.

LU, Yujie; LIU, Ye; LV, Qingfang. A partially restrained energy dissipater : Parametric analysis and application in rocking wall. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 192, n. August 2021, p. 107235, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107235>.

LU, Yujie; LV, Qingfang; LIU, Ye. Experimental and numerical study on seismic performance of CLB rocking wall with bending-friction coupled dampers. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 45, n. October 2021, p. 103622, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103622>.

LÜ, Qingfang; WANG, Weiyang; LIU, Ye. Experimental study on mechanical properties of cross-laminated bamboo slabs after one-sided fire. **Journal of Southeast University**, [s. l.], v. 51, n. 2, p. 212–218, 2021.

LUAN, Yu *et al.* A novel bamboo engineering material with uniform density, high strength, and high utilization rate. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 184, 2022.

LV, Qingfang *et al.* An experimental and analytical study on cross-laminated bamboo rocking walls with friction dampers. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 1757–1779, 2021.

LV, Qingfang; HAN, Tongchen; LIU, Ye. Models and design procedure for cross-laminated bamboo rocking walls. **Structures**, [s. l.], v. 38, n. February, p. 1031–1049, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.045>.

LV, Qingfang; WANG, Weiyang; LIU, Ye. Charring depth and charring rate of cross-laminated bamboo slabs exposed to a one-sided standard fire. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 125, n. June, p. 103439, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103439>.

LV, Qingfang; WANG, Weiyang; LIU, Ye. Flexural Performance of Cross-Laminated Bamboo (CLB) Slabs and CFRP Grid Composite CLB Slabs. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], p. 17, 2019b.

LV, Qingfang; WANG, Weiyang; LIU, Ye. Study on Thermal Insulation Performance of Cross-Laminated Bamboo Wall. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 7, n. 11, p. 1231–1250, 2019a.

MA, K.; XIAO, Y. General parametric design of a steel-*glulam* hybrid space truss. **Modern Engineered Bamboo Structures - Proceedings of the Sustainable Bamboo Building Materials Symposium of BARC 2018 and 3rd International Conference on Modern Bamboo Structures, ICBS 2018**, [s. l.], p. 223–229, 2020.

MACDONALD, Stuart; HEADLAM, Nicola. **Research methods handbook : introductory guide to research methods for social research**. Manchester: Centre for Local Economic Strategies, 2008.

MAHDAVI, M *et al.* Development of Laminated Bamboo Lumber: Review of Processing, Performance, and Economical Considerations. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, p. 1036–1042, 2011.

MARÇAL, Vitor Hugo Silva. **Análise Comparativa de Normas Técnicas Internacionais para o Emprego do Bambu – Colmo em Estruturas Prediais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/33946>. Acesso em: 6 mai. 2023.

MATERIALDISTRICT. **Materialdistrict**, 2024. The world's first tall building made of engineered bamboo. Disponível em: <https://materialdistrict.com/article/the-worlds-first-tall-building-made-of-engineered-bamboo/>. Acesso em: 06 set. 2024.

MENG, Taotao *et al.* In Situ Lignin Adhesion for High-Performance Bamboo Composites. **Nano Letters**, [s. l.], v. 23, n. 18, p. 8411–8418, 2023.

MINISTRY OF CONSTRUCTION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. **JG/T 199: Testing Method for Physical and Mechanical Properties of Bamboo Used in Building**. Beijing, China: Ministry of Construction, 2007.

MUÑOZ, Freddy *et al.* Clt fabricated with *gmelina arborea* and *tectona grandis* wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–17, 2022.

NATH, Arun Jyoti; SILESHI, Gudeta W.; DAS, Ashesh Kumar. **BAMBOO: Climate Change Adaptation and Mitigation**. [S.l.]: Apple Academic Press Inc, 2020.

NI, Lin *et al.* Manufacture and Mechanical Properties of Glued Bamboo Laminates. **BioResources**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 4459–4471, 2016.

NKEUWA, William Nguegang *et al.* Bamboo-based composites: A review on fundamentals and processes of bamboo bonding. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 235, 2022.

NOIA, Paula Regina da Cruz. **Sustentabilidade socioambiental: desenvolvimento de sistemas construtivos em bambu no Vale do Ribeira, SP**. 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-04032013-095707/pt-br.php>. Acesso em: 10 mai. 2023.

NUGROHO, Naresworo; ANDO, Naoto. Development of structural composite products made from bamboo I_ fundamental properties of bamboo zephyr board. **The Japan Wood Research Society**, [s. l.], v. 46, p. 68–74, 2000.

NUGROHO, Naresworo; ANDO, Naoto. Development of structural composite

products made from bamboo. Fundamental properties of laminated bamboo lumber. **The Japan Wood Research Society**, [s. l.], v. 47, p. 237–242, 2001.

OH, Jung Kwon; LEE, Jun Jae; HONG, Jung Pyo. Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 28–34, 2015.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences**. Paris: OECD, 2018.

PADILLA, José *et al.* Dataset on the mechanical and physical characterization of the Ecuadorian *Guadua angustifolia kunth* bamboo culms belonging to “Caña Mansa” biotype. [s. l.], v. 52, 2024.

PANG, Sung Jun; JEONG, Gi Young. Load sharing and weakest lamina effects on the compressive resistance of cross-laminated timber under in-plane loading. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 64, n. 5, p. 538–550, 2018.

PENELLUM, Matthew *et al.* Relationship of structure and stiffness in laminated bamboo composites. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 165, p. 241–246, 2018.

POZZA, Luca; SCOTTA, Roberto. Influence of wall assembly on behaviour of cross-laminated timber buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, [s. l.], v. 168, n. 4, p. 275–286, 2015.

PT INDOBAMBOO LESTARI. **PT Indobamboo Lestari**. Kab. Klungkung, Bali, 2024. LinkedIn: PT Indobamboo Lestari. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/pt-indobamboo-lestari/about/>. Acesso em: 10 ago. 2024a.

PT INDOBAMBOO LESTARI. **PT Indobamboo Lestari**. Kab. Klungkung, Bali, 2024b. LinkedIn: PT Indobamboo Lestari. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/pt-indobamboo-lestari/posts/?feedView=all>. Acesso em: 10 ago. 2024.

P4G. P4G: Pioneering Green Partnerships, Investing in Impact. 2024a. Disponível em: <https://p4gpartnerships.org/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

P4G. Indobamboo Lestari - Bamboo Village Trust. 2024b. Disponível em: <https://p4gpartnerships.org/pioneering-green-partnerships/all-p4g-partnerships/indobamboo-lestari-bamboo-village-trust>. Acesso em: 14 ago. 2024.

QIU, Zhenyu *et al.* A more explosion-resistant bamboo fiber reinforced composite structure through balancing bamboo anisotropy. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 409, 2023.

QIU, Zhenyu; FAN, Hualin. Laminated bamboo materials for plated building structures. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 61, n. September, p. 105239, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105239>.

QIU, Zhenyu; YANG, Yunze; FAN, Hualin. Flexural failure mechanism of bamboo composite plates with different construction technologies and tectonic patterns. **Industrial Crops & Products**, [s. l.], v. 218, n. May, p. 118992–119002, 2024.

QIU, Zhenyu; ZHU, Wenli; FAN, Hualin. Anisotropy attenuation of reconstituted bamboo lumber by orthogonal layup process. **Composites Communications**, [s. l.], v. 40, n. May, p. 101608, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101608>.

QUARANTA, Giuseppe; DEMARTINO, Cristoforo; XIAO, Yan. Experimental dynamic characterization of a new composite *glulam*-steel truss structure. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 25, n. September 2018, p. 1–11, 2019.

RAO, Fei *et al.* Water resistance and mechanical properties of *bamboo scrimber* composite made from different units of *Bambusa chungii* as a function of resin content. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 335, 2022.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024a. Connect. Disponível em: <https://www.renuteq.com/connect>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024b. Technology. Disponível em: <https://www.renuteq.com/technology>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024c. Design Assist Contracting. Disponível em: <https://www.renuteq.com/design-assist-contracting>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024d. Operations. Disponível em: <https://www.renuteq.com/operations>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024e. Structural Solutions. Disponível em: <https://www.renuteq.com/structural>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024f. ReNüTeq implements it's new Patented Structural Material. Disponível em: https://www.renuteq.com/_files/ugd/df390b_2f4d017520c140f696d591eb654d6dbd.pdf. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024g. Sustainability. Disponível em: <https://www.renuteq.com/sustainability>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024h. Dimensional | Industrial Components. Disponível em: <https://www.renuteq.com/dimensional-components-industrial>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024i. RENÜTEQ's Highest Performance Structural Material: "RadLam®" - Controlled Supply Chain – Americas. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/ren%C3%BCteq-s-highest-performance-structural-material-radlam-controlled-supply-chain-americas>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024j. SoLis: Solar Powered Structures Structural Engineered Bamboo + Sustainable Building Solutions. Disponível em: https://www.renuteq.com/_files/ugd/df390b_afc22d3e67dc4463a0905b7a818682b5.pdf. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024k. Glaz™ Hibrid glass solutions. Disponível em: https://www.renuteq.com/_files/ugd/df390b_0a389370c08249bcbc7a09b6a579ee76.pdf. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024l. Dimensional Components Structural Engineered Bamboo + Sustainable Building Solutions. Disponível em: https://www.renuteq.com/_files/ugd/df390b_2bbe43ee6d164f56be1ecd48989ef062.pdf. Acesso em: 25 maio. 2024.

RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024m. Introducing the Most Sustainable & Innovative OWJ (Open Web Joist) | Hybrid SEB + Welded Steel Web. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/introducing-the-most-sustainable-innovative-owj-open-web-joist-hybrid-seb-welded-steel-web>. Acesso em: 28 maio. 2024.

- RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024n. RENÜTEQ Product EOL – Disposition. Disponível em: https://www.renuteq.com/_files/ugd/df390b_52a8e80996e6401c8419bb2c04a41155.pdf. Acesso em: 28 maio. 2024.
- RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024o. Four Story Mixed Use Structure Integrating SEB (Structural Engineered Bamboo) for Primary Structure and Glass Elements | Greater St. Louis, Missouri, USA. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/four-story-mixed-use-structure-integrating-seb-structural-engineered-bamboo-for-primary-structure-a>. Acesso em: 28 maio. 2024.
- RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024p. Project Awarded | "Missouri Primary Care Association" | Structural Engineered Bamboo | Structural Frame & Glass Systems. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/project-awarded-missouri-primary-care-association-structural-engineered-bamboo-structural-fr>. Acesso em: 28 maio. 2024.
- RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2024q. St. Louis Project Awarded | "The Farm Pavilion" | Structural Engineered Bamboo Integrated | Donald Danforth Plant Science Center. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/st-louis-project-awarded-the-farm-pavilion-structural-engineered-bamboo-integrated-donald>. Acesso em: 28 maio. 2024.
- RENÜTEQ. **ReNüTeq**, 2026. ReNüTeq - Solar Charging Structure - BMW North America. Disponível em: <https://www.renuteq.com/single-post/2019/10/26/renuteq-solis-solar-charging-structure-bmws-i360-program-internationally>. Acesso em: 28 maio. 2024.
- ROSA, R A *et al.* Effects of preservative treatment and the adhesive on mechanical characteristics of laminated lumber of two bamboo species [Efeitos do tratamento preservativo e adesivo nas características mecânicas do laminado colado de duas espécies de bambu]. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, [s. l.], v. 40, n. 103, p. 451–462, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907924400&partnerID=40&md5=afb9356d0212d300cdb69f96ac5813bc>.
- ROSA, Rafael Amorim *et al.* Influences of species, preservative treatment and adhesives on physical properties of laminated bamboo lumber. **Ciencia Florestal**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 913–924, 2016.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024a. Sobre Runzhu. Disponível em: <https://runccn.com/guanyuwomen/>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024b. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/fushoulangan/117.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024c. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/fushoulangan/102.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024d. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/fushoulangan/113.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024e. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/fushoulangan/114.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024f. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/zhuzhuangpeishijianzhu/48.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024g. Products. Disponível em: <https://runccn.com/products/zhuzhuangpeishijianzhu/47.html>. Acesso em: 10 maio. 2024.

- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2024h. News. Disponível em: <https://runccn.com/news/qiyexinwen/20.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019a. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/zhujiangzhu/143.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019b. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/zhujiangzhu/145.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019c. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/zhujiangzhu/142.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019d. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/zhujiangzhu/141.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019e. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/huwaizhucai/130.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- RUN ZHU. **Run Zhu Lv Jian**, 2019f. Case. Disponível em: <https://runccn.com/case/zhujiangzhu/144.html>. Acesso em: 15 maio. 2024.
- SAAVEDRA FLORES, E. I. *et al.* Multi-scale model updating for the mechanical properties of cross-laminated timber. **Computers and Structures**, [s. l.], v. 177, p. 83–90, 2016.
- SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007. Disponível em: www.bireme.br.
- SANDOLI, A. *et al.* Role of perpendicular to grain compression properties on the seismic behaviour of CLT walls. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 34, 2021.
- SHAH, Darshil U.; SHARMA, Bhavna; RAMAGE, Michael H. Processing bamboo for structural composites: Influence of preservative treatments on surface and interface properties. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 85, p. 15–22, 2018.
- SHAHNEWAZ, Md; DICKOF, Carla; TANNERT, Thomas. Experimental investigation of the hysteretic behaviour of single-story single- and coupled-panel CLT shear walls with nailed connections. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 291, 2023.
- SHAN, B. *et al.* Assessing adhesion and glue-line defects in cold-pressing lamination of *glubam*. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 274, 2021.
- SHAN, Bo *et al.* Experimental research on standardized bamboo culm components for developing prefabricated bamboo building. **Structures**, [s. l.], v. 50, n. February, p. 272–285, 2023a.
- SHAN, Bo *et al.* Thermal performance of cross-laminated timber (CLT) and cross-laminated bamboo and timber (CLBT) panels. **Architectural Engineering and Design Management**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 511–530, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2140399>.
- SHANGGUAN, Weiwei *et al.* Effects of heat treatment on the properties of *bamboo scrimber*. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 62, n. 5, p. 383–391, 2016.
- SHARMA, Bhavna *et al.* Engineered bamboo: State of the art. **Construction Materials**, [s. l.], v. 168, n. 2, p. 57–67, 2014.

- SHARMA, Bhavna *et al.* Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 81, p. 66–73, 2015.
- SHARMA, Bhavna *et al.* Mechanical characterisation of structural laminated bamboo. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, [s. l.], v. 170, n. 4, p. 250–264, 2017.
- SHARMA, Bhavna; GATÓO, Ana; RAMAGE, Michael H. Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 83, p. 95–101, 2015.
- SHARMA, B.; VAN DER VEGTE, A. Engineered bamboo for structural applications. In: HARRIES, Kent A.; SHARMA, Bhavna (org.). **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications**. 2. ed. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020. p. 597–623.
- SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* Bamboo as a Sustainable Building Material. In: PALOMBINI, Felipe Luis; NOGUEIRA, Fernanda Mayara (org.). **Bamboo and Sustainable Construction**. Singapore: Springer, 2023. p. 1–23.
- SINHA, Arijit; MIYAMOTO, Byrne T. Lateral Load Carrying Capacity of Laminated Bamboo Lumber and Oriented Strand Board Connections. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 741–747, 2014.
- SINHA, Arijit; WAY, Daniel; MLASKO, Skyler. Structural Performance of Glued Laminated Bamboo Beams. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 1, 2014.
- SOLARTE, A.; HIDALGO, J.P.; TORERO, J.L. Flammability studies for the design of fire-safe bamboo structures. In: , 2018. **WCTE 2018 - World Conference on Timber Engineering**. [S. l.: s. n.], 2018.
- SONGSONG, Sun; MAOSONG, Wan. Evaluation of the applicability of different viscoelasticity constitutive models in *bamboo scrimber* short-term tensile creep property research. **Science and Engineering of Composite Materials**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 363–371, 2021.
- STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. **GB/T 1931**: Method for determination of the moisture content of wood. Shenzhen, China: SAC, 2009a.
- STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. **GB/T 1933**: Method for determination of the density of wood. Shenzhen, China: SAC, 2009b.
- STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. **GB/T 1936.1**: Method of testing in bending strength of wood. Shenzhen, China: SAC, 2009c.
- SU, Jingwen *et al.* Structural design and construction of an office building with laminated bamboo lumber. **Sustainable Structures**, [s. l.], v. 1, n. 2, 2021.
- SULASTININGSIH, I M *et al.* Physical and Mechanical Properties of Glued Laminated Bamboo. **Journal of Tropical Forest Science**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 290–297, 2021.
- SULASTININGSIH, Im; NUWARTI. Physical and mechanical properties of laminated bamboo board. **Journal of Tropical Forest Science**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 246–251,

2009.

SUN, Xiaofeng; HE, Minjuan; LI, Zheng. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 249, 2020.

SUN, Songsong; WAN, Maosong. Statistical analysis of *bamboo scrimber* tensile mechanical property based on different models and experiments. **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 728–738, 2021.

SUNZO BAMBOO. **Sunzo Bamboo**, 2024a Home. 2024a. Disponível em: <https://sunzo-bamboo.com/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SUNZO BAMBOO. **Sunzo Bamboo**, 2024b **Sunzo Bamboo**, 2024b. About Sunzo. 2024b. Disponível em: <https://sunzo-bamboo.com/factory-tour/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SUNZO BAMBOO. **Sunzo Bamboo**, 2024c. Sunzo Bamboo Product Specifications. 2024c. Disponível em: <https://sunzo-bamboo.com/products/bamboo-structural-lumber/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SUNZO BAMBOO. **Sunzo Bamboo**, 2024d. Zhengzhou ProMarket Community Commercial Complex. 2024d. Disponível em: <https://sunzo-bamboo.com/zhengzhou-promarket-community-commercial-complex/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SUNZO BAMBOO. **Sunzo Bamboo**, 2024e. Certificates and Patents. Disponível em: <https://sunzo-bamboo.com/certifications-and-patents/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SYAIFUDIN, Tirana Novitri; IRAWATI, Inggar Septhia; AWALUDIN, Ali. Shear and Bending Performance of Horizontal Laminated Bamboo Lumber Bonded With Urea-Formaldehyde and Preserved With Deltamethrin. **ASEAN Engineering Journal**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 41–49, 2022.

TAKEUCHI, Caori P.; ESTRADA, Martín; LINERO, Dorian L. Experimental and numerical modeling of shear behavior of laminated Guadua bamboo for different fiber directions. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 177, p. 23–32, 2018.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024a. 竹建筑结构材 (Material Estrutural De Bambu Para Construções). Disponível em: <http://www.thjhn.com/chanpin/zmjb/84.html>. Acesso em: 26 nov. 2024a.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024b. 企业简介 (Perfil Da Empresa). Disponível em: <http://www.thjhn.com/zoujin/gushi/>. Acesso em: 26 nov. 2024b.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024c. 技术特点 (Características Técnicas). Disponível em: <http://www.thjhn.com/cpzx/tedian/>. Acesso em: 26 nov. 2024c.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024d. 首页 (Página Inicial). Disponível em: <http://www.thjhn.com/>. Acesso em: 03 jul. 2024.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024e. Disponível em: <https://www.chinathj.cn/about-us/>. Acesso em: 03 jul. 2024.

TAOHUAIJIANG BAMBOO. **Taohuaijiang Bamboo**, 2024f. Disponível em: <http://www.thjhn.com/zixun/xinwen/421.html>. Acesso em: 03 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024g. 竹集成材 (Madeira Laminada de Bambu). Disponível em: <http://www.thjhn.com/chanpin/zmjcb>. Acesso em: 03 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024h. 新型竹结构材 (Novos materiais estruturais de bambu). Disponível em: <http://www.thjhn.com/chanpin/zmjcb/274.html>. Acesso em: 03 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024i. 户外浅炭防腐竹材 (Bambu tratado superficialmente contra corrosão para uso externo). Disponível em: <http://www.thjhn.com/chanpin/hwqt/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024j. 防腐竹木凉亭 (Quiosque de bambu e madeira tratado contra corrosão). Disponível em: <http://www.thjhn.com/chanpin/hwqt/254.html>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024k. 厂区展示 (Exposição da Área da Fábrica). Disponível em: <http://www.thjhn.com/zoujin/cqzs/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024l. 2024“以竹代塑”产业推进会在桃江召开, 300位与会代表来我司参观现代竹结构科技示范楼 (A Conferência de Promoção da Indústria "Substituindo o Plástico pelo Bambu" de 2024 foi realizada em Taojiang. 300 participantes vieram à nossa empresa para visitar o moderno edifício de demonstração de tecnologia de estrutura de bambu). 2024j. Disponível em: <http://www.thjhn.com/zixun/xinwen/452.html>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024m. 贵阳曹状元街区项目 (Projeto da Rua Guiyang Cao Zhuangyuan). 2024k. Disponível em: <http://www.thjhn.com/gongcheng/443.html>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024n. 贵阳曹状元街区项目 (Projeto da Rua Guiyang Cao Zhuangyuan). 2024l. Disponível em: <http://www.thjhn.com/gongcheng/447.html>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024o. 温室气体排放核查报告 (Relatório de Verificação de Emissões de Gases de Efeito Estufa). Disponível em: <http://www.thjhn.com/zoujin/wsqthcbg/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOHUAJIANG BAMBOO. **Taohuajiang Bamboo**, 2024p. 碳足迹报告 (Relatório de Pegada de Carbono). Disponível em: <http://www.thjhn.com/zoujin/tzjbg/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAOJIANG. **Taojiang**, 2024. (以竹代塑)桃江: “以竹代塑”走出绿色发展新路径 ([Usando bambu em vez de plástico] Taojiang: "Usar bambu em vez de plástico" cria um novo caminho para o desenvolvimento verde). 2024. Disponível em: http://www.taojiang.gov.cn/24397/24408/content_1991230.html. Acesso em: 26 nov. 2024.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). **Commodities at a glance: Special issue on bamboo**. Geneva, 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi: UN Environment Programme, 2022. Disponível em:

<https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 11 mai. 2023.

UNTERWIESER, Helene; SCHICKHOFER, Gerhard. Characteristic Values and Test Configurations of CLT with Focus on Selected Properties. *In:* , 2013. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2013.

USGBC. **Usgbc**, 2024. LEED rating system. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed>. Acesso em: 06 set. 2024.

VAN DER LUGT, P.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. A.J.F.; JANSSEN, J. J.A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 648–656, 2006.

VORONTSOVA, Maria S. *et al.* **World checklist of bamboos and rattans**. INBAR Technical report, n.37, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316620295_World_Checklist_of_Bamboos_and_Rattans. Acesso em: 10 mai. 2023.

WANG, R. *et al.* Performance of connection system used in lightweight *glulam* shear wall. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 206, p. 419–431, 2019.

WANG, Haida *et al.* Physical and Mechanical Properties of *Bamboo scrimber*. [s. l.], v. 9, n. August, p. 755–768, 2020.

WANG, R. *et al.* Rolling shear performance of cross-laminated bamboo-balsa timber panels. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 299, 2021.

WANG, Jianfei *et al.* Rolling shear properties of cross-laminated bamboo (CLB) specimens: A comprehensive study. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 414, 2024.

WANG, R.; XIAO, Y.; LI, Z. Lateral Loading Performance of Lightweight *Glulam* Shear Walls. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 6, 2017.

WEN, Jie; XIAO, Yan. The flexural behavior of cross laminated bamboo and timber (CLBT) and cross laminated timber (CLT) beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 408, n. October, 2023.

WIDUZ. **Widuz**, 2024. Widuz profile. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/widuz/about/>. Acesso em: 12 set. 2024.

WIDUZ. **Widuz**, 2020. Our Products. Disponível em: <https://www.widuz.com/our-products/>. Acesso em: 12 set. 2024.

WIERUSZEWSKI, Marek; MAZELA, Bartłomiej. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. **Drvna Industrija**, [s. l.], v. 68, n. 4, p. 359–367, 2017.

WU, Jiangyuan *et al.* Effects of density and resin content on the rebonding performance of *bamboo scrimber* composite. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 400, n. July, 2023.

WU, Yao *et al.* Experimental investigation on translaminar fracture behavior of cross-laminated bamboo. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 393, 2023.

WU, Y.; XIAO, Y. Steel and *glulam* hybrid space truss. **Engineering Structures**, [s.

l.], v. 171, p. 140–153, 2018.

XIAO, Y. *et al.* Development of a new type *Glulam-Glubam*. In: , 2008. **Proceedings of 1st International Conference on Modern Bamboo Structures, ICBS-2007**. [S. l.: s. n.], 2008. p. 41–47.

XIAO, Y. Engineered bamboo in China. In: HARRIES, Kent A.; SHARMA, Bhavna (org.). **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2019. p. 625–643.

XIAO, Y. **Engineered Bamboo Structures**. Leiden: CRC Press/ Balkema, 2022.

XIAO, Y. *et al.* Glue Laminated Bamboo (*Glubam*) for Structural Applications. In: MATERIALS AND JOINTS IN TIMBER STRUCTURES. [S. l.]: RILEM, 2014. v. 9, p. 589–601.

XIAO, Y.; CAI, H.; DONG, S. Y. A Pilot Study on Cross-Laminated Bamboo and Timber Beams. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 4, p. 1–7, 2021.

XIAO, Y.; SHAN, B.; LI, Z. Recent progress in engineered bamboo development. In: XIAO, Y.; LI, Z.; LIU, K. W. (org.). **Modern Engineered Bamboo Structures**. London: Taylor & Francis Group, 2020. p. 3–22.

XIAO, Y.; YANG, R. Z.; SHAN, B. Production, environmental impact and mechanical properties of *glubam*. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 44, p. 765–773, 2013.

XIAO, Yan; ZHOU, Quan; SHAN, Bo. Design and Construction of Modern Bamboo Bridges. **Journal of Bridge Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 533–541, 2010.

XING, W.Q. *et al.* Engineered Bamboo's Further Application: An Empirical Study in China. In: , 2018. **MATEC Web of Conferences**. [S. l.: s. n.], 2018.

XING, Weiqi; HAO, Jianli; SIKORA, Karol S. Shear Performance of Adhesive Bonding of Cross-Laminated Bamboo. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 9, 2019.

YADAV, Madhura; MATHUR, Arushi. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview. In: , 2021. **Materials Today: Proceedings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021. p. 2872–2876.

YANG, Shiyu *et al.* Bond Quality and Durability of Cross-Laminated Flattened Bamboo and Timber (CLBT). **Forests**, [s. l.], v. 13, n. 8, 2022.

YANG, Seungmin *et al.* Mechanical properties of hybrid cross-laminated timber with wood-based materials. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 206, 2023.

YANG, R. Z.; XIAO, Y.; LAM, F. Failure analysis of typical *glubam* with bidirectional fibers by off-axis tension tests. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 58, p. 9–15, 2014.

YONGJIE, Chen. **Lessons learnt: Construction business, products, techniques, technologies and future outlook**. [China]: INBAR Official, 2022. 1 vídeo (3h54min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=347i96EvXvc&t=12482s>. Acesso em: 4 set. 2024.

YU, Junbao *et al.* Strong, durable and fire-resistant glass fiber-reinforced *bamboo scrimber*. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 181, n. March, 2022.

YUSOF, Norwahyuni Mohd *et al.* Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 65, n. 1, 2019.

YUSOH, Alia Syahirah *et al.* Mechanical performance and failure characteristics of cross laminated timber (clt) manufactured from tropical hardwoods species. **Physical Sciences Reviews**, [s. l.], p. 77–86, 2022.

ZEА ESCAMILLA, Edwin *et al.* Bamboo: An Engineered Alternative for Buildings in the Global South. In: GUEDES, Manuel Correia; CANTUARIA, Gustavo (org.). **Bioclimatic Architecture in Warm Climates**. Wiesbaden: Springer, 2019. p. 397–414.

ZHANG, Xiubiao *et al.* Bending and shear performance of a cross-laminated composite consisting of flattened bamboo board and Chinese fir lumber. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 392, n. January, p. 131913, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131913>.

ZHANG, Dan; WANG, Ge; REN, Wenhan. Effect of Different Veneer-joint Forms and Allocations on Mechanical Properties of Bamboo-bundle Laminated Veneer Lumber. **BioResources**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 2689–2695, 2014.

ZHICHENG, Xue. **Lessons learnt: Construction business, products, techniques, technologies and future outlook**. [China]: INBAR Official, 2022. 1 vídeo (3h54min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=347i96EvXvc&t=12482s>. Acesso em: 4 set. 2024.

ZHONG, Yong *et al.* Bending properties evaluation of newly designed reinforced bamboo scrimber composite beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 143, p. 61–70, 2017.

ZHOU, Haiying *et al.* Evaluation of uniformity of bamboo bundle veneer and bamboo bundle laminated veneer lumber (BLVL). **Forests**, [s. l.], v. 10, n. 10, 2019.

ZHOU, Junwen *et al.* Experimental Investigation on Embedding Strength Perpendicular to Grain of Parallel Strand Bamboo. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2018, 2018.

ZHOU, Quan *et al.* Flexural fatigue study of *glubam* beams. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 517, p. 158–163, 2012.

ZHOU, Shu Rong *et al.* Global buckling behaviour of bamboo scrimber box columns under axial compression: Experimental tests and numerical modelling. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 63, n. July 2022, 2023.

ZHU, Xuguang *et al.* Effect of Structural Design on the Pore Structure, Water Resistance, and Mechanical Properties of Engineered Wood/Bamboo Laminated Composites. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 24, 2022.