

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO — CAMPUS RIO VERDE - GO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉ-
FABRICADAS UTILIZANDO BAMBU COMO ELEMENTOS
DE ENCHIMENTO

Autor: Luiz Gustavo Pimenta de Pádua
Orientador: Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Felipe

RIO VERDE - GO.
Janeiro - 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO — CAMPUS RIO VERDE - GO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉ-
FABRICADAS UTILIZANDO BAMBU COMO ELEMENTOS
DE ENCHIMENTO

Autor: Luiz Gustavo Pimenta de Pádua
Orientador: Prof. Dr. Alexsandro dos Santos Felipe
Coorientadores: Prof. Dr. José Pinheiro Melges

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Engenharia Civil

RIO VERDE - GO.
Janeiro - 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

P125a Pádua, Luiz Gustavo Pimenta de
Análise experimental de lajes pré-fabricadas
utilizando bambu como elemento de enchimento / Luiz
Gustavo Pimenta de Pádua; orientador Alexsandro dos
Santos Felipe; co-orientador Jose Luiz Pinheiro
Melges. -- Rio Verde, 2021.
138 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação
em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia
Goiano) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio
Verde, 2021.

1. Concreto. 2. Bambu. 3. Lajes pré-fabricadas.
I. Felipe, Alexsandro dos Santos, orient. II.
Melges, Jose Luiz Pinheiro, co-orient. III. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 nº2376



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 3/2021 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-
RV/CMPRV/IFGOIANO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉ-FABRICADAS UTILIZANDO
BAMBU COMO ELEMENTOS DE ENCHIMENTO

Autor: Luiz Gustavo Pimenta de Pádua
Orientador: Dr. Aleksandro dos Santos Felipe

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de
Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 21 de janeiro de 2021.

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
Avaliador externo - USP

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
Avaliador externo - UFSCar

Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Felipe
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

Guilherme Aris Parsekian, Guilherme Aris Parsekian - 234310 - Professor de engenharia - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 25/01/2021 15:18:41.
Aleksandro dos Santos Felipe, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/01/2021 20:25:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/12/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:
Código Verificador: 224583
Código de Autenticação: 7bc9c76f69



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas
**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES
TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Luiz Gustavo Pimenta de Pádua
Matrícula: 201910233144007

Título do Trabalho: Análise experimental de lajes pré-fabricadas utilizando bambu como elementos de enchimento

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: Em processo de publicação em periódico e produção de patente

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 17/04/2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

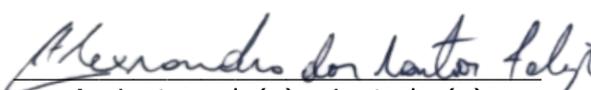
O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 21 de Janeiro de 2021


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades que tenha me proporcionado, permitindo a chance de lutar pelos meus sonhos.

Muito obrigado...

Aos meus queridos pais Luiz Antônio de Pádua e Ivana Pimenta Araújo de Pádua, pelo apoio incondicional na realização de mais um sonho e por acreditar na minha capacidade de crescer profissionalmente. Vocês fizeram de mim quem sou hoje e por isso agradeço até o último dos meus dias. Obrigado...

Agradeço a todos os professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade em especial ao meu orientador, Professor Dr. Alexsandro dos Santos Felipe pela seriedade e competência, sendo o mesmo fundamental na realização desse projeto e principalmente por creditar em meu potencial.

Ao meu coorientador Professor Dr. José Luiz Pinheiro Melges, pela disponibilização do laboratório para realização dos ensaios e aos ensinamentos nos proporcionados.

Aos meus queridos avós, tios e tias presentes em carne e em espírito morando com o pai, que sempre me proporcionaram muitas alegrias, carinho e atenção me acolhendo e confortando nas horas que mais precisei.

A minha noiva Geovana Calaça Alvim, pelas alegrias e momentos bons proporcionados ao seu lado, pelo apoio e segurança em minhas decisões, pela confiança dos anos vividos ao seu lado e muitos deles distantes, pela tranquilidade que sempre tenta me transmitir nos momentos decisivos e por fim a capacidade de me ajudar a criar mais responsabilidade e respeito.

Aos meus colegas do mestrado Abner Santos Baroni Sales, Murilo Santos Peixoto, Victor Baldim, Júlio César Queiroz Paula e Lavinnia Barros Ribeiro, pelas longas horas de estudos e principalmente no auxílio para produção desse projeto.

E por fim ao meu querido irmãozinho Pedro Lucas que semanalmente, sempre me recepciona nos finais de semana com aquele abraço sincero de um verdadeiro amor de irmão.

A todos vocês, a minha gratidão sempre. Muito Obrigado!

BIOGRAFIA DO AUTOR

Natural de Catalão – GO, filho de Luiz Antônio de Pádua e Ivana Pimenta Araújo de Pádua. Graduado em 2011 no curso Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade de Uberaba (UNIUBE), Campus Uberlândia. Pós-Graduado em 2016 em *lato sensu* MBA Gerenciamento de Obras e Tecnologia e Qualidade da Construção pelo Instituto de Pós-Graduação (IPOG). Em 2019 ingressou no Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde – GO (IFGoiano). Atua na área da Engenharia Civil desde o ano de 2012, em consultorias e elaboração de projetos civis.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	xviii
RESUMO	20
ABSTRACT	21
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Referências	24
2 OBJETIVOS	26
2.1 Geral	26
2.2 Específicos	26
3 CAPÍTULO I	27
3.1 Introdução	28
3.2 Bambu: Disposição Geográfica	35
3.3 Armazenamento e Sequestro de Carbono pelo Bambu	37
3.4 Bambu na Construção Civil	44
3.5 Indústria Cerâmica e seus Impactos	49
3.6 EPS: Poliestireno Expansivo	55
3.7 Lajes Pré-Fabricadas	56
3.7.1 Vigotas Pré-Moldadas	58
3.7.2 Elementos de Enchimento	59
3.7.3 Armadura Complementares	60

3.7.4 Capa de Compressão	61
3.7.5 Considerações de Dimensionamento	61
3.7.5.1 Análise estrutural para Dimensionamento das Lajes Pré-Fabricadas.....	62
3.7.5.2 Dimensionamento à Flexão	63
3.7.5.3 Cálculo de Deslocamento (Estimativa de Flechas Imediata).....	63
3.8 Materiais e métodos.....	69
3.8.1 Materiais	69
3.8.1.1 Bambu.....	70
3.8.1.2 Lajota Cerâmica	72
3.8.1.3 Vigotas Pré-Fabricadas.....	73
3.8.1.4 Armadura de Distribuição	73
3.8.1.5 Justificativa para definição da altura e capa de compressão da laje	74
3.8.1.6 Instrumentação e Obtenção de Dados	76
3.8.2 Métodos	77
3.8.2.1 Modelo Construtivo	77
3.8.2.2 Montagem das Formas e Posicionamento	79
3.8.2.3 Montagem, Concretagem, Adensamento e Cura.....	80
3.8.2.4 Determinação do peso próprio das lajes	87
3.8.2.5 Extensômetros Elétricos	88
3.8.2.6 Instrumentação e Procedimento de Ensaio a Flexão em 4 Pontos.....	91
3.8.2.7 Ensaio de Flexão dos Elementos de Enchimento	94
3.8.2.8 Caracterização Microestrutural por Meio do MEV.....	95
3.8.3 Dimensionamento dos Modelos de Lajes Pré-Fabricadas Treliçadas	95
3.8.3.1 Características Geométricas do Modelo de laje	95
3.8.3.2 Previsão da Flecha Imediata – Modelo Proposto por Branson (1963).....	97
3.8.4 Análise de Custos.....	100
3.9 Resultados e discussões.....	102
3.9.1 Resistência do Concreto Utilizado na Capa	102

3.9.2 Resistência Mecânica à Compressão dos Elementos de Enchimento.....	103
3.9.3 Massa Específica das Lajes	105
3.9.4 Análise dos Resultados Experimentais com os Teóricos Envolvendo Deslocamentos	106
3.9.4.1 Método de Branson – Estádio I.....	106
3.9.4.2 Análise da Curva Experimental e Teórica - Estádio I+II	106
3.10 Análise das Deformações do aço e do Concreto.....	108
3.11 Análise do Padrão de Fissuras	109
3.12 Análise de um Revestimento Rústico (Eco-design).....	111
3.13 Análise Econômica e Sustentável.....	113
3.14 Conclusões	117
3.15 Referências	118
ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	
Tabela 1 - Compostos de clínquer e emissões de CO ₂	34
Tabela 2 – Ciclo da cultura e produtividade de espécies.	37
Tabela 3 - Estatísticas descritivas dos resultados dos teores ponderados de carbono. .	39
Tabela 4 - Estoque de biomassa C e taxa de sequestro em bambus lenhosos.	43
Tabela 5 - Resistência mecânica de algumas espécies de bambu.....	48
Tabela 6 - Taxas de emissões de CO ₂ no setor cerâmico.	52
Tabela 7 - Planilha de inventário da análise de ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural em relação a um milheiro de tijolo.....	53
Tabela 8 - Emissões de CO ₂ no setor cerâmico (GgCO ₂).	53
Tabela 9 - Características geométricas da seção transversal bruta “T”, estágio I.	64
Tabela 10 - Características do Bambu Imperial.....	72
Tabela 11 - Características físicas das lajotas cerâmicas.....	73
Tabela 12 - Características da treliça.....	73
Tabela 13 - Características físicas do aço usado na armadura de distribuição.	74
Tabela 14 - Características do concreto da capa de compressão	74
Tabela 15 - Características do concreto da capa de compressão	75
Tabela 16 - Características e aplicações dos extensômetros elétricos.	77
Tabela 17 - Identificação dos modelos de lajes produzidas.....	79
Tabela 18 - Características das barras de aço usados na armadura de distribuição. Quantificação para um modelo de laje	83
Tabela 19 - Propriedades geométricas das lajes com lajota cerâmica.	96
Tabela 20 - Propriedades geométricas das lajes com bambu.....	97
Tabela 21 - Características mecânicas, método Branson.....	97
Tabela 22 - Resistência mecânica a compressão do concreto da capa aos 28 dias.....	103
Tabela 23 - Resistência mecânica à compressão dos elementos de enchimento.....	103
Tabela 24 – Massa específica das lajes.....	105

Tabela 25 – Análise estatística da massa específica das lajes	106
Tabela 26 – Teste de Tukey para as cargas de ruptura das lajes	111
Tabela 27 - Insumos e custo unitário para confecção das lajes	114
Tabela 28 – Custo unitário de acabamento / revestimento da face inferior das lajes – Custo para 1,0 m ² de laje	115

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I	
Figura 1- Emissões específicas de CO ₂	29
Figura 2 – Quantitativo de emissões de CO ₂ na fabricação de cimento.....	30
Figura 3 - Consumo estimado de materiais comuns de 2002-2005.....	31
Figura 4 - Uso e disponibilidade estimada de matérias-primas alternativas.....	31
Figura 5 - Ciclo do Carbono.	32
Figura 6 - Captura de CO ₂ durante a carbonatação natural do concreto.....	33
Figura 7 - Distribuição mundial do bambu.	36
Figura 8 - Taxa de carbono ao longo dos anos.	39
Figura 9 - Partição da biomassa seca acima do solo em cinco espécies de bambu em um experimento de cinco anos de idade em Pinhais (PR).....	40
Figura 10 - Processo de fotossíntese.....	41
Figura 11 - Captura de CO ₂ por meio de uma plantação de bambu.....	42
Figura 12 - Biomassa e densidade dos bambus lenhosos.	42
Figura 13 - Aplicações do bambu: a) Aeroporto Internacional de Barajás (Madri – Espanha). b) Fundação ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives), para a Expo 2000 (Hannover - Alemanha). c) Catedral Alternativa Nuestra Señora de La Pobreza (Colombia).....	45
Figura 14 - Artefato desenvolvido com bambu laminado colado.....	46
Figura 15 - a) Relação tensão-deformação típica de tiras de bambu e madeira de teca; b) MOE e MOR de bambu e madeira; c) Fator de ductilidade.....	47
Figura 16 - Consumo de argilas comuns.	50
Figura 17 - Emissões de Gases do Efeito Estufa no setor industrial.	54
Figura 18 - Elementos pré-fabricados: a) Vigota de concreto comum. b) Vigota de concreto protendido. c) Vigota treliçada.	58
Figura 19 - Esquema construtivo de laje treliçada.....	59
Figura 20 - Elementos de enchimento: a) EPS. b) Lajota cerâmica.	60

Figura 21 - Armaduras complementares: a) Armadura longitudinal. b) Armadura de distribuição.	60
Figura 22 - Lançamento do concreto da capa de compressão.	61
Figura 23 - Representação esquemática de lajes pré-fabricadas compostas por vigotas pré-moldadas.	62
Figura 24 - Detalhamento da seção transversal de lajes pré-moldadas, adaptada: a) Seção da nervura. b) Seção adotada.	63
Figura 25 - Seção transversal em formato “T”.	64
Figura 26 - Seção transversal em formato “T” estágio II.	65
Figura 27 - Viga de concreto biapoiada sob ações de serviço.	67
Figura 28 - Viga de concreto biapoiada e seus diagramas de esforços.	68
Figura 29 - Viga de concreto biapoiada e seus diagramas de esforços.	68
Figura 30 - Colheita do bambu.	70
Figura 31 - Extração do bambu: a) Transporte, b) Corte, c) Armazenamento.	71
Figura 32 – Geometria do bambu.	71
Figura 33 - Gabarito para corte dos frisos.	72
Figura 34 - Geometria das lajotas cerâmicas.	72
Figura 35 - Detalhamento da vigota treliçada.	73
Figura 36 - Malha de distribuição.	74
Figura 37 - Rompimento dos corpos de prova do concreto da capa.	76
Figura 38 - a) e b) Extensômetros elétrico para aplicação em aço. c) e d) Extensômetros elétrico para aplicação em concreto.	77
Figura 39 - Seção transversal dos protótipos. a) Lajes com lajota cerâmica. b) Lajes com bambu. (medidas em cm).	78
Figura 40 - Geometria da montagem das formas de madeira.	80
Figura 41 – Montagem das lajes: a) e b) Posicionamento das vigotas pré-moldadas e distribuição das lajotas cerâmicas. c) e d) Posicionamento das vigotas pré-moldadas e distribuição dos bambus.	81
Figura 42 - Laje com bambu: a) e d) Detalhamento do encaixe do bambu junto a vigota pré-moldadas. b) e c) Posicionamento de sacos de cimento sobre a superfície dos bambus.	82
Figura 43 - Disposição final: a) Laje com lajota cerâmica. b) Laje com bambu.	82

Figura 44 - Armadura de distribuição e ganchos de suporte: a) Disposição das armaduras de distribuição nas lajes com lajota cerâmica. b) Disposição das armaduras de distribuição nas lajes com bambu. c) Detalhamento dos ganchos para içamento.	83
Figura 45 - Umedecimento das lajes.....	84
Figura 46 - Concretagem - Lançamento, nivelamento e acabamento final da capa de compressão: a) e b) Laje com lajota cerâmica. c) e d) Laje com bambu.....	85
Figura 47 - Cura da capa de compressão: a) e b) proteção da superfície das lajes com lona.	85
Figura 48 - Laje após concretagem.....	86
Figura 49 - Lajes vistas por baixo: a) e b) Lajes produzidas com lajota cerâmica. c) Lajes confeccionadas com bambu sem verniz e d) Lajes produzidas com bambu com aplicação de verniz.	87
Figura 50 - Sistema para determinação do peso próprio das lajes.....	88
Figura 51 - Representação esquemática da posição dos extensômetros na região mais comprimida da capa de concreto.	88
Figura 52 - Instrumentação e fixação dos extensômetros na face superior da capa de compressão.	89
Figura 53 - Posicionamento dos extensômetros – Armação das vigotas pré-fabricadas	89
Figura 54 - Instrumentação das treliças das vigotas pré-fabricadas: a) Fixação do extensômetro no banzo superior. b) Fixação do extensômetro no banzo inferior. c) Detalhamento dos extensômetros já fixados.	90
Figura 55 - Concretagem das treliças instrumentadas para formação das vigotas pré-fabricadas.....	91
Figura 56 - Vista lateral - Esquema de ensaio de resistência a flexão (dimensões em cm).....	92
Figura 57 - Corte AA - Esquema de ensaio de resistência a flexão (dimensões em cm).	92
Figura 58 - Posicionamento do pistão hidráulico, célula de carga e rótula.	93
Figura 59 - Instalação e posicionamento dos relógios LVDT. a) Posicionamento na face direita. b) Posicionamento na face esquerda.....	94
Figura 60 - Estrutura do ensaio de ruptura e aquisição de dados.	94
Figura 61 - Ensaio de resistência dos elementos de enchimento. a) Bambu. b) Lajota cerâmica.....	95

Figura 62 - a) Aparelho utilizado para realização do MEV. b) Aparelho utilizado na metalização das amostras.....	95
Figura 63 - Seção transversal da laje com lajota cerâmica para o dimensionamento...	96
Figura 64 - Seção transversal da laje com bambu para o dimensionamento	96
Figura 65 - Seção Transversal em forma de “T”, no Estádio II puro	99
Figura 66 - Resistência mecânica na compressão da lajota cerâmica e do bambu (MPa)	104
Figura 67 - Operário em cima do bambu a) instalação da laje. b) concretagem	104
Figura 68 - Detalhamento das fibras do bambu por meio do MEV. a) Aumento em 100x. b) Aumento em 400x.....	105
Figura 69 - Curvas teóricas e experimentais dos momentos fletores x flechas (Estádio I+II), a) Laje Referência e b) laje com lajotas de bambu	107
Figura 70 - Curvas teóricas e experimentais dos momentos fletores x flechas (Estádio I+II).....	108
Figura 71 - Deformações no concreto e no aço. a) lajes com lajota cerâmica. B) Lajes com enchimento de bambu	109
Figura 72 - Fissuras dentro do estádio II. a) fissuras verticais na lateral. b) fissuras na Lj-ref. c) fissuras na Lj-bambu e d) representação dos estádios de fissuração (I e II).	110
Figura 73 - Cargas de ruptura média da lajes	110
Figura 74 - Laje com enchimento de bambu – metade limpa e metade suja.....	111
Figura 75 - Laje com enchimento de bambu - metade envernizada e metade suja	112
Figura 76 - Laje com enchimento de bambu - toda envernizada.....	113
Figura 77 - Custo de confecção das lajes e acabamento para 1,0 m ² de laje.....	116
Figura 78 - Levantamento de emissão de CO ₂ dos elementos de enchimentos (cerâmica e bambu) para o exemplo de 50 casas com 100 m ² de laje cada	117
Figura 79 - Seção transversal da laje com lajota cerâmica	132
Figura 80 - Seção transversal da laje com bambu.	132

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

	Página
CAPÍTULO I	
Equação 1	29
Equação 2	29
Equação 3	29
Equação 4	30
Equação 5	30
Equação 6	30
Equação 7	41
Equação 8	41
Equação 9	41
Equação 10	63
Equação 11	66
Equação 12	66
Equação 13	66
Equação 14	69
Equação 15	98
Equação 16	98
Equação 17	98
Equação 18	99
Equação 19	99
Equação 20	99
Equação 21	99
Equação 22	100
Equação 23	101
Equação 24	101
Equação 25	132
Equação 26	133
Equação 27	133

Equação 28	133
Equação 29	133
Equação 30	133
Equação 31	133
Equação 32	133
Equação 33	134
Equação 34	134
Equação 35	134
Equação 36	134
Equação 37	134
Equação 38	135
Equação 39	135
Equação 40	135
Equação 41	135
Equação 42	136
Equação 43	136
Equação 44	136
Equação 45	136
Equação 46	136
Equação 47	136
Equação 48	136
Equação 49	137
Equação 50	137
Equação 51	137
Equação 52	137
Equação 53	137
Equação 54	137
Equação 55	138
Equação 56	138

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/Sigla	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Cl ₂	Cloro
C	Carbono
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio (Calcário)
CaO	Óxido de Cálcio
CO	Óxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono (Gás Carbônico)
CO ₃	Carbonato
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C ₃ S	Alita
C ₂ S	Belita
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
C ₄	Família do carbono
C20	Concreto de resistência característica de 20 MPa
C25	Concreto de resistência característica de 25 MPa
CA60	Resistência característica do aço de 600 MPa
CCS	<i>Capture and Storage</i>
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i>
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do cimento
CEB	COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON
°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
EPS	Poliestireno expansivo
Eq.	Equação
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
<i>et al.</i>	E outros (as)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
F	Flúor
g/mol	Gramas por mol
GPa	Giga Pascal
Gg	Giga grama
Gg CO ₂	Giga grama de CO ₂
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GJ	Giga Joule
Há	Hectare
HCN	Cianeto de hidrogênio
INBAR	International Network for Bamboo and Rattan
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPPU	Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos
IEA	Agência Internacional de Energia
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
kN	Quilo Newton

kg	Quilograma
kg/m	Quilograma por metro
kg/m ²	Quilograma por metro quadrado
kg/ton	Quilograma por tonelada
kg CO ₂ /ha ano	Quilograma de gás carbônico por hectare ao longo de um ano
kgf	Quilograma força
LVDT	Comparador e transdutor de deformação
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MCTI	Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa
MPa	Mega Pascal
MPT	Mini-painéis treliçados
m ²	Metro ao quadrado
mm	Milímetro
Mg há ⁻¹	Miligrama por hectare
NEPAE	Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural
NO	Oxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NH ₃	Amônia
O ₂	Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PT	Painel treliçado
PAH	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
REDD	Redução de Emissões pelo Desmatamento e Degradação Florestal
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
SiO ₂	Óxido de silício
SO ₂	Enxofre
Ton	Tonelada
Tf	Tonelada força
Ton / ha . ano	Tonelada por hectare ao ano
Ton/mes	Toneladas por mês
Ton CO ₂ / ton cerâmica	Tonelada de CO ₂ por tonelada de cerâmica
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VC	Vigota de concreto
XXI	21
WBCSD	Conselho Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

RESUMO

PÁDUA, LUIZ GUSTAVO PIMENTA Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, janeiro de 2021. **Análise experimental de lajes pré-fabricadas utilizando bambu como elementos de enchimento.** Orientador: Alexsandro dos Santos Felipe. Coorientador: Prof. José Luiz Pinheiro Melges.

No Brasil existem várias alternativas de lajes para edificações, nas edificações residenciais de pequeno e médio porte, predomina o uso das **lajes** pré-moldadas unidirecionais, a razão por esta escolha é a montagem simples “*in loco*”. Os elementos que as constituem são o concreto que forma a capa, a alma e a sapata das vigotas, o aço é o material que forma a treliça constituinte da vigota. As respostas mecânicas das lajes pré-moldadas são garantidas pelo concreto para os esforços em sua maioria de compressão e o aço que atende a maioria dos esforços de tração. Existe também o elemento de enchimento, comumente, utiliza-se a lajota cerâmica ou isopor. Estes não conferem respostas mecânicas aos esforços solicitantes na laje. Baseado nisso, este estudo propôs a substituição das lajotas cerâmicas pelo bambu. A justificativa é o apelo sustentável, visto que as lajotas cerâmicas, por exemplo, são geradores de poluentes (processo de fabricação – combustão) e são formadas por material não renovável extraída na natureza (argila) e cada vez mais escassa, já o bambu é uma espécie vegetal com os maiores índices de sequestro de gás carbônico, crescimento rápido e alta resistência mecânica. A proposta foi executar 3 lajes de cada tipologia, sendo uma delas instrumentada com extensômetros elétricos. Foi verificado o comportamento mecânico teórico e experimental, avaliado as deformações e flechas imediatas, situações de serviço e ruptura. O estudo demonstrou que como era esperado, não existem diferenças mecânicas acentuadas entre as tipologias. Mostrou também uma alternativa de acabamento rústico, simples e barata a ser empregada. Verificou-se que o custo final destas lajes com enchimento de bambu foi 28,56% menor, podendo ser uma alternativa para populações que necessitam de uma habitação básica.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto, bambu, lajes pré-fabricadas

ABSTRACT

PÁDUA, LUIZ GUSTAVO PIMENTA Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, janeiro de 2021. **Experimental analysis of prefabricated slabs using bamboo as a filling element.** Orientador: Alexsandro dos Santos Felipe. Coorientador: Prof. José Luiz Pinheiro Melges.

In Brazil there are several alternatives of slabs for buildings; in small and medium-sized residential buildings, precast one-way slabs prevail, and the reason for this choice is the simple in situ assembly. The constituting elements are the concrete that forms the cover, the web and the joist base; steel is the material that forms the lattice constituting the joist. The mechanical responses of the precast slabs are guaranteed by the concrete for mostly by its compressive strength and the steel that meets most of the tensile strength. There is also the filling element, commonly used by the ceramic tile or styrofoam. These do not provide mechanical responses to the stresses applied on the slab. Based on this, this study proposed the replacement of ceramic tiles with bamboo. The justification is the sustainable appeal, since ceramic tiles, for example, are pollutant generators (manufacturing process - combustion) and are formed by non-renewable material extracted from nature (clay) and increasingly scarce; bamboo is a plant species with the highest rates of carbon dioxide sequestration, rapid growth and high mechanical strength. The proposal was to build 3 slabs of each type, one of which was instrumented with strain gauges. The theoretical and experimental mechanical behavior was verified, and deformations and immediate arrows as well as service situations and disruption were evaluated. The study demonstrated that, as expected, there are no marked mechanical differences between the types. It also showed an alternative of rustic, simple and cheap finishing to be used. The final cost of these slabs with bamboo filling was 28.56% lower, representing an alternative for populations that need a basic housing.

Keywords: Concrete, bamboo, precast slabs

1 INTRODUÇÃO

O ritmo crescente da população e conseqüentemente a maior urbanização das cidades ocasionou em aumento no desenvolvimento dos países. Com isso, a construção civil obteve um grande salto, pois é uma participante de todo crescimento urbano. Na medida que se aumenta as construções, há mais necessidade de matéria-prima e de otimização dos seus processos.

Segundo Szabó (2003) e o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2013), entre os anos de 1950 e 2020, o processo de fabricação do cimento aumentou 34 vezes, enquanto a sociedade mundial cresceu em aproximadamente 3 vezes, de acordo com a Divisão de População da ONU em 2015.

A indústria da fabricação do cimento é um setor que gera significativa taxa de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (o CO₂ é um exemplo), a alta concentração deste gás na atmosfera aumenta os impactos negativos, como: o aumento da temperatura da terra, extinção de algumas espécies de animais e plantas (reduzindo a biodiversidade), aumento do nível do oceano, desertificação, alteração do regime de chuvas, provocando inundações e secas, entre outras conseqüências. Estima-se que essa taxa de emissões é de 5 a 7% em relação a todas as emissões mundiais (MEHTA e MONTEIRO, 2014), representando em questões de emissões industriais a taxa de 13% (FISCHEDICK et al., 2014)

O cimento Portland é um material muito consumido e está presente em praticamente todas as edificações, suas matérias-primas, como o calcário e a argila (matérias-primas base) são respectivamente encontradas na natureza de forma abundante e moderada. No ano de 2016 sua produção chegou em aproximadamente 809 milhões de toneladas (World Business Council for Sustainable Development; WBCSD, 2016).

A estimativa do progresso de utilização e a presente procura desse material geram discussões, pesquisadores constantemente estão produzindo pesquisas para minimizar os

efeitos deletérios pela emissão de gases gerados pela produção do cimento. Algumas soluções como substituição de insumos para reduzir a quantidade de clínquer no cimento, criação de combustíveis renováveis e formas de captura e armazenamento de CO₂ (gerado por essa própria fabricação, utilizando de seus próprios produtos nesse ciclo), têm sido estudadas.

A preocupação ambiental se dá pelos riscos que o aquecimento global tem gerado mundialmente, as formas para minimizarem esses impactos tem sido amplamente divulgada e adaptada em vários setores, principalmente na construção civil, com inovações desafiadoras.

Em relação as emissões de CO₂ e a sua captura, sabe-se que as plantas por meio de seu processo de fotossíntese o retêm e armazenam em forma de biomassa (o carbono, constituinte de sua composição beneficia para o seu desenvolvimento). As florestas são grandes responsáveis por esse ciclo favorável ao meio ambiente, contribuindo significativamente sequestro desse gás na atmosfera.

O bambu é uma planta da família das gramíneas, com uma diversidade de espécies em todo o mundo é bem conhecido pela sua estrutura e pela alta taxa desenvolvimento (cresce até 10 cm por dia). Esse progresso auxilia no processo de captura e armazenamento de carbono, indicando índices consideráveis e viáveis ecologicamente. Além dessa contribuição ambiental, o bambu possui excelentes características mecânicas e versatilidade de uso no ramo da construção civil, é utilizado em telhados, vigas, pilares, lajes, paredes, pisos e, também nos artesanatos, trazendo novas formas arquitetônicas, belezas exclusivas, leveza e economia às edificações.

Com propriedades semelhantes a madeira maciça, o bambu é considerado mais um material de construção com potencial de uso. Seu rápido crescimento auxilia no reflorestamento e utilização em um ciclo rápido. Porém, carecendo de pesquisas sobre suas contribuições em uma escala sistêmica e multidisciplinar.

Sua disposição produtiva é possível em quase todo território mundial, com diversidade de espécies. É uma alternativa que evidencia a busca por recursos renováveis, pois além de todos os seus benefícios de resistência mecânica, ainda sequestra mais CO₂ e libera mais oxigênio que a maioria das árvores de tronco maciço.

Custo, durabilidade e qualidade de um insumo são requisitos primordiais na procura e caracterização de um material estrutural, o bambu tem especificações que se encaixam nas padronizações de resistência mecânica a tração, flexão e ductilidade semelhantes ao aço e da madeira maciça, por exemplo.

Alguns elementos estruturais, como as lajes pré-moldadas trazem grandes benefícios a construção. São versáteis, simples de serem montadas e agilizam toda a construção de

pequeno porte. Na sua constituição são necessários elementos de enchimento para formação de seção transversal no formato de T. Os elementos mais usuais são o EPS e a lajota cerâmica. Porém, em questões ambientais, ambos poluem e degradam o meio ambiente, sendo principalmente pelo processo de produção e do descarte inadequado.

A cerâmica devido ao seu processo de fabricação gera consideráveis concentrações de CO₂ no ar pela queima dos combustíveis, geralmente madeiras nativas. O processo de queima polui o entorno da indústria, tanto em relação ao ar quanto visualmente, afetando o bioma e gerando resíduos tanto na fábrica, quanto nas construções (é um material frágil e por isso quebra com facilidade, ocasionando em crescentes resíduos). Já o EPS tem desvantagens no seu descarte. É um material que leva anos para se decompor, caracterizando por não ser biodegradável, gera resíduos volumosos e ao ser queimado (procedimento não recomendável), volatiliza substâncias tóxicas. Ambas as opções de lajotas ainda exigem uma disposição construtiva que necessite do emprego de elementos de segurança (tábuas) para locomoção de operários, podendo somente assim, finalizar a capa de concreto fresco.

Devido às aplicações crescentes desse elemento construtivo, suas qualidades e em decorrência de questões ambientais, visa-se um aprimoramento dessa técnica com medidas que agregam em resistência mecânica, versatilidade, leveza e contribuem para o meio ambiente. Uma medida promissora apresentada por esse trabalho é a substituição da lajota cerâmica e do EPS (materiais convencionais de enchimento no processo de montagem de lajes pré-moldadas) por bambu, trazendo inovações sustentáveis para a indústria da construção civil, com melhor disposição construtiva e economia.

Essa substituição tem caráter favorável, retirando materiais poluentes e com potencial de degradação do meio ambiente e incluindo um material sustentável, leve, econômico e de fácil obtenção, permitindo acesso a todos os níveis econômicos, além de ser considerado um elemento que tem capacidade de absorver e armazenar o carbono atmosférico em sua biomassa (ao longo de seu desenvolvimento) e, assim reduzir suas concentrações no ambiente. Contribuindo para minimizar os efeitos do aquecimento global.

1.1 Referências

FISCHEDICK, M. *et al.* **Industry**. O. Edenhofer, *et al.* (Eds.), Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2014).
https://kar.kent.ac.uk/53224/2/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. IBRACON, 2014.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GNR Project reporting CO₂**. 2016. <https://www.wbcdcement.org/GNR-2016/index.html>.

SZABÓ, L.; HIDALGO, I. ; CÍSCAR, J. C. ; SORIA, A. ; RUSS, P. . **Energy Consumption and CO₂ Emissions from the World Cement Industry**. European Commission Joint Research Center (DG JRC) (2003). <http://www.bvsde.paho.org/bvs-aia/fulltext/energy.pdf>.

SNIC. **Relatório Anual 2012–2012 Annual Report**. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento/Brazilian Cement Industry Union, Rio de Janeiro (2013). http://www.snic.org.br/pdf/relatorio_anual_2012-13_web.pdf.

UN Population Division. **World Population Prospects: The 2015 Revision**. United Nations Department of Economic and social Affairs, New York (2015).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar experimentalmente a viabilidade técnica e econômica da utilização do bambu como elemento de enchimento em lajes pré-fabricadas unidirecionais, como substituição da lajota cerâmica. Visar buscar novos métodos de execução econômicos, sustentáveis e funcionais.

2.2 Específicos

- I. Avaliar o peso próprio das lajes propostas e verificar se influenciam mecanicamente;
- II. Avaliar os deslocamentos experimentais e teóricos para as lajes em estudo dentro do estágio I + estágio II;
- III. Verificar o comportamento mecânico das lajes com lajota cerâmica e das lajes com enchimento de bambu;
- IV. Apresentar a opção de acabamento rústico e das disposições de aplicação nas lajes com enchimento de bambu;
- V. Fazer a comparação econômica entre as lajes propostas, na confecção e acabamento.

3 CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Ambiente Construído)

Análise Experimental de Lajes Pré-Fabricadas Utilizando Bambu como Elementos de Enchimento

Experimental Analysis of Prefabricated Slabs Using Bamboo as a Filling Elements

RESUMO

No Brasil existem várias alternativas de lajes para edificações, nas edificações residenciais de pequeno e médio porte, predomina o uso das lajes pré-moldadas unidirecionais, a razão por esta escolha é a montagem simples “*in loco*”. Os elementos que as constituem são o concreto que forma a capa, a alma e a sapata das vigotas, o aço é o material que forma a treliça constituinte da vigota. As respostas mecânicas das lajes pré-moldadas são garantidas pelo concreto para os esforços em sua maioria de compressão e o aço que atende a maioria dos esforços de tração. Existe também o elemento de enchimento, comumente utiliza a lajota cerâmica ou isopor. Estes não conferem respostas mecânicas aos esforços solicitantes na laje. Baseado nisso, este estudo propôs a substituição das lajotas cerâmicas pelo bambu. A justificativa é o apelo sustentável, visto que as lajotas cerâmicas, por exemplo, são geradores de poluentes (processo de fabricação – combustão) e são formadas por material não renovável extraída na natureza (argila) e cada vez mais escassa, já o bambu é uma espécie vegetal com os maiores índices de sequestro de gás carbônico, crescimento rápido e alta resistência mecânica. A proposta foi executar 3 lajes de cada tipologia, sendo uma delas instrumentada com extensômetros elétricos. Foi verificado o comportamento mecânico teórico e experimental, avaliado as deformações e flechas imediatas, situações de serviço e ruptura. O estudo demonstrou que como era esperado, não existem diferenças mecânicas acentuadas entre as tipologias. Mostrou também uma alternativa de acabamento rústico, simples e barata a ser empregada. Verificou-se que o custo final destas lajes com enchimento de bambu foi 28,56% menor, podendo ser uma alternativa para populações que necessitam de uma habitação básica.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto, bambu, lajes pré-fabricadas

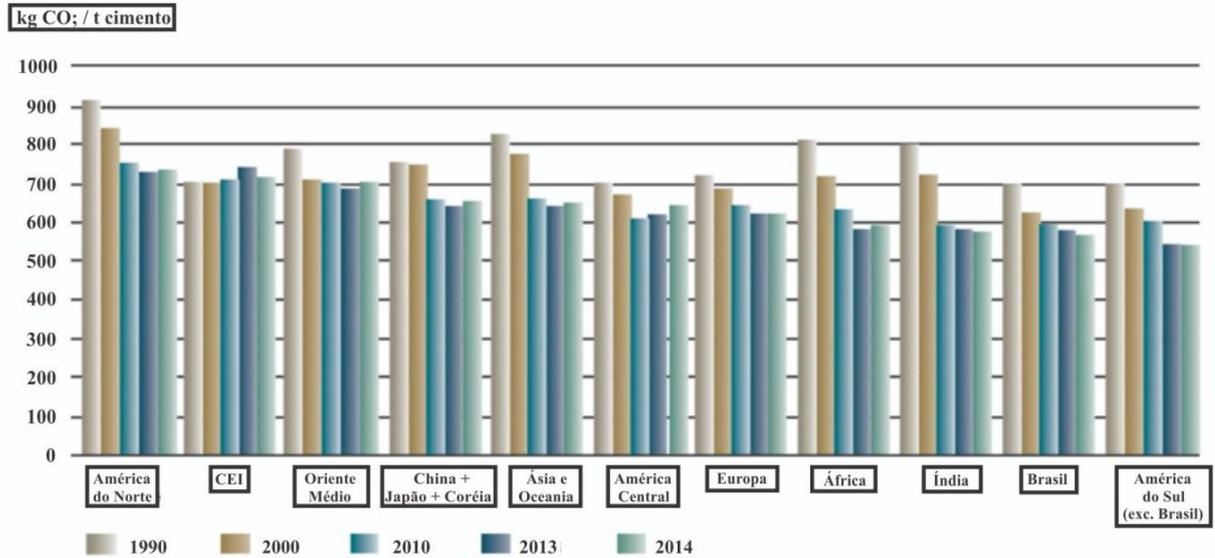
ABSTRACT

In Brazil there are several alternatives of slabs for buildings; in small and medium-sized residential buildings, precast one-way slabs prevail, and the reason for this choice is the simple in situ assembly. The constituting elements are the concrete that forms the cover, the web and the joist base; steel is the material that forms the lattice constituting the joist. The mechanical responses of the precast slabs is guaranteed by the concrete for, mostly, compressive strength and the steel that meets most of the tensile strength. There is also the filling element, commonly used by the ceramic tile or styrofoam. These do not provide mechanical responses to the stresses applied on the slab. Based on this, this study proposed the replacement of ceramic tiles with bamboo. The justification is the sustainable appeal, since ceramic tiles, for example, are pollutant generators (manufacturing process - combustion) and are formed by non-renewable material extracted from nature (clay) and increasingly scarce; bamboo is a plant species with the highest rates of carbon dioxide sequestration, rapid growth and high mechanical strength. The proposal was to build 3 slabs of each type, one of which was instrumented with strain gauges. The theoretical and experimental mechanical behavior was verified, deformations and immediate arrows, service situations and disruption were evaluated. The study demonstrated that, as expected, there are no marked mechanical differences between the types. It also showed an alternative of rustic finishing, simple and cheap to be used; the final cost of these slabs with bamboo filling was 28,56% lower, representing an alternative for populations that need a basic housing.

Keywords: Concrete, bamboo, precast slabs

3.1 Introdução

Um dos insumos mais utilizados na construção civil é o cimento, sendo responsável por emitir a cerca de 5 a 7% de CO₂ na atmosfera (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No Brasil essa porcentagem é um terço de toda essa participação mundial, representando 2,6%, de acordo com o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (MCTI 2016). Em 2014 a emissão média era de 829 kg de gás carbônico por tonelada de clínquer produzido (VISED0; PECCHIO, 2019). Sendo que em média essa emissão é de 842 kg CO₂ / ton de clínquer (WBCSD, 2014). A Figura 1 relaciona essas emissões em diferentes países mostrando que os países com maiores índices de emissões se localizam na América do Norte, Ásia e Oceania, e evidenciando a necessidade de se buscar por alternativas mais sustentáveis nesse processo, devido as taxas serem elevadas em relação a cada tonelada de cimento produzido.

Figura 1- Emissões específicas de CO₂.

Fonte: Adaptado Roadmap tecnológico do cimento (2019).

As equações 1 a 6 e a Figura 2 elucidam esses valores de emissão através da fabricação do cimento (desconsiderando adições de gesso, filler, pozolana etc.), na utilização do calcário como matéria-prima e principal fonte de emissão de CO₂ e do coque de petróleo como combustível para descarbonatação do calcário.

Produção de cimento:

1 ton de cimento → 1,2 ton de CaCO₃

1 ton de cimento → 3,3 GJ de energia

Descarbonatação:

CaCO₃ (100 g/mol) → CaO (56 g/mol) + CO₂ (44 g/mol)

Eq. 1

CO₂ → 1,2 ton de CaCO₃

Eq. 2

44 g/mol → 100 g/mol

0,528 ton de CO₂ emitidos

Combustão (coque de petróleo):

Coque de petróleo: 31 GJ/ton

$\frac{3,3}{31} = 0,1$ ton de coque / ton de cimento

Admitindo que o coque é puro carbono

C + O₂ → CO₂ (44 g/mol)

Eq. 3

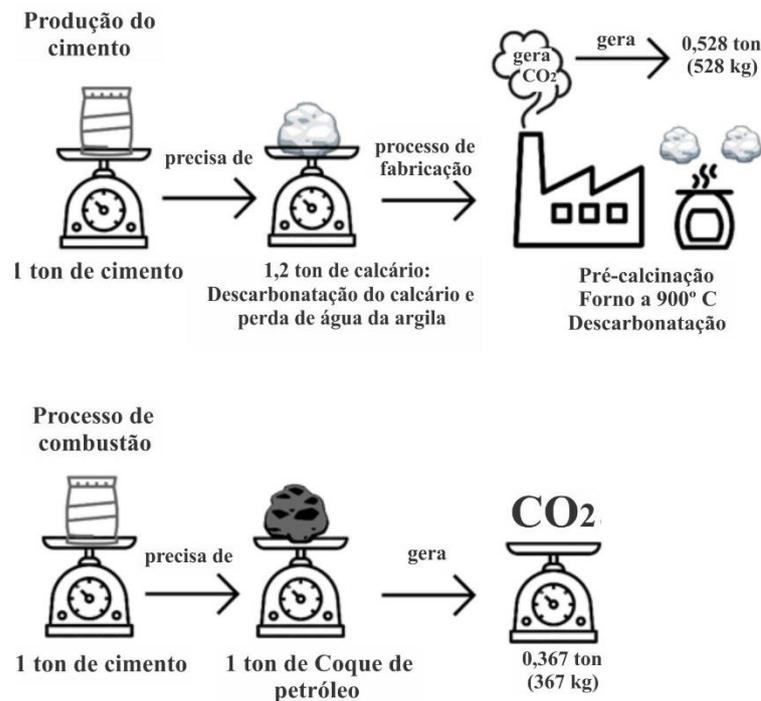
$$\frac{\text{CO}_2}{\text{C}} = \frac{44}{12} = 3,67 \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{CO}_2 \rightarrow 100 \times 3,67 = 367 \text{ kg de CO}_2 \text{ emitidos} \quad \text{Eq. 5}$$

Total de emissões (descarbonatação + combustão):

$$528 \text{ kg de CO}_2 + 367 \text{ kg de CO}_2 = 895 \text{ kg de CO}_2 / \text{ton de cimento} \quad \text{Eq. 6}$$

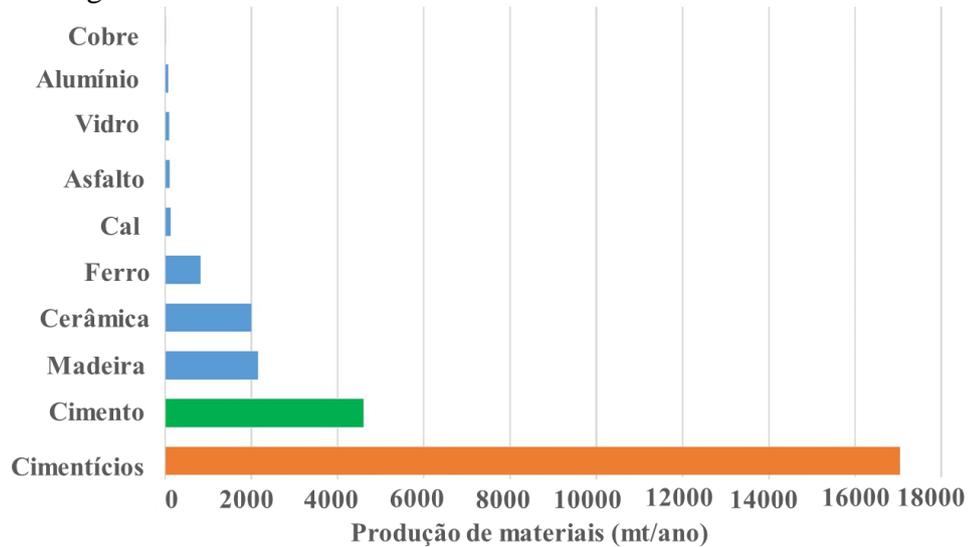
Figura 2 – Quantitativo de emissões de CO₂ na fabricação de cimento.



Fonte: Autoria Própria (2021).

A Figura 3 mostra uma comparação da quantidade de concreto usado na construção civil com outros materiais, como: cerâmica, madeira, ferro e outros. Percebe-se que a quantidade de uso desses materiais nessa comparação é menor, mesmo que eles tenham um apelo sustentável maior que os produtos cimentícios. Porém, esses materiais muitas vezes não substituem os artefatos de cimento Portland. Contudo, há um desafio, esse material é tratado como uma commodity, condicionado a procedimentos rigorosos, e dificulta alterações que atendam às exigências econômicas e ambientais (UN ENVIRONNEMENTE et al. 2018). Os autores afirmam que objetivando atender a demanda da construção de países em desenvolvimento, a fabricação do cimento deve aumentar, porém as emissões de CO₂ também aumentarão a cerca de 260% até 2050 (o ano de referência foi 1990), diante disso, se novas formas de redução das emissões de CO₂ não forem implantadas, a indústria de cimento seria responsável em 2050 por um terço do total das emissões deste poluente no planeta.

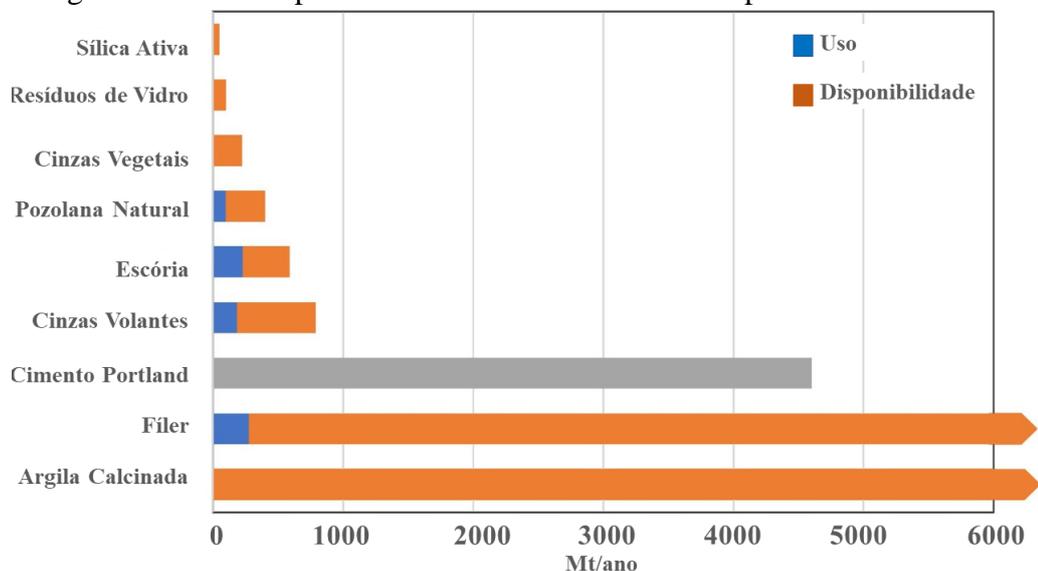
Figura 3 - Consumo estimado de materiais comuns de 2002-2005.



Fonte: Adaptado Un Environment et al. (2018).

O Conselho Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, 2014), a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) (2009) publicaram uma estratégia global visando quatro principais pilares para mitigação do CO₂ na produção do cimento até 2050, sendo eles: matérias-primas e combustíveis alternativos, medidas de eficiência energética, tecnologias inovadoras e emergenciais. A Figura 4 relata acerca da disponibilidade de matérias-primas com características cimentícias e alguns de enchimento (como o filler) comparados com a quantidade de cimento fabricado e mostra que o uso desses materiais é relativamente pequeno no que se diz respeito a sua disponibilidade.

Figura 4 - Uso e disponibilidade estimada de matérias-primas alternativas.

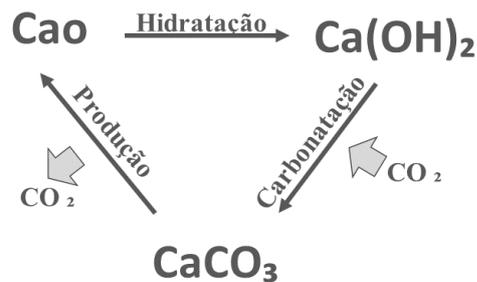


Fonte: Adaptado Un Environment et al. (2018).

Com o objetivo de diminuir a concentração do CO_2 atmosférico há algumas soluções tecnológicas que visam reduzir os impactos das mudanças climáticas, elas propõem o *Carbon Capture and Storage (CCS)* e o *Carbon Capture and Utilization (CCU)*. O CCS elucidada na captura do CO_2 , no transporte e depósito geológico, já o CCU no extravio do CO_2 , o qual iria para a atmosfera, no uso como um elemento em algum processo industrial, porém essas alternativas têm um impacto significativo no custo de fabricação do cimento (UN ENVIRONNEMENTE et al. 2018).

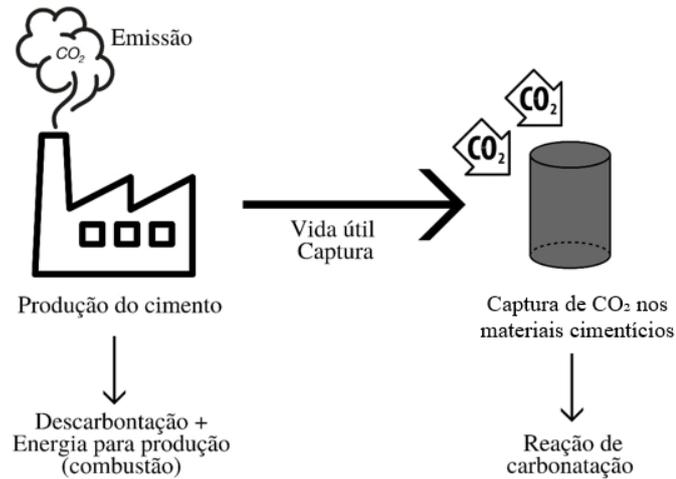
Materiais cimentícios absorvem o gás carbônico da atmosfera de um modo natural de sequestro e armazenamento (PADE; GUIMARES, 2007). O termo “sequestro de carbono” vem sendo comumente empregado no intuito de promover um método eficiente de captura do CO_2 atmosférico. Pesquisas atuais buscam por alternativas de captura do gás carbônico por meio do processo de carbonatação do concreto. As Figuras 5 e 6 demonstram o ciclo do cimento, que o CO_2 emitido na fabricação (na decomposição do calcário: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) pode reagir com os produtos da hidratação do cimento, voltando ao seu estado original: carbonato de cálcio.

Figura 5 - Ciclo do Carbono.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 6 - Captura de CO₂ durante a carbonatação natural do concreto.



Fonte: Autoria Própria (2021).

O Cimento Portland é um dos materiais mais usados mundialmente pela abundância de algumas de suas matérias-primas na crosta terrestre, porém alguns elementos são limitados em sua disposição (UN ENVIRONNEMENTE et al. 2018). Ainda segundo os autores, essa questão expressa uma análise de busca por alternativas que poderiam ser realizadas. A composição dos cimentos é praticamente por óxidos (óxido de silício, alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio e magnésio), os quais, após hidratação possuem características cimentícias. Os mais representativos são os de silício (SiO₂), cálcio (CaO) e alumínio (Al₂O₃) (representando 90% do total de um cimento comum) e os reativos se concentram nos silicatos de cálcio e os aluminatos ou sulfo-aluminatos de cálcio.

O teor de cálcio desses materiais é um ponto importante pelas emissões de CO₂, pois o mesmo advém do calcário (CaCO₃). Na fase de fabricação, primeiramente há a descarbonatação desse elemento (CaCO₃ → CaO + CO₂), sendo uma reação responsável por aproximadamente 60% das emissões de gás carbônico no processo de produção do Cimento Portland padrão. A Tabela 1 relaciona as emissões de CO₂ em cada fase da hidratação do cimento e mostra que são taxas relevantes de emissões, com grandes concentrações devido as suas composições químicas.

Tabela 1 - Compostos de clínquer e emissões de CO₂.

Composto do clínquer	Emissões de CO ₂ (kg/t)
Alita (C ₃ S)	579
Belita (C ₂ S)	512
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	489
Ferro aluminato tetracálcico (C ₄ AF)	362
Cal livre (CaO)	786

Fonte: Adaptado Un Evironmente et al. (2018).

Diante dessa pegada sustentável, diversos autores com o intuito de minimizarem a concentração de CO₂ atmosférico utilizaram de alternativas sustentáveis, como o uso de RCD's (Resíduos da Construção e Demolição) como adição no concreto e analisar a captura do gás carbônico por meio dos processos de carbonatação no interior do artefato (SILVA et al, 2020; MEDEIROS, 2019), carbonatação acelerada (NEVES JUNIOR, 2014), e também a cura por carbonatação em materiais pré-fabricados (EL-HASSAN; SHAO, 2015; FORTUNATO; PARSEKIAN; NEVES, 2018; SHAO; LIN, 2011), verificaram tanto o potencial de captura de cada um dos artefatos, quanto a sua microestrutura analisando as resistências mecânicas à compressão.

A importância de desenvolver inovação surge mediante as preocupações climáticas, as quais vêm sofrendo variações significativas e afetando os seres vivos ao seu redor. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas as taxas de aquecimento futuras se dão em cenários com aumento de 6°C (emissões na mesma pegada atual) e entre 1,5° a 2°C (reduzindo essas emissões). Recomenda reduzir pela metade as emissões mundiais de CO₂ até o ano de 2050. Alguns climatologistas afirmam que o aumento da temperatura média da Terra em 2°C é uma demarcação máxima, ou seja, uma rota sem retorno, significando que as calamidades climáticas se tornariam difíceis de serem controladas (GALLO; VICTOR; LEVIN, 2017; GRASSI et al., 2017; WARRER et al., 2017).

Com alternativas que mitiguem as alterações climáticas oriundas das ações humanas, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e modelos semelhantes do mercado de carbono visam projetos de reflorestamento e florestamento (MOGNON et al., 2017).

Em um plantio com média 1.667 mudas de árvores distribuídas por hectare, com árvores de 3 a 11 anos de idade (com estimativa de 20 anos), o Instituto Totum e pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), da Universidade de São Paulo, juntamente com a Fundação SOS Mata Atlântica, observaram que cada árvore localizada na Mata Atlântica retém a cerca de 163,14 kg de CO₂ (num período de 20 anos). O estudo também mensurou

essa captura nos primórdios da implantação do programa, de 2000 a 2011, no projeto Clichárvore 23.354.266 árvores foram plantadas e analisadas acerca do sequestro de gás carbônico, verificou-se que ao longo desse período a cerca de 1,05 milhões de toneladas desse gás foram sequestradas, aproximadamente 7,27 kg desse gás retido por árvore a cada ano.

Em outro estudo que avaliou 3.842.426 árvores entre 2003 e 2011 (Programa Florestas do Futuro) observando que essa captura foi de 194,23 mil toneladas, equivalendo a 10,11 kg de CO₂ absorvidos por cada árvore por ano. As concentrações de CO₂ absorvidos por cada árvore são relacionadas a fatores climáticos, ao solo, as espécies, qualidade das sementes, manutenção entre outros parâmetros que podem modificar esses valores.

3.2 Bambu: Disposição Geográfica

Um dos materiais que possui muitas vantagens dentro da construção civil é o bambu, caracterizando como um insumo sustentável, renovável e com propriedades mecânicas equiparadas as da madeira (pertencente as angiospermas: dicotiledôneas ou monocotiledôneas). A relevância desse produto se dá por ser um material encontrado em locais de rápido crescimento mundial, visto que em alguns lugares a madeira é um recurso restrito (SHARMA et al., 2015). É uma matéria que tem boa capacidade de armazenar carbono em sua biomassa devido ao seu ligeiro crescimento (LIU; YEN, 2020).

A Figura 7 apresenta a distribuição do bambu ao longo de todo o mundo, indicando uma vasta posição geográfica em boa parte da Ásia (nos países do sul), África (localizados mais centralmente) e em praticamente toda América do Sul, destacando o Brasil. Essa distribuição se estende a 45°30' (norte) e 47° (sul), em latitudes. Ele cresce em ambientes com temperaturas de 8°C a 36°C, nas regiões relativamente chuvosas e quentes (GAION; PASCHOARELLI; PEREIRA, 2005).

Figura 7 - Distribuição mundial do bambu.



Fonte: Adaptado Gaion, Paschoarelli; Pereira (2005).

O bambu pertence à família da Poaceae, dividida na subfamília Bambusoideae, ou em alguns casos à Bambusaceae, constituindo de mais de 50 gêneros e aproximadamente 1300 espécies (LIESE, 1998; SODERSTROM; ELIIS, 1988; MACCLURE, 1996). Caracteriza-se por ser uma planta lenhosa, monocotiledônea, da classe angiosperma (HIDALGO LOPES, 1974). As categorias dos bambus, gigantes e lenhosos, caracterizam-se por gramíneas semelhantes às árvores, com uma vasta pluralidade de gênero, desenvolvem em localidades tropicais e temperadas. Dispõe de um sistema de raízes bem evoluídas e com talos firmes e quase sempre lignificados, proporcionando, assim ótimos atributos físicos e estruturais (LIMA; WILLRICH; FABRO, 2014).

O Brasil expõe a cerca de 200 espécies, sendo, entre as Américas, o que maior expõe esse número (DRUMOND; WIEDMAN, 2017; FELISBERTO; BERALDO; CLERICE, 2017). Dentre as espécies mais encontradas no Brasil, tem-se: *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa vulgaris var. vitata* (bambu-imperial), *Bambusa tuldoides* (bambu-comum), *Guadua angustifolia* (nativos, encontrados na região Amazônica), *Dendrocalamus giganteus* (bambu-gigante) e algumas espécies de *Phyllostachys* (bambu-chinês), *Bambusa Dendrocalamus*, *Gigantochloa*, *Phyllostachys*, *Pseudosasa*, *Sasa* e *Sinoarundinaria* (OSSE, 2006). Elas representam 32% das espécies e 85% dos gêneros encontrados ao longo de toda a América Latina (LONDONO, 1999).

Por ser singular no que se diz respeito a abundância dos ecossistemas florestais, a floresta de bambu difere com relevância das florestas comuns, de árvores de madeira, em relação ao seu desenvolvimento, características e uso (YEN; LEE, 2011; YEN; WANG, 2013; YEN; JI; LEE, 2010). Levantamentos elucidam que há mais de 36 milhões de hectares de florestas de

bambu no mundo (YEN; WANG, 2013; YEN; JI; LEE, 2010; YEN; LEE, 2011; YEN, 2015; YEN, 2016; INBAR, 2015; LI; LIN; YEN, 2016; YUEN; FUNG; ZIEGLER, 2017). Desempenham papel primordial aos ecossistêmicos, com fatores ambientais, econômicos e sociais (YUEN; FUNG; ZIEGLER, 2017; FAO, 2014; YEN; JI; LEE, 2010; YEN, 2015; YEN, 2016; INBAR, 2015; XU et al., 2020).

De acordo com Benavides (2012), os bambuzais minimizam as erosões do solo, retendo as águas, ajustando as correntes hídricas, diminuindo as temperaturas e armazenando carbono no formato de tecido lenhoso, tornando-o um produto promissor em relação a questões ambientais minimizando alguns de seus impactos.

3.3 Armazenamento e Sequestro de Carbono pelo Bambu

As vantagens do bambu são inúmeras, sendo como substituto da madeira ou como uma forma de reflorestamento, mitigando os desmatamentos e degradações ambientais e contribuindo para manter o carbono estocado, sendo alternativas visadas pela Redução de Emissões pelo Desmatamento e Degradação Florestal (REDD) (LOBOVIKOV et al., 2012).

Segundo Delgado (2011) quanto maior é a produtividade (crescimento e desenvolvimento de uma planta), mais biomassa a planta acumula e conseqüentemente maior é a absorção de CO₂ e a quantidade de carbono retirado da atmosfera fica retida na planta (OPRINS, 2006). Oprins (2006) ainda afirma que o bambu produz mais oxigênio que as árvores tradicionais (35% a mais). A Tabela 2 apresentará um comparativo entre 3 tipos de espécies, observando o ciclo da cultura e a produtividade de cada uma delas.

Tabela 2 – Ciclo da cultura e produtividade de espécies.

	Pinus	Eucalipto	Bambu
Ciclo da cultura (anos)	5-25	7-10	2-6
Produtividade (ton/ha.ano)	25-35	30-50	40-60

Fonte: Adaptado Oprins (2006).

A metodologia de sua ceifa se fundamenta no corte seletivo, evidenciando uma colheita ecologicamente correta. Por causa do aquecimento global, as florestas de bambu têm vantagens importantes, porque o crescimento ligeiro do bambu colabora com a captura e absorção do CO₂ da atmosfera de forma eficaz, tornando essa produção útil em termos econômicos e, também ambientais (YEN; WANG, 2013; IPCC, 2007).

Com isso, várias pesquisas dão foco na elevada capacidade das florestas de bambu para a captura do CO₂, essa habilidade de sequestrar o CO₂ está ligado à produtividade,

desenvolvimento e a ceifa (LONDONO, 1999; YEN; LEE, 2011; YEN; WANG, 2013; YEN; JI; LEE, 2010; YEN, 2015).

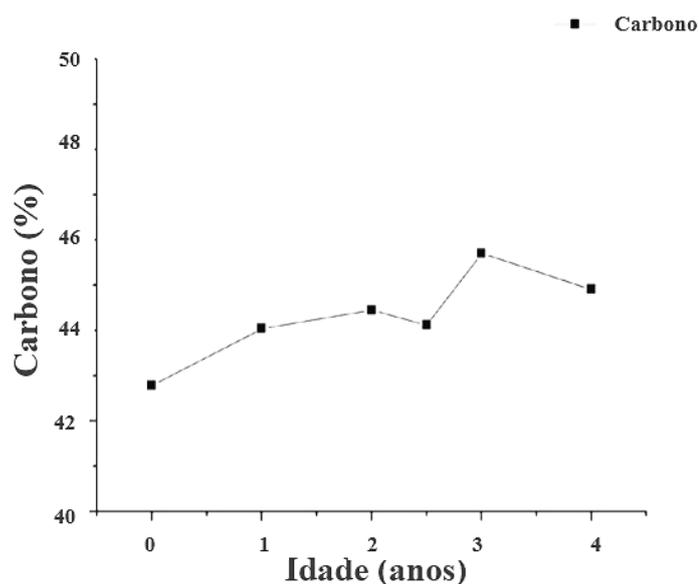
Com o intuito de incentivar o cultivo e a cultura do bambu no Brasil, o governo brasileiro, em 2011, criou a lei Nº 12.484, a qual “Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências”, visando alternativas e pesquisas de técnicas do cultivo do bambu e a sua comercialização (Lei Nº12.484, 2011).

Pesquisas realizadas pela Rede Internacional de Bambu e Rattan (INBAR, 2015), relatam acerca da forma de crescimento, evidenciando que o bambu pode ser um acumulador de carbono efetivo. O crescente desenvolvimento dos artefatos duráveis de bambu garante que esse sistema possa ser considerado um sumidouro de carbono, em breve.

A Ecuador: National Bamboo Strategy 2018-2022 (2018) relata acerca da Agenda de Desenvolvimento Sustentável 2030 (em vigor desde janeiro de 2016), a qual contribui com a adoção de medidas urgentes que combatam as mudanças climáticas e seus efeitos. O bambu tem potencial de oferecer variadas práticas que possam minimizar essa mudança, pois hectare dessas florestas retêm grande quantidade de carbono. De acordo com as espécies e suas condições climáticas, essa estocagem varia entre 94 e 392 toneladas.

A cerca de 50% da biomassa do bambu está relacionada ao estoque de carbono (IPCC, 2007), sendo que sua biomassa média é de 124 Mg ha⁻¹, variando entre 60 a 242 Mg há⁻¹ (NATH; LAL; DAS, 2015). Segundo Delgado (2011) por meio de análise elementar de CHN (carbono, hidrogênio e nitrogênio) avaliou a taxa de carbono constituída ao longo da biomassa do bambu. Encontrou teor de 44, 33% de carbono e 6% de hidrogênio, sendo taxas baixas de nitrogênio. As taxas de carbono giraram a cerca de 42 a 45%. A Figura 8 ilustra esse crescimento, demonstrando que a taxa de carbono permanece constante. O teor de carbono retido está vinculado ao tipo de vegetação, a disposição dos nutrientes e água do meio e a temperatura (DURIGAN, 2004).

Figura 8 - Taxa de carbono ao longo dos anos.



Fonte: Adaptado Delgado (2011).

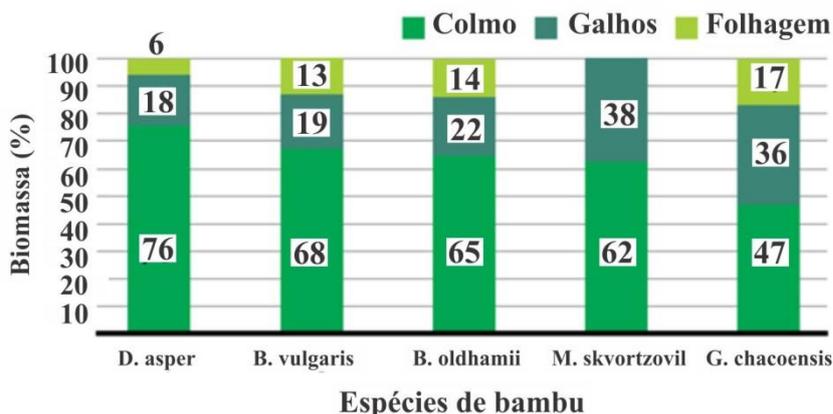
Mogmon et al. (2017), relacionou 5 espécies de bambu e estimou os teores de biomassa de carbono em cada uma delas, verificando também onde a concentração dessa biomassa é maior ao longo de toda a estrutura do bambu, seus resultados estão descritos na Tabela 3 e Figura 9, respectivamente.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas dos resultados dos teores ponderados de carbono.

Espécie	Méd. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)	S	s ²	CV (%)
<i>G.chacoensis</i>	34 42,62	41,70	43,53	0,92	0,84	2,15
<i>M.skvortzovii</i>	34 44,52	43,53	45,52	0,99	0,99	2,23
<i>D. asper</i>	34 46,03	45,06	47,00	0,97	0,94	2,11
<i>B. vulgaris</i>	34 46,15	45,09	47,21	1,06	1,12	2,30
<i>B. oldhamii</i>	34 45,36	44,23	46,48	1,12	1,26	2,48

Fonte: Adaptado Mognon et al. (2017).

Figura 9 - Partição da biomassa seca acima do solo em cinco espécies de bambu em um experimento de cinco anos de idade em Pinhais (PR).

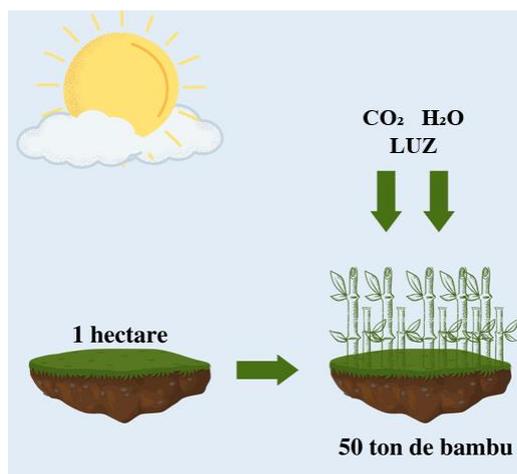


Fonte: Adaptado Mognon et al. (2017).

O sequestro de CO₂ da atmosfera por meio das plantas advém do processo de fotossíntese, o que ocorre na presença de luz, e durante seu crescimento utiliza do carbono e devolve a atmosfera o oxigênio (DELGADO, 2011), nesse processo também ocorre a respiração, absorção de oxigênio (O₂) e liberação de uma certa quantidade de CO₂ para o ambiente (processo intitulado de foto respiração), as plantas C₄ se caracterizam por se ausentarem desse processo, por estocarem em suas fibras o CO₂ que foi dispersado pelas plantas tradicionais (RAVEN, 1997).

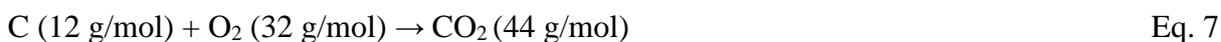
O Bambu é uma planta classificada como C₄ (retém quantidades significativas de carbono) (DELGADO, 2011), conforme Kerbauy (2004), o mecanismo fotossintético de concentração de CO₂ (C₄), fundamenta-se em um ciclo de carboxilação e descarboxilação, com anatomia das folhas singular apresentando duas importantes consequências: O CO₂ se concentra nas células perivasculares da bainha (com perdas por difusão reduzidas), as quais possuem paredes espessas com baixa permeabilidade aos gases e posteriormente, as células do mesófilo (situadas próximas as células da bainha perivascular), são unidas pelos plasmodesmas, possibilitando boa integração para o processo de fotossíntese. Sua eficiência de carboxilação permite a ausência da oxigenase, resultando na não competição entre o O₂ e CO₂, garantindo, assim a eliminação da fotorrespiração (BROWN; BYRD, 1993) e o CO₂ liberado seja capturado novamente pela PEP-case, que possui significativo vínculo com o CO₂ (OGREN, 1984) e conseqüentemente não havendo liberação de CO₂ para a atmosfera (PIMENTEL, 1988). A Figura 10 ilustra esse processo, considerando que 1 hectare equivale a aproximadamente 50 toneladas de bambu.

Figura 10 - Processo de fotossíntese.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Sendo assim, se uma floresta de bambu constituir de 44% de carbono (biomassa) e produzir a cerca de 50 toneladas (em um ano), ao longo de um hectare, isso significa que ela terá potencial de absorção de aproximadamente 22 toneladas de carbono. Cada molécula de carbono retido na planta significa uma molécula CO_2 absorvida, analisando a massa molar de cada um desses elementos (O_2 32 g/mol, C 12g/mol e CO_2 44g/mol) e que 1 tonelada equivale a 1.000.000 g (DELGADO, 2011) evidencia-se que aproximadamente 80 toneladas de CO_2 são capturados. Conforme apresentado pelas equações 7 a 9 e Figura 11.

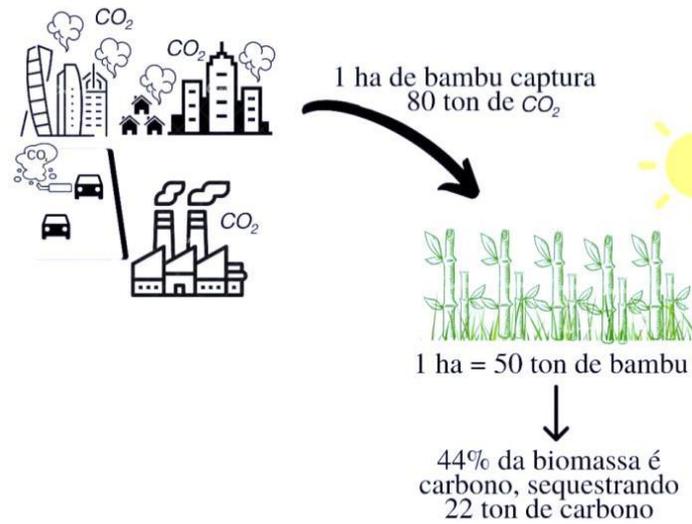


$$\text{Razão molar} \rightarrow \frac{44 \text{ g/mol}}{12 \text{ g/mol}} = 3,66$$



$$\text{Quantidade de ton. de CO}_2 \text{ absorvidos pelo bambu} = 3,66 \times 22 = 80,67 \text{ ton.}$$

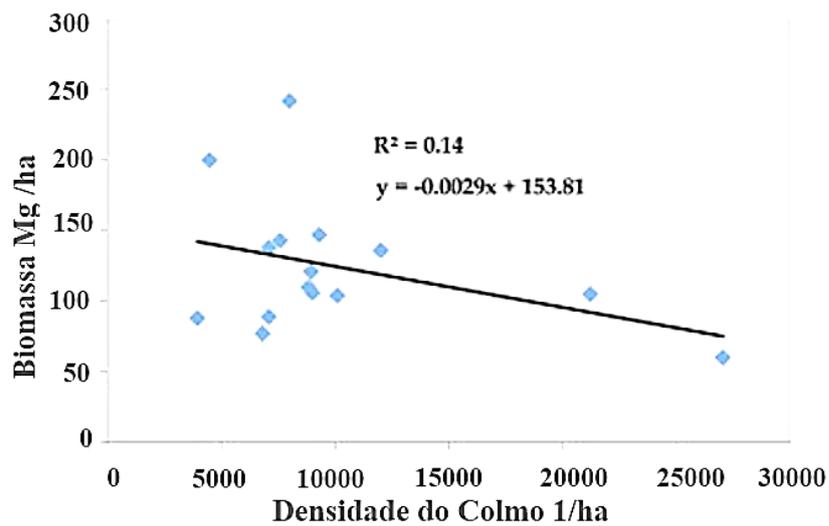
Figura 11 - Captura de CO₂ por meio de uma plantação de bambu.



Fonte: Autoria Própria (2021).

A Figura 12 e a Tabela 4 relacionam a biomassa com a densidade dos colmos em bambus lenhosos e o estoque de biomassa e sequestro de carbono por eles, respectivamente.

Figura 12 - Biomassa e densidade dos bambus lenhosos.



Fonte: Adaptado Nath; Lal; Das (2015).

Tabela 4 - Estoque de biomassa C e taxa de sequestro em bambus lenhosos.

Espécie	Padrão de crescimento	Local	Biomassa (Mg há ⁻¹)	Arm. de biomassa C	Seq. de carbono	Referência
<i>Phyllostachys makinoi</i>	Monopodial	Taiwan	105	50	10	Yen et al., 2010
<i>Phyllostachys heterocycla</i>	Monopodial	Taiwan	89	41	8	Yen e Lee, 2011
<i>Guadua angustifolia</i>	Simpodial	Bolívia	200	100	-	Quiroga et al., 2013
<i>Phyllostachys pubescens</i>	Monopodial	China	88	40	7	Zhang et al., 2014
<i>Bambusa cacharensis</i> , <i>B. vulgaris</i> e <i>B. balcooa</i>	Simpodial	Índia	121	61	-	Nath et al., 2009

Fonte: Adaptado Nath; Lal; Das. (2015).

O percentual médio de armazenamento e sequestro de carbono têm variação de 30 a 121 Mg ha⁻¹ e de 6 a 13 Mg ha⁻¹ anos⁻¹, respectivamente. Vários autores relatam a cerca desse armazenamento, constatando que ele se dá dentro da biomassa lenhosa, que a média em plantações florestais vaiam de 47 a 80 Mg ha⁻¹ (entre altas, médias, baixas e secas e úmidas latitudes) (KLEINHENZ; MIDMORE, 2001; HUNTER, 2002; WINJUN; DIXON; SCHROEDER, 1997). O potencial de sequestro de carbono se dá em produções de bambu com características monopodiais (LIU; YEN, 2020), como observado na Tabela 4.

Diante da técnica de corte seletivo, o armazenamento de carbono e a biomassa no bambu são um tipo de estoque permanente, pela ceifa dos bambus e consequentemente a perda de biomassa e o carbono são compensadas pelos novos colmos fabricados anualmente (NATH; DAS, 2011). As virtudes do bambu são destacadas pelo potencial de utilização do mesmo entre bilhões de pessoas diariamente (YEN; LEE, 2011; YEN; JI; LEE, 2010; NATH; DAS, 2011; NATH; DAS, 2008; LOBOVIKOV et al., 2009; SONG et al., 2011).

A fim de quantificar o fluxo de CO₂ em uma plantação comercial, estudiosos da Universidade Paulista fez essa avaliação por meio de três fases: implantação, adaptação e operação, objetivando a mensuração de estoque de carbono no período dos 25 anos de vida útil deles. Constataram a absorção entre 31.860 e 77.039 kg CO₂/ha ano (GHELMANDI NETTO; GIANNETTE, 2009).

Diante dessa pegada sustentável, o bambu possui características promissoras como sendo um material de construção, permitindo inovações no ramo da indústria civil, pesquisas que aperfeiçoem esse processo e aplicação e dissipação de um novo conceito de construção verde, moderna e incorporando beleza.

3.4 Bambu na Construção Civil

A procura por materiais renováveis tem gerado grandes inovações na construção civil, um dos materiais alternativos que constitui de ótimas propriedades mecânicas, físicas e químicas é o bambu, um vegetal de ligeiro desenvolvimento, renovável, duradouro e que precisa de pouca energia para ser adquirido e baixo custo, tornando-o viável e com elevada habilidade de uso na construção civil (TSUTSUMOTO, 2016). Por ser um material sustentável e com produtividade ecológica e atributos socioeconômicos, pode ser considerado com um produto de eco design (AMERICO, 2009).

O termo “edifício verde” se tornou um conceito relacionado ao desenvolvimento sustentável e com isso a importância de inovações dos materiais ecológicos e de estruturas eco eficientes, a fim de diminuir ou substituir alguns materiais tradicionais de construção (como o aço no concreto), desafiando estudiosos da área de engenharia civil a se desenvolverem nesse tema a partir do século XXI (YAN XIÃO; ZHOU; SHAN, 2020).

O uso do bambu em estruturas melhora o seu nível em termo de valor agregado, aumentando a provisão e sobrevivência dos agricultores e viabilizando a construção sustentável (YAN XIÃO; ZHOU; SHAN, 2020). A substituição do aço por bambu é alvo de pesquisadores (tendo longa história de aplicações) e objetivando as estruturas modernas (BRINK; RUSH, 1966; GHAVAMI, 1995 e RONG, 2008).

O bambu pode ser utilizado em diversos locais e componentes (sendo eles de caráter estrutural ou não), compondo versatilidade atualmente. Possui mais de três mil fins, como nas áreas alimentícias, de energia, artesanato, como material de construção e produto industrial (KUTTIRAJA, et al., 2013; LIU et al., 2016).

Na construção civil é utilizado na fabricação de tesouras, pilares, vigas, lajes como reforço de concreto e, também em placas de régua (traçado) (DELGADO, 2011). Compondo seu uso em solo-cimento, argamassa, gesso e concreto (WILZA, 2002).

Arquitetonicamente dizendo, tem ampla aplicabilidade, compondo beleza, modernidade e caráter sustentável as edificações, as Figuras 13a, 13b e 13c demonstram a multifuncionalidade do bambu, diversamente utilizado em várias localidades do mundo.

Figura 13 - Aplicações do bambu: a) Aeroporto Internacional de Barajás (Madri – Espanha). b) Fundação ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives), para a Expo 2000 (Hannover - Alemanha). c) Catedral Alternativa Nuestra Señora de La Pobreza (Colômbia).



Fonte: Tsutsumoto (2016).

A Figura 13.a apresenta uma cobertura de bambu com aproximadamente 200.000 m², a estrutura foi projetada para transparecer aos passageiros desse aeroporto calma, leveza e tranquilidade. Já as Figuras 13.b e 13.c são projetos do arquiteto Simón Vélez, chamando a atenção pelos seus detalhes e ornamentos arquitetônicos (TSUTSUMOTO, 2016).

Alguns pesquisadores vêm desenvolvendo estudos acerca de substituir o aço de alguns elementos estruturais pelo bambu, visto que o bambu apresenta resistências a tração equiparadas ao do aço (200 MPa para o bambu e 240 MPa para o aço), sendo o bambu um material mais econômico (reduzindo em aproximadamente 30 no custo final) e sustentável no que se diz respeito a essa comparação (REDE SOCIAL DO BAMBU).

Objetivando comprovar algumas características do bambu em relação a eficiência, resistências mecânicas, estética e boa conformação, estudiosos da UNESP de Bauru (SP), desenvolveram um artefato de bambu laminado colado (GAION; PASCHOARELLI; PEREIRA, 2005). A Figura 14 apresenta essas inovações.

Figura 14 - Artefato desenvolvido com bambu laminado colado.



Fonte: Gaion; Paschoarelli; Pereira (2005).

O bambu possui excelentes propriedades mecânicas sendo comparados a madeira maciça e indicado em diversas aplicações estruturas na engenharia, dá versatilidade as construções, compondo leveza, beleza, economia e resistência.

Em comparação com algumas espécies de madeiras comerciais, o bambu apresenta propriedades mecânicas semelhantes ou superiores, oferecendo capacidade de processamento como um suplente da madeira (principalmente as raras). Resistência mecânica e tenacidade são vitais para os compostos e materiais estruturais, muitos dos materiais resistentes costumam ser facilmente fraturáveis (CHEN et al., 2020). Segundo Ritchie (2011), na grande maioria dos insumos, as propriedades de tenacidade e resistência são exclusivas. Essa propriedade é considerada como um compromisso (uma combinação entre a resistência e a ductilidade). Pode-se considerar o bambu como um insumo natural com alta resistência e ductilidade, pontos cruciais no que diz respeito as utilizações estruturais (YU et al., 2011).

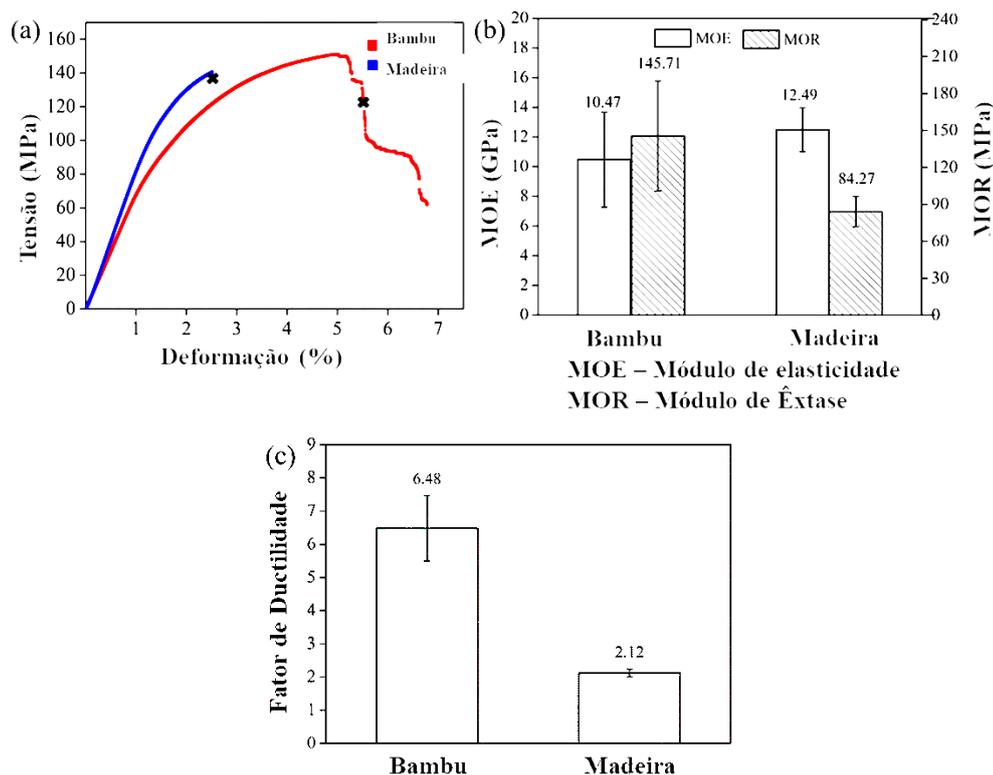
De acordo com Liese (1998) e Lopez (2003) as particularidades do bambu (físicas e mecânicas), relacionam-se devido a sua química e anatomia, um fator importante e essencial nessas propriedades são as alternâncias nas taxas de parênquima e fibra (nos sentidos transversal e longitudinal), e acerca da dimensão da parede nos extremos das hastes o que segundo Salamon (2009) é primordial considerar essa variância ao longo de todo o elemento, podendo afetar na utilização desse insumo.

O bambu tem uma estrutura externa formada por: rizomas, colmos, galhos e folhas. Em seu desenvolvimento, os colmos se formam alternadamente de nós e entrenós, sendo que o nó possui uma proteção que é a folha caulinar. Sua constituição é basicamente por fibras, vasos e condutores de seiva (distribuídos ao longo da seção transversal), os quais são envoltos pelo parênquima (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

As propriedades mecânicas do bambu (resistência) são porque suas fibras, que compõem a cerca de 40 a 90% externamente e 15 a 30% internamente (LIMA JUNIOR; WILLRICH; FABRO, 2005). Anatomicamente, de acordo com Liese (1998) o bambu se constitui por fibras, células parenquimosas e vasos (40%, 50% e 10%, respectivamente). Essas fibras são concentradas em pontos próximos a casca, dando resistência ao material, principalmente às cargas oriundas do vento, seu grupo de vasos (que constituem nos tecidos que transportam as seivas e fibras), são os responsáveis pela resistência mecânica, sendo imergidas em uma matriz parenquimática (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

Uma excelente resistência mecânica e ductilidade viabiliza que o bambu e seus subprodutos, tornam-se utilizáveis em situações em que o produto irá sofrer grande deformação. Chen et al. (2020) analisa o comportamento, a deformação de flexão e a fratura em bambus, relacionando-os com algumas madeiras, conforme a Figura 15, percebe-se que as figuras 15a e 15b que o bambu deforma bem mais que a madeira, antes de sofrer ruptura (isso é devido a sua morfologia, microestrutura, densidade e arranjo), e na figura 15c o fator de ductilidade. Ela apresenta a comparação entre o bambu de espécie mossô e a madeira, comercialmente chamada teca, cujo nome científico é *Tectona grandis*.

Figura 15 - a) Relação tensão-deformação típica de tiras de bambu e madeira de teca; b) MOE e MOR de bambu e madeira; c) Fator de ductilidade.



Fonte: Chen et al. (2020).

Os projetos e execução com bambu são similares aos da madeira com interligação das partes e qualidade relacionada aos detalhes como as prevenções de fungos, insetos e infiltrações (o que evidencia bom tratamento antes da sua utilização). Porém, para sua aplicabilidade é necessário conhecer e comparar as propriedades mecânicas das diferentes espécies, objetivando os fins adequados (RUSCH et al., 2020). A Tabela 5 mostra alguns valores referentes as propriedades mecânicas de variados bambus segundo um estudo bibliográfico realizado por Rusch et al. (2020), evidenciando diversos autores.

Tabela 5 - Resistência mecânica de algumas espécies de bambu.

Espécie	Resistência a tração (MPa)	Resistência a compressão (MPa)	Flexão Estática (MPa)	Resistência ao cisalhamento	Referência
<i>Bambusa arundinacea</i>	297	34	76	9,5	Pereira (2001)
<i>Bambusa multiplex</i>	103	27	75	56	Pereira (2001; 2012)
<i>Bambusa nutans</i>	132	47	60	-	Carbonari et al. (2017)
<i>Bambusa oldhami</i>	16	72	-	-	Carbonari et al. (2017)
<i>Bambusa tulda</i>	160	75	-	-	Carbonari et al. (2017)
<i>Bambusa vulgaris</i>	82	27	78	41	Pereira (2001; 2012)
<i>Bambusa vulgaris Scharad</i>	149	46	124	8,5	Pereira (2012)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	135	40	108	46	Salgado et al. (1994)
<i>Guadua angustifolia</i>	87	29	-	-	Ghavami e Marinho (2005)
<i>Guadua atter</i>	288	31	97	8,2	Pereira (2001; 2012)
<i>Guadua superba</i>	130	42	102	48	Pereira (2001)
<i>Guadua verticillata</i>	237	29	82	8	Pereira (2001; 2012)
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	120	42	-	-	Pereira (2001)
<i>Phyllostachys pubescens</i>	163	64	159	-	Berndsen (2008)

Fonte: Adaptado de Rusch et al. (2020).

Na Tabela 5, destacam-se as espécies *Bambusa arundinacea*, *Bambusa multiplex*, *Bambusa nutans*, *Bambusa vulgaris* Scharad, *Dendrocalamus giganteus*, *Guadua atter*, *Guadua superba*, *Guadua verticillata* e *Phyllostachys pubescens*, cujos valores de resistência a tração apresentam entre 130 e 297 MPa, em menor performance mecânica a espécie *Bambusa oldhami* com apenas 16 MP. As resistências a compressão apresentaram entre 27 a 75 MPa, com boas resistências ao cisalhamento da espécie *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua superba*.

A excelente propriedade mecânica do bambu sujeita-o a aplicações diversas podendo ser substituído em várias partes da construção civil. Diante de uma pegada sustentável, o bambu pode ser aplicado como um elemento de enchimento de lajes pré-fabricadas, sendo um substituto promissor da lajota cerâmica e do EPS, proporcionando ao sistema melhor disposição construtiva, economia e caráter ambiental. A indústria cerâmica no seu processo de produção gera impactos ambientais em todo o seu entorno, degradando-o e retirando mais recursos naturais ao invés de obter alternativas que minimizem esse procedimento.

3.5 Indústria Cerâmica e seus Impactos

Segundo Macedo (1998), os minerais não metálicos correspondem a 31,01% da produção mineral no Brasil, as argilas contemplam 8,25 % desse setor, ficando atrás apenas das pedras britadas, calcário, areia e cascalho. A argila é comumente utilizada na indústria de cerâmica vermelha e estrutural, como produto principal na fabricação de tijolos, blocos, tubos e ladrilhos (CABRAL JUNIOR et al., 2005).

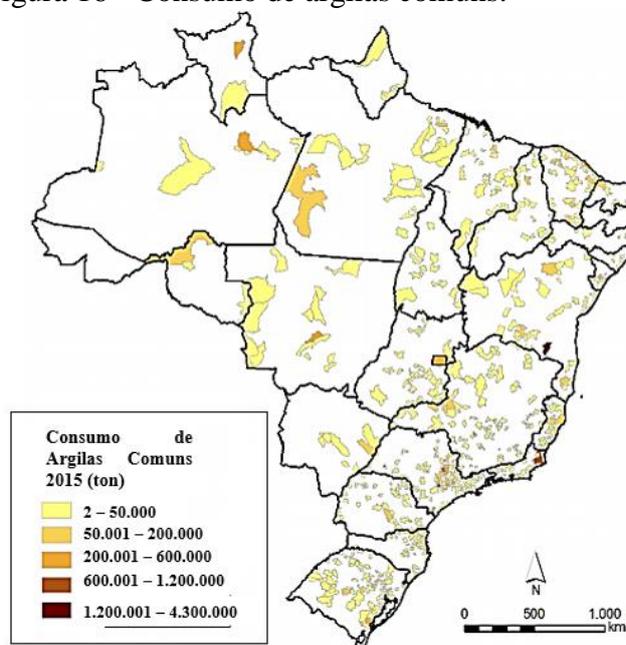
A indústria cerâmica obteve elevado crescimento na necessidade de se substituir madeira por tijolos e telhas, em decorrência de razões sanitárias e a falta dessa matéria-prima. Com isso, mudanças no entorno de centros urbanos aconteceram com a implantação das indústrias cerâmicas, de portes diversos e com ampla gama de materiais a serem fabricados, tais como: revestimento, louças, materiais refratários e abrasivos (BACCELLI JUNIOR, 2010).

A constante urbanização das cidades gera cada vez mais consumo de materiais e conseqüentemente desafios são impostos a esses setores para promover alternativas os favoreçam e tenham caráter sustentável. A produção de insumos fabricados pela indústria cerâmica é estimada em 130 milhões de toneladas por ano, quantificando em uma variação de 0,5% a 30% de resíduos gerados (a variação consiste devido a alguns fatores, os quais são mencionados na literatura) (HOLANDA; SILVA, 2011; VIEIRA, 2005). De acordo com Zhang (2013) e Raut; Raleganaonkar; Mandavgane (2013), a produção de blocos cerâmicos

anualmente é de aproximadamente 1391 bilhões de unidades, demanda que cotidianamente têm-se a previsão de aumento.

Em 2008, segundo dados do IBGE, de acordo com a “Fabricação de Produtos Cerâmicos Não Refratários para Uso Estrutural na Construção, excluídas as palavras pisos e azulejos da razão social” quantificou o consumo de toneladas/mês de argila em aproximadamente 6.903 empresas, elucidando 7.800.000 ton/mês para a produção de blocos e 2.500.000 ton/mês na produção de telhas cerâmicas (ANICER, 2020). Segundo dados Ministério de Minas e Energia em 2015, o consumo de argila variou de 2 a 4,3 milhões de toneladas, destacando os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e o sul da Bahia, a Figura 16 demonstra o consumo de argilas em todo território Nacional.

Figura 16 - Consumo de argilas comuns.



Fonte: Brasil (2016).

A produção industrial causa danos ambientais, principalmente, à medida que se utiliza de matéria-prima e recursos não renováveis, o que ocasiona a escassez tanto temporária quanto permanente (HOLANDA; SILVA, 2011; VIEIRA, 2005).

Como exemplo tem a fabricação de cerâmica vermelha, a qual tem como matéria principal a argila (caracterizada por ser recurso natural com ampla extensão na natureza, porém finito, originando: tijolos, tubos, pisos, louças, isoladores, telhas, dentre outros (HOLANDA; SILVA; VIEIRA, 2011) e a lenha como fonte de energia. essa produção e extração gera impactos ao meio físico e sociedade nas proximidades, causando transformações no entorno de todo esse setor, como geração de empregos, poluição do ar e do meio ambiente entre

outros aspectos negativos (DIAS et al., 1999; LEITE, 2013; SÁNCHEZ, 2008), além de se destacar por ser responsável pelo desflorestamento das zonas, as quais se inserem (RODRIGUES et al., 2010) e degradação do solo (KUASOSKI et al., 2020).

Cabral Júnior et al. (2010) relata que os problemas mais acentuados em relação ao fornecimento de mineral estão relacionados a escassez de argila, a falta de qualidade dos materiais, e a ausência de recursos tecnológicos. Essa escassez é uma limitação no setor cerâmico para o seu desenvolvimento, intimidando à amplificação do processo produtivo e promovendo o fechamento das fábricas (CABRAL JUNIOR et al., 2012).

Segundo Uygunoglu (2012), nenhum recurso natural possui de reservas infinitas, fazendo com que a terra não suporte a elevada taxa de crescimento de exploração. Em alguns países a fabricação de blocos cerâmicos já foi limitada, pela falta de matéria-prima (argila) em vários locais do mundo (CHEN et al., 2011). De acordo com *Committee Chinese Economic Trade* (2001), na China, no intuito de desenvolver materiais de construção ecológicos e proteger as reservas de argila, o uso de tijolos fabricados com argila está proibido, incentivando a fabricação desse produto por meio de resíduos.

No processo de fabricação das cerâmicas, há necessidade de muita energia para a produção do seu produto, as quais oriundas da queima da lenha, eletricidade, combustíveis (GLP, resíduos de biomassa e óleo diesel) e o gás natural (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010; LV et al., 2019). Segundo Hansen; Seo; Kulav (2010), a queima dos combustíveis como fontes de energia dos atomizados e fornos, além dos insumos e do transporte são os fatores que mais influenciam negativamente no meio ambiente, no que diz respeito a indústria cerâmica. Khan et al (2019) ressalta que os fornos apresentam maior porcentagem de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa principalmente na fabricação de tijolos cerâmicos, a qual cresce mundialmente.

No que tange as emissões de gases formadores do efeito estufa, tem-se que são constituídos de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), cloro (Cl_2), amônia (NH_3), dióxido de enxofre (SO_2), óxido de nitrogênio (NO), cianeto de hidrogênio (HCN) e flúor (F) (KADIR; MOHAJERNAI, 2015; TOLEDO et al., 2004; UKWATTA et al., 2018). A difusão de CO_2 nas indústrias de cerâmica é relacionada a taxa de carbonato (CO_3) que está inserido em alguns insumos como a argila e a marga (comumente usados para produção de elementos de construção de caráter estruturais), quando o percentual desses elementos à base de carbonato são maiores que 20% podem ocasionar em taxas de emissões de CO_2 elevadas durante a queima dos produtos (GONZALEZ et al., 2011). Esse percentual de emissões na decomposição dos carbonatos é relacionado a composição das matérias-primas, sendo de 62

kg CO₂ / ton em materiais para ladrilhos, 15 kg CO₂ / ton para azulejos e 1 kg CO₂ / ton para os porcelanatos (MEZQUITA; MONFORT; ZAERA, 2009).

Em relação as emissões de dióxido de carbono liberadas por meio do processo de queima são provenientes da combustão de gás natural, aproximadamente de 248–271 kg CO₂ / ton de produtos queimados (GONZALEZ et al., 2011).

Costa (2012) através da mensuração de emissões de CO₂ na produção de diversos materiais empregados na construção civil (setor de transporte, de ferro, cimento, produção de cal, vidro, madeira e alumínio), quantificou os valores médios dessas emissões no setor cerâmico (fabricação de tijolos, telhas e revestimentos), através da extração de matéria-prima, transporte, processamento e reações químicas (sem considerar as perdas ocasionadas nas construções), seus resultados estão ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Taxas de emissões de CO₂ no setor cerâmico.

Identificação	ton CO₂/ton cerâmica
Produção total (ton)	153.108.000
Fator de emissão do uso de energia	0,0583
Fator de emissão da queima de material carbonáceo	0,0326
Fator de emissão do transporte de revestimento cerâmico	0,0965
Fator de emissão do transporte de telhas e tijolos	0,0201
Fator de emissão do setor de revestimento cerâmico (FEP)	0,1873
Fator de emissão do setor cerâmico de telhas e tijolos (FEP)	0,1110

Fonte: Costa. (2012).

Seye (2003) na análise do ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural quantificou as emissões dos gases responsáveis pelo efeito estufa na fabricação de um milheiro de tijolos, constatando que a formatação e a queima são os principais processos de fonte de emissão de CO₂. O gás metano (CH₄) emitido é derivado da extração da argila (pela queima do óleo diesel), sendo responsável por 37,2 kg de CH₄ de todo metano liberado. A Tabela 7 apresenta o total dessas emissões, segundo o autor.

Tabela 7 - Planilha de inventário da análise de ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural em relação a um milheiro de tijolo.

Contribuição	Unidade	Plantio de Capim	Extração da argila	Transporte rodoviário	Produção de tijolo	Total
Energia						
Energia	GJ	0,044	1,046	0,667	1,822	3,58
Emissões para a atmosfera						
CO ₂	kg	24,02	61,75	38,28	269,20	393,15
N ₂ O	kg	64,80	-	1,68*10 ⁻³	0,08	64,88
CH ₄	kg	0,28	37,2	1,20*10 ⁻³	0,59	38,08
SO ₂	kg	-	0,02	-	1,25	1,27
CO	kg	0,33	0,39	7,32*10 ⁻²	79,07	79,79
NO _x	kg	0,26	0,96	8,04*10 ⁻²	1,97	3,27
Partículas	kg	0,065	0,15	2,88*10 ⁻²	0,99	1,23
NH ₃	kg	19,60	-	-	-	19,6

Fonte: Adaptada Seye. (2003).

A preocupação acerca das emissões de CO₂ em cada setor da construção civil se dá pelo nível do aquecimento global, o qual à medida que for aumentando ocasiona calamidades que podem ser incontroláveis. Visar alternativas que minimizem essas emissões vêm sendo uma preocupação mundial. O setor cerâmico tem significativa taxa de emissões, além de causar vários impactos no seu entorno, havendo a necessidade de explorar meios que otimizem esse processo.

Em 2011 o Inventário de Emissões Antrópicas de Gases do Efeito Estufa de São Paulo, estimou as taxas de emissões do CO₂ no processo de queima de combustíveis fósseis entre 1990 e 2008 em vários setores (industriais, transportes, dentre outros), dentre eles se encontra o setor cerâmico (CETESB, 2011). A Tabela 8 apresentará os resultados desse relatório, evidenciando o aumento dessas emissões ao longo dos anos, pela crescente produção desses materiais, concluindo que queima de combustíveis fósseis acarreta grandes prejuízos ambientais.

Tabela 8 - Emissões de CO₂ no setor cerâmico (GgCO₂).

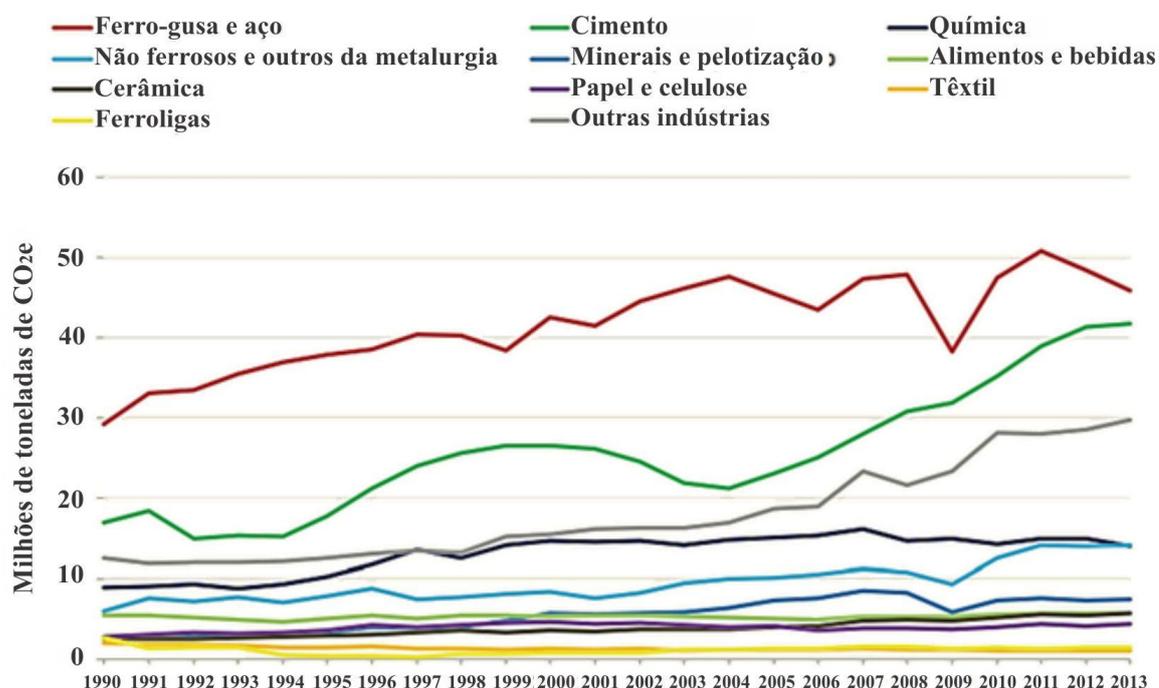
Setor/Ano	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Cerâmico	514	570	635	719	762	841	879	989	732	968
Setor/Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Cerâmico	952	946	1150	1141	1138	1374	1431	1541	1642	

Fonte: CETESB. (2011).

Analisando o setor industrial e seus impactos ao meio ambiente principalmente em relação a emissão de gases do efeito estufa, de 1990 a 2013 houve quantificação dessas emissões no

Brasil, que foi relatada pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) em 2015. A Figura 17 demonstra que o setor industrial é um dos principais responsáveis pela liberação de gases poluentes e tóxicos, destaca-se no gráfico a produção de aço e ferro, cimento, a indústria química, o setor metalúrgico e a indústria cerâmica, apresentam crescimento no decorrer dos anos em análise.

Figura 17 - Emissões de Gases do Efeito Estufa no setor industrial.



Fonte: Documento de Análise (IEMA) (2015).

De acordo com o Inventário de Emissões de Gases do Efeito Estufa do estado do Rio de Janeiro (2015) a indústria cerâmica emitiu aproximadamente 51,5 Gg CO₂e, sendo considerada alta emissão do Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU), ficando abaixo apenas da indústria de cimento, cal e vidro, setores analisados por suas altas concentrações de emissões de gases poluentes.

De acordo com um estudo comparativo das emissões de carbono do ciclo de vida e energia incorporada entre tijolos secos ao sol e tijolos de argila cozidos e através de dados locais de um estudo de caso realizado em Dakhla Oasis, no Deserto Ocidental do Egito, o *Mazout* (resíduo de óleo) ou diesel é utilizado como combustível, significando que a cerca de 205 litros são queimados por 1000 tijolos, ocasionando em 0,536 kg de CO₂ por litro. Além da queima, têm-se o transporte da matéria-prima e a extração dela, processos que também emitem CO₂ para a atmosfera. Os autores exemplificam que para produzir 1000 tijolos, a energia para extração de matéria-prima, processamento, fabricação e entrega de material no

local de construção é de 4250 MJ. As emissões de carbono calculadas foram de 5502 kg CO₂e (DABAIEH et al., 2020).

Além dos elementos cerâmicos usados como enchimento das lajes pré-fabricadas, tem-se também os EPS (poliestireno expansivo), caracterizados por dar leveza a todo esse sistema. Este material, porém, não é um material biodegradável, levando anos para se decompor.

3.6 EPS: Poliestireno Expansivo

Segundo Oliveira (2013), o EPS é um dos materiais de construção mais usados, por sua versatilidade, baixa densidade, ser um isolante térmico-acústico e ser econômico, reduzindo custos e tempo em projetos. O autor relata que o EPS é um plástico oriundo da polimerização do estireno em água, o agente expansão consiste num hidrocarboneto, que degrada pela reação fotoquímica (causada por raios solares) e não interfere no meio ambiente.

Obtém resistência ao envelhecimento, mantendo-se suas propriedades inalteradas ao longo de seu ciclo de vida. Sua resistência a decomposição se dá devido aos grupos fenil e as ligações C-C simples (OLIVEIRA, 2013) contribuindo, assim com impactos ambientais negativos, como poluição visual e efeitos na vida selvagem como redução da eficiência alimentar e ingestão (DAVIS, 2013). Alguns autores estimam a degradação em 50 anos (TESSARI, 2006) e 150 anos (KUMAYAMA, 2014; OLIVEIRA, 2013; SCHICOSKI, 2008).

Milling; Mawsha; Martin (2020) descreve o EPS como um produto fabricado a partir de grânulos expansíveis de poliestireno (espuma). É um material não biodegradável, e que gera impactos negativos ambientalmente, além de ser volumoso, é previsto que sua produção duplique de 2013 para 2020 passando de 17,5 milhões de toneladas para 35 milhões de toneladas, dados relacionados a *Earth Friendly Building Materials, EPS Recycling* (2013).

Conforme Ergut; Levendis; Carlson (2007), ocasionam em altas taxas de volume e resíduos municipais, gerando problemas em aterros, pois segundo Schicoski (2008) gera gastos públicos (com novos) e reduz a vida útil deles. Quando são descartados de modo impróprio, que acontece na maioria das vezes, acarreta no entupimento de redes de drenagem, infertilidade das terras no setor agrícola (pois é impermeável e causa danos ao solo, impedindo a penetração da água) nos rios e mares pode causar confusão aos animais, pois podem achar que são alimentos, induzidas inundações, mortalidade da vida marinha, o que contradiz o conceito de sustentabilidade, e sugere que a melhor solução para esse material é a reciclagem (KUMAYAMA, 2014; MILLING; MAWSHA; MARTIN, 2020 e SAHEED et al., 2020), ou seja, não usar como um insumo primário, mas reutilizado.

A queima também não é recomendável, na combustão, a cerca de 57 subprodutos químicos são emitidos, um exemplo é o estireno, gás tóxico e eventualmente cancerígeno, conforme menciona *Earth Resource Foundation, Polystyrene Foam Report* (2015). Ainda relatam que a fabricação do poliestireno além de poluir o ar gera resíduos sólidos e líquidos em quantidades significativas, os hidrocarbonetos utilizados na produção do EPS (Poliestireno expandido) são liberados ao ar, ao nível do solo e associados aos óxidos de nitrogênio e raios solares, geram o ozônio troposférico, o qual é caracterizado por ser um poluente grave.

Hammond; Jones (2011), afirmam que o fator de emissões de CO₂ do isopor equivalem a 3,26 kg CO₂/kg de material produzido. Conforme Cruz (CRUZ, 2015), por meio da análise de emissões de gases do efeito estufa (GEE) no processo de fabricação e pelo potencial de aquecimento global no entorno de 100 anos (IPCC, 2006; 2013), evidenciou o total de 130, 24 MJ kg/kg de EPS e 6,64 kg de CO₂/kg de EPS, avaliando a produção da resina, produção do EPS, uso, descarte e transporte durante todo o ciclo de vida.

Em sua combustão, grande quantidade de fuligem é gerada e, também os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), os quais trazem riscos graves a saúde. O Poliestireno é responsável por 22% do peso total de todos os plásticos (DURLAK et al., 1998), sua incineração produz mais resíduos e gases que o restante dos outros plásticos, principalmente diante da presença dos anéis aromáticos em sua estrutura química (PANAGIOTOU; LEVENDIS, 1994; 1998; PANAGIOTOU et al., 1996). Libera uma junção de hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH's), conhecidos como carcinógenos (ZHOU et al., 2010), como o NO₂, SO₂ e CO₂ causando mudanças climáticas. Em grande parte dos países desenvolvidos, a queima desses materiais é uma realidade comum, em altas temperaturas gera principalmente o CO₂, hidrocarbonetos voláteis, água e calor, a 900°C ocasiona 65% desses gases e 35% de resíduos (fuligem), com redução de apenas 1% do produto de origem (DURLAK et al., 1998).

Na construção com o desenvolvimento de materiais e técnicas construtivas, visa-se multifuncionalidades das estruturas, sendo mais leves, resistentes e que atendam às exigências das normas, do usuário com economia, segurança e beleza. Uma alternativa que vem se destacando são as lajes pré-fabricadas, economizando tempo, mão de obra, formas e escoras e garantindo assim a segurança e facilidade de execução.

3.7 Lajes Pré-Fabricadas

Por meio de transformação, a construção civil vem modificando os métodos construtivos tradicionais por técnicas mais eficientes (AZMAN et al., 2011; MUGARED et al., 2019;

NAWI et al., 2014). De acordo com Mugahed e Amran (2016) essa nova técnica se caracteriza como um sistema industrializado de construção (IBS), Aksoylu e Sezer (2018) relata que acerca da fabricação desses elementos, podendo ser *in loco* ou fora do local, o concreto é colocado nas formas e submetidos a cura sob condições ambientais, após esse procedimento os pré-moldados são deslocados para o local de uso (AZMAN; AHAMAD; WAN HUSIN, 2012).

O surgimento das lajes treliçadas se deu após a segunda guerra mundial, tendo vasta utilização na Europa, o que colaborou para a reconstrução dos países pós-guerra (MUNIZ, 1991). As lajes treliçadas são comumente empregadas em obras de pequeno e médio porte em decorrência de suas vantagens construtivas, tais como: fabricação, manuseio e transporte, além da economia com formas, escoramentos, consumo de materiais, ocasionando em menor peso próprio o que conseqüentemente alivia as cargas nas fundações (CUNHA, 2012).

Devido a crescente geração de resíduos que são ocasionados pela construção civil, visam maneiras de se desenvolver sustentavelmente por meio de uma construção eco eficiente, baseando-se no uso de lajes de concreto pré-moldadas (SHEN; TAM; LI, 2009). Os métodos de minimizarem os resíduos de construção dão foco em tecnologias avançadas, tais como as formas, andaimes de aço, os painéis de repartição (*drywall*), além dos concretos pré-moldados (CHEN; LI; WONG, 2000; POON et al., 2000; POON; YU; NG, 2001).

Segundo Vargas et al. (2014), a estrutura de uma laje é responsável pela maior taxa de carga total e volume de uma estrutura, seu peso próprio varia de 40 a 60% do total da edificação, com isso, ao reduzir seu peso próprio no entorno de 10%, tem-se uma otimização da estrutura em uma redução de 5% de sua carga total (YARDIM et al., 2013).

As propriedades mais relevantes e analisadas nas lajes pré-moldadas são resistência mecânica na flexão e rigidez, as quais se baseiam na aderência entre o concreto e o aço e em suas resistências individuais (BS EN 15037-1, 2008).

Mediante a esses parâmetros de resistência mecânica e peso próprio dos elementos estruturais, reduzir a densidade das lajes tem caráter promissor, de acordo com Vargas et al. (2014), essa alternativa de redução traz benefícios econômicos e em relação ao consumo de materiais de construção, ou seja, essa leveza estrutural de um elemento que ocupa grande parte da edificação ocasiona menores cargas. Reduzir o peso próprio dos materiais otimiza a construção, ou seja, não necessita de máquinas de transporte no local (guindastes e outros), evidenciando na diminuição dos custos da construção (THANOON et al., 2010).

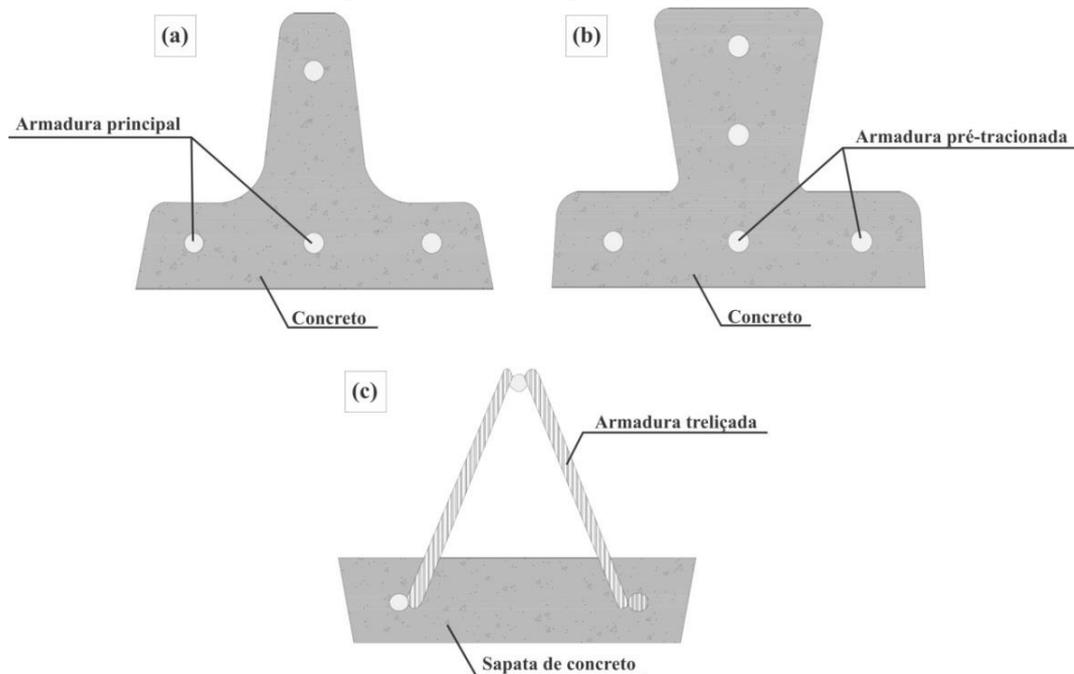
Carvalho e Figueiredo Filho (2004), lista algumas das vantagens do uso das lajes pré-moldadas de vigotas treliçadas relacionando com as maciças, são elas: dispensam uso de

formas (seus elementos cumprem esse papel), reduzem o número de escoras (devido sua disposição construtiva), além do menor peso próprio.

3.7.1 Vigotas Pré-Moldadas

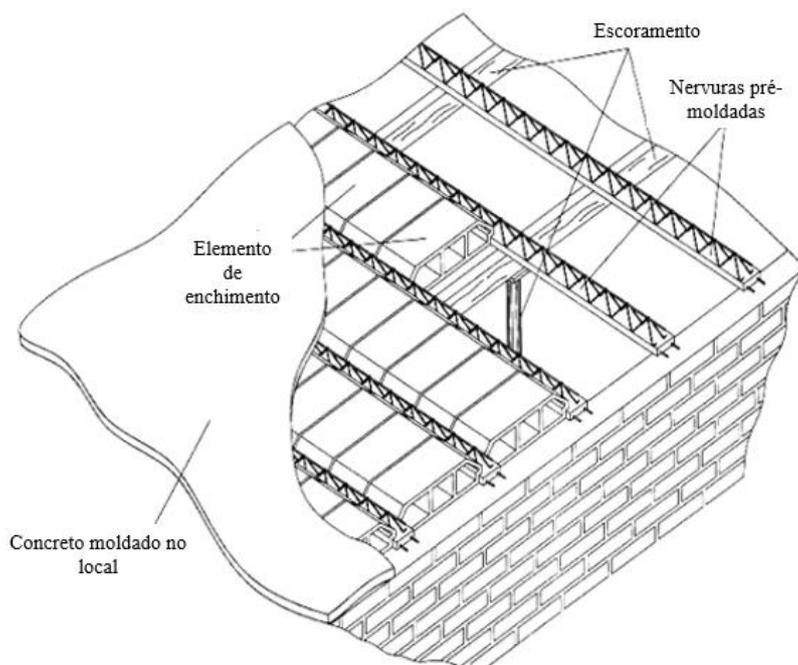
A norma elucida cinco tipos de elementos pré-moldados estruturais, sendo eles: vigota com armadura simples ou comum (VC – elementos de concreto e armadura passiva, pré-moldados estruturalmente), vigota com armadura protendida (concreto estrutural e armadura principal ativa), vigota com armadura treliçada T (armadura treliçada eletrossoldada e concreto estrutural), minipainel treliçado (MPT – duas armaduras treliçadas eletrossoldadas e concreto estrutural) e os painéis treliçados (PT – armaduras treliçadas eletrossoldadas, concreto estrutural e largura superior a 400 mm) especificado na NBR 14859-1(ABNT, 2016). As Figuras 18 e 19 representam alguns dos elementos pré-moldados e a disposição deles nas lajes.

Figura 18 - Elementos pré-fabricados: a) Vigota de concreto comum. b) Vigota de concreto protendido. c) Vigota treliçada.



Fonte: Aatoria Própria (2021).

Figura 19 - Esquema construtivo de laje treliçada.



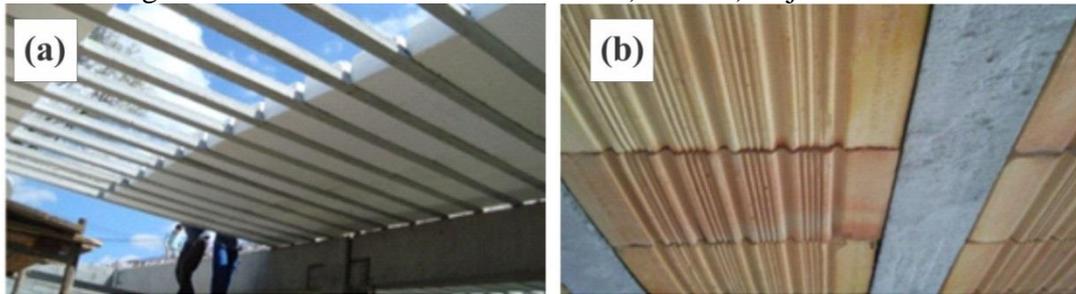
Fonte: Adaptada de El Debs (2017).

3.7.2 Elementos de Enchimento

Os elementos de enchimento nas lajes pré-moldadas, caracterizam-se por ser um elemento não estrutural, feito com materiais inertes, com a finalidade de diminuir a quantidade de concreto, e com isso, o próprio peso do elemento estrutural por completo, além de servir como forma, são encontrados de modo maciço ou vazado. Esses elementos inertes podem constituir de materiais de rupturas tanto frágeis, como dúcteis, sendo que em cada um dos requisitos há uma forma específica de caracterizá-los conforme especifica a NBR 14859-1 (ABNT, 2016).

A norma NBR 14859-1 (ABNT, 2016) ainda relata que esses elementos de enchimento devem ter resistência característica mínima de 0,7 kN (para casos de elementos com dimensões iguais a 60 mm e 80 mm) a 1,0 kN, com o objetivo de suportar as cargas oriundas do processo de montagem e concretagem das lajes. A Figura 20 apresenta os tipos de enchimento mais usuais na construção civil, a figura 20a apresenta os elementos de enchimento de EPS e a figura 20b as lajotas cerâmicas.

Figura 20 - Elementos de enchimento: a) EPS. b) Lajota cerâmica.



Fonte: Vargas (2014).

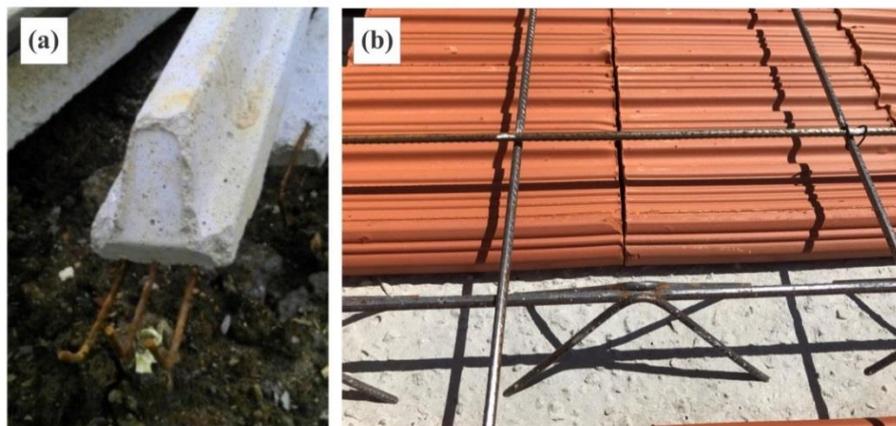
Segundo Vargas (2014), esses elementos devem possuir face inferior nivelada, abas de encaixe que se apoiam nas vigotas, as quais devem estar livres de danos, impedindo o desempenho adequado e o escoamento do concreto de capa, visto que todo esse sistema funciona como uma forma para o concreto posteriormente lançado.

Os elementos de enchimento formam a geometria da laje, suas dimensões influenciam na altura da mesma e na distância entre as vigotas e os pré-fabricados, além disso, também interferem no peso próprio final e, também nas deformações da estrutura (SANTINE, 2005).

3.7.3 Armadura Complementares

Além das treliças, pode-se colocar armadura complementar, sendo longitudinal (distribuída ao longo das nervuras, aumentando a área de aço na seção tracionada), e armadura de distribuição (dissipando tensões, amenizam as fissuras e diminuem as retrações do concreto, são dispostas na transversal e longitudinal sob a capa) e/ou superior (combate a fissuras e combatendo o momento fletor negativo, disposta longitudinalmente) (FAZZAN, 2011). A Figura 21 detalha os tipos de armaduras complementares.

Figura 21 - Armaduras complementares: a) Armadura longitudinal. b) Armadura de distribuição.



Fonte: Vargas (2014).

3.7.4 Capa de Compressão

A capa de concreto ou capa de compressão é realizada após todos os procedimentos mencionados anteriormente, sendo a mesma moldada *in loco*. Essa capa auxilia na funcionalidade do elemento estrutural (tornando todas as composições em um único elemento), garantindo à resistência a flexão conforme Figura 22.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda especifica que a resistência à compressão mínima do concreto lançado na capa de compressão seja de 20 MPa, resistência esta atingida aos 28 dias de idade.

Figura 22 - Lançamento do concreto da capa de compressão.



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.7.5 Considerações de Dimensionamento

Os critérios de dimensionamento de laje pré-fabricadas são estabelecidos pelas normas NBR 14859-1 (ABNT, 2016), NBR 14859-2 (ABNT, 2016) e NBR 14859-3 (ABNT, 2016). A primeira parte NBR 14859-1 (ABNT, 2016) especifica os requisitos básicos dos elementos estruturais utilizados nas lajes pré-fabricadas, quanto a sua fabricação, utilização e recebimento para aplicação e uso em qualquer tipo de edificação. A segunda parte NBR 14859-2 (ABNT, 2016) especifica os requisitos de recebimento e aplicação dos elementos inertes utilizados na fabricação das lajes pré-fabricadas. Por fim, a terceira parte NBR 14859-3 (ABNT, 2016) detalha os requisitos de fabricação, fornecimento, recebimento e ensaio das amaduras do tipo treliçadas utilizadas para fabricação de lajes pré-fabricadas.

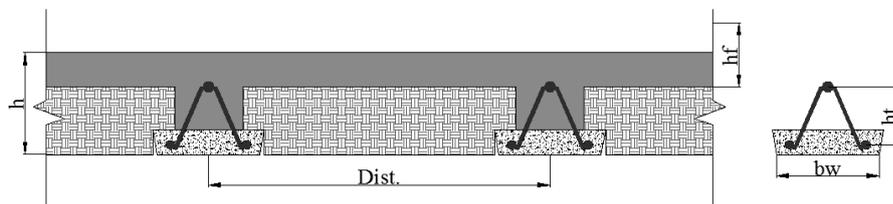
Ferreira (2017) relata que para o dimensionamento das lajes pré-fabricadas, alguns parâmetros devem ser definidos, sendo eles:

- Vãos necessários a serem vencidos;

- Definição das cargas recomendadas para cada uso, conforme especifica a NBR 6120 (ABNT, 2019);
- Existência de cargas pontuais;
- Tipo de elemento de enchimento;
- Resistência à compressão do concreto a ser utilizado;
- Altura total da laje (h);
- Espessura final da capa de compressão (h_f);
- Distância entre eixo ou nervuras (Dist.);
- Largura da base da nervura (b_w);
- Altura armação treliçada (h_t).

A Figura 23 ilustra os parâmetros e recomendações indicadas por Ferreira et al. (2017).

Figura 23 - Representação esquemática de lajes pré-fabricadas compostas por vigotas pré-moldadas.



Fonte: Adaptada Ferreira et al. (2017).

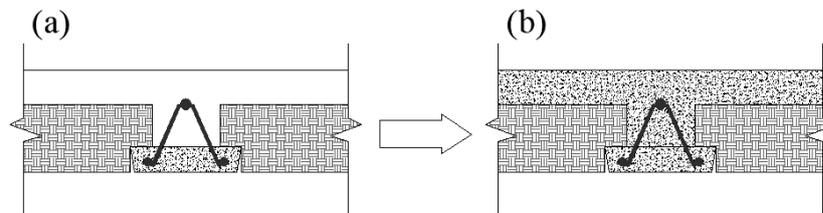
3.7.5.1 Análise estrutural para Dimensionamento das Lajes Pré-Fabricadas

A distribuição dos esforços, deformações e tensões de um elemento estrutural pode ser estabelecida através da análise estrutural (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004). Conforme prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014), a análise deve ser realizada utilizando um modelo estrutural em tamanho real, a fim de visualizar claramente os caminhos percorridos pelas ações até o suporte de apoio do elemento, permitindo assim a visualização das deformações lineares dos materiais empregados. A análise permite verificar o Estado Limite Último da estrutura, ou seja, o limite máximo que o elemento estrutural suporta até entrar em colapso, fator que determina a paralização ou uso da estrutura conforme relatado na NBR 6118 (ABNT, 2014). O status de restrição de uso do elemento estrutural está relacionado à durabilidade, aparência, conforto e bom uso funcional conforme especificado na NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.7.5.2 Dimensionamento à Flexão

Para o cálculo de uma laje pré-fabricada do tipo treliçada, utiliza-se o conceito matemático de vigas simplesmente apoiadas, cujas nervuras constituídas pelas vigotas pré-fabricadas trabalham independentes, formando uma seção “T” em sua seção transversal, conforme mostra a Figura 24.

Figura 24 - Detalhamento da seção transversal de lajes pré-moldadas, adaptada: a) Seção da nervura. b) Seção adotada.



Fonte: Adaptada Vargas (2014).

Carvalho e Figueiredo Filho (2004) relata que é recomendável a adoção de momento fletor máximo através da teoria de flexão normal simples aplicado nas nervuras isoladas, para determinação dos esforços atuantes nas lajes pré-fabricadas simples apoiadas. A equação 10 é utilizada para se obter o momento fletor máximo atuante nas nervuras quando o carregamento é distribuído por toda a laje.

$$M_{max} = \frac{P.l^2}{8} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: P é o carregamento distribuído e atuante na nervura; l é o comprimento do vão do elemento estrutural.

As barras de aço do banzo inferior existente na armadura treliçada e as barras adicionais (quando necessárias) posicionadas na base ou sapata da vigota pré-fabricada são elementos atuantes a fim de resistir ao momento fletor máximo.

3.7.5.3 Cálculo de Deslocamento (Estimativa de Flechas Imediata)

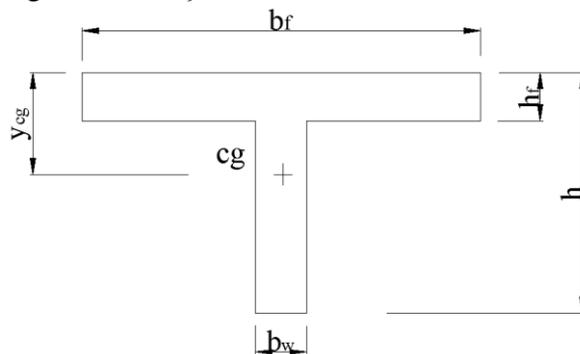
Junges e La Rovere, (2017) especifica que, para cálculo das flechas imediatas em vigas de concreto são utilizados dois métodos simplificados de cálculo, sendo eles: a fórmula de Branson (1963), também especificada na NBR 6118 (ABNT, 2014) e o Bilinear descrito pela CEB (1985).

O método apresentado por Branson (1963) busca relatar através de cálculos de deformações, os efeitos das fissurações do concreto localizadas em determinadas regiões das vigas quando o elemento é submetido aos esforços de flexão. Junges e La Rovere (2017) relata ainda que o método proposto por Branson (1963) adota uma fórmula de inércia ponderada em dois estádios, I e II.

Relacionado ao **estádio I**, a estrutura será solicitada por carregamentos de baixa intensidade, sendo que a tensão aplicada no concreto não seja superior a resistência a tração NBR 14859-2 (ABNT, 2016). Considerando a baixa tensão aplicada e conseqüentemente a pouca deformação da estrutura, pode se afirmar que as tensões são proporcionais as deformações, podendo considerar como base de cálculo das deformações para esse estágio, a lei de Hooke (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2004).

Considerando a seção transversal do concreto denominada pela norma de concreto, como seção bruta, considerando a inexistência de armadura, podendo definir o momento de inércia da seção transversal do elemento estrutural, apresentado na Figura 25 e na Tabela 9 para uma seção em formato “T”.

Figura 25 - Seção transversal em formato “T”.



Fonte: Adaptado Carvalho; Figueiredo Filho. (2004).

Tabela 9 - Características geométricas da seção transversal bruta “T”, estágio I.

Área (seção geométrica)	$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h$
Centro de gravidade	$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g}$
Momento de inércia	$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2$

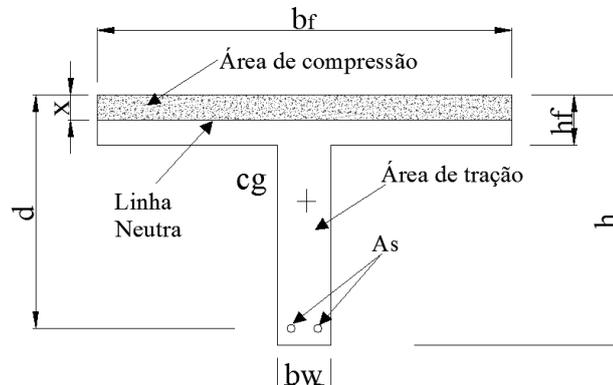
Fonte: Adaptado Carvalho; Figueiredo Filho. (2004).

Para carregamentos superiores a resistência à tração do concreto, ou seja, para aumento das tensões atuante na seção transversal, a análise passa para o **estádio II** devido a mudança do comportamento da estrutura, passando para o estado de fissuração. Carvalho e Figueiredo Filho (2004) relatam que para esse estágio admite-se:

- A armadura presente abaixo da linha neutra é o único elemento que trabalha a tração na seção transversal, ou seja, o concreto não é solicitado aos esforços à tração;
- O concreto da borda inferior da viga apresenta pequenas fissuras;
- Devido a aderência entre o aço e o concreto, todas as tensões de tração aplicadas na seção são absorvidas pela armadura, não ocorrendo a plastificação do concreto nem o escoamento do aço;
- As deformações são equivalentes a distância da linha neutra;
- Para compressão do concreto e tração da armadura utiliza a lei de Hooke.

Ainda no estágio II, devido a modificação das características geométricas da seção transversal, há necessidade de realização do cálculo para posicionamento da nova linha neutra. O novo posicionamento da nova linha neutra se faz necessário pela homogeneização da seção, a fim de converter equivalentemente uma área de aço tracionado em uma área de concreto (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004). A Figura 26 detalha a seção transversal para o estágio II.

Figura 26 - Seção transversal em formato “T” estágio II.



Fonte: Adaptado Carvalho e Figueiredo Filho. (2004).

Para aplicação do dimensionamento em lajes pré-moldadas treliçadas em que a linha neutra corta a mesa formando uma seção retangular, sendo ($x < h_f$) conforme mostra a Figura 26, o resultado de “ x ” será obtido levando em consideração que o momento estático da seção seja igual a zero, demonstrada na equação 11.

O cálculo do momento de inércia da seção no estágio II será obtido por meio da equação 12, considerando a mesma situação anterior, em que ($x < hf$).

$$m_s = 0 \rightarrow \alpha_e [\sum A_{si} \cdot (d_i - x)] - b_f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

$$I_{II} = b_f \cdot \frac{x^3}{12} + b_f \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2 \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: $\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$

A separação entre o estágio I e estágio II de deformação de uma determinada seção transversal é definida pelo cálculo do Momento de Fissuração (M_r), detalhada na equação 13.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct.inf} \cdot I_c}{y_t} \quad \text{Eq. 13}$$

Em que:

α : 1,2 para seções em forma de “T” ou duplo “T” e 1,5 para seções retangulares (fator correlacionado a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta)

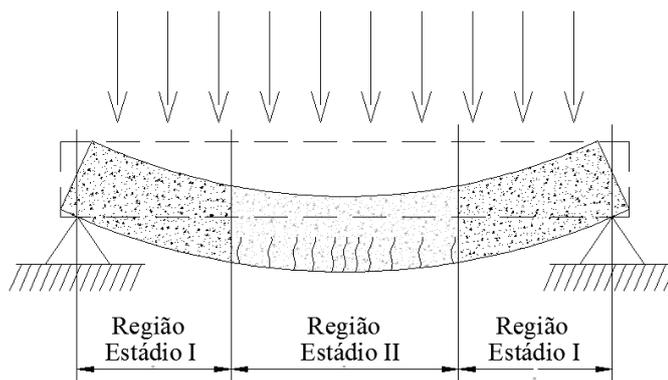
I_c : momento de inércia da seção bruta do concreto;

$f_{ct.inf}$: resistência a tração direta do concreto ($f_{ct.inf} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$);

y_t : distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada da seção.

Diante do resultado do momento fletor será possível identificar o aparecimento de fissuras em determinadas regiões da seção, precisamente abaixo da linha neutra nos elementos bi apoiados. Por meio da Figura 27 é possível evidenciar as seções que delimitam os estádios I e II, considerando que em função dos momentos fletores atuantes, o elemento estrutural (viga) não sofre fissuração nas seções próximas aos apoios (estádio I), enquanto a região central apresenta seções fissuradas (estádio II). O aparecimento de fissuras ocorre quando o momento fletor atuante na seção é maior que o momento de fissuração (M_r), fato esse provoca a diminuição da inércia da seção fissurada.

Figura 27 - Viga de concreto bi apoiada sob ações de serviço.

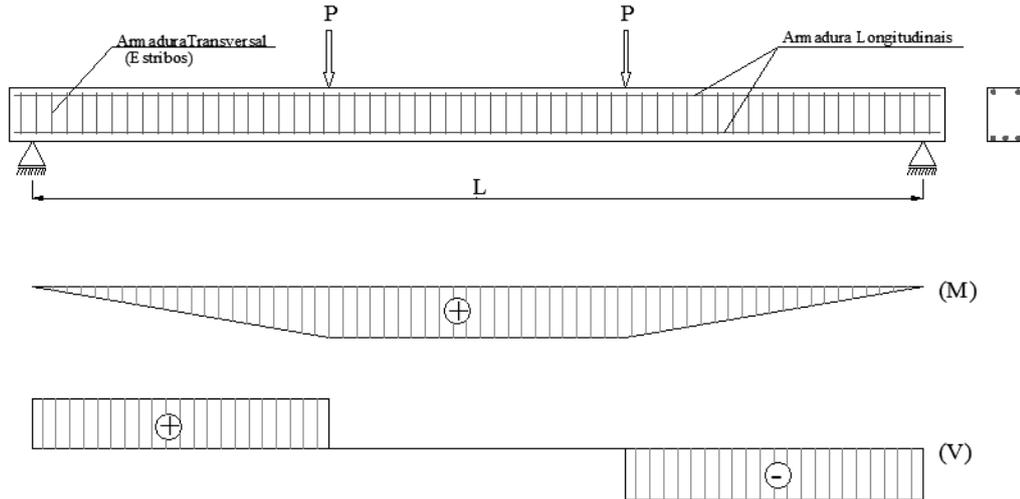


Fonte: Autoria Própria (2021).

Por meio de análises feitas por Leonhardt e Mönning (1982) diante de um esquema representativo de um perfil biapoiado (viga de concreto), sendo a mesma submetida a duas forças “P” concentradas de intensidades iguais, composta ainda por armaduras longitudinais (resistentes a tensões ocasionadas pela flexão) e transversais (resistente aos esforços cortantes), conforme mostra a Figura 28, foi possível analisar que:

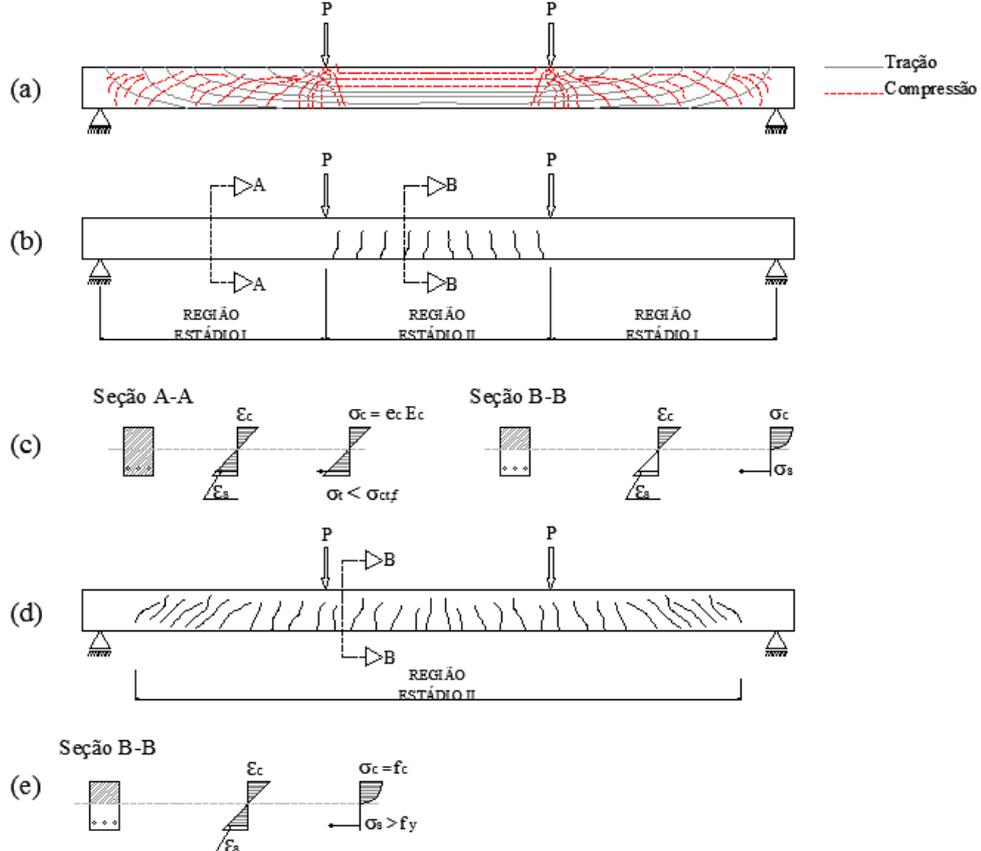
- Os seguimentos das tensões de tração e compressão no estágio II seguem paralelas ao eixo longitudinal da viga, já nos trechos do estágio I as tensões apresentam trajetórias inclinadas ocasionadas pelos esforços cortantes, conforme mostra a Figura 29a;
- O surgimento de fissuras provenientes de esforços a flexão é evidenciado apenas nas regiões que apresentam momentos fletores máximos, sendo estas ocasionadas quando as tensões atuantes superam a resistência máxima do concreto quanto à tração na flexão, conforme detalha a Figura 29b.
- Para os trechos do estágio I a tensão de compressão máxima (σ_c) pode ser avaliada por meio da lei de Hooke, não sendo permitida a aplicação deste método para os trechos do estágio II. Os diagramas de tensões e deformações nos trechos ou regiões do estágio I e II são detalhados na Figura 29c.
- No momento em que o carregamento atinge um patamar mais elevado, ocorre o aparecimento de fissuras inclinadas próximo aos apoios, alongando o trecho do estágio II, ficando, portanto, os trechos do estágio I mais curtos, sendo eles localizados apenas próximos aos apoios, conforme mostra a Figura 29d. O aparecimento das fissuras ao longo da viga ocorre pela atuação das forças cortantes em conjunto com os momentos fletores. Os diagramas de tensões e deformações nos trechos ou regiões do estágio I e II para esta hipótese de carregamento são detalhados na Figura 29e.

Figura 28 - Viga de concreto biapoada e seus diagramas de esforços.



Fonte: Adaptado Leonhardt e Mönning. (1982).

Figura 29 - Viga de concreto biapoada e seus diagramas de esforços.



Fonte: Adaptado Leonhardt; Mönning. (1982).

A NBR 6118 (ABNT, 2014), por meio da proposta de Branson (1963), apresenta os critérios de cálculo das deformações de um elemento de concreto armado por meio de um método semi-probabilístico, considerando uma variação de tensões aplicada ao longo da seção do

elemento estrutural (Estádio I – trechos não fissurados e Estádio II trechos fissurados). O método busca relatar os efeitos das fissurações do concreto, quando submetidos a esforços de flexão por meio de expressões empíricas para cálculo dos valores médios da inércia.

A equação 14 recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), pode ser utilizada para cálculo da flecha imediata em vigas de concreto armado simplesmente apoiadas, assim como para vigas contínuas, sendo adotado apenas uma seção de referência de um vão de viga para cálculo da rigidez equivalente (EI_{eq}).

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad \text{Eq. 14}$$

Em que:

I_c : é a inércia da seção bruta do concreto (desconsiderando a contribuição das barras de aço na seção transversal do concreto);

I_{II} : é o momento de inércia da seção fissurada do concreto (Estádio II) – cálculo com $\alpha_e = E_s/E_c$;

M_a : é o momento fletor da seção crítica do vão considerado, considerando o momento máximo no vão para vigas contínuas ou biapoiadas;

M_r : é o momento de fissuração do elemento estrutural, sendo o valor reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

E_{cs} : é o módulo de elasticidade secante do concreto.

3.8 Materiais e métodos

O desenvolvimento do projeto bem como a montagem das lajes e a realização dos ensaios de análise estruturais, contou com a estrutura do Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural (NEPAE) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, campus Ilha Solteira – SP., em parceria com Instituto Federal Goiano – IFGoiano, campus Rio Verde – GO.

3.8.1 Materiais

Inicialmente, foram definidos todos os materiais necessários para o estudo e produção de 6 lajes, partindo da colaboração financeira e técnica de uma empresa privada, a LGP Engenharia Construtora e Pré-moldados do ramo de fabricação de lajes pré-fabricadas, localizada no município de Corumbáiba – GO, que forneceu as vigotas pré-moldadas e as lajotas cerâmicas utilizadas no estudo. A aquisição do bambu foi por meio da extração na

zona rural do município de Corumbáiba – GO conforme mostra a Figura 30, esse material, as vigotas pré-fabricadas e as lajotas cerâmicas foram transportadas para Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho - UNESP, campus Ilha Solteira – SP.

Também foram utilizados no experimento o concreto usinado, aço para armadura de distribuição, forma em madeira para retenção do concreto nas bordas da laje, lona plástica e alguns equipamentos para realização dos ensaios e obtenção de resultados, tais como: extensômetros elétricos, célula de carga e relógios comparadores, perfis, pórticos metálicos e sistema de aquisição de dados, ambos materiais e equipamentos disponíveis no município de Ilha Solteira – SP. As descrições e características dos materiais e equipamentos utilizados para confecção dos modelos foram descritos nos itens 2.1.1 ao 2.1.6.

3.8.1.1 Bambu

A espécie do bambu escolhida para utilização como elemento de enchimento nas lajes produzidas foi o *Bambusa Vulgaris* de idade desconhecida, comumente conhecida no Brasil como “bambu brasileiro” ou “bambu imperial”, que tem como característica principal os colmos bem justos.

A extração do bambu foi feita através da poda manual, em seguida transportada por um veículo de carga até o local onde serão selecionados e cortados, conforme dimensões desejadas como mostra as Figura 30 e 31.

Figura 30 - Colheita do bambu.



Fonte: Autoria Própria (2021).

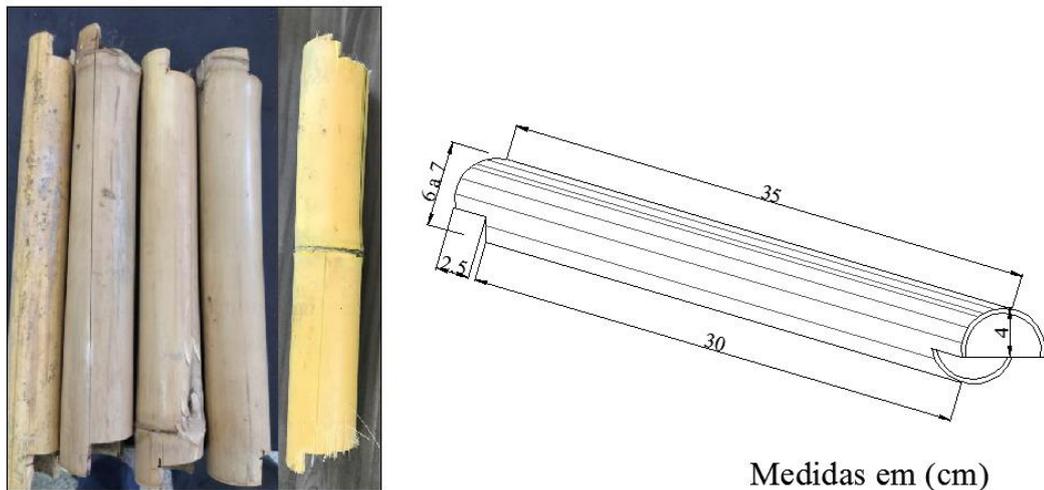
Figura 31 - Extração do bambu: a) Transporte, b) Corte, c) Armazenamento.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Os bambus foram selecionados com o objetivo de ter um diâmetro médio de 6,0 a 7,0 centímetros, eles foram cortados com comprimento de 35 centímetros e em seguida, realizou-se cortes (dente) de 2,5 centímetros de comprimento em ambas as extremidades da peça (para encaixe nas vigotas pré-moldadas), como mostra a Figura 32. Para o corte dos dentes, criou-se um gabarito de madeira a fim de facilitar a produtividade, conforme mostra a Figura 33.

Figura 32 – Geometria do bambu.



Medidas em (cm)

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 33 - Gabarito para corte dos frisos.



Fonte: Aatoria Própria (2021).

Após a seleção e corte das peças, verificou-se que foram necessárias 34 peças de bambu para aplicação em 1 metro quadrado de laje. Demais informações estão mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características do Bambu Imperial.

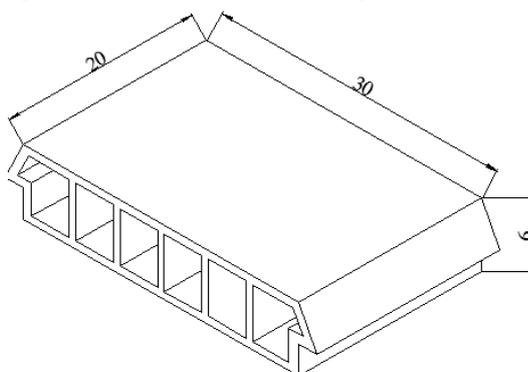
Elemento	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Peso unitário (kg)	Quantidade por m ²	Peso total (kg/m ²)
Bambu	6,0 a 7,0	35	0,298	34	10,13

Fonte: Aatoria Própria (2021).

3.8.1.2 Lajota Cerâmica

As lajotas cerâmicas utilizadas para fabricação das lajes (Referências) seguiram as dimensões exigidas pela NBR 14859-2 (ABNT, 2016) e a quantidade de lajotas necessárias para aplicação em 1 metro quadrado de laje é de 10 peças, conforme as dimensões apresentadas na Figura 34. As características físicas da lajota usada são discriminadas na Tabela 11.

Figura 34 - Geometria das lajotas cerâmicas.



Medidas em (cm)

Fonte: Adaptada Vargas (2014).

Tabela 11 - Características físicas das lajotas cerâmicas.

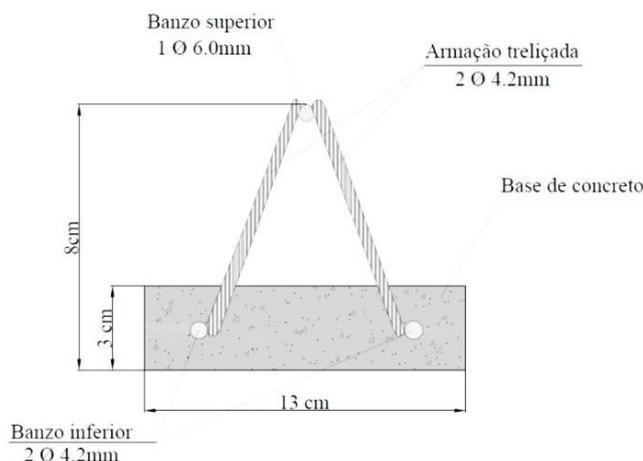
Elemento	Dimensões em cm (altura x largura x comprimento)	Peso unitário (kg)	Quantidade por m ²	Peso total (kg/m ²)
Lajota cerâmica	6 x 20 x 30	2,305	10	23,05

Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.1.3 Vigotas Pré-Fabricadas

Todas as vigotas pré-moldadas são do tipo treliçadas, constituídas por uma sapata de base 3 cm x 13 cm (altura e largura) que envolvem as armaduras dos banzos inferiores e comprimento de 2,10m cada. A nomenclatura da treliça utilizada na fabricação das vigotas é a TR 8644: 8cm, composta por 1 barra de diâmetro de 6,0mm em sua parte superior (banzo superior), 2 fios de diâmetro 4.2mm em sua parte inferior (banzo inferior) e 2 fios de diâmetro de 4.2mm na diagonal, conforme mostra a Figura 35. As características da treliça usadas na fabricação das vigotas pré-moldadas são especificadas na Tabela 12.

Figura 35 - Detalhamento da vigota treliçada



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 12 - Características da treliça.

Designação GERDA™	Designação NBR 14859/03	Peso (kg/m)	Altura (cm)	Diâmetros (mm)		
				Banzo superior	Diagonal	Banzo inferior
TG 8L	TR 8644	0,735	8	6.0	4.2	4.2

Fonte: Comercial Gerdau (2020).

3.8.1.4 Armadura de Distribuição

Seguindo as prescrições da norma NBR 6118 (ABNT,2014), foi disposta na capa de compressão uma armadura de distribuição, utilizado aço CA-60 de diâmetro de 5,0 mm, conforme mostra a Figura 36. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que para aços

de classe CA-50 e CA-60 a área mínima de aço seja de $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$, ou seja, pelo menos três barras por metro, considerando ainda um recobrimento mínimo das armaduras de 2,5 cm. As características físicas da malha usada são especificadas na Tabela 13.

Figura 36 - Malha de distribuição



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 13 - Características físicas do aço usado na armadura de distribuição.

Fio/Barra	Diâmetro (cm)	Peso (kg/m)	Perímetro (cm)	Área (cm ²)	Quantidade barras em (m) por (m ²)	Peso total (kg/m ²)
5.0 (CA-60)	0,50	0,154	1,57	1,96	12	1,848

Fonte: NBR 14859-2 (ABNT, 2014).

3.8.1.5 Justificativa para definição da altura e capa de compressão da laje

A definição da espessura final de uma laje é sempre a somatória da altura do elemento de enchimento mais a altura da capa de concreto. Com base nesse princípio foi seguindo os critérios descritos na NBR-14859-1 (ABNT, 2016). A NBR-14859-1 (ABNT, 2016) ainda dispõe no item 4.1 (Tabela 1) que indica a altura das lajes proporcional as alturas dos elementos de enchimento, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Características do concreto da capa de compressão.

Altura do elemento de enchimento (h)	Altura total da laje (h)
7,0	10,0; 11,0; 12,0
8,0	11,0; 12,0; 13,0
10,0	14,0; 15,0
12,0	16,0; 17,0
16,0	20,0; 21,0
20,0	24,0; 25,0
24,0	29,0; 30,0
29,0	34,0; 35,0

Fonte: Autoria Própria (2021).

A ABNT NBR14859-1 (ABNT, 2016) destaca ainda que, para as lajes do tipo nervuradas quanto à existência de tubulações embutidas horizontalmente de diâmetro menor ou igual a 10mm, a espessura mínima da capa de compressão deve ser de 5,0 cm.

Com base nesses critérios, para este estudo, optou-se pela utilização da espessura mínima da capa para lajes com existência de tubulações horizontais. Sendo assim, definido a espessura mínima da capa de concreto como 6cm, a altura final das lajes foi de 12,0 cm, seguindo os requisitos descritos na ABNT NBR-14859-1 (ABNT, 2016). A Tabela 15 descreve as características e espessura do concreto usado na capa de compressão para as duas tipologias de lajes produzidas.

A variação da espessura da capa de uma tipologia de laje para outra ocorreu por causa da não variedade de lajotas disponíveis no mercado, local que foi realizado o experimento, sendo necessária a utilização de lajotas cerâmicas com espessura inferior ao bambu.

Tabela 15 - Características do concreto da capa de compressão.

Tipo	Resistência característica a compressão (MPa)	Lajes com lajotas cerâmicas - espessura (cm)	Lajes com bambu - espessura (cm)
Usinado	26	6	5,5

Fonte: Autoria Própria (2021).

Para garantir o controle e confirmação da resistência mínima necessária exigida pela ABNT NBR-14859-1 (ABNT, 2016), durante a concretagem das lajes foram retiradas amostras do concreto, sendo moldados 6 corpos de-prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm (diâmetro x altura), a fim de avaliar a resistência a compressão axial e o módulo de elasticidade do concreto aplicado na capa de compressão. O procedimento de moldagem e rompimento dos corpos de prova seguiu o que discrimina nas NBR 5738 (ABNT, 2015) (Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova), ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018) (Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos) e ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017) (Determinação dos módulos de elasticidade e da compressão). A Figura 37 detalha o rompimento dos corpos de prova do concreto utilizado na capa de compressão.

Para realização dos ensaios, utilizou-se uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 300 kN da marca INSTRON™.

Figura 37 - Rompimento dos corpos de prova do concreto da capa.



Fonte: Autoria Própria (2021).

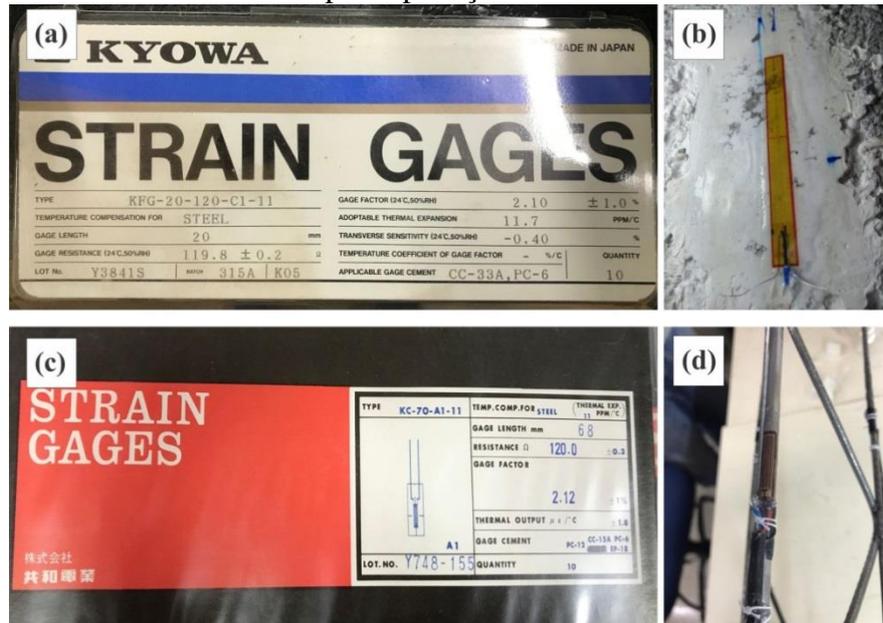
3.8.1.6 Instrumentação e Obtenção de Dados

Para a instalação dos ensaios mecânicos, utilizou-se um atuador hidráulico com capacidade de carga de 100 kN modelo RR1012 acoplado a uma bomba elétrica. Por meio das células de cargas modelo MUF-2-10 TD16 da marca ENERPAC™ fixadas no atuador hidráulico foi possível medir a intensidade das forças aplicadas nas lajes. As Figuras 55, 56, 57, 58 e 60 disposta no item 2.2.7 detalha o esquema de montagem para rompimento dos modelos.

Para analisar os deslocamentos, utilizou-se relógios comparadores de precisão de 0,01 x 30 mm da marca KYOWA, modelo DT-20D Peacock, conforme mostra a Figura 59 disposta no item 2.2.6.

Extensômetros elétricos da marca Kyowa Electronic Instrumensts Co., Ltd. foram fixados nas armaduras treliçadas e na capa de concreto das lajes para medir a deformação. A Figura 38 detalha os extensômetros utilizados para armadura e para capa de compressão e a Tabela 16 apresenta as características dos extensômetros utilizados.

Figura 38 - a) e b) Extensômetros elétrico para aplicação em aço. c) e d) Extensômetros elétrico para aplicação em concreto.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 16 - Características e aplicações dos extensômetros elétricos.

Tipo/Modelo	Marca	Aplicação
KFG-20-120-C1 120L	Kyowa	Armadura
KC-70-A1-11 120L	Kyowa	Concreto

Fonte: Autoria Própria (2021).

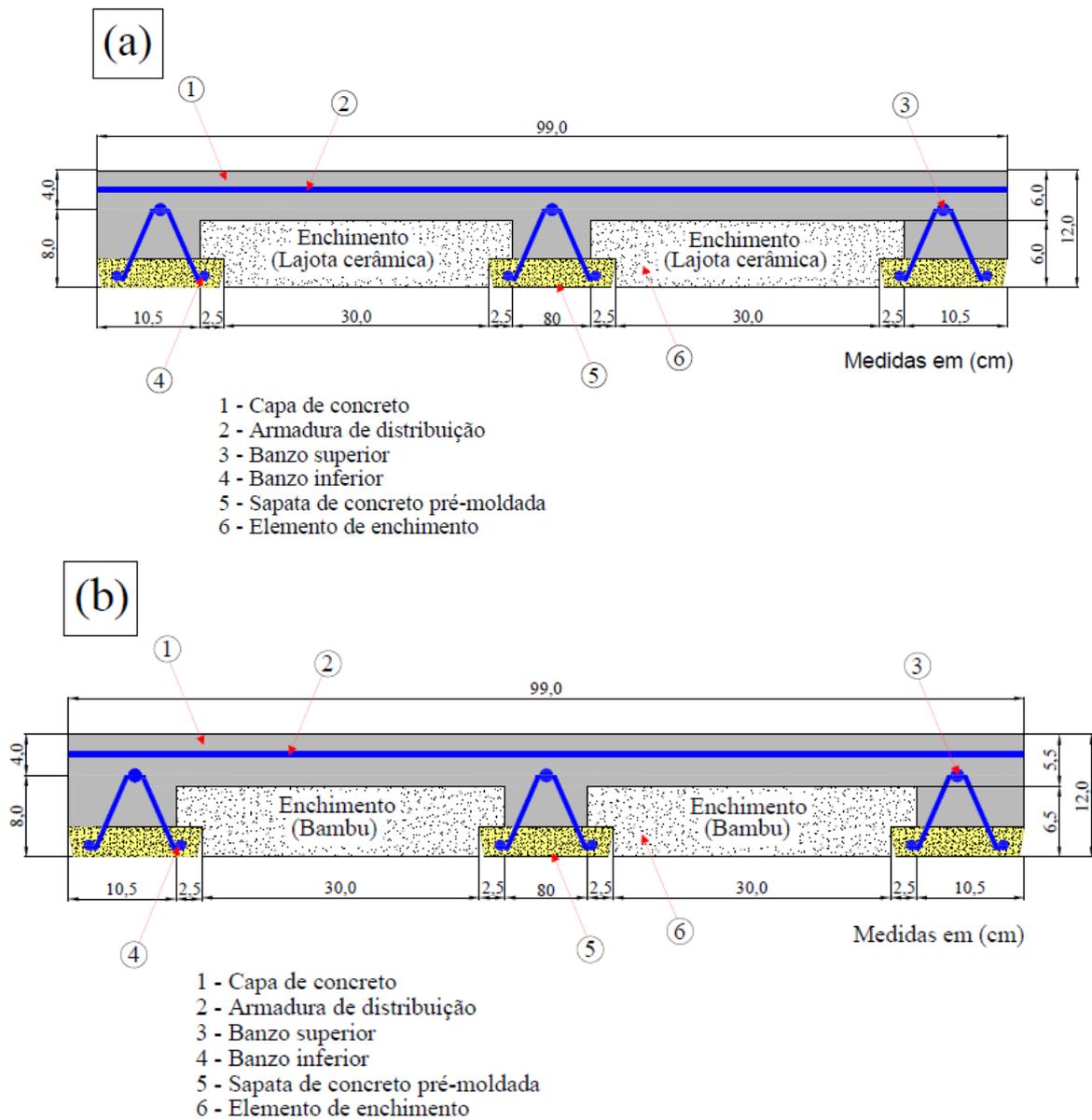
Através do Sistema de Aquisição de dados DAQbook 120 da marca Iotech com interface ao programa DASyLab 5.0 e por meio de relógios comparadores, foi possível a coleta dos dados.

3.8.2 Métodos

3.8.2.1 Modelo Construtivo

Após todas as dimensões pré-estabelecidas dos elementos que formaram as lajes, foi definido o modelo, adotou-se as prescrições e dimensões semelhantes ao de Fazzan (2011), ou seja, com dimensões 210 x 99 x 12 centímetros (comprimento x largura x espessura), conforme detalha a Figura 39 (corte na sessão transversal da laje para as lajes com lajota cerâmica e para as lajes com bambu).

Figura 39 - Seção transversal dos protótipos. a) Lajes com lajota cerâmica. b) Lajes com bambu. (medidas em cm).



Fonte: Autoria Própria (2021).

Para o experimento foram moldados 6 (seis) lajes para 2 (dois) tipos de elementos de enchimento, ou seja, 3 (três) lajes executadas pelo método convencional com lajotas cerâmicas (Lj-ref.) e 3 (três) lajes executadas com bambu (Lj-bambu), sendo todas lajes pré-fabricadas unidirecionais em tamanho e escala real. Cada laje foi composta por 3 (três) vigotas pré-moldadas com comprimento de 2,10 metros cada, posicionadas paralelamente e intercaladas por duas linhas de elementos de enchimento. Compõe ainda na montagem das lajes aço CA-60 de diâmetro de 5,0 mm, para armadura de distribuição e concreto usinado classe C25 para capa de compressão.

Para avaliar a deformação do concreto da capa de compressão e da armação das vigotas pré-moldadas, fez-se o uso de extensômetros elétricos instalados em um modelo de cada tipologia de laje produzida. Para melhor entendimento as lajes foram identificadas e nomeadas conforme mostra a Tabela 17.

Tabela 17 - Identificação dos modelos de lajes produzidas.

Modelo de laje	Identificação dos modelos	Uso de extensômetros elétricos	Quantidade	Dimensões em cm (comprimento x largura x espessura)
Lajes com lajota cerâmica	Lj-ref. - SE	Não	2	210 x 0,99 x 12
Lajes com lajota cerâmica	Lj-ref. - CE	Sim	1	210 x 0,99 x 12
Lajes com bambu	Lj-bambu - SE	Não	2	210 x 0,99 x 12
Lajes com bambu	Lj-bambu - CE	Sim	1	210 x 0,99 x 12

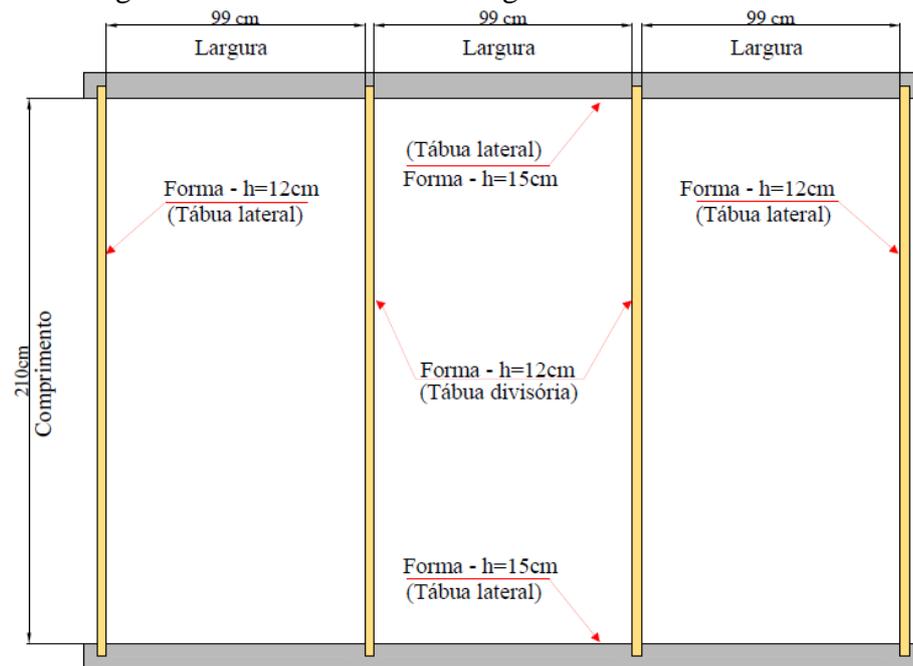
Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.2 Montagem das Formas e Posicionamento

Iniciou-se a montagem das lajes, primeiramente pela fabricação das formas, e foram dispostas e distribuídas ao longo do piso interno do laboratório do Campus IV da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, campus Ilha Solteira – SP. Utilizou-se uma lona sobre o piso para receber a laje.

Para fabricação das formas, utilizou-se tábuas de madeira fixadas com prego e travadas com arame recozido. As formas foram padronizadas em duas alturas, sendo elas: 15cm para as tábuas laterais e 12cm de altura para as tábuas de divisórias. As tábuas de divisórias possuem o mesmo comprimento da largura da laje acabada, portanto estas serviram de galga para concretagem da capa de compressão. A Figura 40 detalha a geometria das formas.

Figura 40 - Geometria da montagem das formas de madeira

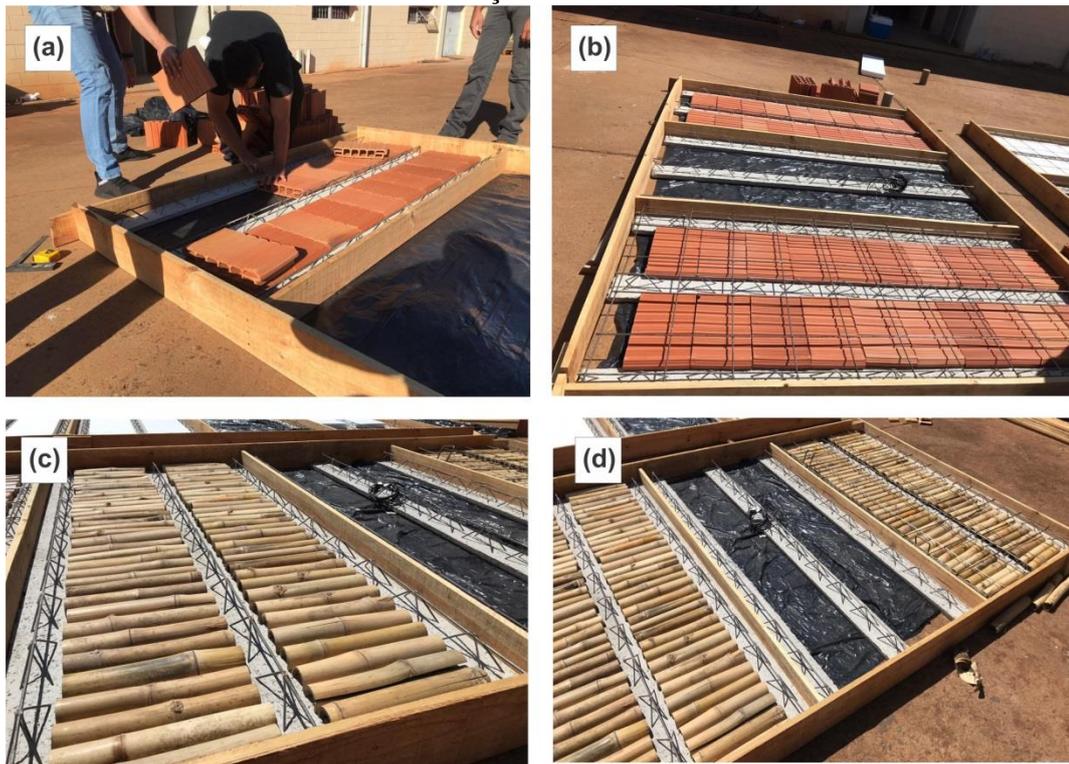


Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.3 Montagem, Concretagem, Adensamento e Cura

Foram utilizadas três vigotas pré-moldadas para cada quadrante de formas, sendo duas nas laterais e uma centralizada, permitindo o encaixe dos elementos de enchimento nos vãos, conforme mostra a Figura 41.

Figura 41 – Montagem das lajes: a) e b) Posicionamento das vigotas pré-moldadas e distribuição das lajotas cerâmicas. c) e d) Posicionamento das vigotas pré-moldadas e distribuição dos bambus.



Fonte: Autoria Própria (2021).

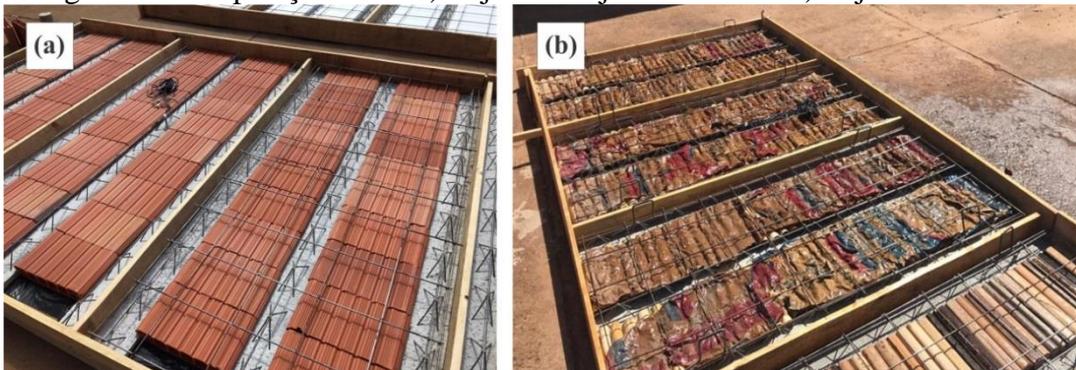
Nas Figuras 42a e 42d mostram os encaixes dos bambus nas vigotas pré-moldadas, foi colocado saco de cimento umedecido em cima dos bambus para evitar perda de concreto por meio dos vãos ocasionados pelos nós, como mostra as figuras 42b e 42c. Contudo, ao final da concretagem foram verificadas que algumas regiões que não foi colocado o saco de cimento propositalmente, não correu vazamentos, sendo então este procedimento desnecessário. A Figura 43a e a Figura 43b mostram as disposições finais das lajes montadas.

Figura 42 - Laje com bambu: a) e d) Detalhamento do encaixe do bambu junto a vigota pré-moldadas. b) e c) Posicionamento de sacos de cimento sobre a superfície dos bambus.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 43 - Disposição final: a) Laje com lajota cerâmica. b) Laje com bambu.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Após o posicionamento das vigotas pré-moldadas e dos elementos de enchimento, realizou-se o posicionamento da amadura de distribuição. A tabela 18 mostra a especificação do aço utilizado, dimensões, quantidades e espaçamento entre barras, quantificados para um modelo de laje.

Tabela 18 - Características das barras de aço usadas na armadura de distribuição.
Quantificação para um modelo de laje.

Fio/Barra	Diâmetro (mm)	Quantidade de barras	Comprimento das barras (cm)	Espaçamento entre barras (cm)
5.0 (CA-60)	5,00	11	0,99	20
5.0 (CA-60)	5,00	6	2,10	20

Fonte: Autoria Própria (2021).

Além da armadura de distribuição foram adicionados nas extremidades das lajes quatro ganchos produzidos com aço CA-50 com diâmetro de 8.0 mm que permitirá o içamento das lajes para o deslocamento ao local do ensaio. As Figuras 44a e 44b detalham as armaduras de distribuição dispostas nas duas tipologias de laje e a Figura 44c mostra os ganchos já posicionados nas lajes.

Figura 44 - Armadura de distribuição e ganchos de suporte: a) Disposição das armaduras de distribuição nas lajes com lajota cerâmica. b) Disposição das armaduras de distribuição nas lajes com bambu. c) Detalhamento dos ganchos para içamento.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Após a montagem das lajes, para as duas tipologias e antes do lançamento da capa de compressão, as lajes foram umedecidas no intuito da retirada de qualquer tipo de impureza ou materiais pulverulentos, conforme mostra a Figura 45.

Figura 45 - Umedecimento das lajes.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Após o umedecimento das lajes e conferência das geometrias da capa de compressão e altura total da laje, conforme prescreve a ABNT NBR-14859-1 (ABNT, 2016), procedeu-se a concretagem, conforme as Figuras 46a, 46b, 46c e 46d. O concreto utilizado na capa de compressão foi usinado, classe C25, abatimento pelo ensaio do tronco de cone de 11 cm.

Figura 46 - Concretagem - Lançamento, nivelamento e acabamento da capa de compressão: a) e b) Laje com lajota cerâmica. c) e d) Laje com bambu.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Após a concretagem, as lajes permaneceram em processo de cura, utilizou-se o umedecimento periódico durante o período de 14 dias, para evitar a evaporação precoce da água e a consequente retração, foi utilizada lona plástica em toda sua superfície, conforme mostram as Figuras 47a e 47b, a Figura 48 mostra as lajes pós concretagem, com os fios da instrumentação devidamente condicionados logo acima do concreto.

Figura 47 - Cura da capa de compressão: a) e b) proteção da superfície das lajes com lona.



Fonte: Autoria Própria (2021).

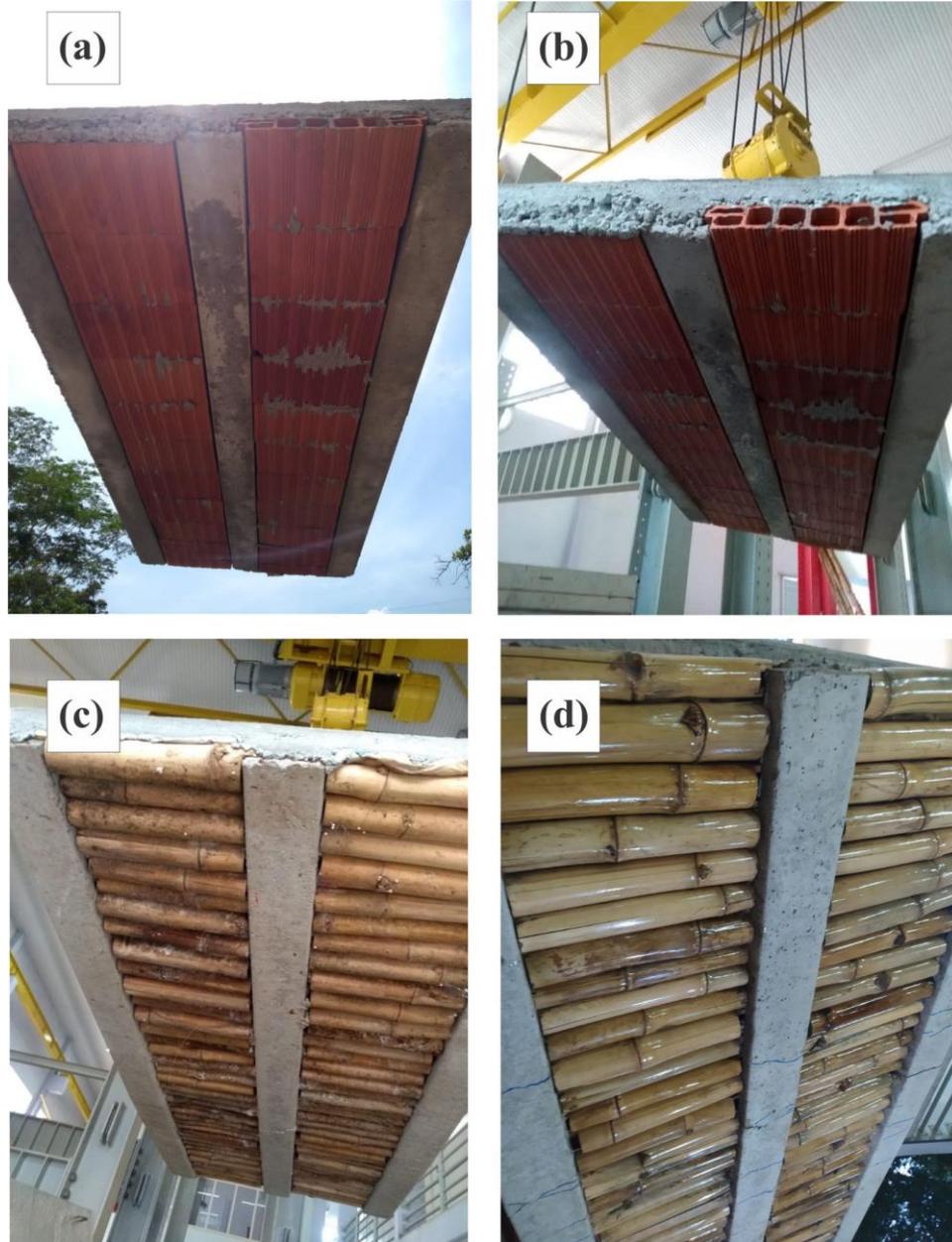
Figura 48 - Laje após concretagem.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Decorrido os 14 dias de cura, as lajes permaneceram por mais 14 dias no local até completarem 28 dias pós-concretagem da capa, então foram içadas e movimentadas até o local de rompimento, no Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE - UNESP), campus 1. As Figuras 49a, 49b, 49c e 49d mostram a vista por baixo das lajes quando içadas, destacando a Figura 49d sendo esta uma opção de acabamento com verniz aplicado nas lajes com bambu.

Figura 49 - Lajes vistas por baixo: a) e b) Lajes produzidas com lajota cerâmica. c) Lajes confeccionadas com bambu sem verniz e d) Lajes produzidas com bambu com aplicação de verniz.



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.4 Determinação do peso próprio das lajes

No processo antes aos ensaios, as lajes foram identificadas de acordo com seus elementos de enchimento. Em seguida foram pesadas a fim de obter o peso unitário de cada amostra. Para a determinação da densidade de cada laje foi utilizado dois atenuadores hidráulicos apoiados no chão, posicionados nas extremidades das lajes, sendo possível conferir o peso de cada amostra pelo sistema de aquisição de dados, conforme mostra a Figura 50.

Figura 50 - Sistema para determinação do peso próprio das lajes.

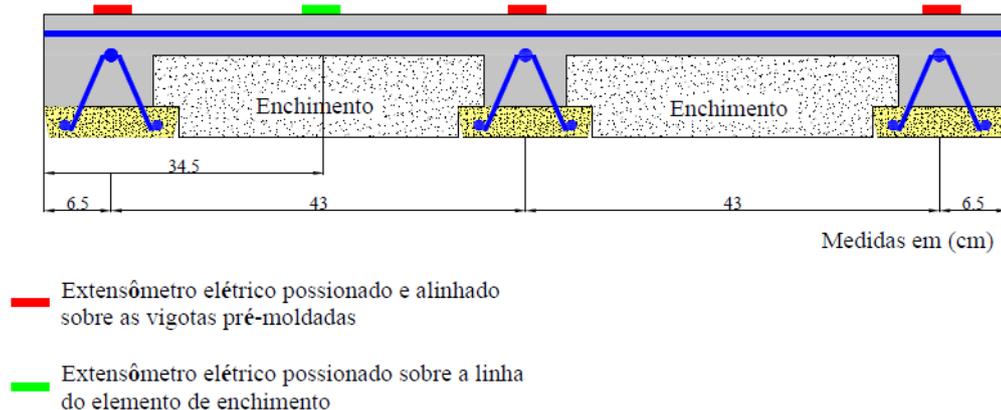


Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.5 Extensômetros Elétricos

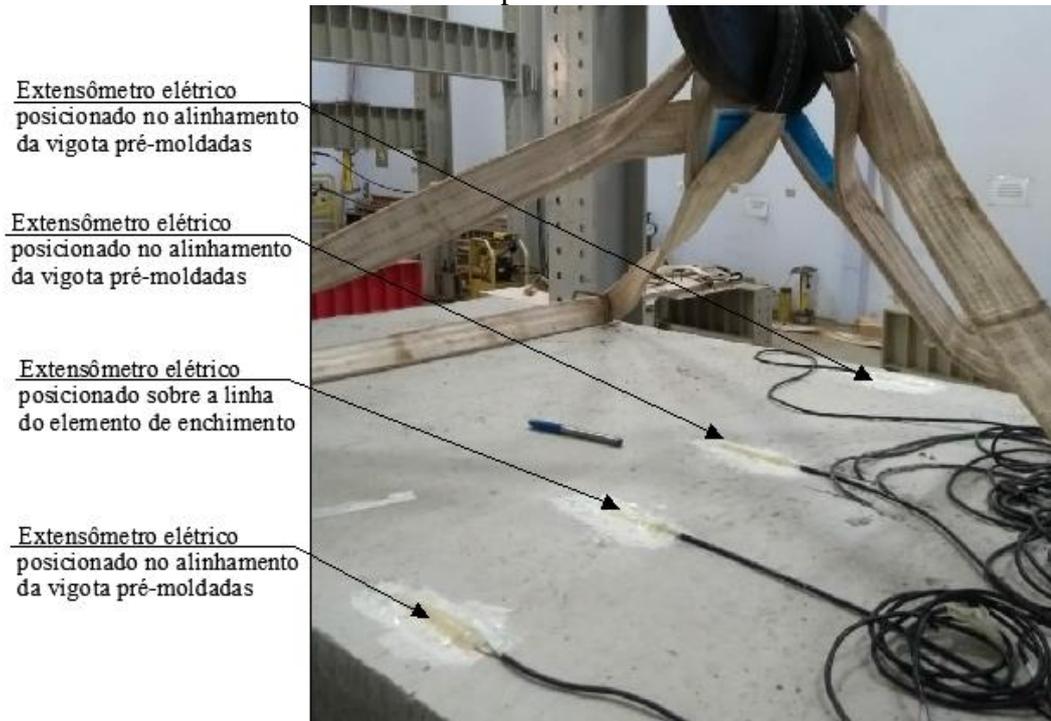
Para avaliar as deformações dos aços e do concreto, foram utilizados extensômetros elétricos. Os extensômetros foram usados para instrumentar um modelo de cada tipologia. Para a capa de compressão foram usados quatro extensômetros da marca Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd do tipo KC-70-A1-11 120L, sendo três deles posicionados no alinhamento de cada vigota pré-fabricada e um extensômetro posicionado sobre uma das linhas dos elementos de enchimento (Figura 51 e 52). No aço, a instrumentação ocorreu na vigota central, na posição dos dois banzos inferiores e no banzo superior, utilizou-se extensômetros da marca Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd do tipo KFG-20-120-C1-11 120L, como mostra as Figuras 53 e 54.

Figura 51 - Representação esquemática da posição dos extensômetros na região mais comprimida da capa de concreto.



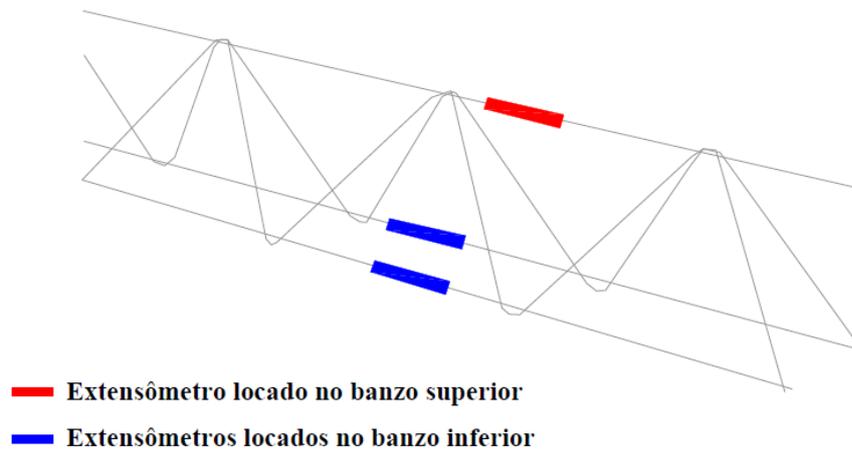
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 52 - Instrumentação e fixação dos extensômetros na face superior da capa de compressão.



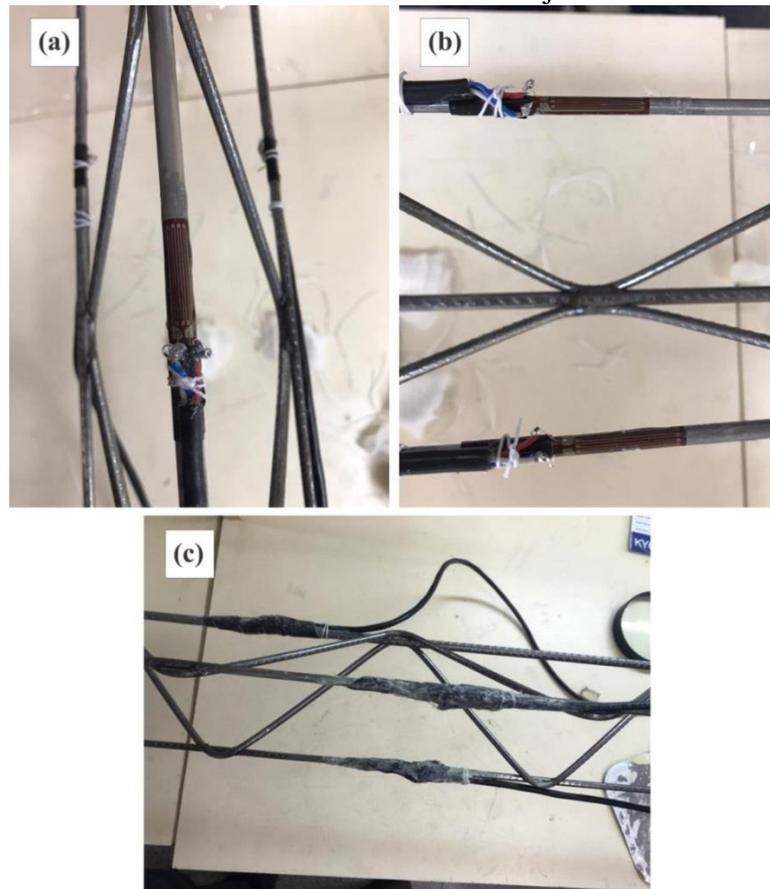
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 53 - Posicionamento dos extensômetros – Armação das vigotas pré-fabricadas



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 54 - Instrumentação das treliças das vigotas pré-fabricadas: a) Fixação do extensômetro no banzo superior. b) Fixação do extensômetro no banzo inferior. c) Detalhamento dos extensômetros já fixados.



Fonte: Autoria Própria (2021).

A instrumentação dos extensômetros nos banzos das treliças usadas para fabricação das vigotas pré-fabricadas ocorreu 3 dias antes da concretagem da sapata, a Figura 55 mostra a concretagem das treliças para formação da vigota pré-moldada, na fábrica. A instrumentação dos extensômetros na face superior da capa de compressão ocorreu no vigésimo quarto dia após a concretagem da capa.

Figura 55 - Concretagem das treliças instrumentadas para formação das vigotas pré-fabricadas.

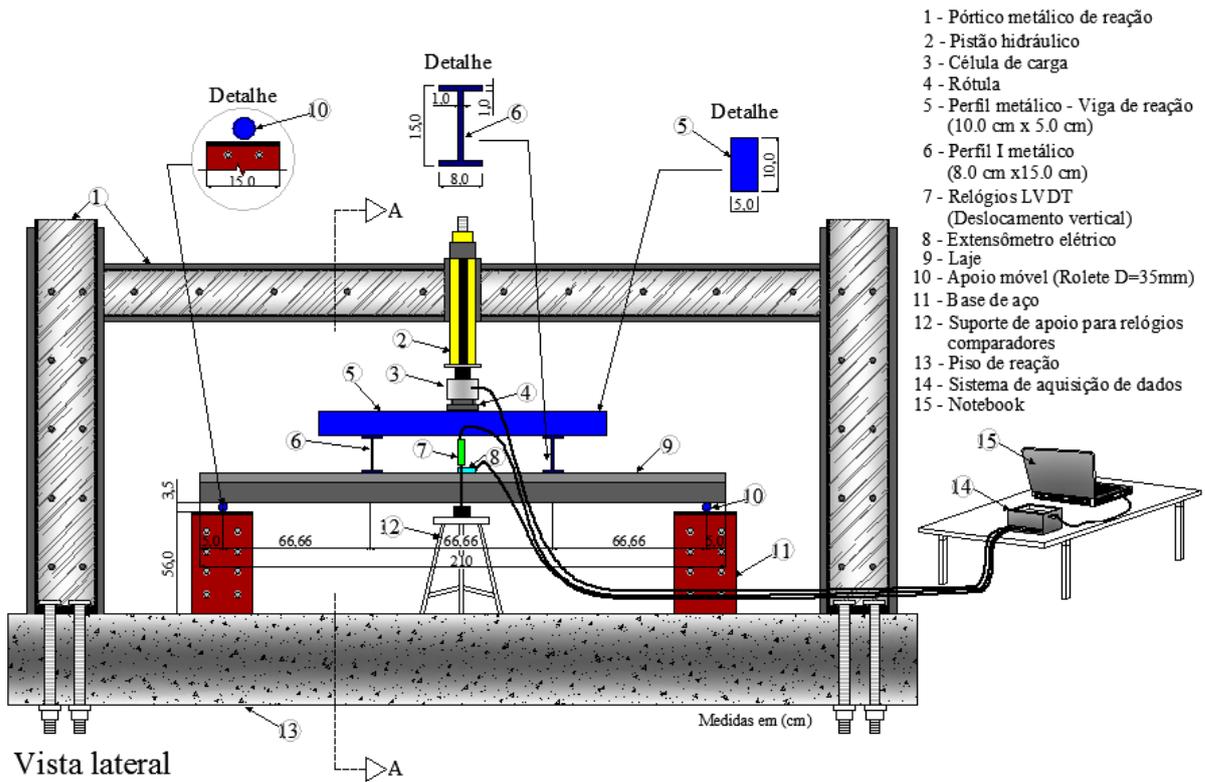


Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.6 Instrumentação e Procedimento de Ensaio a Flexão em 4 Pontos

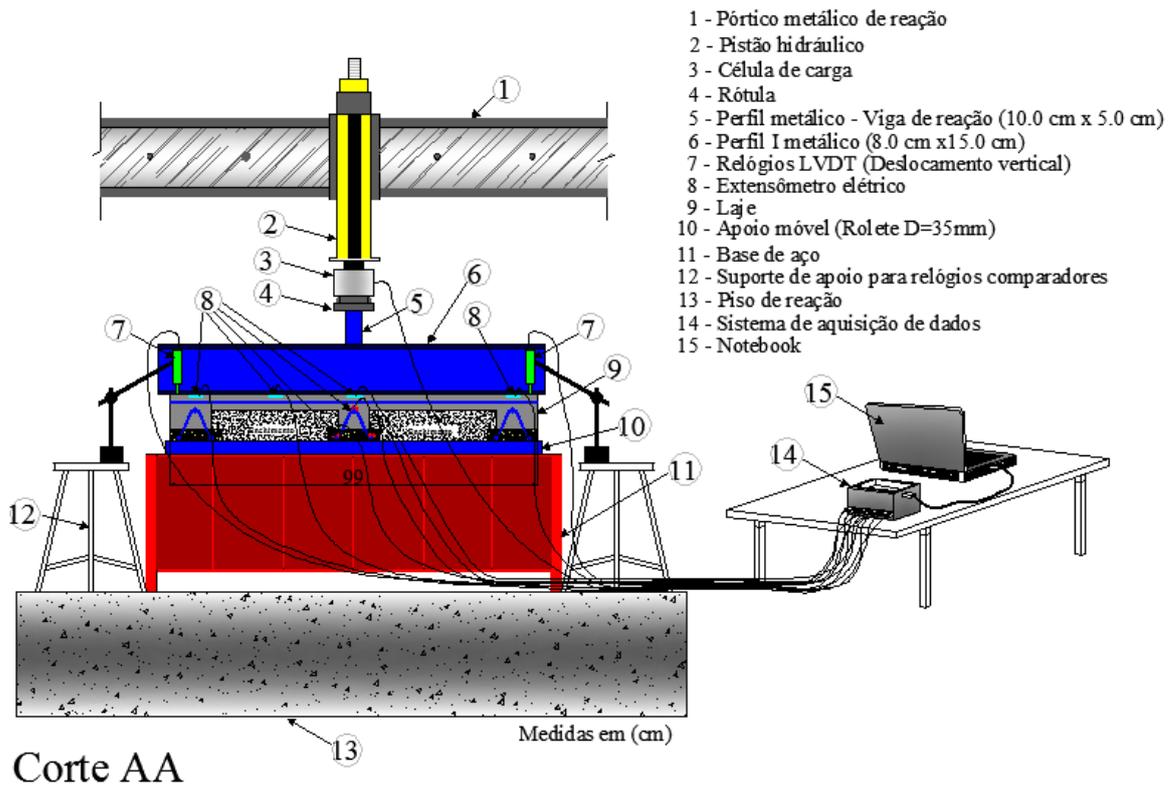
Após a concretagem e passado os 28 dias de cura, realizou-se então o ensaio de flexão em 4 pontos, as vigas de reação (perfis I) ficaram locadas a um terço dos apoios de cada modelo. Para coleta dos dados, os relógios comparadores, a célula de carga e os extensômetros elétricos (fixados na capa de compressão e nas armaduras das vigotas pré-moldadas) foram conectados ao sistema de aquisição de dados. As Figuras 56 e 57 mostram os detalhes deste ensaio. A disposição do ensaio seguiu a proposta adotada por Fazzan (2011). Os ensaios de flexão foram executados no Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural (NEPAE) da UNESP Campus Ilha Solteira.

Figura 56 - Vista lateral - Esquema de ensaio de resistência a flexão (dimensões em cm).



Fonte: Autoria Própria (2021).

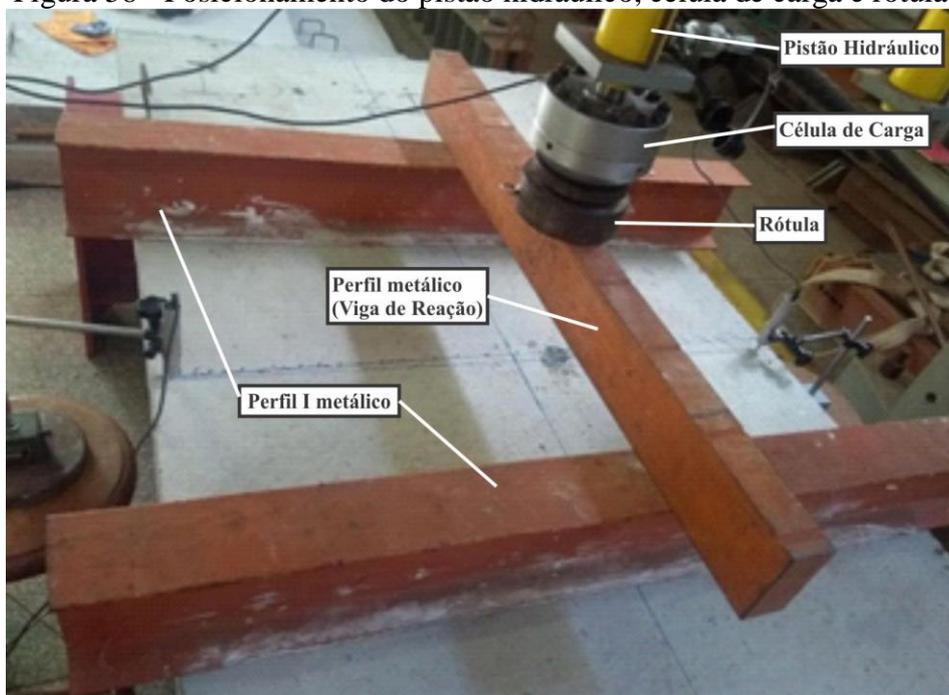
Figura 57 - Corte AA - Esquema de ensaio de resistência a flexão (dimensões em cm).



Fonte: Autoria Própria (2021).

A aplicação das cargas foi dada por um cilindro hidráulico acoplado a uma célula de carga com capacidade de 100 kN. A distribuição das forças foi distribuída por dois perfis em “I” metálicos de base de 8,0 cm por 15,0 cm de altura e um perfil metálico (viga de reação, seção retangular) de base de 5,0 cm por 10,0 cm de altura, foi utilizado uma rótula metálica entre a célula de carga e a viga de reação, conforme mostra a Figura 58.

Figura 58 - Posicionamento do pistão hidráulico, célula de carga e rótula.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Com auxílio de dois relógios LVDT ligados ao sistema de aquisição de dados, posicionados no centro das lajes, um em cada borda, foi possível medir os deslocamentos verticais ao longo do carregamento, como mostra as Figura 59. A Figura 60 mostra a estrutura completa do ensaio de ruptura e aquisição de dados.

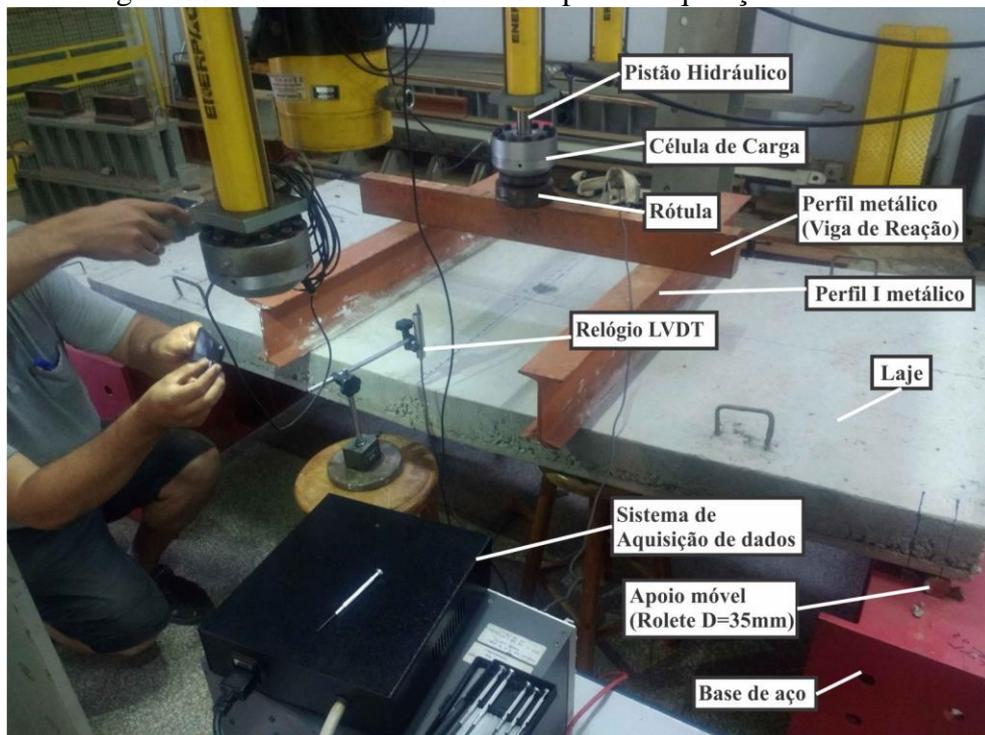
A velocidade de carregamento do ensaio de flexão foi de aproximadamente 30 kN/s.

Figura 59 - Instalação e posicionamento dos relógios LVDT. a) Posicionamento na face direita. b) Posicionamento na face esquerda.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 60 - Estrutura do ensaio de ruptura e aquisição de dados.

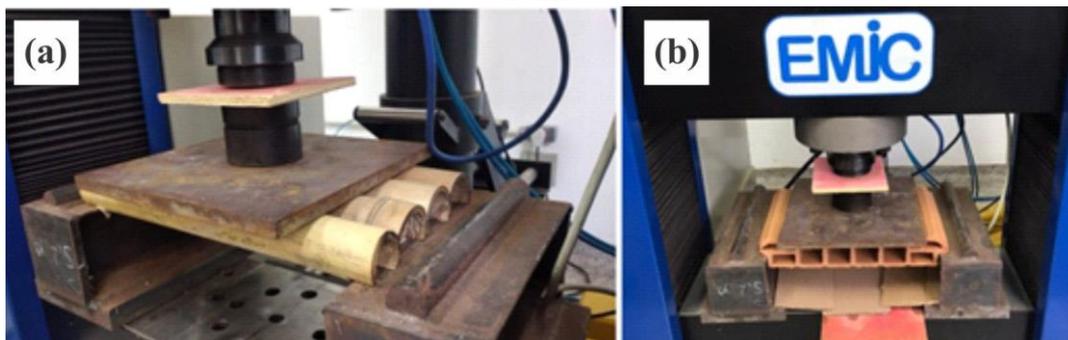


Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.7 Ensaio de Flexão dos Elementos de Enchimento

O ensaio de compressão das lajotas cerâmicas e dos bambus seguiram as prescrições da ABNT NBR-14859-2 (ABNT, 2016). Para padronização dos ensaios, visando uma semelhança no padrão de dimensão dos 2 elementos de enchimento (lajota cerâmica e bambu), adotou-se a quantidade de 4 peças de bambu posicionados paralelamente, como mostra a Figura 61. Para realização dos ensaios, utilizou-se uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 300 kN da marca INSTRON™.

Figura 61 - Ensaio de resistência dos elementos de enchimento. a) Bambu. b) Lajota cerâmica.

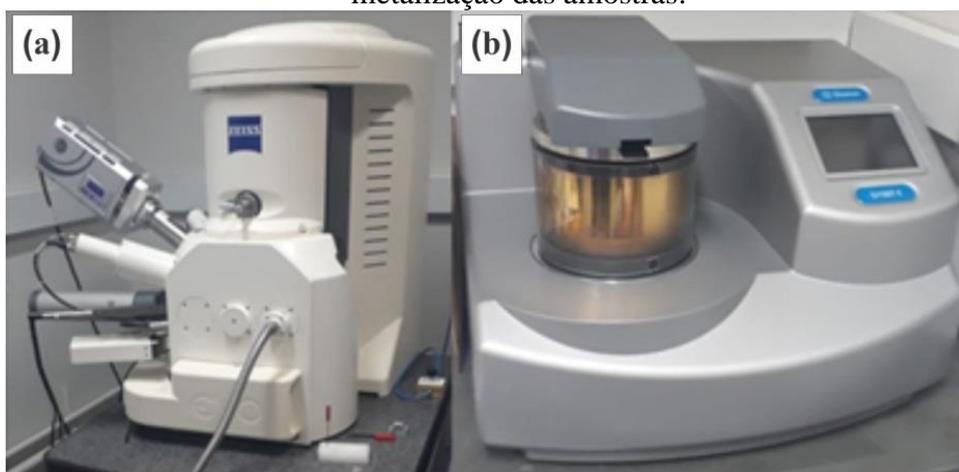


Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.2.8 Caracterização Microestrutural por Meio do MEV

Amostras de bambu foram metalizadas por meio de um banho de plasma de ouro e em seguida foram analisados por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca ZEISS, modelo EVO LS15 com o objetivo de analisar as microestruturas do bambu e as características das fibras. A Figura 62b mostra o equipamento utilizado para realização da metalização das amostras e a Figura 62a o equipamento utilizado na realização do MEV.

Figura 62 - a) Aparelho utilizado para realização do MEV. b) Aparelho utilizado na metalização das amostras.



Fonte: Autoria Própria (2021).

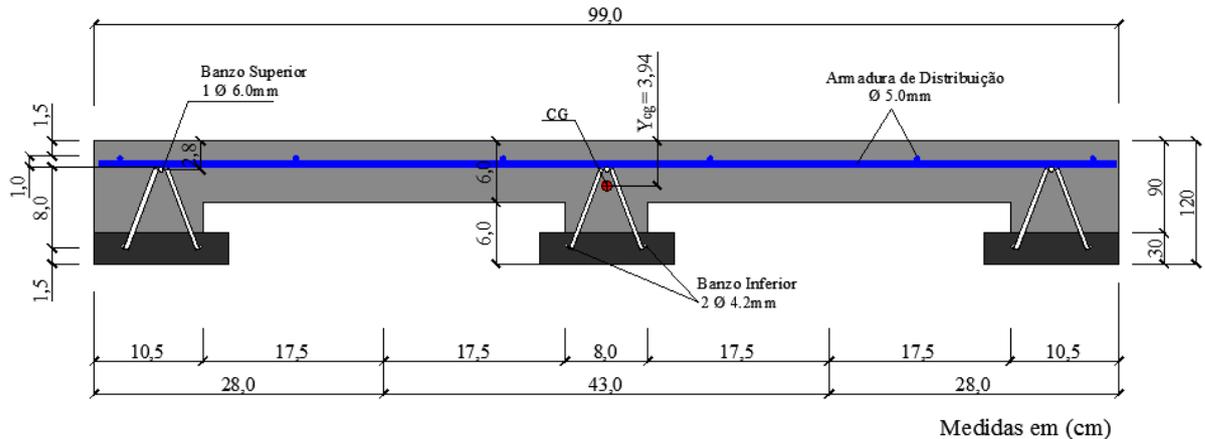
3.8.3 Dimensionamento dos Modelos de Lajes Pré-Fabricadas Treliçadas

3.8.3.1 Características Geométricas do Modelo de laje

A geometria dos modelos da laje é representada conforme a Figura 63 e a Tabela 19 para as lajes com lajota cerâmica e Figura 64 e a Tabela 20 para as lajes com bambu, representando

sua seção transversal para o dimensionamento e suas propriedades geométricas, respectivamente.

Figura 63 - Seção transversal da laje com lajota cerâmica para o dimensionamento.



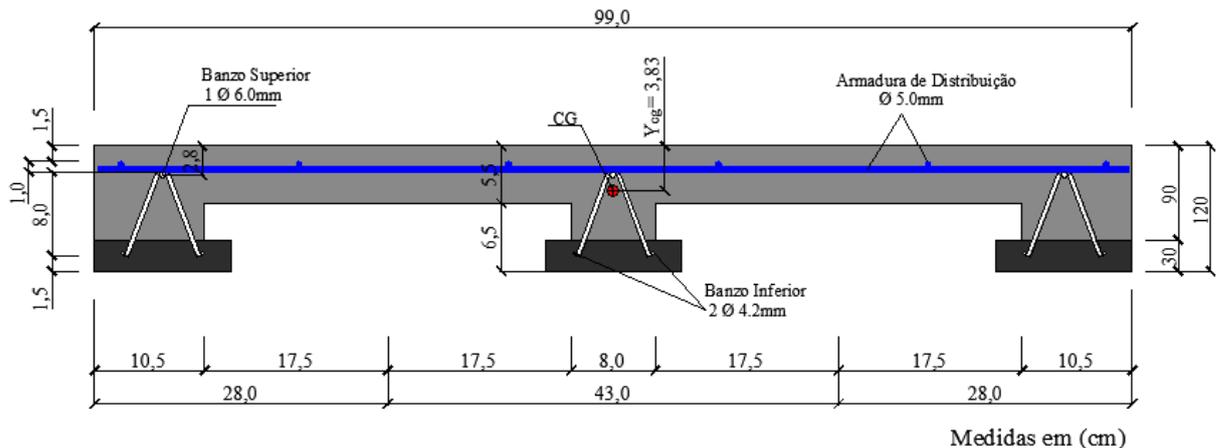
Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 19 - Propriedades geométricas das lajes com lajota cerâmica.

Propriedades geométricas da seção transversal		
Área (cm ²)	A_g	306
Altura (cm)	h	12
Altura útil (cm)	d	10,29
Altura da mesa (cm)	h_f	6,0
Largura (cm)	b_t	99
Largura da nervura (cm)	b_w	8
Centro geométrico em y (cm)	y_{cg}	3,94
Momento de inércia (cm ⁴)	I_g	2374,94
Área de aço banzos inferiores (cm ²)	A_{st}	0,28

Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 64 - Seção transversal da laje com bambu para o dimensionamento.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 20 - Propriedades geométricas das lajes com bambu.

Propriedades geométricas da seção transversal		
Área (cm ²)	Ag	288,5
Altura (cm)	h	12
Altura útil (cm)	d	10,29
Altura da mesa (cm)	hf	5,5
Largura (cm)	bt	99
Largura da nervura (cm)	bw	8
Centro geométrico em y (cm)	y_{cg}	3,83
Momento de inércia (cm ⁴)	I_g	2313,85
Área de aço banzos inferiores (cm ²)	A_{st}	0,28

Fonte: Autoria Própria (2021).

3.8.3.2 Previsão da Flecha Imediata – Modelo Proposto por Branson (1963).

As características mecânicas estão representadas pela Tabela 21, as quais foram estabelecidas pelo método de Branson (1963).

Tabela 21 - Características mecânicas, método Branson.

Características	Unid.	Modelos			
		LJLC	LJLC	LJBA	LJBA
		SE	CE	SE	CE
Resistência média a compressão (f _{cm})	kN/cm ²	-	2,6	-	2,6
Resistência a Tração Axial (f _{ct, m})	kN/cm ²	-	0,2633	-	0,2633
Momento de Inércia (I _c)	cm ⁴	-	2374,94	-	2313,85
Momento de fissuração (M _r)	kN.cm	-	93	-	89,48
Módulo de Elasticidade Secante (E _{cs})	kN/cm ²	-	2427,13	-	2427,13
Módulo de Elasticidade do aço (E _s)	kN/cm ²	-	210000	-	210000
α _e	---	-	8,65	-	8,65
Posição da Linha Neutra (x)	cm	-	1,02	-	1,02
Momento de Inércia Estádio II (I _{II})	cm ⁴	-	223,39	-	223,39

Fonte: Autoria Própria (2021).

As previsões das flechas imediatas constarão nos modelos de cálculo a seguir para os modelos LJ-ref. e Lj-bambu que foram instrumentadas com extensômetros. De acordo com a equação 15, inicia-se calculando o Momento de Fissuração (M_r).

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_g}{y_{cg}} \quad \text{Eq. 15}$$

Em que:

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares e $1,2$ para seções T ou T duplo;

f_{ct} = resistência a tração direta do concreto ($f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$);

I_g = Momento de Inércia da seção bruta de concreto;

y_{cg} = distância do centro de gravidade da seção para a fibra mais tracionada.

Calcula-se e avalia nos Estádios I (relação entre a área do concreto e a armadura - α_e , expressas pelas equações 16 e 17) e II (adquirindo a posição da linha neutra (x)).

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad \text{Eq. 16}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 17}$$

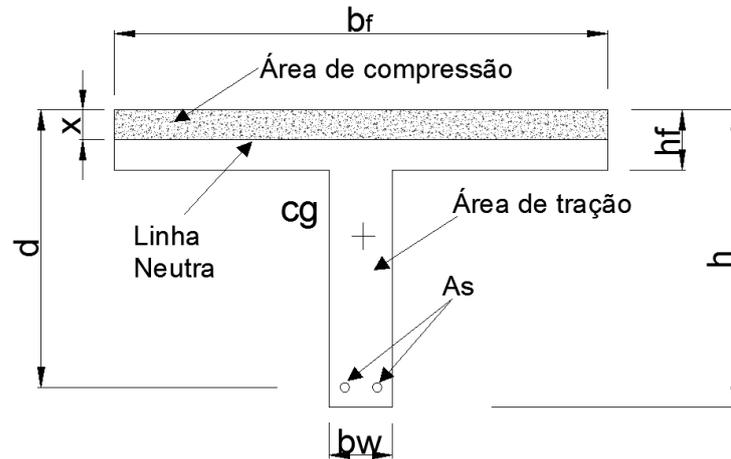
Em que:

E_{cs} = Módulo de Elasticidade secante do concreto;

f_{ck} = Resistência Característica do concreto aos 28 dias.

A Figura 65 representa a seção transversal T no Estádio II puro, sendo necessário conhecer a posição da linha neutra (adotando que a linha neutra corta a mesa, ou seja, $x < hf$) e considerar o momento estático (m_s) igual a 0, o qual a armadura comprimida contribuirá. As equações 18 a 20 expressam o roteiro de cálculo para se adquirir a flecha máxima imediata ($v_{m\acute{a}x}$), dada pela equação 21.

Figura 65 - Seção Transversal em forma de “T”, no Estádio II puro



Fonte: Adaptado Carvalho; Figueiredo Filho (2004).

$$m_s = 0 \rightarrow \alpha_e = [\sum A_s \cdot (d - x)] - b_f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad \text{Eq. 18}$$

$$I_{II} = b_f \cdot \frac{x^3}{12} + b_f \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \alpha_e \cdot \sum A_s \cdot (d - x)^2 \quad \text{Eq. 19}$$

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad \text{Eq. 20}$$

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{P \cdot a \cdot (3l^2 + 4a^2)}{24 (EI)_{eq}} \quad \text{Eq. 21}$$

Em que:

m_s = Momento estático;

α_e = relação entre Módulo de Elasticidade do aço pelo Módulo de Elasticidade secante do concreto;

A_s = área do aço;

b_f = largura da mesa;

I_{II} = Momento de Inércia na seção do Estádio II;

$(EI)_{eq}$ = Rigidez equivalente;

M_a = Momento fletor máximo na seção analisada;

M_r = Momento de fissuração do elemento estrutural;

$v_{\text{máx}}$ = flecha máxima;

a = distância do carregamento ao apoio.

3.8.4 Análise de Custos

Considerando que o trabalho propôs um novo método construtivo de lajes pré-fabricadas comparadas ao método convencional, foram analisados os custos dos materiais utilizados para confecção das duas tipologias, sendo desprezados os custos de formas e mão de obra para montagem, pois o processo para ambas as tipologias é semelhante. Para análise dos custos, estabeleceu-se o mesmo critério de comercialização, ou seja, estabelecidos valores por metro quadrado de laje produzida. Para as lajes produzidas com bambu, consideraram custos estimados de mão de obra para o corte dos bambus no local da extração, transporte local (local da extração do material até a fábrica), custos de mão de obra para seleção e cortes das peças em tamanhos padronizados e execução dos dentes de encaixe. Demais custos para aquisição do material (bambu) nesse experimento não foram considerados, pois se trata de um material disponibilizado na natureza, de fácil acesso.

Para os demais custos de fabricação utilizaram valores unitários de cada material utilizado no processo de fabricação, sendo analisados a quantidade e custo das vigotas pré-moldadas, a quantidade e custo dos elementos de enchimento, a quantidade e custo do aço utilizado na armadura de distribuição e a quantidade e custo dos concretos utilizados na capa de compressão, ambos os valores e quantidade dimensionado para 1,0 m² de laje. Para análise dos custos de cada laje utilizou-se as seguintes composições:

- Vigotas pré-moldadas: Quantidade (m/m²) x custo real de mercado (R\$/m);
- Material de enchimento: Quantidade (un/m²) x custo real de mercado (R\$/un);
- Aço para armadura de distribuição: Quantidade (m/m²) x custo real de mercado (R\$/m);
- Concreto para capa de compressão: Quantidade (m³/m²) x custo real de mercado (R\$/m³).

A equação 22 apresenta a composição para obtenção da quantidade de vigotas pré-fabricadas necessárias para 1,0 m² de laje.

$$Vigotas = \frac{A_{laje}}{l_{vigotas}} = \frac{1}{0,43} = 2,33 \quad \text{Eq. 22}$$

Em que:

$V_{vigotas}$ = quantidade de vigotas necessárias para 1,0 m² de laje – unidade de medida (m);

A_{laje} = área de lajes – unidade de medida (m²);

$I_{vigotas}$ = interreixo entre as vigotas pré-fabricadas – unidade de medida (cm).

A equação 23 apresenta a composição para obtenção do volume de concreto da capa de compressão necessária para 1,0 m² de laje.

$$C_{concreto} = (L_{vigota} - L_{apoios}) \cdot vigotas + E_{capa} \cdot A_{laje} \quad \text{Eq. 23}$$

Em que:

$C_{concreto}$ = volume de concreto necessário para 1,0 m² de laje – unidade de medida (m³);

$L_{vigotas}$ = largura das vigotas pré-moldadas – unidade de medida (cm), sendo esse valor igual a 13,0 cm;

L_{apoios} = largura dos apoios dos elementos de enchimento – unidade em (cm), sendo esse valor igual a 0,05 cm; $V_{vigotas}$ = quantidade de vigotas necessárias para 1,0 m² de laje – unidade de medida (m), sendo esse valor igual a 2,33 m;

E_{capa} = espessura do concreto da capa de compressão – unidade de medida (cm), sendo esse valor de 6,0 cm para as lajes com lajota cerâmica e 5,5 cm para as lajes com bambu;

A_{laje} = área de lajes – unidade de medida (m²), sendo esse valor igual a 1,0 m².

Por meio da equação 24 foi possível obter a composição final do custo para fabricação de 1,0 m² de laje.

$$\Sigma_{total} = \Sigma_{vigotas} + \Sigma_{el.enchimento} + \Sigma_{aço\ dist.} + \Sigma_{concreto} \quad \text{Eq. 24}$$

Em que:

Σ_{total} = somatória final do custo unitário dos insumos necessários para fabricação de 1,0 m² de laje – unidade de medida (R\$/m²);

$\Sigma_{vigotas}$ = custo unitário x quantidade das vigotas pré-moldadas por m² – unidade de medida (R\$/m²);

$\Sigma_{el.enchimento}$ = custo unitário x quantidade de elementos de enchimento por m² – unidade em (R\$/un);

$\Sigma_{aço\ dist}$ = custo unitário x quantidade de aço por m² – unidade em (R\$/m);

$\Sigma_{\text{concreto}} = \text{custo unitário} \times \text{volume de concreto por m}^2 - \text{unidade em (R\$/m}^3\text{)}$.

Foi analisado também o custo para acabamento/revestimento da face inferior das lajes para as duas tipologias, sendo esse procedimento de revestimento comumente aplicado na prática na execução de lajes pré-fabricadas. A execução do revestimento se faz necessária para apresentar um acabamento visual no interior da residência, após a execução da laje.

Para representar os custos considerando que para a laje executada com lajota cerâmica é comum à execução do revestimento com reboco mais pintura. Já para a laje executada com bambu, pelo fato do elemento (bambu) proporcionar uma estética visual (rústico), optou-se por um acabamento mais simples, ou seja, aplicação de uma pintura à base de verniz nos elementos de enchimento e uma mão de massa corridas, e pintura na face inferior das vigotas pré-moldadas.

Foram analisados para 1,0 m² de laje produzida: os custos de materiais, mão de obra para execução do reboco, pintura nas lajes com lajota cerâmica, os custos do material, mão de obra para execução de verniz nos elementos de enchimento, massa corrida mais pintura nas vigotas pré-moldadas para as lajes produzidas com bambu.

3.9 Resultados e discussões

Para este tópico serão avaliadas as resistências mecânicas de lajotas e das lajes, serão analisados o comportamento experimental e teórico das deformações em relação ao momento fletor. Para comprovar a representatividade dos resultados foi feito um tratamento estatístico com base no teste de Tukey, este método se baseia em códigos, o código com maior índice “aj”, em que j varia de 1 a n, sendo o grupo com maior número apresenta a composição com o melhor desempenho (maior média), e a ligeiramente menor, logicamente apresenta média inferior, quando o índice j for o mesmo para as variáveis em estudo, significa que elas não são distintas entre si, ou seja, mesmo que numericamente sejam diferentes, estatisticamente não o são, visto que seus valores não são representativos em relação à média.

3.9.1 Resistência do Concreto Utilizado na Capa

A Tabela 22 apresenta os resultados da resistência mecânica à compressão e do módulo de elasticidade do concreto usado na capa na idade de 28 dias. Foi possível evidenciar por meio dos resultados que o concreto utilizado seguiu os critérios mínimos prescritos na 14859-1 (ABNT, 2016).

Tabela 22 - Resistência mecânica a compressão do concreto da capa aos 28 dias.

Corpos de prova	Resistência a compressão axial (MPa)	Resistência a compressão axial - Média (MPa)	Módulo de elasticidade à compressão - Média (GPa)
CP-1	27,86		
CP-2	24,27	25,92	31,65
CP-3	25,64		

Fonte: Autoria Própria (2021).

3.9.2 Resistência Mecânica à Compressão dos Elementos de Enchimento

A Tabela 23 apresenta os resultados da resistência mecânica na compressão (σ_c) dos elementos de enchimento, e foi possível verificar que ambos atenderam os critérios mínimos prescritos na ABNT NBR 14859-1 (ABNT, 2016). Neste caso, como a variação da média dos resultados é pequena e a amplitude de resistência mecânica é bem destacada entre as lajotas cerâmicas e o bambu, não será necessário fazer o teste de Tukey.

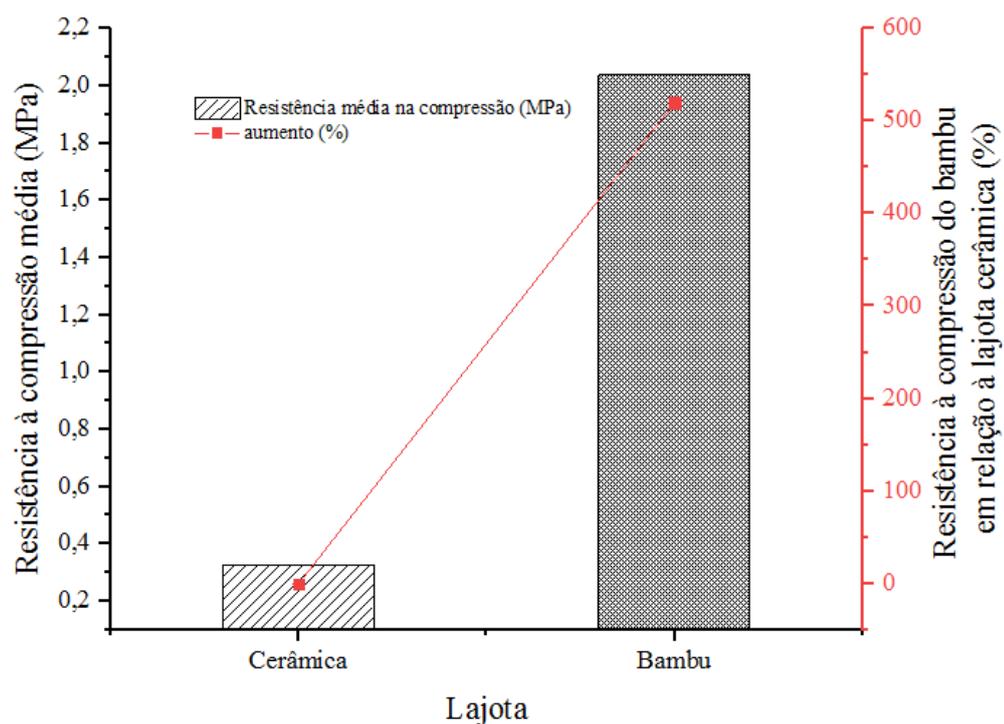
Tabela 23 - Resistência mecânica à compressão dos elementos de enchimento

Elemento de enchimento	F_{rup} (daN)	σ_c (MPa)	$\sigma_{cmédia}$ (MPa)	Sd	CV (%)
Lajota cerâmica - 1	184,61	0,31			
Lajota cerâmica - 2	203,67	0,34	0,33	0,015	4,68%
Lajota cerâmica - 3	199,34	0,33			
Bambu - 1	1231,05	2,06			
Bambu - 2	1198,34	2,00	2,04	0,035	1,70%
Bambu - 3	1234,53	2,06			

Fonte: Autoria Própria (2021).

A elevada resistência à compressão do bambu em relação à lajota cerâmica mostrada na Figura 66 permite que o operário execute toda instalação e concretagem da laje sem a necessidade da utilização de tábuas para se movimentar sobre elas, esta vantagem oferece ganho de tempo na execução da obra e economia com as tábuas, a Figura 67 mostra o operário sobre os bambus.

Figura 66 - Resistência mecânica na compressão da lajota cerâmica e do bambu (MPa).



Fonte: Autoria Própria (2021).

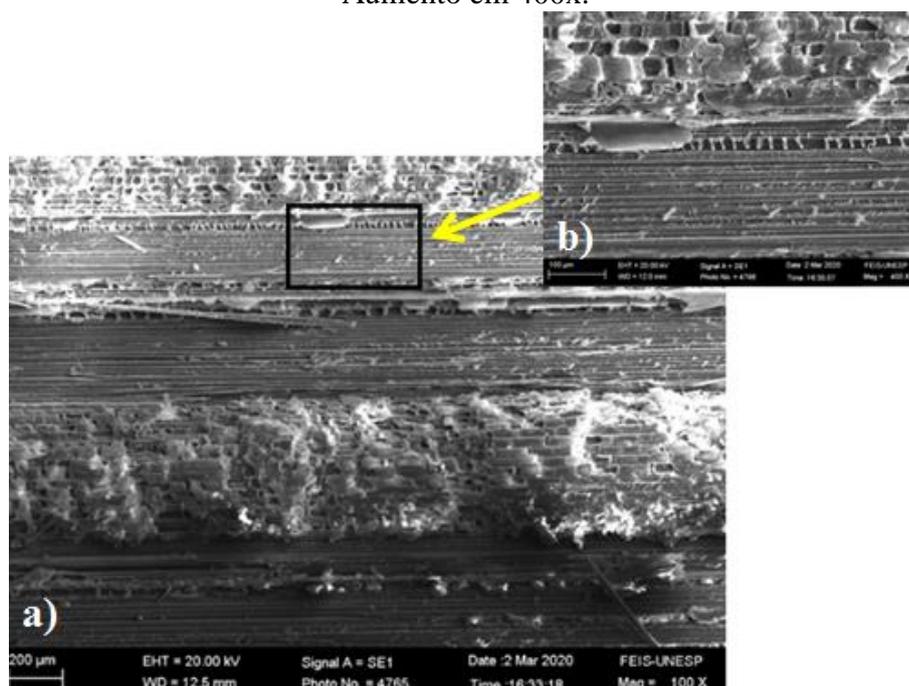
Figura 67 - Operário em cima do bambu a) instalação da laje. b) concretagem



Fonte: Autoria Própria (2021).

Devido às propriedades elevadas na tração e compressão, o bambu é utilizado largamente em estruturas, na Figura 68a mostra as fibras em geral (aumento de 100x) e na Figura 68b (aumento de 400x) a um destaque destas fibras bem compactas, dando configuração favorável para sua eficiência mecânica.

Figura 68 - Detalhamento das fibras do bambu por meio do MEV. a) Aumento em 100x. b) Aumento em 400x.



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.9.3 Massa Específica das Lajes

A Tabela 24 mostra os resultados da análise da massa específica (ρ) de cada laje confeccionada. Diante dos resultados foi possível observar que as lajes com bambu apresentaram redução da ρ em relação às lajes com lajota cerâmica.

Tabela 24 – Massa específica das lajes

Tipo	Peso médio (daN)	ρ (kg/m ³)	Sd	CV (%)
Lj-ref.	462,00	1851,85	310,42	9,58
Lj-bambu	435,67	1746,31	171,12	5,62

Fonte: Autoria Própria (2021).

A análise estatística pelo teste de Tukey, como mostra a tabela 25 afirma que as tipologias de lajes são diferentes entre si, ou seja, o peso da Lj-bambu é representativo, portanto esta laje é mais leve que a Lj-ref.

Tabela 25 – Análise estatística da massa específica das lajes.

ANOVA						
Fonte da variação		<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr>Fc</i>
Entre grupos		1040,17	1	1040,17	168,676	0,00
CV (%) =	0,55					
Média geral:	448,83	Número de observações:		5		
Teste Tukey peso						
Tratamento	Média	Resultado do Teste				
Lj-bambu	435,67	a1				
Lj-ref	462,00	a2				

Fonte: Autoria Própria (2021).

Contudo é válido observar que as lajes produzidas com bambu tiveram uma capa com altura de 0,5 cm inferior em média às lajes produzidas com lajota cerâmica, podendo afirmar que as lajes apresentaram valores reais de ρ muito próximos, sendo prudente orientar que a Lj-bambu não garante ser mais leve que a Lj-ref

3.9.4 Análise dos Resultados Experimentais com os Teóricos Envolvendo Deslocamentos

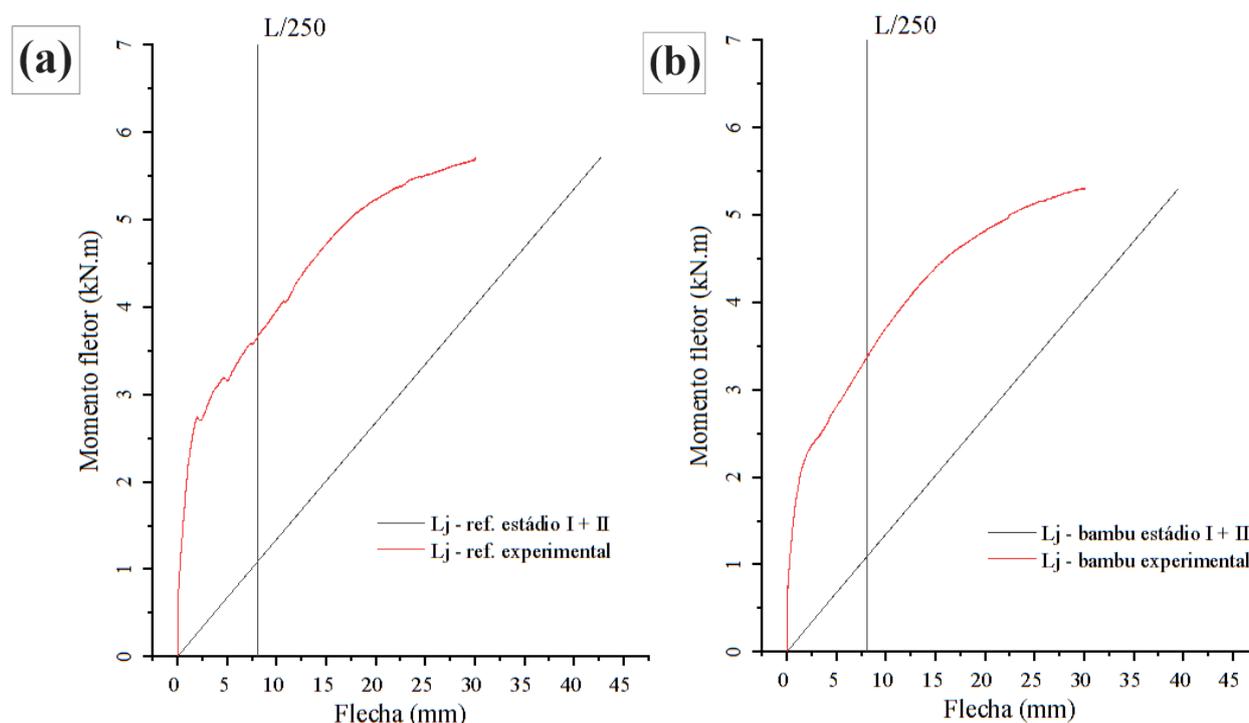
3.9.4.1 Método de Branson – Estádio I

Neste capítulo foi realizado as análises experimentais e teóricas (Branson) para as lajes propostas, foi feito a análise teórica dentro de um estado sem fissuras no concreto, e as cargas (peso próprio + carregamento) não ultrapassassem o momento de fissuração (M_r), demonstrado pelas contas em Anexo.

3.9.4.2 Análise da Curva Experimental e Teórica - Estádio I+II

Após análise do estágio I, realizou-se a verificação do estágio II que é o estudo da flexão pura, considerando a seção fissurada é possível analisar estes dois estádios (os cálculos estão em Anexos), desta forma, pode-se avaliar os valores teóricos das flechas previstas com as experimentais (imediatas) obtidas por meio dos relógios comparadores (LVDT). As Figuras 69a e 69b mostram respectivamente esta análise para a Lj-ref. e a Lj-bambu.

Figura 69 - Curvas teóricas e experimentais dos momentos fletores x flechas (Estádio I+II), a) Laje Referência e b) laje com lajotas de bambu.

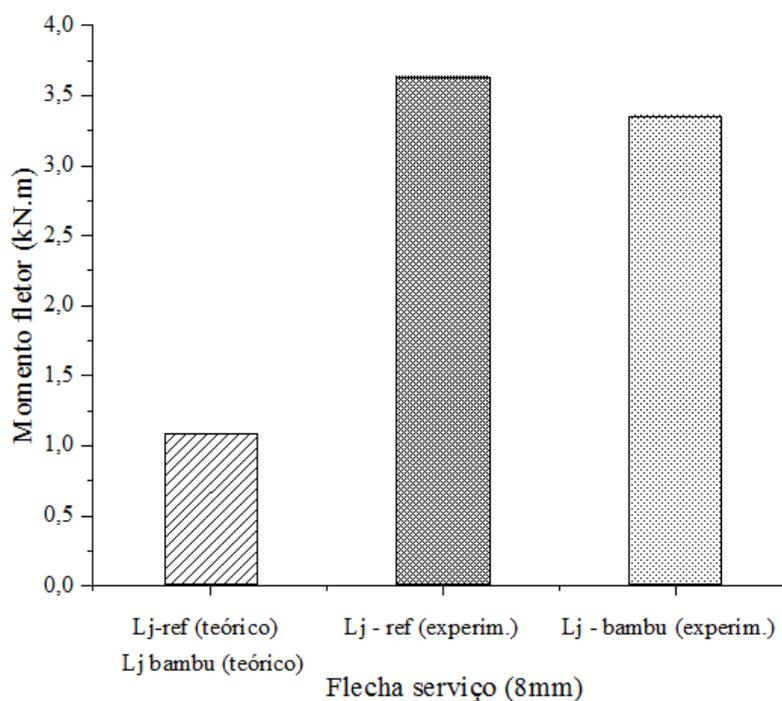


Fonte: Autoria Própria (2021).

Nas Figuras 69a e 69b é possível notar que as flechas experimentais são menores que a teórica, mostrando que ambas atendem as prescrições normativas da norma ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), estes resultados semelhantes confirmam o que era previsto - os elementos de enchimento não alteraram os efeitos mecânicos. No trabalho de VARGAS (2013) quando utilizou lajes com materiais de enchimento do tipo garrafa PET, (LJPET) latinhas de alumínio (LJLT) e por último embalagens de leite (caixas cartonadas) (LJCX), o autor não manteve a padronização das distâncias intereixos, como foi feito neste trabalho, ele usou 4 vigotas para cada tipologia, desta forma obteve valores de carregamentos na ruptura maiores que a laje referência, com lajotas (tabela) cerâmicas (LJTV) variando em ganhos de 14 a 19%.

Nas Figuras 69a e 69b é possível verificar a flecha de serviço ($L/250 = 8$ mm), nota-se que os momentos fletores experimentais foram maiores que o teórico, ou seja, a flecha de serviço foi alcançada com carregamentos maiores, favorecendo a segurança, este aumento em relação a flecha de serviço pode ser visto na Figura 70.

Figura 70 - Curvas teóricas e experimentais dos momentos fletores x flechas (Estádio I+II).



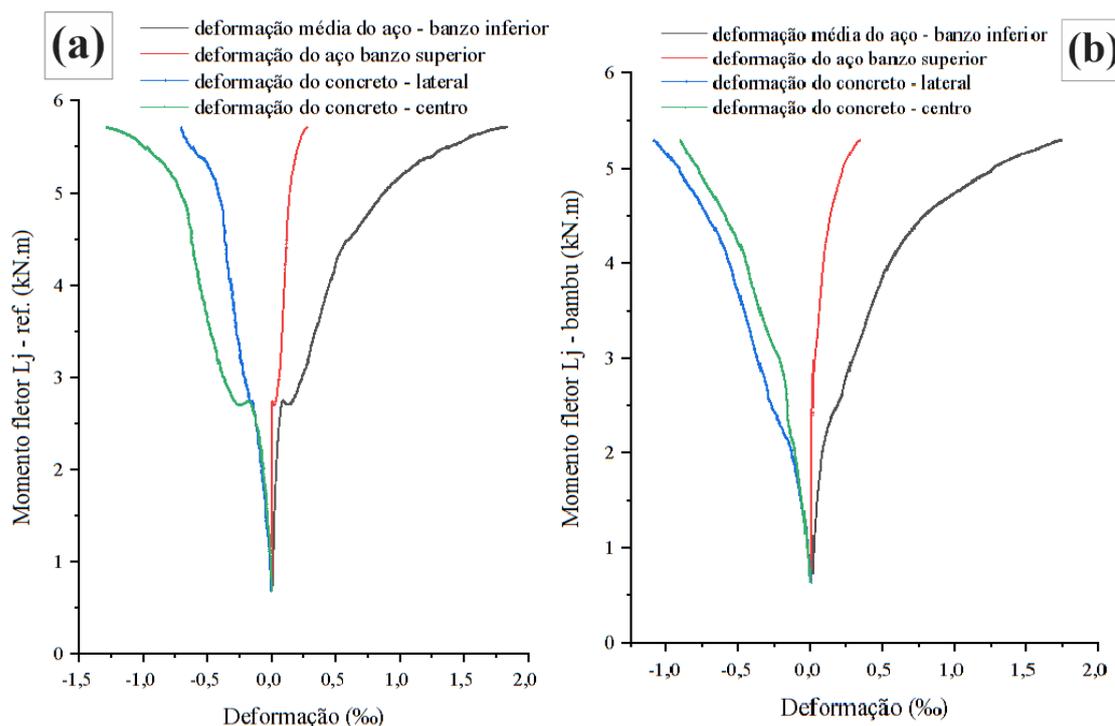
Fonte: Autoria Própria (2021).

3.10 Análise das Deformações do aço e do Concreto

As deformações analisadas neste item refletem os resultados dos extensômetros elétricos instalados no aço e no concreto, os extensômetros elétricos instalados na meia distância entre aqueles colocados na lateral e no centro, assim como um da lateral, dos dois disponíveis, não foram lidos pelo sistema de aquisição de dados, pelo problema no canal, contudo, estas ocorrências não prejudicaram as análises.

Na Figura 71a e figura 71b é possível observar as deformações no aço e concreto, percebe-se que as deformações foram próximas, mostrando que as tipologias são semelhantes, o que era esperado. A diferença entre a deformação lateral e central indica possível efeito de torção, contudo esta particularidade é pela disposição construtiva e não tem correlação com as tipologias empregadas, a deformação do aço ficou abaixo de 2 (‰)

Figura 71 - Deformações no concreto e no aço. a) lajes com lajota cerâmica. B) Lajes com enchimento de bambu.



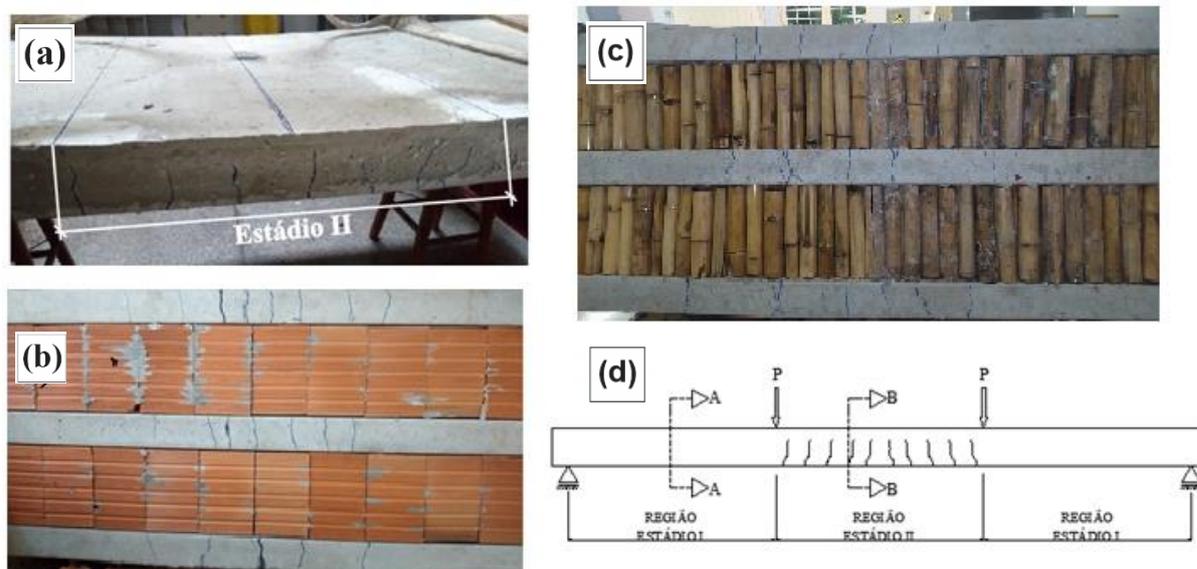
Fonte: Autoria Própria (2021).

3.11 Análise do Padrão de Fissuras

As lajes Lj-ref. e Lj-bambu mostraram o mesmo padrão de fissuras, a partir do instante em que as tensões principais de tração forem maiores que a resistência de tração do concreto, surgem as fissuras, ou seja, dentro da região do estágio II. O padrão para estas fissuras é uma direção aproximadamente vertical, ou seja, perpendicular à direção das tensões principais de tração, como mostra a Figura 72a e 72d (representação esquemática dos estádios I e II em duas cargas pontuais a 1/3 de cada apoio), as Figuras 72b e 72c mostram respectivamente as fissuras por baixo da laje Lj-ref. e Lj-bambu. As cargas de ruptura média que geraram estas fissuras são mostradas na tabela 26 e Figura 73.

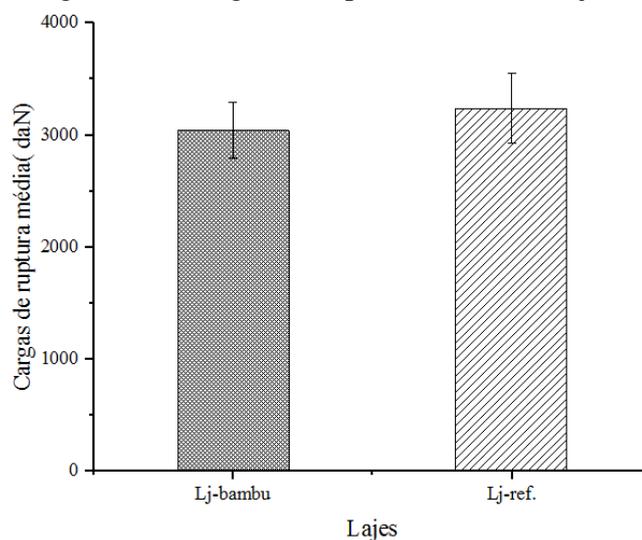
Por meio da análise de fissuração foi possível também observar que os elementos de enchimento de ambas as tipologias de lajes produzidas não sofreram deformação visíveis, conforme mostra as Figuras 72b e 72c.

Figura 72 - Fissuras dentro do estágio II. a) fissuras verticais na lateral. b) fissuras na Lj-ref. c) fissuras na Lj-bambu e d) representação dos estádios de fissuração (I e II).



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura 73 - Cargas de ruptura média das lajes.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Pela figura 73, é possível notar que os valores e variações de erro para as cargas de ruptura das tipologias de lajes analisadas são semelhantes, o teste de Tukey da tabela 26 afirma que elas não são distintas entre si.

Tabela 26 – Teste de Tukey para as cargas de ruptura das lajes.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr>Fc</i>
Entre grupos	59302,04	1	59302,04	1,062	0,36
CV (%) =	7,52				
Média geral:	3142,08	Número de observações:	6		
Teste Tukey σ_c					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
Lj-bambu	3042,67	a1			
Lj-ref	3241,50	a1			

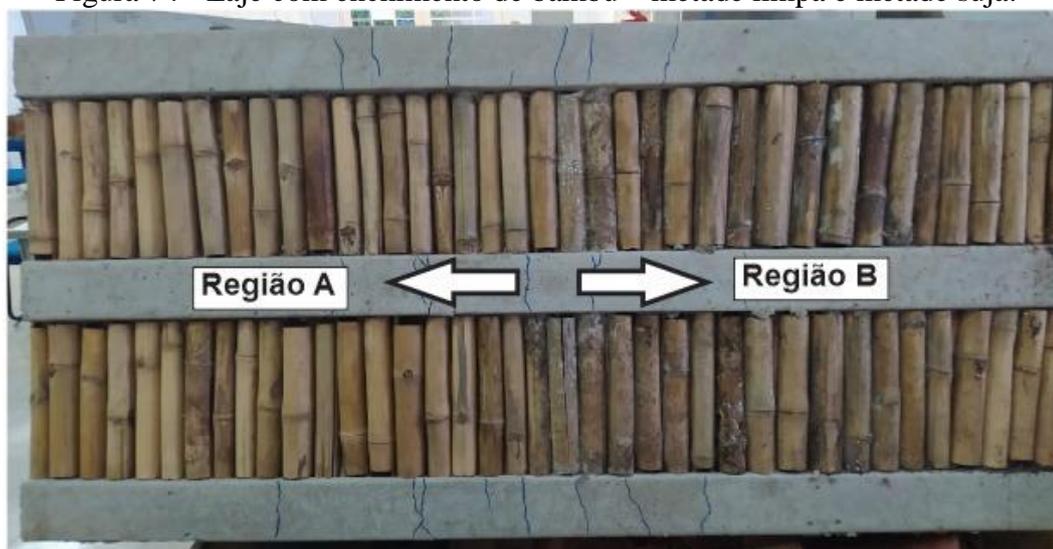
Fonte: Autoria Própria (2021).

Pelo teste de Tukey mostrado pela tabela 26 é possível verificar que as tipologias possuem valores não representativos entre elas, ou seja, elas estatisticamente não são diferentes em termos da carga de ruptura, isso significa que o elemento de enchimento proposto com bambu não gerou variações mecânicas significativas, as lajes são equivalentes.

3.12 Análise de um Revestimento Rústico (Eco-design)

Neste capítulo mostra a laje com enchimento de bambu envernizado como uma alternativa de acabamento rústico, não recomendando a aplicação de revestimentos que tirem o destaque dos bambus, como gesso e a argamassa, esta alternativa além de proporcionar um aspecto de acabamento exótico, visa também, reduzir gastos com mão de obra e materiais. As figuras 74, a Figura 75 e a Figura 76 mostram as etapas desta proposta.

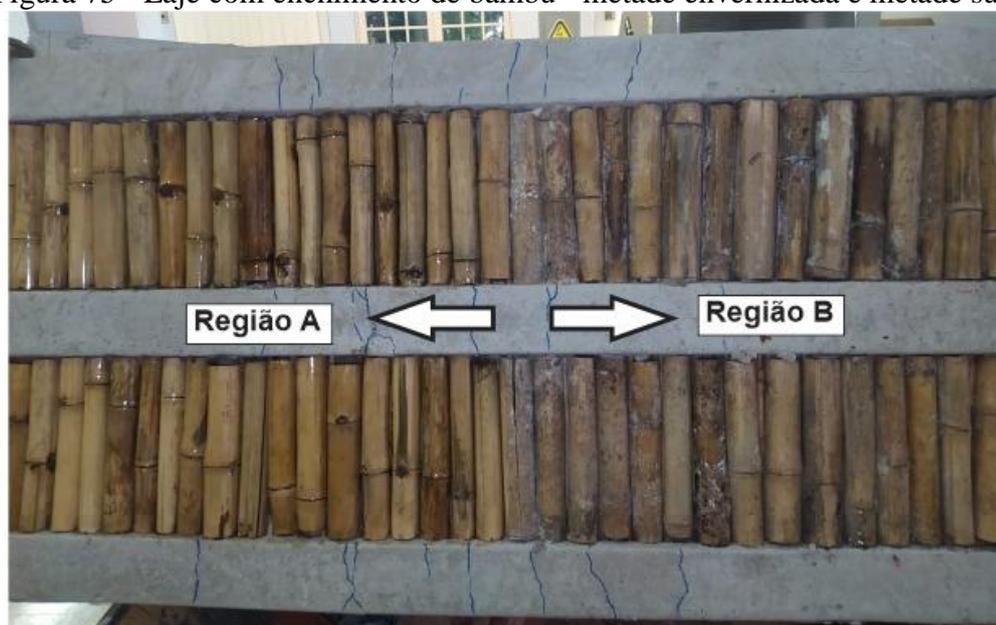
Figura 74 - Laje com enchimento de bambu – metade limpa e metade suja.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Figura 74 é possível visualizar na região a uma região limpa, sem sujeiras grosseiras, nesta região foi passado pano úmido sem muita preocupação com limpeza profunda (mais intensa e detalhada), o processo foi rápido e sem desconforto. Na região b, optou-se por deixar sujo para mostrar a diferença dos efeitos, a laje foi concretada no chão, então o bambu ficou em contato constante com a umidade da cura, diferentemente na situação *in loco*, onde a umidade nos bambus seria apenas a da atmosfera.

Figura 75 - Laje com enchimento de bambu - metade envernizada e metade suja



Fonte: Autoria Própria (2021).

A Figura 75 mostra a laje com enchimento de bambu envernizada com uma demão em 50% de sua extensão, o restante permaneceu sem limpeza e verniz para mostrar a diferença dos efeitos, o verniz foi aplicado pelo autor deste estudo – sem nunca ter aplicado verniz em bambu ou outro substrato.

Figura 76 - Laje com enchimento de bambu - toda envernizada



Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Figura 76, o autor deste estudo aplicou verniz em toda a laje, após limpeza da extensão que estava suja. Nota-se um efeito brilhante, ao total foram duas demãos no substrato limpo, não foi preciso ter experiência, a aplicação foi rápida e sem desconforto de manuseio, o procedimento foi feito com pano umidecido com verniz. Desta forma, a utilização deste material de enchimento é viável esteticamente, considerando que ainda existe melhorias a fazer quando utilizado mão de obra especializada. Contudo, a aplicação mesmo sem experiência mostra que a proposta do emprego destas lajes é viável para todos, inclusive aquelas populações que demandam por uma moradia básica.

3.13 Análise Econômica e Sustentável

A tabela 27 apresenta a quantidade e o custo unitário dos insumos necessários para fabricação das lajes, considerando os valores e quantidades para aplicação em 1,0 m². Diante dos resultados foi possível observar que as lajes produzidas com bambu apresentaram economia de 10,24% (custo de fabricação) diante das lajes produzidas com lajota cerâmica. A economia se deu porque, para produção das lajes com bambu houve diferença da altura da capa de 0,5 cm menor em relação às lajes referência, este evento foi pela variação de diâmetros do bambu em relação a espessura da lajota cerâmica utilizada no experimento. A aquisição do bambu é considerada de baixo custo, os custos contabilizados foram: mão de obra para o corte dos bambus no local da extração, transporte local (local da extração do material até a fábrica), custos de mão de obra para seleção e cortes das peças em tamanhos padronizados e execução dos dentes de encaixe. Além da redução significativa de custo de 10,24% destas lajes em

comparação a convencional, as lajes produzidas com bambu permitem a substituição das lajotas cerâmicas por um novo material sustentável, disponibilizado e extraído da natureza de forma limpa e com custo de aquisição baixa.

A justificativa de maior relevância para o uso da proposta deste estudo se dá porque a lajota cerâmica para ser produzida necessita de matéria-prima escassa e não renovável, a argila. A argila além de escassa e não renovável, seu processo de extração provoca grande impacto ambiental, pois sua extração muitas vezes ilegal provoca a degradação do meio ambiente. A queima da argila, processo principal para produção das lajotas cerâmicas também traz grande problema ambiental, pois os gases poluentes são gerados e jogados na natureza sem nenhum tratamento, fato esse que contribui para o efeito estufa, como é o caso do CO₂.

Tabela 27 - Insumos e custo unitário para confecção das lajes.

Referência para orçamento – Custo composição analítica Sinapi NOVEMBRO/2020 – Desonerada
Custo do dólar comercial atual – US\$ 5,53

Laje com LAJOTA CERÂMICA										
Amostra	Vigota		Materiais de Enchimento		Aço – Ø 5.00mm		Concreto Capa fck 25		Custo Final (R\$/m ²)	Custo Unitário (US\$/m ²)
	Consumo (m/m ²)	Custo Unitário (R\$/m)	Consumo (un/m ²)	Custo (R\$/un)	Consumo (kg/m ²)	Custo Unitário (R\$/kg)	Consumo (m ³ /m ²)	Custo Unitário (R\$/m ²)		
LJCR-1	2,33	10,61	10,0	0,85	1,91	6,20	0,073	355,95	71,10	12,85
LJCR-2	2,33	10,61	10,0	0,85	1,91	6,20	0,071	355,95	70,39	12,73
LJCR-3	2,33	10,61	10,0	0,85	1,91	6,20	0,076	355,95	72,17	13,04
Média:									71,22	12,87
Laje com BAMBU										
Amostra	Vigota		Material de Enchimento	Aço – Ø 5.00mm		Concreto Capa fck 25		Custo Final (R\$/m ²)	Custo Unitário (US\$/m ²)	
	Consumo (m/m ²)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo (Extração, transporte local, ferramentas e cortes) (R\$/m ²)	Consumo (kg/m ²)	Custo Unitário (R\$/kg)	Consumo (m ³ /m ²)	Custo Unitário (R\$/m ²)			
LJBA-1	2,33	10,61	3,52*	1,91	6,20	0,066	355,95	63,57	11,49	
LJBA-2	2,33	10,61	3,52*	1,91	6,20	0,068	355,95	64,28	11,62	
LJBA-3	2,33	10,61	3,52*	1,91	6,20	0,067	355,95	63,92	11,55	
Média:									63,92	11,55

*Preços estimados não tabelados.

Fonte: Autoria Própria (2021).

A Tabela 28 demonstra o custo referente ao acabamento da face inferior das lajes, sendo representados os custos de dois tipos de acabamento, um para cada tipologia. Considerou-se para a laje executada com bambu um acabamento mais simples, sendo ele: aplicação de uma pintura à base de verniz nos elementos de enchimento (bambu) e aplicação de uma camada de massa corrida mais pintura na face inferior das vigotas pré-fabricadas. A escolha desse

acabamento se deu porque o bambu já apresenta uma estética visual (rústico), sendo desnecessária a execução do reboco em sua face inferior, método utilizado como base de custos para as lajes com lajota cerâmica.

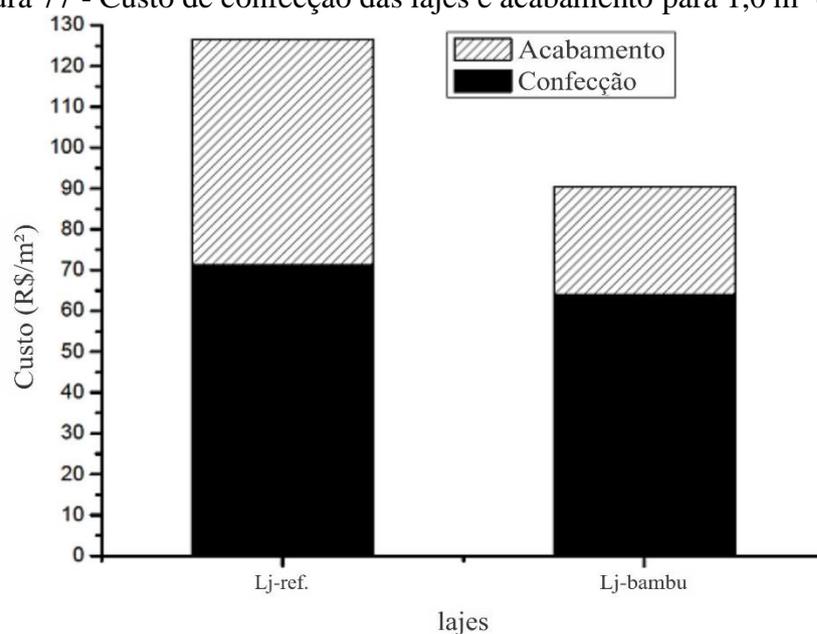
O custo de acabamento da laje executada com bambu representou um valor de R\$26,50/m², enquanto para as lajes executadas com lajota cerâmica o custo de revestimento foi de R\$ 55,35/m². Diante dos resultados foi possível observar que as lajes produzidas com bambu representaram a economia de 52,12%. O custo global (confecção + acabamento) mostrou que as lajes com enchimento de bambu oferecem economia de 28,56% na obra quando se avalia somente as lajes. A Figura 77 mostra o comparativo de custo total por m² das duas tipologias de lajes.

Tabela 28 – Custo unitário de acabamento / revestimento da face inferior das lajes – Custo para 1,0 m² de laje.

Referência para orçamento – Custo Agetop ABRIL/2019 – Desonerada								
Custo do dólar comercial atual – US\$ 5,53								
Laje com LAJOTA CERÂMICA - (Reboco)								
Item	Fonte /Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário (Material)	Preço unitário (Mão de obra)	Custo Unitário (R\$/m ²)	Custo Unitário (US\$/m ²)
1.0	Agetop 210101	Chapisco em forro (1 CI: 3ARG)	m ²	1,00	R\$ 1,74	R\$ 3,05	R\$ 4,79	US\$ 0,86
1.1	Agetop 210201	Emboço em forro (1 CALH: 4 ARML+150KG CI/M3)	m ²	1,00	R\$ 5,40	R\$ 11,18	R\$ 16,58	US\$ 3,00
1.2	Agetop 210301	Reboco fino em forro (1 CALH: 4 ARFC+100KG CI/M3)	m ²	1,00	R\$ 1,41	R\$ 13,03	R\$ 14,44	US\$ 2,61
1.3	Agetop 261304	Emassamento acrílico 2 demãos	m ²	1,00	R\$ 3,73	R\$ 7,07	R\$ 10,80	US\$ 1,95
1.4	Agetop 261000	Pintura látex acrílica 2 demãos c/ selador	m ²	1,00	R\$ 3,81	R\$ 4,93	R\$ 8,74	US\$ 1,58
Custo Total / m²							R\$ 55,35	US\$ 10,00
Laje com BAMBU - Opção (Rústico envernizado)								
Item	Fonte /Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário (Material)	Preço unitário (Mão de obra)	Custo Unitário (R\$/m ²)	Custo Unitário (US\$/m ²)
2.0	Agetop 260902	Pintura c/ verniz acrílico-02 demãos	m ²	1,57	R\$ 3,47	R\$ 3,19	R\$ 10,46	US\$ 1,89
2.1	Agetop 261305	Emassamento acrílico 1 demão	m ²	1,00	R\$ 2,40	R\$ 4,90	R\$ 7,30	US\$ 1,32
2.2	Agetop 261000	Pintura látex acrílica 2 demãos c/ selador	m ²	1,00	R\$ 3,81	R\$ 4,93	R\$ 8,74	US\$ 1,58
Custo Total / m²							R\$ 26,50	US\$ 4,79

Fonte: Autoria Própria (2021).

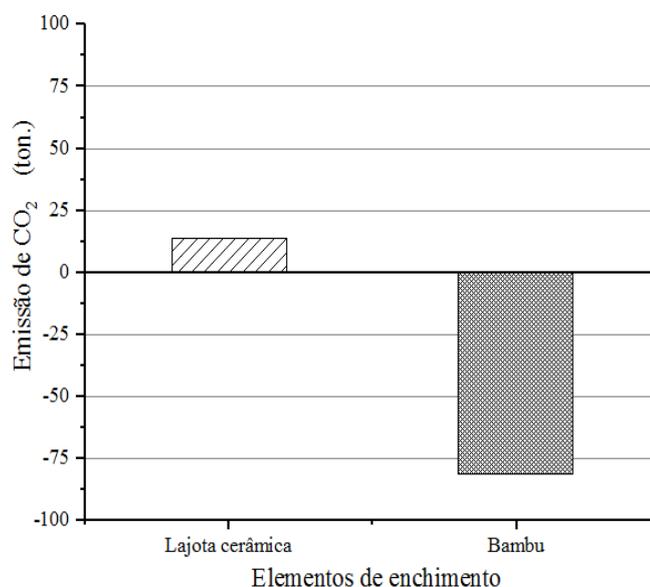
Figura 77 - Custo de confecção das lajes e acabamento para 1,0 m² de laje



Fonte: Autoria Própria (2021).

Em um exemplo básico de aplicação em um conjunto habitacional de 50 casas, cada unidade constituída por uma área de 100 m² de lajes executadas com bambu, representaria uma economia de R\$ 180.750,00 (custo de fabricação e revestimento). A Figura 78 mostra os resultados da contribuição sustentável da não utilização da lajota cerâmica e da utilização do bambu para o mesmo exemplo de aplicação anterior. Foi possível observar que a exclusão do uso das lajotas cerâmicas ocasionando a não fabricação das mesmas contribuiu pela não emissão de 14,10 toneladas de CO₂ e o sequestro de 81,79 toneladas de CO₂ por parte do bambu utilizado (cálculo baseado na relação de massa molar de CO₂/C de 3,67, considerando que a quantidade de carbono na biomassa do bambu é de aproximadamente 44%).

Figura 78 - Levantamento de emissão de CO₂ dos elementos de enchimentos (cerâmica e bambu) para o exemplo de 50 casas com 100 m² de laje cada



Fonte: Autoria Própria (2021).

3.14 Conclusões

O Presente estudo investigou e mostrou que a substituição das lajotas cerâmicas por bambu em lajes pré-moldadas pode apresentar as seguintes considerações:

- O peso das lajes com bambu como elemento de enchimento apresenta valores próximos às lajes com lajota cerâmica devido a maior massa do concreto, o efeito da redução de peso do bambu fica menos representativo.
- O fato de o bambu ser mais de 5 vezes resistente na flexão que as lajotas cerâmicas conferem a estas lajes serem instaladas sem auxílio de tábuas para movimentação dos operários, gerando economia de material, menos tempo de execução e maior segurança.
- As Lajes avaliadas neste estudo são equivalentes mecanicamente comparando as cargas de ruptura média.
- Ambas as lajes demonstraram estar a favor da segurança por meio da avaliação das flechas imediatas e previstas.
- A laje com enchimento de bambu pode não precisar de acabamento convencional como uso de argamassas e gesso devido ao efeito rústico quando aplicado verniz, esta proposta pode ser uma solução simples e adequada para atender populações de baixa renda.

- A laje com enchimento de bambu oferece a economia de 28,56% em relação às lajes com lajota cerâmica no custo global.

Para trabalhos futuros, sugerem-se estudos sobre o comportamento da estrutura ao incêndio, estudo sobre tratamentos aplicados ao bambu e durabilidade da estrutura.

3.15 Referências

AKSOYLU, C.; SEZER, R. Investigation of precast new diagonal concrete panels in strengthened the infilled reinforced concrete frames. **Jornal KSCE de Engenharia Civil**. v. 22, p.236 – 246, 2018. DOI: 10.1007/s12205-017-1290-6

AMÉRICO, L. Eco-design e a utilização de materiais alternativos renováveis: o Bambu e sua inter-relação com o design. *In*: 2º Simpósio Brasileiro de Design Sustentável (II SBDS), Rede Brasil de Design Sustentável – RBDS, São Paulo, 2009. **Anais [...]**. 2009.

ANICER: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso 11/12/2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1: Lajes pré-fabricadas de concreto - Requisito – Parte 1: Vigotas, minipaineis e paineis**. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

_____. **NBR 14859-2: Lajes pré-fabricadas de concreto - Requisitos – Parte 2: Elementos inertes para enchimento e forma**. Rio de Janeiro, 2016. 18p.

_____. **NBR 14859-3: Lajes pré-fabricadas de concreto - Requisitos – Parte 3: Armadura treliçada eletrosoldadas para lajes pré-fabricadas**. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

_____. **NBR 5738: Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. **NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

_____. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019. 59p.

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017. 20p.

AZMAN, M. N. A.; AHAMAD, M. S. S.; MAJID, T. A.; HANAFLI, M. H. Status of industrialized building system manufacturing plant in Malaysia. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**. v.2(2). 2011. DOI: 10.33736/jcest.89.2011

AZMAN, M. N. A.; AHAMAD, M. S. S.; WAN HUSIN, W. M. Comparative study on prefabrication construction process. **International Surveying Research Journal (ISrJ)**. v. 2, n.1, p. 45-58. 2012.

BACCELLI JÚNIOR, G. **Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Seridó – RN**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na Área de Concentração de Tecnologia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2010.

BENAVIDES, A. S. J. **Proposta de sistema construtivo para habitação de interesse social com bambu guadua: um estudo de caso no Equador**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/99326>

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. Oportunidades de eficiência energética na indústria: Relatório setorial - Setor cerâmico [Energy efficiency opportunities in industry: Sectoral report - Ceramic sector]. Brasília. CNI [National Confederation of Industry]. 2010.

BRANSON, D. E. **Instantaneous and time-dependent deflections of simple and continuous reinforced concrete beams**. HPR Report, N° 7, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, 1963.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Serviço de Informação ao Cidadão do Departamento Nacional de Produção Mineral. Dados do sistema AMBweb. Brasília, 2016. 2 CD-ROM. Documento acessível mediante autorização da instituição.

BRASIL. Lei nº 12.484 de 08 de setembro de 2011. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12484.htm. Acesso em 20/12/2020.

BRINK, F. E.; RUSH, P. J. Bamboo reinforced concrete construction. **U.S. Naval Civil Engineering Laboratory** Rep. 1966. Disponível em: <http://www.romanconcrete.com/docs/bamboo1966/BambooReinforcedConcreteFeb1966.htm>

BRITISH STANDARD, EUROPEAN STANDARD. **BS EN 15037-1-Precast Concrete Products – Beam-and-block Floor Systems – Part 1: Beams** (2008)

BROWN, R. H.; BYRD, G. T. Estimation of bundle sheath cell conductance in C4 species and O2 insensitivity on photosynthesis. **Plant Physiology**. v. 103. p.1183-1188. 1993

CABRAL JÚNIOR, M.; GAMBA, C. T. C.; TANNO, L. C.; ALMEIDA, A. S. Proposta metodológica para identificação e caracterização de fontes de suprimento de matérias-primas minerais: Aplicação na indústria de cerâmica vermelha do médio Rio Tietê – SP. **Geociências**. v. 31, n. 2, p. 287-307, 2012

CABRAL JÚNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. RMIs: argilas para cerâmica vermelha. In: **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap. 28. p.583-606.

CABRAL JUNIOR, M.; TANNO, L.C.; SINTONI, A.; MOTTA, J.F.M.; COELHO, J.M. A Mineração de Argila para Cerâmica Vermelha no Brasil. **Brasil Mineral**, v. 294, p. 46-57, 2010.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2004. 374 p.

CETESB (São Paulo). **Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo**, 1. Comunicação estadual / CETESB; 2.ed. - São Paulo: CETESB, 2011. 192 p.

CHEN, M.; YE, L.; LI, H.; WANG, G.; CHEN, Q.; FANG, C.; DAI, C.; FEI, B. Flexural strength and ductility of moso bamboo. **Construction and Building Materials**. v.246. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118418>

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; BAO, S. Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2107-2111. 2011.

CHEN, Z.; LI, H.; WONG, T. C. Environmental management of urban construction projects in China. **Journal of Construction Engineering and Management**. v.126, p. 320-324. 2000. DOI: 10.1061 / (ASCE) 0733-9364 (2000) 126: 4 (320)

COMERCIAL GERDAU. **Aço para construção civil**. Gerdau: [s.n.], 2020. Catálogo de Venda. Disponível em: < <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>>. Acesso em: 27 nov. 2020.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Design manual on cracking and deformations**, Bulletin d'Informtion. No. 185-E. Paris, France, 1985.

COMMITTEE CHINESE ECONOMIC Trade. Ten-five programme of building materials industry. **Chin Build Mater**, v. 7, p. 7-10. 2001.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para determinação da redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados à reciclagem do EPS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UNESP Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2015.

CUNHA, M. O. **Recomendações para projeto de lajes formadas por vigotas com armação treliçada**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Universidade de São Paulo. São Carlos. 2012.

DABAIEH, M.; HEINONEM, J.; EL-MAHDY, D.; HASSAN, M. D. A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay

bricks. **Journal of Cleaner Production**. V. 275, 1 December 2020, 122998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>

DAVIS, T. N. **Destino dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em espuma de poliestireno no ambiente marinho**. San Diego State University ,CA (2013).

DELGADO, P. S. **O Bambu como material eco-eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG). Ouro Preto, 2011.

DIAS, M. C. O.; MAURI, C. B. P.; DIAS, P. L. F.; VIRGÍNIO, J. F. (1999), Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais atividades produtivas, Banco do Nordeste, Fortaleza.

Documento de análise [recurso eletrônico]: **evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013): setor de energia e processos industriais** / Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). – São Paulo: Observatório do Clima, 2015. 64 p.

DROPPA JÚNIOR, A. **Análise Estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). São Carlos - SP. 1999

DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (org.). 2017. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH. 655 p.

DURIGAN, G. **Estimativas de Estoque de Carbono na Vegetação Natural do estado de São Paulo**. Estudos da Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, 2004.

DURLAK, S.; BISWAS, P.; SHI, J.; BERNHARD, M. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon particulates and gaseous emissions from polystyrene combustion. **Environmental Science Technology**. v. 32, p. 2301 – 3237, 1998.

EARTH FRIENDLY BUILDING MATERIALS, EPS Recycling, 2013. [http://www.efbm.com/Articles-on-Insulated-Concrete-Forms-\(ICFs\).html](http://www.efbm.com/Articles-on-Insulated-Concrete-Forms-(ICFs).html) (Acesso em 09.12.20).

EARTH RESOURCE FOUNDATION: **Polystyrene Foam Report**, 2015.

Ministry of Agriculture and Livestock (Ecuador); Bamboo Sectoral Table (Ecuador). **2018-2022: Ecuador National Bamboo Strategy Guidelines for Inclusive and Green Development**. INBAR, 2018

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

EL-HASSAN, H; SHAO, Y. Early Carbonation Curing of concrete masonry units with ortland limestone cemente. **Cement & Concrete Composities**. v.62, p. 168-177, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.004>

ERGUT, A.; LEVENDIS, Y. A.; CARLSON, J. Emissions from the combustion of polystyrene, styrene and ethylbenzene under diverse conditions. **Fuel**. v. 86, Issues 12–13, p. 1789-1799, 2007.

FAZZAN, J. V. **Comportamento Estrutural de Lajes Pré-Moldadas Treliçadas com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Ilha Solteira, 2011.

FELISBERTO, M. H. F.; BERALDO, A. L.; CLERICI, M. T. P. S. Young bamboo culm flour of *Dendrocalamus asper*: technological properties for food applications. **Food Science and Technology**, v. 76, p. 230-235. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.015>

FERREIRA, T. R.; LIMA, M. C. V.; DELALIBERA, R. G. Structural optimization of slabs formed by lattice joists with and without prestressing. **Science & Engineering Journal**. v.26, n.2, p.01-09. 2017.

Food and Agriculture organization of the United Nations (FAO), 2014. Enhancing the socio-economic benefits from forests. State of the World's Forests 2014. Rome Italy.

FORTUNATO, L. R.; PARSEKIAN, G. A.; NEVES, J. A. **Captura de CO₂ em peças de concreto para pavimentação através da cura por carbonatação acelerada**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) UFSCAR – Universidade de São Carlos. São Carlos, 2018.

GAION, C. P.; PASCHOARELLI, L. C. PEREIRA, M. A. R. O bambu como matéria-prima para o desenho industrial: um estudo de caso. In.: 3º Congresso Internacional de Pesquisa em Design. Rio de Janeiro, 2005.

GALLO, N. D; VICTOR, D. G; LEVIN, L. A. Ocean commitments under the Paris Agreement. **Nature Climate Change**. v.7. p.833-838. 2017.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.9. 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000100016>

GHAVAMI, K. Ultimate load behavior of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. **Cement and Concrete Composites**, v. 17 (4), p. 281–288. 1995. 10.1016/0958-9465(95)00018-8

GHELMANDI NETTO, L; GIANNETTI, B. F. Contabilidade dos fluxos de CO₂ em uma plantação comercial de bambu visando a produção papeleira. In.: **International Workshop Advances in Cleaner Production**: “Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change”. São Paulo, 2009.

GONZÁLEZ, E.; GALÁN, A.; MIRAS, M. A.; VÁZQUEZ. CO₂ emissions derived from raw materials used in brick factories. Applications to Andalusia (Southern Spain). **Applied Clay Science**. v. 52, p. 193-198, 2011. DOI: [10.1016 / j.clay.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.003)

GRASSI, G; HOUSE, J; DENTENER, F; FEDERICI, S; DEN ELZEN, M; PENMAN, J. The key role of forests in meeting climate targets requires Science for credible mitigation. **Nature Climate Change**. v.7. p.220-226. 2017.

HAMMOND, G; JONES, C. Inventory of Carbon and Energy (ICE), version 2.0. University of Bath, 2011.

HANSEN, A. P.; SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Identification of environmental performance improvement opportunities in a material ceramics production process by Life Cycle Assessment (LCA) approach applying. **Revista Produção Online**, v. 10, n. 4, p. 912–936, 2010.

HIDALGO LOPEZ, O. **Bambu, su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía**. Colombia, Cali: Estudios Técnicos Colombianos Ltda. 1974. p.318.

HOLANDA, R. M.; SILVA, B.B. Cerâmica vermelha: desperdício na construção *versus* recurso natural não renovável: estudo de caso nos municípios de Paudalho-PE e Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4 (n. 4), p. 872 – 890, 2011. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i4.232683>

HUNTER, I.R.; WU, J. **Bamboo Biomass**. INBAR, Beijing (2002).

International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), 2015. International Network for Bamboo and Rattan. International Trade of Bamboo and Rattan 2012.

Inventário de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Estado do Rio de Janeiro: ano base 2015: resumo técnico / Secretaria do Ambiente. – Rio de Janeiro, 2017. 48 p.

IPCC (2006a). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary Combustion.

IPCC (2007). Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 1535p.

JUNGES, E.; LA ROVERE, H. L. Comparison between simplified and FE models for short-term deflection in continuous RC beams. **Revista IBRACON Estruturas e Materiais**. v.10, n.02, p.01-21. 2017.

KADIR, A.A; MOHAJERNAL, A. Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts. **Applied Clay Science** v. 104, p. 269-276, 2015. DOI: 10.1016/j.clay.2014.12.005

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 2004.

KLEINHENZ, V.; MIDMORE, D. J. Aspects of bamboo agronomy. **Advances in Agronom.** v.74, p. 99-153, 2001. [10.1016/S0065-2113\(01\)74032-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)74032-1)

KUASOSKI, M.; DOLIVEIRA, A. L. D.; SILVA, A. Q.; PANHOCA, L.; SHEVCHENKO, I. Sustainable practices of the red ceramic industry and its influence on local communities. **Journal of Cleaner Production** (JCLP 121765). 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121765>

KUMAYAMA, R. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore para produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2014.

KUTTIRAJA, M.; SINDHUI, R.; VARGHESE, E.; SANDHYA, V. Bioethanol production from bamboo (*Dendrocalamus* sp.) process waste. **Biomass and bioenergy**, n. 59, p. 142-150, 2013. [10.1016/j.biombioe.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.015)

LEITE, M. G-P.; GONÇALVES – FUJACO, M. A. A atividade de beneficiamento de quartzitos na cidade de Ouro Preto-Brasil: características gerais e principais impactos ambientais. **Economia, Sociedad y Territorio**, XIII (41), El Colegio Mexiquense, a. c., Zinacantepec, p. 227-243. 2013.

LEONHARDT, F. ; MÖNNIG, E. **Constntções de concreto - Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**, v. 1. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1982, 305p.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. International Network of Bamboo and Rattan (INBAR), Technical Report, 18, Beijing, China, 1998. 208 p.

LI, L. E., LIN, Y. J., YEN, T.M. Using allometric models to predict the aboveground biomass of thorny bamboo (*Bambusa stenostachya*) and estimate its carbon storage. **Taiwan Journal of Forest Science**. v.31 (1), 37–47. 2016.

LIMA JÚNIOR, H. C. WILLRICH, F. L.; FABRO, G. Vigas de concreto reforçado com bambu *Dendrocalamus giganteus*. II: Modelagem e critérios de dimensionamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v. 9, n. 4, p. 652-659, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400031>

LIMA, L. P. F. C; CABRERA, J. M. F; GARCIA, A. D. G; SANTANA, R. M. C. Inclusão do bambu em projetos de mecanismos de desenvolvimento limpos: créditos de carbono. *In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente*. Bento Gonçalves – RS. 2014.

LIU, X.; SMITH, G. D.; JIANG, Z.; BOCK, M. C. D.; BOECK, F.; FRITH, O.; GATÓO, A.; LIU, K.; MULLIGAN, H.; SEMPLE, K. E.; SHARMA, B.; RAMAGE, M. Engineered bamboo nomenclature. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 1141-1161, 2016.

Disponível em:
http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_1_1141_Liu_Nomenclature_Engineered_Bamboo/407

LIU, Y. -H; YEN, T. -M. Assessing aboveground carbon storage capacity in bamboo plantations with various species related to its affecting factors across Taiwan. **Forest Ecology and Management**. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118745>

LOBOVIKOV, M.; SCHOENE, D.; YIPING L. Bamboo in climate change and rural livelihoods. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.17, p.261- 276, 2012. [10.1007/s11027-011-9324-8](https://doi.org/10.1007/s11027-011-9324-8)

LOBOVIKOV, M.; YIPING, L.; SCHOENE, D.; WIDENOJA, R. **The Poor Man's Carbon Sink. Bamboo in Climate Change and Poverty Alleviation**. FAO, INBAR, Rome (2009)

LONDONO, X. **Evaluation of Bamboo Resources in Latin America**. A summary of The Find Reporto of Project N96-9300-01-4. Internation Network for Bamboo and Rattan, 1999.

LÓPEZ, O. H. **Bamboo: the gift of the God's**. D'vinni: Bogotá, Colômbia, 2003. 553 p

LV, J.; GU, F.; ZHANG, W.; GUO, J. Life cycle assessment and life cycle costing of sanitary ware manufacturing: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 1 -16, 2019. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117938.

L. ZHANG. **Production of bricks from waste materials** – a review. *Constr Build Mater*, 47 (2013), pp. 643-655

MACEDO, A. B. Recursos minerais não-metálicos. **Estudos Avançados**. v.12, n. 33, p.67-87, ago. 1998.

MCCLURE, F. A. **The Bamboos: A Fresh Perspective**. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts (1966), p. 345.

MEDEIROS, A. G. **Propriedades de concreto sustentável produzido com o pó do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita**. 2019. Tese (Doutorado em manejo de solo e água), Universidade Federal Rural do Semiárido, Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação em manejo de solo e água, Mossoró, 2019.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. IBRACON, 2014.

MEZQUITA, A.; MONFORT, E.; ZAERA, V. Sector azulejero y comercio de emisiones: reducción de emisiones de CO₂, benchmarking europeo. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio** . v.48, p. 211 – 222. 2009

MILLING, A.; MAWSHA, A.; MARTIN, H. Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction. **Construction and Building Materials**. v.253. August 2020, 119158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119158>

MOGNON, F; SANQUETTA, C. R; CORTE, A. P. D; RODRIGUES, A. L; SANQUETTA, M. N. I. Bambu, uma alternativa para o sequestro de carbono. **Bambu no Brasil: da biologia a tecnologia**. Wiedman. - 1. ed. - Rio de Janeiro : ICH, 2017. p. 227-241.

MUGARED AMRAN, Y. H.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H.; ALSCHOUDI, F.; RASHID, R. S. M. Influence of slenderness ratio on the structural performance of lightweight foam concrete composite panel. **Case Studies in Construction Materials**. v. 10, 2019. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00226

MUGARED AMRAN, Y. **Determination of Structural Behavior of Precast Foamed Concrete Sandwich Panel**. Universiti Putra Malaysia (UPM) (2016)

MUNIZ, C. E. **Mais competitivas: lajes treliçadas**. v.1. n.1. p.19-21. 1991.

M.W. KHAN, Y. Ali, F. De FELICE, A. SALMAN, A. PETRILLO. **Impact of brick kilns industry on environment and human health in Pakistan**. Sci. Total Environ., 678 (2019), pp. 383-389, 10.1016/j.scitotenv.2019.04.369. 2019

NATH, A.J., DAS, A.K. Bamboo resources in the homegardens of Assam: a case study from Barak Valley. **Journal Tropical of Agriculture**, v.46, p. 46-49. 2008.

NATH, A.J.; DAS, A.K. Carbon storage and sequestration in bamboo-based smallholder homegardens of Barak Valley. **Assam Current Science**, v.100, p. 229-233. 2011.

NATH, A.J., DAS, G., DAS, A.K. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. **Biomass and Bioenergy**, v.33, p.1188-1196. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.020>

NATH, A. J; LAL, R; DAS, A. K. Managing woody bamboos for carbon farming and carbon trading. **Global Ecology and Conservation**. v.3. p.654-663. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.03.002>

NAWI, M. N. M.; LEE, A.; AZMAN, M. N. A.; KAMAR, K. A. M. Fragmentation issue in Malaysian industrialised building system (IBS) projects. **Journal of Engineering Science and Technology**. v. 9, p. 96-105, 2014.

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO2 em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OGREN, W. L. Photorespiration: pathways, regulation, and modification. **Annual Review of Plant Physiology**, v.35, p.415-442, 1984.

OLIVEIRA, L. S. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ). São João Del Rei, 2013.

OPRINS, J. et al. **Bamboo: A material for Landscape and Garden Design**. Birkhauser-pubishers for Architecture Basel- Berlin-Boston, 2006

OSSE, V. C. **Bambu, cultura e paisagem**. 2006. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PADE, C; GUIMARES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, pp. 1348-1356, 2007.

PANAGIOTOU, T.; LEVENDIS, Y. A. A study on the combustion characteristics of PVC, poly(styrene), poly(ethylene) and poly(propylene) particles under high heating rates. **Combustion and Flame**, v.99 (1), p. 53-74, 1994.

PANAGIOTOU, T.; LEVENDIS, Y. A.; CARLSON, J.; VOUIROS, P. The effect of bulk equivalence ratio on the PAH emissions from the combustion of PVC, poly(styrene) and poly(ethylene). **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 26, p. 2421-2430, 1996.

PANAGIOTOU, T.; LEVENDIS, Y. A. Observations on the combustion of polymers (plastics): from single particles to groups of particles. **Combustion Science and Technology**, v. 137, 1998.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédia: Edur, 1988. 150p.

POON, C. S.; YU, T. W. NG, L.H. **A guide for managing and minimizing building and demolition waste**. The Hong Kong Polytechnic University (2000)

POON, C. S.; YU, T. W.; NG, L. H. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. Resources. **Conservation and Recycling**. v.32, p. 157-172. 2001. DOI: [10.1016/S0921-3449\(01\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00052-0)

RAVEN, J. In: **Botanical Research. Incorporating Advances in plant pathology**. J. A. Calow. School of Biology in Science University of Birghman, Birghman Uk v 27 Academic Press, Boston, 1997

REDE SOCIAL DO BAMBU. Disponível em: <https://bamboo.ning.com/>

RITCHIE, R. O. The conflicts between strength and toughnees. **Nature. Materials**. v.10. p. 817-822. 2011.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

RODRIGUES, M. I. V.; LIMA, P. V. P. S.; MAYORGA, M. I. O.; CASIMIRO FILHO, F. **Análise de impactos em áreas propensas à desertificação em municípios do Estado do Ceará**. In.: 2ª Conferência Internacional: clima, sustentabilidade e desenvolvimento em Regiões Semiáridas, ICID, 16-20 agosto, Fortaleza. 2010

RONG, B. S. **Modern bamboo structures: Proceedings of the First International Conference**. Edited By Yan Xiao, Masafumi Inoue, Shyam K. Paudel. Ed. 1. Londres, 2008. <https://doi.org/10.1201/9780203888926>

R. TOLEDO, D.D. SANTOS, R.F. JR, J.G. CARRIO, L.T. AULER, H. VARGAS. Gas release during clay firing and evolution of ceramic properties. **Applied Clay Science**. v. 27, p.3-4, p. 151-157, 2004. DOI: [10.1016/j.clay.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.06.001)

RUSCH, F.; HILLIG, E.; TREVISAN, R.; MUSTEFAGA, E. C.; CAMPOS, R. F. Propriedades físicas e mecânicas de hastes adultas de diferentes espécies de bambu: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 4, p. 22549-22566. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n4-426.

SAHEED, S.; MUGARED, A. Y. H.; MOHAMED, E-Z.; NORA, A. FARAH, A. A. R.; FEDIUK, R.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H. Structural behavior of out-of-plane loaded precast lightweight EPS-foam concrete C-shaped slabs. **Journal of Building Engineering**. v.33, January 2020, 101597. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101597>

SALAMON, C. **Ensaio para viabilizar a laminação do bambu *Dendrocalamus giganteus* em operações de torneamento sem centros**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. 113f

SÁNCHEZ, L. E (2008), Avaliação de impactos ambientais: conceitos e métodos, Oficina de Textos, São Paulo.

SANTINE, C. R. et al., **Projeto e construção de lajes pré-fabricadas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

SCHICOSKI, Carlos Alberto. Isopor: uso abusivo e reciclagem incipiente. **Revista Meio Ambiente**, Campo Mourão, v.3 n.11, p.16-17, fev.2008.

SEYE, O. **Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo com insumo energético Capim Elefante (*Pennisetum Purpurium* Schaum)**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas, Campinas, 2003.

SHEN, L-Y; TAM, V. W-Y; LI, C-Y. Benefit analysis on replacing *in situ* concreting with precast slabs for temporary construction works in pursuing sustainable construction practice. **Resources, Conservation and Recycling**.v.53. p.145-148. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.001>

SHAO, Y; LIN, X. Early-Age Carbonation Curing of Concrete Using Recovered CO₂. **ACI Committee 236, Material Science of Concrete**. Concrete International. 2011.

SHARMA, B; GATÓO, A; BOCK, M; RAMAGE, M. Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**. v.81. 2015. p. 66-73. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>

SILVA, L. A.; NAHIME, B. O.; FELIPE, A. S.; ELIAS, C. N.; DO CARMO, D. R.; DE LIMA, E. C.; DOS SANTOS, I. S.; LIMA, K. L. Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste. **Construction and Building Materials**. v. 265, p.1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120119>.

SODERSTROM, T. R.; ELIIS, R. P. The woody bamboos (Poaceae: Bambusoideae) of Sri Lanka. A Morphological-Anatomical study. **Smithsonian Contributions of Botany**. v. 72, Smithsonian Institution Press, Washington, D.D. (1988), pp. 30-36.

SONG, X.; ZHOU, G.; JIANG, H.; YU, S.; FU, J.; LI, W.; WANG, W.; MA, Z.; CHANGHUI. Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges. **Environmental Reviews**, v.19, p. 418-428. 2011. [10.1139/a11-015](https://doi.org/10.1139/a11-015)

RAUT, S. P; RALEGAONKAR, R; MANDAVGANE, S. Utilization of recycle paper mill residue and rice husk ash in production of light weight bricks. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 13, p. 269-275. 2013.I

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

THANOON, W. A.; YARDIM, Y.; JAAFAR, M. S.; NOORZAEI, J. Development of interlocking mechanism for shear transfer in composite floor. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 2604-2611. 2010. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2010.05.015](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.015)

TSUTSUMOTO, N, Y. **Avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado com taliscas de bambu reforçadas nos nós**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira – SP. 2016.

UN ENVIRONMENT; SCRIVENER, K. L; JOHN, V.M; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**. v. 114, p.2-26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

UYGUNOGLU, T.; TOPCU, I. B.; GENCEL, O.; BRISTOW, W. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). **Construction and Building Materials**, v.30. p. 180-187. 2012.

UKWATTA, A; MOHAJERANI, A; SETUNGE, S; ESHTIAGHI, N. A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids. **Waste Management.**, v. 74, p. 413 - 426, 2018. DOI: [10.1016/j.wasman.2018.01.006](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.006)

VARGAS, A. **Análise experimental de lajes pré-fabricadas utilizando embalagens recicláveis como elementos de enchimento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Criciúma, 2014.

VARGAS, A.; SILVA, B. V.; ROCHA, M. R.; PELISSER, F. Precast slabs using recyclable packaging as flooring support elements. **Journal of Cleaner Production**. v.66. p.92-100. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.059>

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos** 2005. 107p Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa (2005)

VISEDO, G; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileiro até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

WARRER, R; PRICE, J; GRAHAM, E; FORSTENHAEUSLER, N; VANDERWA, J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants on limiting global warming to 1,5° C rather than 2°C. **Nature Climate Change**. v.7. p.791-795. 2017

WBCSD Cement Sustainability Initiative, Getting the Numbers Right, Project Emissions Report 2014

WILZA, G. R. L. **Solo cimento reforçado com bambu: Características Físico-Mecânicas**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campinas. Campinas. 2002.

WINJUM, J. K., DIXON, R.C.; SCHROEDER, P. E. Carbon storage in forest plantations and their wood products. **Journal of World Forest Resource Management**. v. 8, p. 1-19. 1997.

XU, L., FANG, H., DENG, X., YING, J., LV, W., SHI, Y., ZHOU, G., ZHOU. Biochar application increased ecosystem carbon sequestration capacity in a Moso bamboo forest. **Forest Ecology Management**. v. 475, 118447. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118447>

YAN XIÃO, M. ASCE.; ZHOU, Q.; SHAN, B. Design and Construction of Modern Bamboo Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. v.15. 2020.

YARDIM, Y.; WALEED, A. M. T.; JAAFAR, M. S.; SLED LASEIMA. AAC-concrete light weight precast composite floor slab. **Construction and Building Materials**. v. 40, p. 405 – 410. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.10.011>

YEN, T. M. Comparing aboveground structure and aboveground carbon storage of an age series of moso bamboo forests subjected to different management strategies. **Journal of Forest Research**. v.20 (1), p. 1–8, 2015. [10.1007 / s10310-014-0455-0](https://doi.org/10.1007/s10310-014-0455-0)

YEN, T. M. Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in an initial growth stage for a fast-growing moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*). **Botanical Stud**. 57, 10. 2016. [10.1186 / s40529-016-0126-x](https://doi.org/10.1186/s40529-016-0126-x)

YEN, T. M., JI, Y. J., LEE, J. S. Estimating biomass production and carbon storage for a fast-growing makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) plant based on the diameter distribution model. **Forest Ecology Management**. v.260, p. 339–344. 2010. [10.1016 / j.foreco.2010.04.021](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.021)

YEN, T. M., LEE, J. S. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. **Forest Ecology Management**. v.261, p.995–1002. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.015>

YEN, T. M., WANG, C. T. Assessing carbon storage and carbon sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in Taiwan. **International**

Journal of Sustainable Development & World Ecology. v.20 (5), p.455–460. 2013.
<https://doi.org/10.1080/13504509.2013.811445>

YUEN, J. Q., FUNG, T., ZIEGLER, A.D. Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: Estimates and uncertainties. **Forest Ecology Management.** v.393, 113–138.2017.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.017>

YU, Y; JIANG, Z. H; FEI, B.H; WANG, G; WANG, H. K. Uma técnica de microtração aprimorada para caracterização mecânica de fibras curtas de plantas: um estudo de caso em fibras de bambu. **Journal of Materials Science.** v. 46, p. 739–746. 2011. DOI: 10.1007 / s10853-010-4806-8

ZHOU,G.D. RICHARDSON,M.; FAZILI, I.; WANG, J.; DONNELLY, K.; MOORTHY, B. Role of retinoic acid in the modulation of benzo (a) pyrene-DNA adducts in human hepatoma cells: implications for cancer prevention. **Toxicology and Applied Pharmacology.** v. 249, p. 224 – 230, 2010.

3ª Comunicação Nacional do Brasil à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – MCTI 2016.

$$y_{cg} = \frac{(43 - 8) \cdot \left(\frac{6^2}{2}\right) + 8 \cdot \frac{12^2}{2}}{(43 - 8) \cdot 6 + (8 \cdot 12)}$$

$$y_{cg} = 3,94 \text{ cm}$$

$$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad \text{Eq. 26}$$

$$I_g = \frac{(43 - 8) \cdot 6^3}{12} + \frac{8 \cdot 12^3}{12} + (43 - 8) \cdot 6 \cdot \left(3,94 - \frac{6}{2}\right)^2 + 8 \cdot 12 \cdot \left(3,94 - \frac{12}{2}\right)^2$$

$$I_g = 2374,94 \text{ cm}^4 \text{ para uma viga T ou } 4749,88 \text{ cm}^4 \text{ para duas vigas T}$$

b) Estádio II puro: características geométricas

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{210000}{4760 \cdot \sqrt{26}} = 8,65 \text{ cm} \quad \text{Eq. 27}$$

- Admitindo-se inicialmente que a linha neutra passa na mesa, ou seja, $x_{II} < h_f$, sendo $b_w = b_f$ e $A_s = 0$, tem-se que a posição da linha neutra:

$$a_1 = \frac{b_w}{2} = \frac{43}{2} = 21,5 \text{ cm} \quad \text{Eq. 28}$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 8,65 \cdot 0,28 = 2,42 \text{ cm}^2 \quad \text{Eq. 29}$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -10,29 \cdot 8,65218 \cdot 0,28 = -24,9287 \text{ cm}^3 \quad \text{Eq. 30}$$

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = \frac{-2,423 \pm \sqrt{2,423^2 - 4 \cdot 21,5 \cdot (-24,9287)}}{2 \cdot 21,5} \quad \text{Eq. 31}$$

$$x_{II} = 1,02 \text{ cm} < h_f = 6 \text{ cm}$$

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x - d)^2 \quad \text{Eq. 32}$$

$$I_{II} = \frac{43 * 1,02^3}{3} + 8,652182 * 0,28 * (1,02 - 10,29)^2 = 223,39 \text{ cm}^4$$

c) Cálculo das flechas (Peso próprio + carga aplicada)

Estádio I

- Flecha baseada somente no peso próprio

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_g} = \frac{5 \cdot 0,00988 \cdot 200^4}{384 \cdot 2427,13 \cdot 2379,94} = 0,035635 \text{ cm} \quad \text{Eq. 33}$$

- Flecha baseada na carga pontual

$$a = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E I_g} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 34}$$

Flecha total Estádio I (valor máximo para o momento de fissuração)

$$a_{pp\text{próprio}} + a_{carga \text{ aplicada}}$$

Estádio II

- Peso próprio (Estádio II - I_{II})

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_{II}} = \frac{5 \cdot 0,00988 \cdot 200^4}{384 \cdot 2427,13 \cdot 223,39} = 0,37965 \text{ cm} \quad \text{Eq. 35}$$

- Carga Aplicada ((Estádio II - I_{II}))

$$a = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E I_{II}} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 36}$$

Flecha total Estádio II

$$a_{pp\text{próprio}} + a_{carga \text{ aplicada}}$$

Estádio I + II

- Peso próprio (Estádio I + II - I_m)

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_m} = \frac{5 \cdot 0,00988 \cdot 200^4}{384 \cdot 24271,13 \cdot 232,72} = 0,36443 \text{ cm}$$

- Carga Aplicada ((Estádio I + II - I_m))

$$a = \frac{P \cdot a}{24 EI_m} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 38}$$

Flecha total Estádio I + II

$$a_{pproprio} + a_{carga \text{ aplicada}}$$

Sendo $E_{cs} = 24271,13$ MPa e I_m a inércia média de Branson:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{II} \quad \text{Eq. 39}$$

O M_r , momento de fissuração, de uma seção “T”, foi calculado em função de I_g e y_t (a distância do centro de gravidade da seção bruta à fibra mais tracionada:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_g}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 2633 \cdot 2,37 \cdot 10^{-5}}{(0,12 - 0,0394)} = 0,93 \text{ kN.m ou } 93 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq. 40}$$

Em que $f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2633 \text{ kN/m}^2$ ou $0,2633 \text{ kN/cm}^2$

O momento atuante $M_a = M_{m\acute{a}x}$, sendo: $5,71 \text{ kN.m}$ ou 571 kN.cm

$$I_m = \left(\frac{0,93}{5,71}\right)^3 \cdot 2,37 \cdot 10^{-5} + \left[1 - \left(\frac{0,93}{5,71}\right)^3\right] \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}$$

$$I_m = 232,72 \text{ cm}^4$$

Bambu

a) Estádio I: características geométricas da seção transversal

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{hf^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g} \quad \text{Eq. 41}$$

$$y_{cg} = \frac{(43 - 8) \cdot \left(\frac{5,5^2}{2}\right) + 8 \cdot \frac{12^2}{2}}{(43 - 8) \cdot 5,5 + (8 \cdot 12)}$$

$$y_{cg} = 3,83 \text{ cm}$$

$$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot hf^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot hf \cdot \left(y_{cg} - \frac{hf}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad \text{Eq. 42}$$

$$I_g = \frac{(43 - 8) \cdot 5,5^3}{12} + \frac{8 \cdot 12^3}{12} + (43 - 8) \cdot 5,5 \cdot \left(3,94 - \frac{5,5}{2}\right)^2 + 8 \cdot 12 \cdot \left(3,83 - \frac{12}{2}\right)^2$$

$$I_g = 2313,85 \text{ cm}^4$$

b) Estádio II puro: características geométricas

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{210000}{4760 \cdot \sqrt{26}} = 8,65 \text{ cm} \quad \text{Eq. 43}$$

- Admitindo-se inicialmente que a linha neutra passa na mesa, ou seja, $x_{II} < hf$, sendo $b_w = b_f$ e $A_s = 0$, tem-se que a posição da linha neutra:

$$a_1 = \frac{b_w}{2} = \frac{43}{2} = 21,5 \text{ cm} \quad \text{Eq. 44}$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s = 8,65 \cdot 0,28 = 2,42 \text{ cm}^2 \quad \text{Eq. 45}$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s = -10,29 \cdot 8,65218 \cdot 0,28 = -24,9287 \text{ cm}^3 \quad \text{Eq. 46}$$

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = \frac{-2,423 \pm \sqrt{2,423^2 - 4 \cdot 21,5 \cdot (-24,9287)}}{2 \cdot 21,5} \quad \text{Eq. 47}$$

$$x_{II} = 1,02 \text{ cm} < hf = 6 \text{ cm}$$

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x - d)^2 = \quad \text{Eq. 48}$$

$$I_{II} = \frac{43 \cdot 1,02^3}{3} + 8,652182 \cdot 0,28 \cdot (1,02 - 10,29)^2 = 223,39 \text{ cm}^4$$

c) Cálculo das flechas (Peso próprio + carga aplicada)

Estádio I

- Peso próprio (Estádio I – $I_I = I_g$)

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_g} = \frac{5 \cdot 0,0093 \cdot 200^4}{384 \cdot 2427,13 \cdot 2379,94} = 0,0344995 \text{ cm} \quad \text{Eq. 49}$$

- Carga Aplicada (Estádio I – $I_I = I_g$)

$$a = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E I_g} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 50}$$

Flecha total Estádio I

$$a_{ppróprio} + a_{carga \text{ aplicada}} =$$

Estádio II

- Peso próprio (Estádio II)

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_{II}} = \frac{5 \cdot 0,0093 \cdot 200^4}{384 \cdot 2427,13 \cdot 223,39} = 0,0357342 \text{ cm} \quad \text{Eq. 51}$$

- Carga Aplicada (Estádio II)

$$a = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E I_{II}} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 52}$$

Flecha total Estádio II

$$a_{ppróprio} + a_{carga \text{ aplicada}}$$

Estádio I + II

- Peso próprio (Estádio I + II)

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_m} = \frac{5 \cdot 0,0093 \cdot 200^4}{384 \cdot 2427,13 \cdot 233,45} = 0,34194 \text{ cm} \quad \text{Eq. 53}$$

- Carga Aplicada ((Estádio I + II)

$$a = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E I_m} (3l^2 - 4a^2) \quad \text{Eq. 54}$$

Flecha total Estádio I + II

$a_{\text{próprio}} + a_{\text{carga aplicada}}$

Sendo $E_{cs} = 24271,13$ MPa e I_m a inércia média de Branson:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{II} \quad \text{Eq. 55}$$

O M_r , momento de fissuração, de uma seção “T”, foi calculado em função de I_g e y_t (a distância do centro de gravidade da seção bruta à fibra mais tracionada):

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_g}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 2633 \cdot 2,31 \cdot 10^{-5}}{(0,12 - 0,0383)} = 0,89 \text{ kN.m ou } 89 \text{ kN.cm} \quad \text{Eq. 56}$$

Em que $f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2633 \text{ kN/m}^2$ ou $0,2633 \text{ kN/cm}^2$

O momento atuante $M_a = M_{\text{máx}}$, sendo: 5,30 kN.m ou 530 kN.cm

$$I_m = \left(\frac{0,89}{5,30}\right)^3 \cdot 2,31 \cdot 10^{-5} + \left[1 - \left(\frac{0,89}{5,30}\right)^3\right] \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}$$

$$I_m = 233,45 \text{ cm}^4$$