

**LETÍCIA MEDEIROS DE ARAÚJO**

**TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÕES  
POPULARES NA AMAZÔNIA, PELA INTRODUÇÃO DE BAMBU,  
CONSIDERANDO A AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA**

**Sorocaba**

**2021**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências  
ambientais*



**unesp**  
Sorocaba

**LETÍCIA MEDEIROS DE ARAÚJO**

**TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÕES  
POPULARES NA AMAZÔNIA, PELA INTRODUÇÃO DE BAMBU,  
CONSIDERANDO A AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Araújo de Medeiros  
Coorientador: Prof. Dr. Bruno Fernando Gianelli

**Sorocaba**  
**2021**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

**ciências**  
**ambientais**



A663t

Araújo, Letícia Medeiros de

Transição de ecoeficiência na construção de habitações populares na Amazônia, pela introdução de bambu, considerando a avaliação de ciclo de vida. / Letícia Medeiros de Araújo. -- Sorocaba, 2021

69 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Gerson Araújo de Medeiros

Coorientador: Bruno Fernando Gianelli

1. Construção civil.. 2. Avaliação de Ciclo de Vida.. 3. Impacto Ambiental.. 4. Sustentabilidade.. 5. Inventário de Ciclo de Vida.. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Transição de ecoeficiência na construção de habitações populares na Amazônia, pela introdução do bambu, considerando a avaliação do ciclo de vida

**AUTORA:** LETICIA MEDEIROS DE ARAUJO

**ORIENTADOR:** GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS

**COORIENTADOR:** BRUNO FERNANDO GIANELLI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. BRUNO FERNANDO GIANELLI (Participação Virtual)  
Instituto Federal de São Paulo IFSP



Prof. Dr. DARLAN COLLINS DA CUNHA E SILVA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia de Pesca / Unesp - Câmpus de Registro



Prof. Dr. BENONE OTAVIO SOUZA DE OLIVEIRA (Participação Virtual)  
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA) / Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Sorocaba, 24 de setembro de 2021

“No começo pensei que estivesse lutando para salvar seringueiras, depois pensei que estava lutando para salvar a Floresta Amazônica. Agora, percebo que estou lutando pela humanidade” (Chico Mendes, 1987)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ser minha fonte de força nos momentos que achei que não a teria.

À minha família, por todo apoio incondicional. Em destaque agradeço aos meus pais, Leila e Leônidas, por serem minha inspiração de vida, força e amor pleno; à minha irmã Laís, por sempre estar comigo em todas as situações oferecendo todo seu amor e companheirismo; ao Victor, meu cunhado, que me ajudou significativamente nas etapas de elaboração dessa pesquisa; aos meus avós, Laís e Gustavo, que sempre cuidaram de mim com todo amor e dedicação; aos meus tios, Gerson e Gutemberg, por me encorajarem a seguir a pesquisa do mestrado e confiarem no meu potencial; à minha sobrinha e afilhada Lívia por trazer luz, alegria e muito amor às nossas vidas; à Socorro, pessoa pela qual tenho profunda estima por estar comigo em todas as etapas da minha vida.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (Unesp) campus Sorocaba, e todos docentes e coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, além de todos os funcionários.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Aos professores Gerson Araújo de Medeiros e Bruno Fernando Gianelli pela dedicação no processo de orientação, pela paciência e apoio nos momentos de ensino, proporcionando uma rica experiência acadêmica.

À Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), na pessoa do Dixon Gomes Afonso, coordenador do Centro Vocacional Tecnológico do Bambu (CVT Bambu), que me incentivou e ajudou no desenvolvimento da pesquisa, disponibilizando todo seu conhecimento científico com relação às espécies de bambu do estado do Acre.

Ao engenheiro agrônomo Emanuel Amaral por compartilhar sua experiência e todo o conhecimento como produtor de bambu no Acre.

A todas as amizades que fiz no mestrado e levarei para a vida inteira, em especial, Agna e Santiago. Grata pela amizade e companheirismo principalmente nos momentos difíceis.

Ao meu amigo de grupo de pesquisa Rafael, por estar sempre me ajudar e apoiar quando tive dificuldades nas resoluções da pesquisa.

Às pessoas que tive a sorte de encontrar no meu caminho em Sorocaba, Octavio e Ingrid, cuja amizade sempre estará presente no meu coração. Agradeço por sempre estarem presentes mesmo quando a distância nos separa.

Aos meus amigos de longa data, que me apoiaram muito no período final do mestrado: Bruno, Débora, Emerson, Edfa, Felipe, Maria Clara e Thereza.

Por fim, gostaria de mencionar que o mestrado foi uma experiência de profunda aprendizagem e enorme desafio, portanto, sou grata a todos os amigos que me acompanham na minha trajetória e que me inspiram diariamente a tentar alcançar meus objetivos de vida além de proporcionar a honra de poder dar uma contribuição científica na busca por um mundo mais sustentável.

## RESUMO

A Amazônia brasileira abrange o norte do país e está distante dos principais centros econômicos e industriais do Brasil. Esse isolamento emerge desafios de logística de materiais para a região, incluindo aqueles relacionados à construção civil. A demanda no setor construtivo tem crescido nessa região, pelo seu potencial econômico, gerando também mais impactos ambientais ligados à produção dos materiais construtivos, aos modais de logística e ao desenvolvimento da obra civil. A avaliação de ciclo de vida (ACV) tem sido cada vez mais utilizada no setor construtivo, realizando uma análise do produto ou do processo em todo seu período de vida útil. A presente pesquisa consiste em avaliar a transição de ecoeficiência na construção de habitações populares na Amazônia, pela introdução do bambu. O estudo foi realizado na cidade de Rio Branco, capital do estado do Acre (AC). Considerou-se inicialmente um projeto de casas populares e a sua comparação com materiais convencionais utilizados na construção civil, além da avaliação do efeito da introdução do bambu em substituição ao aço. Para o estudo foi elaborado um inventário da cadeia produtiva do bambu em Rio Branco e um inventário da construção da habitação popular para as duas concepções de projeto avaliadas, a partir de coleta de dados locais. Um estudo comparativo de ACV atribucional entre as residências com estruturas de bambu e aço, foi realizado com auxílio do *software* SimaPro v 9.1.0.11 e da metodologia ReCiPe 2016, com a abordagem *midpoint* (H). As categorias de impacto selecionadas foram: mudança climática, depleção do ozônio estratosférico, formação de material particulado, eutrofização de água doce, toxicidade humana cancerígena, esgotamento de recursos minerais e consumo de água. Para a transição de ecoeficiência, foi relacionado o valor econômico de cada residência obtido a partir de valores praticados na região, utilizando a tabela SINAPI, em relação ao quantitativo de carga ambiental de ambas, obtidos através da ACV realizada. Os resultados de ACV mostraram que a categoria de impacto relativamente mais significativa foi a toxicidade humana cancerígena, em ambos os processos, porém a residência com a estrutura de bambu apresentou uma redução de 9,53% de diferença nessa categoria específica. A categoria de impacto de eutrofização da água doce se destacou no projeto estrutural de bambu em relação ao aço, com uma diferença de 2% entre os dois processos. As demais categorias de impacto também se mostraram menos impactantes na residência com estrutura de bambu em relação àquela com aço. A categoria de impacto que apresentou a maior diferença entre os dois processos foi o consumo de água, atingindo uma redução de 89% na estrutura de bambu. Na análise de econômica a residência com estrutura em aço apresentou um valor total da obra 16% inferior em relação à estrutura de bambu. Todavia, a residência com a parte estrutural em bambu apresentou uma ecoeficiência de 0,97 mPt/R\$ enquanto a residência com parte estrutural em aço atingiu 1,37 mPt/R\$, demonstrando uma transição de ecoeficiência desejável na construção de habitações populares na Amazônia. A partir desse estudo, foi possível concluir que a residência popular com estrutura em bambu em ambiente amazônico mostrou redução de 15,09% de impactos ambientais totais em relação a residência popular com estrutura convencional em aço, podendo esse número ser melhor quando apresentadas soluções de melhorias na gestão de resíduos da cadeia produtiva de bambu artesanal.

**Palavras chave:** Construção civil; Impacto Ambiental; Inventário de Ciclo de Vida; Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

The Brazilian Amazon covers the north of the country and is far from the main economic and industrial centers in Brazil. This isolation emerges material logistics challenges for the region, including those related to civil construction. The demand of the construction sector has grown in this region, due to its economic potential, also generating more environmental impacts linked to the production of construction materials, logistics modes and the development of civil works. The Life Cycle Assessment (LCA) has been increasingly used in the construction sector, carrying out an analysis of the product or process throughout its lifetime. The present research consists of evaluating the eco-efficiency transition in the construction of low-income housing in the Amazon, through the introduction of bamboo. The study was carried out in the city of Rio Branco, capital of the state of Acre (AC). Initially, it was considered a project of popular houses and its comparison with conventional materials used in civil construction, in addition to evaluating the effect of the introduction of bamboo to replace steel. For the study, an inventory of the bamboo production chain in Rio Branco and an inventory of the construction of popular housing were elaborated for the two evaluated project concepts, based on local data collection. A comparative study of attributional LCA between homes with bamboo and steel structures was carried out using the SimaPro v 9.1.0.11 software and the ReCiPe 2016 methodology, with the midpoint approach (H). The selected impact categories were: climate change, stratospheric ozone depletion, fine particulate matter formation, freshwater eutrophication, human carcinogenic toxicity, mineral resource scarcity, and water consumption. For the eco-efficiency transition, the economic value of each residence obtained from values practiced in the region was related, using the SINAPI table, in relation to the quantity of environmental load of both, obtained through the LCA carried out. The LCA results showed that the relatively more significant impact category was the human carcinogenic toxicity, in both processes, however the residence with the bamboo structure showed a reduction of 9.53% of difference in this specific category. The impact category of freshwater eutrophication stood out in the structural design of bamboo over steel, with a 2% difference between the two processes. The other impact categories were also less impactful in the bamboo structure compared to the steel house. The impact category that showed the greatest difference between the two processes was water consumption, reaching an 89% reduction in the bamboo structure. In the economic analysis, the residence with a steel structure presented a total value of the work 16% lower compared to the bamboo structure. However, the residence with the structural part in bamboo presented an eco-efficiency of 0.97 mPt/R\$ while the residence with the structural part in steel reached 1.37 mPt/R\$, demonstrating a desirable eco-efficiency transition in the construction of low-income housing in the Amazon. From this study, it was possible to conclude that the popular residence with a bamboo structure in an Amazonian environment showed a reduction of 15.09% of total environmental impacts compared to the popular residence with a conventional steel structure, and this number may be better when presented with solutions for improvements in waste management in the artisanal bamboo production chain.

**Keywords:** Civil Construction; Environmental Impact; Life Cycle Inventory; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa de localização e distribuição de florestas com incidência de bambu no estado do Acre. ....	20
<b>Figura 2:</b> Imagem de uma touceira da espécie exótica de bambu, <i>Guadua angustifolia</i> , em viveiro de bambu, apresentando a touceira, e detalhe do colmo e o corte da vara.....	21
<b>Figura 3:</b> Detalhamento do painel de vedação vertical com esteiras de bambu.....	22
<b>Figura 4:</b> Recobrimento de Painéis estruturais com ripas de bambu <i>Guadua</i> . ....	23
<b>Figura 5:</b> Fases de uma ACV. ....	24
<b>Figura 6:</b> Mapa da rodovia BR 364, único meio de acesso terrestre entre a região Sudeste e Rio Branco.....	30
<b>Figura 7:</b> Projeto Urbanístico do Empreendimento Cidade do Povo. ....	32
<b>Figura 8:</b> Tipologias executadas no empreendimento Cidade do Povo. ....	33
<b>Figura 9:</b> Planta Baixa da tipologia implementada no projeto da Cidade do Povo, tomada como base de cálculos de impactos ambientais.....	34
<b>Figura 10:</b> Cortes de uma da tipologia implementadas no projeto da Cidade do Povo, tomada como base de cálculos de impactos ambientais.....	34
<b>Figura 11:</b> Área de produção da cultura (esquerda) e a coleta e transporte do material (direita) no viveiro de bambu, em Rio Branco, Acre. ....	41
<b>Figura 12:</b> Planta da unidade habitacional. Os elementos em verde representam as varas estruturais de bambu. ....	43
<b>Figura 13:</b> Imagem tridimensional representando as estruturas em pórtico (A) e seu detalhamento de encaixe/conexão (B). ....	44
<b>Figura 14:</b> Detalhamento da esteira de bambu: dimensões e posicionamento. ....	45
<b>Figura 15:</b> Fluxo de inventário da cadeia produtiva do bambu, considerando a produção de 15 varas de bambu de 6 metros em Rio Branco, Acre. ....	46
<b>Figura 16:</b> Gráfico impactos da cadeia produtiva de bambu.....	48
<b>Figura 17:</b> Impactos ambientais da habitação em aço.....	52
<b>Figura 18:</b> Impactos ambientais da habitação em bambu. ....	55
<b>Figura 19:</b> Análise comparativa de impactos ambientais das habitações em aço e em bambu. ....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Quantidade de varas de bambu necessárias para a unidade habitacional.....	<b>44</b>
<b>Tabela 2:</b> Impactos ambientais da produção do bambu para atender a unidade funcional (habitação popular). .....	<b>48</b>
<b>Tabela 3:</b> Resultados do cálculo de impactos ambientais para a habitação com aço. ....	<b>51</b>
<b>Tabela 4:</b> Resultados do cálculo de impactos ambientais habitação com bambu. ....	<b>54</b>
<b>Tabela 5:</b> Análise comparativa de impactos ambientais das habitações em aço e em bambu.	<b>56</b>
<b>Tabela 6:</b> Tabela de Materiais da habitação em Aço – Curva ABC.....	<b>59</b>
<b>Tabela 7:</b> Tabela de Materiais da habitação em Bambu – Curva ABC.....	<b>61</b>
<b>Tabela 8:</b> Custos e Carga Ambiental dos processos de estrutura em aço e bambu. ....	<b>62</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Classificação de usos e aplicações do bambu. ....	<b>19</b>
<b>Quadro 2:</b> Inventário da cadeia produtiva artesanal de varas de bambu para a produção de 1 kg de bambu beneficiada no Acre. ....	<b>47</b>
<b>Quadro 3:</b> Inventário da habitação popular com o aço. ....	<b>50</b>
<b>Quadro 4:</b> Inventário da habitação popular com o bambu. ....	<b>53</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCV	Custo de Ciclo de Vida
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNTAC	Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
GEE	Gases de Efeito Estuda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços)
IPAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia.
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Date System</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PMHIS-RB	Plano Municipal de Habitação de Interesse Social de Rio Branco.
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SEINFRA	Secretaria de Estado de Infraestrutura e Desenvolvimento Urbano
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
SINAPI	O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UP	Unidade Produtiva

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
3.1	BAMBU .....	18
3.1.1	<i>Bambu na região Amazônica.....</i>	<i>19</i>
3.1.2	<i>Bambu na construção civil .....</i>	<i>21</i>
3.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV).....	24
3.2.1	<i>Conceitos e estrutura.....</i>	<i>24</i>
3.3	APLICAÇÕES DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	25
3.4	TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA .....	28
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA .....	29
4.2	TIPOLOGIAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO.....	32
4.3	ELABORAÇÃO DO PROJETO ARQUITETÔNICO E ESTRUTURAL DA CASA COM A INSERÇÃO DE BAMBU .....	35
4.4	OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO DE ACV CONFORME ISO 14.040 .....	36
4.4.1	<i>Objetivo do estudo.....</i>	<i>36</i>
4.4.2	<i>Escopo do estudo.....</i>	<i>36</i>
4.5	COLETA DE DADOS PARA INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.....	39
4.6	MODELAGEM DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.....	40
4.6.1	<i>Cadeia produtiva de bambu .....</i>	<i>40</i>
4.6.2	<i>Inventário da Habitação de interesse popular .....</i>	<i>41</i>
4.7	COLETA DE DADOS PARA TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA .....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
5.1	PROJETO ARQUITETÔNICO E ESTRUTURAL EM BAMBU .....	43
5.2	CADEIA PRODUTIVA DE BAMBU EM RIO BRANCO, ACRE .....	45
5.3	ANÁLISE DA HABITAÇÃO POPULAR COM ESTRUTURA EM AÇO .....	49
5.4	ANÁLISE DA HABITAÇÃO POPULAR COM ESTRUTURA EM BAMBU.....	52

5.5	CENÁRIO COMPARATIVO DAS HABITAÇÕES EM AÇO E EM BAMBU .....	56
<b>6</b>	<b>TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA .....</b>	<b>59</b>
6.1	DADOS ECONÔMICOS DA HABITAÇÃO EM AÇO .....	59
6.2	DADOS ECONÔMICOS DA HABITAÇÃO EM BAMBU .....	60
6.3	ANÁLISE COMPARATIVA – TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA.....	62
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A região da floresta Amazônica, classificada como o bioma terrestre Amazônia, é conhecida por ter uma riqueza inestimável para a humanidade. Segundo o IPAM (2011), a Amazônia é responsável por conter mais da metade da biodiversidade mundial e, portanto, apresenta um considerável potencial para o desenvolvimento da biotecnologia.

A Amazônia abrange a região norte do Brasil, correspondendo uma área de 3,85 milhões km<sup>2</sup> ou 45,2% do território nacional, na qual estão inseridos sete estados (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a população dessa região atinge 18,7 milhões de habitantes, correspondendo à menor densidade demográfica média entre as regiões do Brasil (4,8 hab/km<sup>2</sup>).

Esse panorama se dá por questões históricas e sociais do país, resultando em barreiras para o desenvolvimento urbano, principalmente com relação a infraestrutura e abastecimento de produtos para a construção civil, pois são produzidos majoritariamente nos polos industriais localizados nas regiões sul e sudeste (IBGE, 2020). Ademais, por essas regiões serem geograficamente afastadas da Amazônia, as dificuldades acabam se agravando em razão das condições físicas das estradas brasileiras (MANCINI et al., 2021). Com base nesse problema, a busca por materiais renováveis e disponíveis na própria região seria uma alternativa para mitigar os impactos gerados pela construção civil.

Nesse viés se insere o bambu, um dos materiais renováveis amplamente utilizado na construção civil e disponível em abundância em regiões da Amazônia, como o estado do Acre, conforme o relatório “Recursos Naturais: Biodiversidade e Ambientes do Acre” publicado pela SEMA (Secretaria de Estado de Meio Ambiente) em 2010 (SOUZA et al., 2010).

Em relação às propriedades estruturais do bambu para emprego na construção civil, Janssen (2000) comentou que se consideradas as relações de resistência/massa específica e rigidez/massa específica, tais valores superam as madeiras e o concreto, podendo ser tais relações comparáveis, inclusive, ao aço (PEREIRA e BERBALDO, 2016).

A construção civil é mundialmente reconhecida como um dos principais agentes causadores de contaminação e degradação ambiental na atualidade. Passuelo et al. (2014), baseados em dados bibliográficos, indicam a importância relativa do setor construtivo nos impactos ambientais e na economia de um país.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta utilizada para gestão ambiental, sendo considerada uma metodologia internacionalmente consagrada na análise ambiental de todas as etapas da vida útil de um determinado produto ou processo, sendo também utilizada para normatização de cálculo de declarações ambientais de produtos da construção civil seja ele um insumo ou o edifício como um todo (PASSUELO et al., 2014)

Com base nesses conceitos, é notória a necessidade de desenvolvimento de uma cadeia produtiva de materiais renováveis para suprir ou minimizar os efeitos dos impactos ambientais de uso de materiais convencionais na construção civil. O material abordado para o estudo em questão é o bambu, que apresenta várias características que dão suporte ao desenvolvimento da cadeia produtiva em áreas degradadas da região amazônica devido ao seu rápido crescimento e desenvolvimento, conforme coletânea de trabalhos realizada por Dumond, Wiedman (2017) e Pereira, Beraldo (2016).

O presente estudo objetivou promover uma comparação do uso do aço da construção civil em relação à introdução do bambu, como material renovável, por meio da ACV, avaliação econômica, análise da transição de ecoeficiência e propor diretrizes para tomadas de decisões na mitigação de impactos ambientais na construção civil na Amazônia.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente estudo objetivou avaliar os potenciais impactos ambientais e aspectos econômicos na construção de habitações populares gerados pela introdução do bambu como elemento estrutural em substituição ao aço, na cidade de Rio Branco, estado do Acre, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e transição de ecoeficiência.

### **2.2 Objetivos específicos**

- ✓ Avaliar os potenciais impactos ambientais da construção civil de uma habitação de interesse popular no Acre, utilizando o aço e o bambu como elemento principal de estrutura.
- ✓ Realizar uma análise da produção artesanal de bambu para construção civil por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).
- ✓ Analisar comparativamente os potenciais impactos ambientais da habitação popular com o aço e o bambu (material renovável).
- ✓ Avaliar aspectos econômicos da substituição de material não renovável por matéria-prima renovável, na construção civil na região amazônica, baseado em um sistema de produção artesanal do bambu.
- ✓ Avaliar a transição de ecoeficiência na substituição de material não renovável por matéria-prima renovável, na construção civil na região amazônica.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Bambu

Bambu é o termo comum utilizado para membros de um determinado grupo taxonômico de grandes gramíneas lenhosas (subfamília *Bambusoideae*, família *Andropogoneae / Poaceae*). Os bambus abrangem cerca de 1250 espécies, a maioria das quais de crescimento relativamente rápido, atingindo a maturidade em cinco anos, mas florescendo com pouca frequência. Bambus anões podem ter apenas 10 cm de altura, mas grupos de espécies altas podem atingir 15-40 m, e os maiores conhecidos (por exemplo, *Dendrocalamus giganteus*) crescem até 40 m de altura e 30 cm de diâmetro do colmo (caule). São distribuídos principalmente nos trópicos, mas ocorrem naturalmente em zonas subtropicais e temperadas de todos os continentes, exceto Europa (SCURLOCK et al., 2000).

Historicamente o bambu se destaca pelo seu rápido crescimento e rebrotamento, bem como ter acompanhado o desenvolvimento da humanidade, fornecendo alimento, abrigo, possibilidades de produção de ferramentas, utensílios, dentre vários outros itens, incluindo até os decorativos. Atualmente estima-se que contribua para a subsistência de mais de um bilhão de pessoas (PEREIRA e BERALDO, 2016).

Segundo Ben-Zhi et al. (2005), essa gramínea tem uma das maiores taxas de crescimento variando de 30 a 100 cm por dia, dependendo da espécie. Devido a esse rápido crescimento e capacidade de rebrotamento, Ceccon e Ruiz (2019) comentam sobre o alto potencial de sequestro de carbono pela fixação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), transformação em biomassa e posterior armazenamento em formas de matéria orgânica estável no solo.

Polo et al. (2014) apresenta serviços ambientais e produtos obtidos a partir do bambu no Quadro 1.

**Quadro 1:** Classificação de usos e aplicações do bambu.

<b>Classificação</b>	<b>Aplicações do Bambu</b>
<b>Serviços Ambientais</b>	Ornamental e de Beleza Paisagística
	Reguladores Térmicos e Acústicos
	Protetor de solo contra erosão
	Restaurador ecológico em ecossistemas perturbados
<b>Produtos Alimentícios</b>	Brotos de bambu são vendidos como alimentos.
<b>Produtos feitos com bambu</b>	Construção com varas de bambu
	Produção de biocombustível
	Mobiliário: poltronas, cadeiras, mesas, etc.
	Artesanato: Instrumentos musicais, bicicletas, joias, etc.
<b>Produtos industrializados</b>	Pisos laminados
	Painéis de vedação para construção civil
	Papel a partir da fibra vegetal
	Produtos cosméticos

Fonte: POLO, et al. (2014), adaptado pela própria autora.

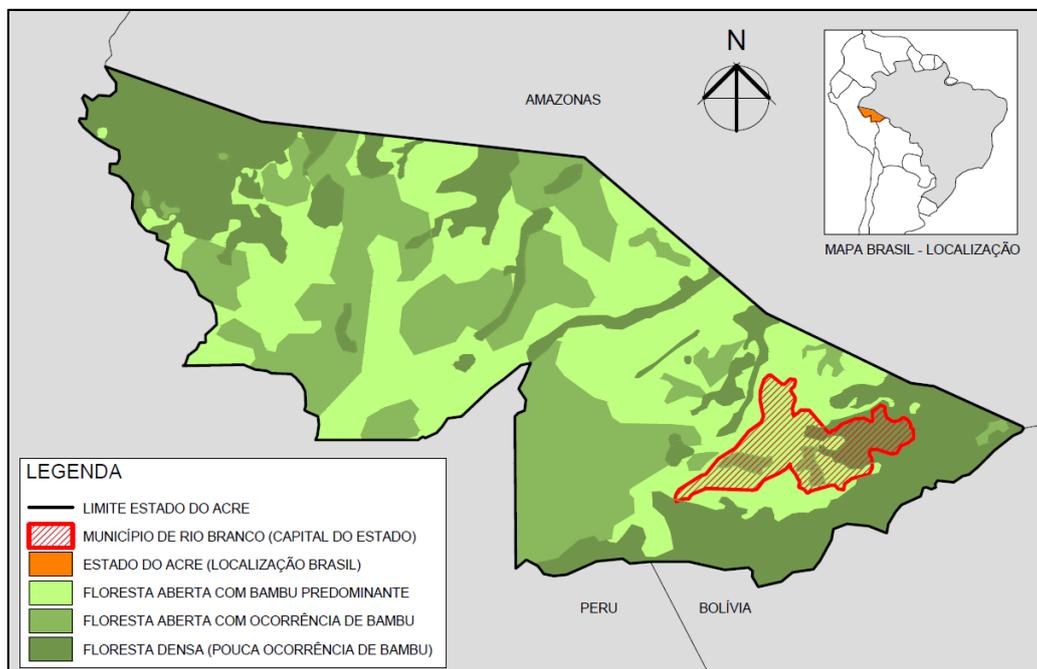
### 3.1.1 *Bambu na região Amazônica*

Segundo estudo de Carvalho et al. (2013), as florestas de bambu cobrem pelo menos 16 milhões de hectares de florestas amazônicas ao longo Brasil, Peru, Bolívia e Colômbia. Esse produto florestal desempenha um importante papel econômico e cultural entre os povos da Amazônia, como fonte alimentícia rica em nutrientes (broto do bambu), além de outros inúmeros usos e aplicações em materiais artesanais, além da utilização na construção civil, por ser um material que se adapta aos abalos sísmicos presentes na região da Colômbia (CARVALHO et al., 2013).

Uma das maiores reservas naturais de bambu nativo do mundo se localiza no estado do Acre, atingindo 18% do total de sua área florestal (SOUZA, 2010). Afonso (2011) relata que apesar da magnitude da área de bambu nativo, esse material não é extensivamente explorado na região, portanto há uma rica possibilidade de instalação de uma cadeia produtiva do mesmo na região, para suprir a demanda de outros materiais, atendida pela importação de outras regiões do Brasil.

A Figura 1 apresenta a distribuição de florestas com a incidência de bambu no estado do Acre. Esse estado possui uma vasta área de floresta aberta com bambu predominante, principalmente na região onde se encontra o estudo proposto, na cidade de Rio Branco (capital do estado do Acre), em destaque no mapa.

**Figura 1:** Mapa de localização e distribuição de florestas com incidência de bambu no estado do Acre.



**Fonte:** Elaborado pela autora, baseado no estudo de AFONSO, 2011.

Apesar de incipiente, o bambu também ocorre em áreas de floresta densa. Afonso (2011) encontrou espécies de bambu em harmonia com outras espécies nativas da região, não representando risco ambiental a biodiversidade local. Com isso, pode-se entender que as condições mesológicas são favoráveis ao desenvolvimento dessa planta na região amazônica, destacando-se no estado do Acre.

Segundo o banco de dados da Flora do Acre (2010) produzido pela SEMA (Secretaria de Estado de Meio Ambiente), existem quatro espécies nativas de bambu no estado do Acre, todas do mesmo gênero: *Guadua*. Todavia, as espécies nativas apresentam dificuldades de manejo e trabalhabilidade pela presença de espinhos.

A espécie de bambu lenhoso *Guadua angustifolia*, conhecida como bambu gigante, é nativa da Colômbia, Venezuela e Equador, mas também pode ser encontrada na Amazônia de países da América do Sul, como Peru, Brasil e Bolívia, e na América Central (LIMA et al., 2012). Tal espécie tem aplicações para fins de construção civil, pelo seu bom desempenho estrutural, com elevadas propriedades mecânicas e durabilidade natural dos colmos (PEREIRA e BERALDO, 2016). Lima et al. (2012) afirma também que a espécie contém características que favorecem o seu uso pelo setor de construção

civil, como: talos de elevado comprimento e diâmetro, talos mais retos com menor índice de conicidade em relação a outras espécies, rápido crescimento, maior resistência mecânica, possibilidade de corte seletivo.

O desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu no Acre é algo fomentado pelo governo local, pela facilidade do seu manejo, todavia se prioriza o bambu exótico, pela variedade de usos que vão desde a construção civil até o ramo alimentício (broto de bambu).

Na Figura 2 pode-se visualizar um dos poucos viveiros de produção de bambu no perímetro urbano da cidade de Rio Branco, estado do Acre, destacando-se a espécie estudada *Guadua angustifolia* em touceira, além do detalhe do colmo e do corte da vara. Nesse viveiro são cultivadas espécies de bambu nativo e espécies de bambu exótico, comercializadas para diversos fins, inclusive na área de construção civil. O bambu exótico do mesmo gênero *Guadua*, apresenta um bom desenvolvimento, crescimento e facilidade de manejo por não apresentar espinhos, de acordo com dados obtidos no viveiro de produção, em entrevista não estruturada.

**Figura 2:** Imagem de uma touceira da espécie exótica de bambu, *Guadua angustifolia*, em viveiro de bambu, apresentando a touceira, e detalhe do colmo e o corte da vara.



**Fonte:** Acervo pessoal.

### 3.1.2 *Bambu na construção civil*

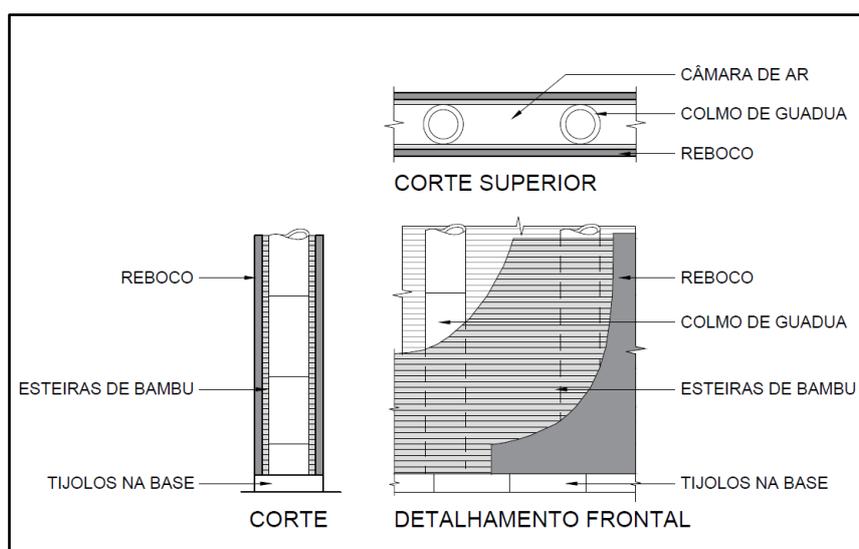
Apesar das diversas possibilidades de uso e aplicação do bambu na construção civil, ainda não se encontram disponíveis normas específicas no Brasil, tanto no cálculo de pré-dimensionamento para estruturas quanto na sua caracterização físico-mecânica para fins construtivos.

De acordo com estudo realizado por Beraldo e Aleixo (2019), a parede externa do colmo de bambu oferece uma elevada resistência à tração. Cordas trançadas com o material proveniente da casca do bambu atingem resistência à tração similar à do aço CA-25 (250 Mpa), utilizado comumente nas armaduras estruturais, porém com apenas 10% de seu peso (BERALDO e ALEIXO, 2019)

O bambu pode ser utilizado em várias etapas da obra, tanto na parte estrutural, realizando papel de viga e pilar, quanto na parte de vedação e acabamento, podendo ser aplicado de diversas formas. Afonso (2011) relaciona as variadas aplicações do bambu na construção civil, destacando-se os telhados, o uso estrutural (pilar e viga) e a composição com o concreto (bambucreto). No presente trabalho, foi utilizado o bambu na solução estrutural (conjunto de pilares e vigas formando pórticos estruturais) da habitação popular, juntamente com a sua vedação.

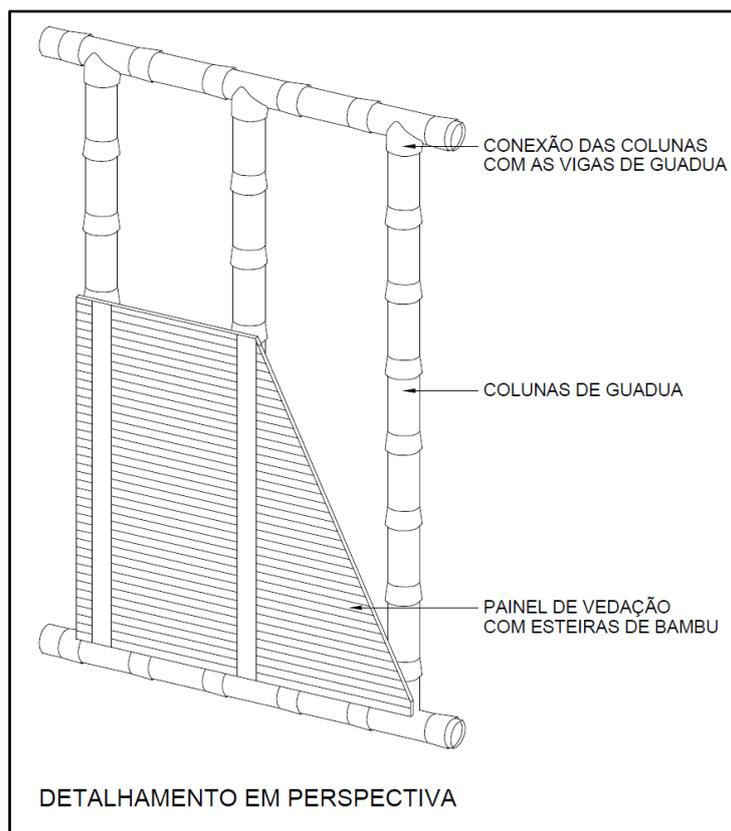
Na vedação foi utilizado o sistema de painéis de esteiras de bambu posicionadas entre as varas, formando uma câmara de ar, e possibilitando um acabamento com reboco e pintura. Essa estrutura de vedação se comporta de forma similar a uma parede feita de acabamento de alvenaria convencional, conforme estudo de Benavides e Ceolin (2015). Nas Figuras 3 e 4 pode-se visualizar o sistema de vedação com esteiras de bambu, posicionadas de forma vertical entre os colmos de *Guadua* (espécie de bambu utilizada neste trabalho, apropriada para construção civil), sendo rebocada, emassada e pintada, proporcionando a separação de ambientes e vedação da residência.

**Figura 3:** Detalhamento do painel de vedação vertical com esteiras de bambu.



**Fonte:** Elaborado pela autora, baseado no desenho de BENAVIDES e CEOLIN, 2015.

**Figura 4:** Recobrimento de Painéis estruturais com ripas de bambu *Guadua*.



**Fonte:** Elaborado pela autora, baseado no desenho de BENAVIDES e CEOLIN, 2015 e MARÇAL, 2018.

Antes do cobrimento dos painéis deve-se instalar as tubulações e acessórios sanitários, com até 50 mm (2"), e elétricos, deixando o espaço das caixas de passagem, tomadas e interruptores. O mesmo procedimento descrito acima pode ser realizado utilizando o que é chamado de esteiras de bambu, que se define por colmos de bambu aberto em forma de esteira. As esteiras de bambu devem ter sua camada interna, ou parte branca, removida. Devem ser deixados pequenos espaços entre as esteiras para melhor fixação do acabamento de argamassa. (MARÇAL, 2018).

Como mencionado anteriormente, o bambu da espécie *Guadua angustifolia* é uma das mais importantes espécies de bambu no mundo, devido a sua resistência mecânica e durabilidade (BENAVIDES e CEOLIN, 2015). Trata-se do melhor material para as estruturas dos edifícios, possuindo também potencial para a manufatura de materiais compósitos (HIDALGO, 2003).

O rápido crescimento do bambu do gênero *Guadua* permite seu aproveitamento contínuo após cinco anos do seu plantio, tornando-o uma alternativa ao uso de madeiras na construção de baixo custo, conforme relatado por Benavides (2012) na Costa Rica.

Portanto, o projeto estrutural com bambu *Guadua* pode se tornar uma solução potencial para uso na construção civil no ambiente amazônico.

## 3.2 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

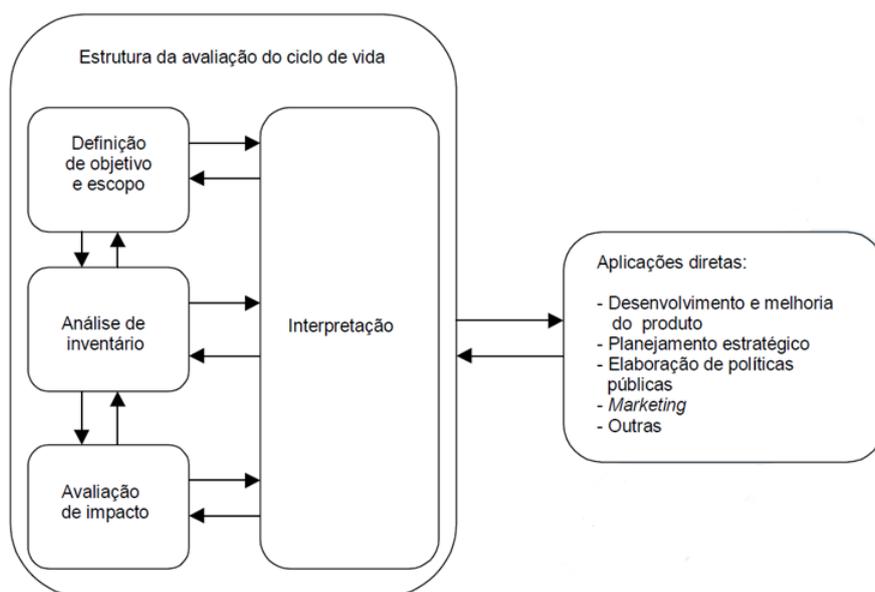
### 3.2.1 Conceitos e estrutura

A avaliação de ciclo de vida consiste em uma abordagem para determinar o desempenho ambiental de produtos, desde a retirada da matéria prima, sua produção, uso e disposição final de seus resíduos, e de processo produtivo, para identificar e entender oportunidades de melhorar o seu desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida, dando suporte aos tomadores de decisão e no desenvolvimento de políticas públicas (COSTA et al., 2018). Essa abordagem permite avaliar os impactos de um produto após o seu uso, da logística convencional e reversa, entre outras, a partir da compilação de informações e das avaliações técnicas, por ser internacionalmente reconhecida (OMETTO, 2005).

A ACV é normalizada pelo conjunto de normas ISO 14.040. No Brasil, a ABNT NBR ISO 14040:2001 estabelece os conceitos gerais e na ABNT NBR ISO 14044:2009 se aborda a definição de suas fases e métodos de análise. (BUENO, 2014).

A ABNT NBR ISO 14.040:2001 define que a ACV deve ser estruturada incluindo as seguintes fases: a) definição de objetivo e escopo, b) análise de inventário, c) avaliação de impactos e d) interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5:** Fases de uma ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14.040:2001

A definição de objetivo e escopo vão nortear o estudo da ACV. A ABNT ISO 14.040:2001 descreve que o objetivo de um estudo da ACV deve declarar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo.

O escopo deve descrever as informações essenciais do estudo: a função ou funções do estudo, requisitos para que o produto ou processo exista; determinação da unidade funcional, processo de quantificação da função ou funções identificadas no estudo; fluxo de referência, que determina a quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional.

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é determinada pela coleta de todas as informações referente ao sistema de análise, quantificando dados de entrada e saída do processo para uma correta avaliação de potenciais impactos ambientais.

Na avaliação de impacto é possível selecionar diferentes categorias, sendo algumas de abrangência global (efeito estufa e depleção da camada de ozônio), e outras de importância local ou regional (efeitos toxicológicos) (GIANELLI, 2014).

O objetivo da avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental. (ABNT NBR ISO 14.044:2009)

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento de ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo. (ABNT NBR ISO 14.044:2009)

### **3.3 Aplicações da Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil**

A construção civil é reconhecida como um setor de considerável consumo de recursos naturais, renováveis e não renováveis, sendo responsável por relevantes cargas de emissões, gerando potenciais impactos ambientais. Escamilla et al. (2018) apresenta dados sobre os aspectos ambientais associados ao setor da construção civil, como a demanda por recursos energéticos. Na produção de materiais de construção, como cimento e agregados, se utiliza de 30% a 40% da produção de energia mundial e, sob as atuais práticas, esse setor é responsável por 30% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) (ESCAMILA et al., 2018).

Com base que os produtos e processos ligados a construção civil podem ter seus impactos minimizados considerando o ciclo de vida, insere-se essa metodologia de análise desses potenciais impactos.

Estudos de ACV, relacionados ao setor de construção civil, tem avaliado tipos de construção (RYBERG et al., 2021), estratégias de gestão de resíduos de construção e demolição para gerar novos materiais (WASKOW et al., 2021), desenvolvimento e comparação de desempenho ambiental de materiais de construção (BRIBIÁN et al., 2011; CARVALHO et al., 2020; ZHANG, BISWAS, 2021).

Além disso, a aplicação de análises preditivas da avaliação do impacto, do uso da energia e emissões de poluentes durante o ciclo de vida desses novos materiais permite que se produzam materiais ecoeficientes, para atender à demanda de um mercado cada vez mais exigente em matéria ambiental. Uma melhor gestão dos materiais de construção implica uma considerável melhoria na pegada ecológica e de carbono da construção civil e na redução global de consumo de recursos naturais e de impactos associados à produção desses produtos (PASSUELO, et al., 2014).

Dentre as principais dificuldades para a disseminação da ACV em sistemas construtivos, no cenário brasileiro, encontra-se a escassez de dados de inventário disponíveis, o que torna a aplicação da metodologia ainda mais complexa e demorada. Por outro lado, bancos de dados internacionais dispõem de uma quantidade considerável de informações, as quais são frequentemente utilizadas em estudos realizados no contexto brasileiro (BUENO, 2014). Todavia, esse não é o caso do bambu, o que confere ineditismo ao presente estudo, especialmente para as condições ambientais da Amazônia.

Zhang, Biswas (2021) compararam tijolos convencionais em relação a tijolos intertravados, por meio de ACV. Os resultados mostraram que os impactos ambientais de tijolos convencionais foram de 28% a 73% maiores do que os tijolos intertravados (dependendo da categoria de impacto), apesar de apresentarem mesma resistência estrutural.

Yu et al. (2015) afirmam que a ACV pode ser aplicada para identificar em qual fase do ciclo de vida da edificação, e que tipo de edifício, se consome mais energia e apresenta maior emissão de gases de efeito estufa. Nesse estudo uma ACV comparativa entre um edifício típico de tijolo e concreto e outro com estrutura de bambu, na China, permitiu diagnosticar que a estrutura de bambu requer menos energia e emite menos dióxido de carbono para atender a requisitos funcionais idênticos, ou seja, sistema de vedação e suporte de estrutura.

Escamilla et al. (2018) realizaram um estudo comparativo de ACV do uso de técnicas construtivas de bambu industrial e bambu artesanal na Colômbia. Os resultados revelaram que o bambu industrial proporciona melhor desempenho ambiental em edificações de vários pavimentos, enquanto o bambu artesanal se destaca em moradias térreas. Esses autores apontaram que os sistemas de construção industrial e tradicional à base de bambu não apenas produzem níveis mais baixos de emissões de GEE, mas também apresentam o potencial de equilibrar as emissões causadas por outros materiais de construção convencionais, como concreto e aço. Portanto, cada edifício estruturado em bambu contribui para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente podendo, assim, apoiar os países produtores de bambu na realização de metas de desenvolvimento sustentável na habitação, ao mesmo tempo em que contribui para os esforços globais de redução de GEE e mitigação das mudanças climáticas.

Chang et al. (2018) realizaram um estudo de ACV na cadeia produtiva industrial de bambu laminado em Taiwan. Nesse estudo, os maiores impactos foram relacionados a saúde humana e esgotamento de recursos nas fases de secagem, prensagem e outros processos que envolvem água. Chang et al. (2018) comentam ainda que os materiais de bambu apresentam funções de armazenamento de carbono e isso contribui para a redução de impactos na categoria de mudanças climáticas.

Van Der Lugt et al. (2015) realizou uma avaliação da pegada de carbono do processo industrial de bambu da China, e identificou que em comparação com outros materiais da construção civil (alumínio, PVC e aço) o bambu apresentava melhor desempenho ambiental, mesmo levando em consideração o transporte intercontinental (da China para Europa) e a resina utilizada.

Em contraste com a madeira, um dos principais benefícios ambientais do bambu refere-se ao aproveitamento dos recursos naturais, em razão do mesmo ser uma gramínea, com características distintas de crescimento e colheita do que das árvores, quando comparada a outros recursos madeireiros; além de ser menos suscetível ao corte raso/desmatamento (nenhum ganho econômico de curto prazo quando comparado com madeira) e adequado para o reflorestamento, mesmo em áreas nas quais a agricultura não é viável, por reabilitar terras degradadas, incluindo encostas erodidas. Tais características podem justificar a ausência de impacto ambiental na categoria Esgotamento dos Recursos Minerais do presente trabalho.

### 3.4 Transição de Ecoeficiência

Ecoeficiência é o equilíbrio de bens e serviços com preços competitivos que satisfazem necessidades humanas e qualidade de vida, reduzindo progressivamente os impactos ecológicos e a intensidade do uso dos recursos ao longo do ciclo de vida dentro da capacidade de carga estimada da Terra (HSIEH. et al., 2013).

Segundo Sakamoto (2019), a ecoeficiência pode ser descrita como uma abordagem que considera a produção de sistemas e produtos com valores acessíveis, possibilitando o atendimento à demanda de necessidades da sociedade, com potencial redução de impactos ambientais ligados ao processo, promovendo um ganho ambiental e melhoria na qualidade de vida.

A ABNT NBR-14045, traz a definição de ecoeficiência como instrumento quantitativo de gestão que possibilita a avaliação de impactos do ciclo de vida de um sistema ou produto juntamente com os dados econômicos do processo.

Dessa forma, pode-se descrever que a análise e o portfólio de ecoeficiência são uma ferramenta poderosa de suporte à decisão para várias questões estratégicas. Kicherer (2007) comenta que a transição de ecoeficiência se dá pela relação do CCV (Custo do Ciclo de Vida) em relação aos impactos ambientais avaliados na ACV (Análise de Ciclo de vida).

Por sua vez, o CCV traz como resultados a viabilidade econômica para o sistema ou processo analisado através da ACV. É importante salientar que o CVV considera fatores de externalidade na composição da sua análise, visto que há uma transição de valores de mercado entre os produtos ou processos. (SAKAMOTO, 2019)

Bribián et al. (2011) realizaram um estudo envolvendo ecoeficiência do impacto dos produtos de construção civil e constataram que os mesmos podem ser reduzidos significativamente, promovendo a utilização das melhores técnicas disponíveis e a ecoinovação nas unidades produtivas. A ecoinovação se dá pela substituição de recursos naturais finitos por resíduos gerados em outros processos produtivos, preferencialmente disponíveis localmente. Isso estimularia a concorrência entre os fabricantes para o lançamento de produtos mais ecoeficientes e encorajar o uso das Declarações Ambientais do produto.

A busca pela ecoeficiência se assemelha, em certa medida, à busca pela produtividade. Seu conceito se embasa em ter maior capacidade produtiva com menor quantidade de insumos para melhorar o desempenho econômico e, ao mesmo tempo,

reduzir o consumo de recursos, o desperdício e a poluição. (KABONGO e BOIRAL, 2017.)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Descrição da Área de estudo e Contextualização da pesquisa

O estudo se concentrou no município de Rio Branco, localizado na região conhecida por Amazônia ocidental ou sudoeste amazônico, no bioma terrestre Amazônia. Rio Branco apresenta uma população estimada, em 2020, de 413.418,00 habitantes e uma área territorial 8.834,942 km<sup>2</sup>. Pelo censo de 2010 do IBGE, foi quantificado o dado de 87.196 domicílios particulares permanentes na área urbana e 6.988 domicílios particulares permanentes em área rural (IBGE, 2018).

O PIB *per capita* da capital acreana é de R\$ 22.287,70 (IBGE, 2018). A economia do estado do Acre é composta por: serviços, agricultura, pecuária e indústria. A realidade local mostra que o setor industrial do estado não é expressivo, fazendo com que a maior parte de bens de consumo sejam importados das regiões mais industrializadas, especialmente a sudeste, inclusive os materiais da construção civil. O maior produto de exportação do Acre é a madeira, um dos poucos materiais de construção civil que não é importado de outros estados.

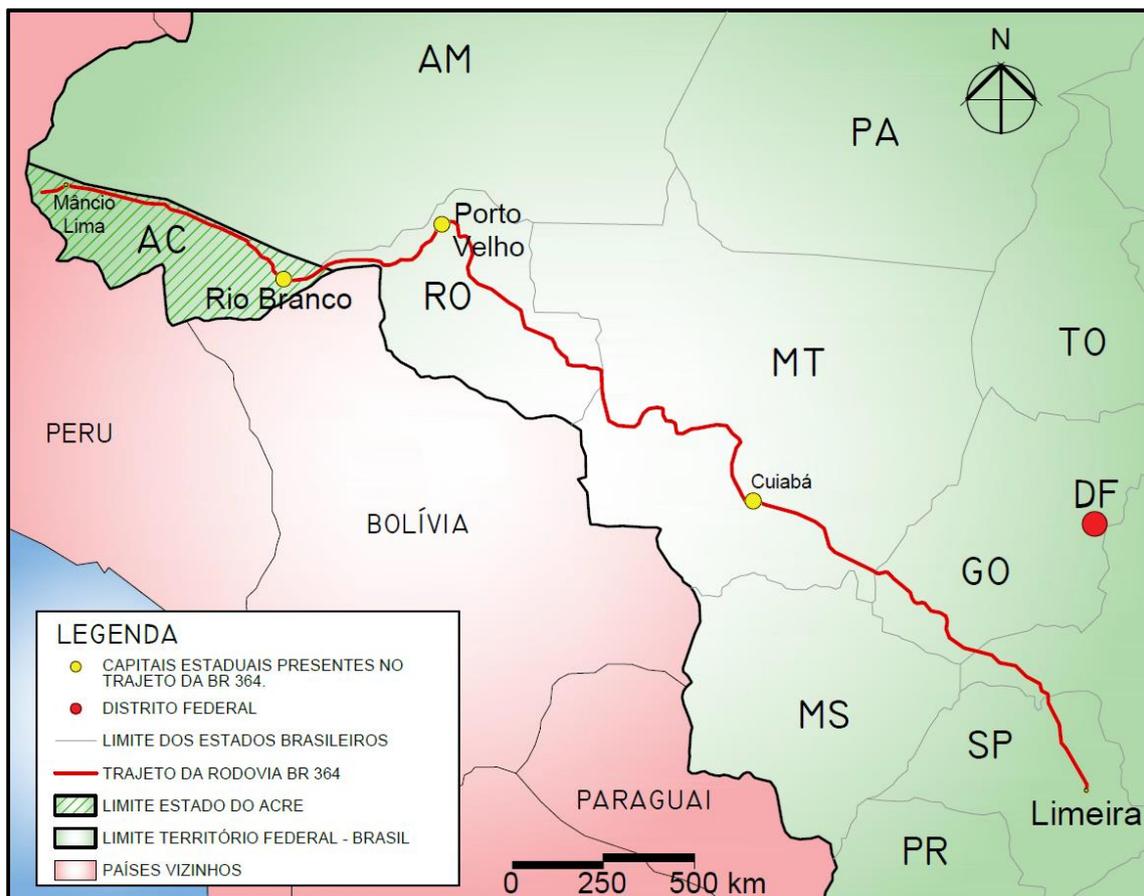
O município apresenta 56,7% de seus domicílios com esgotamento sanitário, segundo IBGE (2018) sendo considerado baixo para a capital do estado em comparação com cidades de mesma proporção na região sudeste, configurando uma necessidade de investimentos públicos em infraestrutura urbana.

A Figura 6 mostra o único meio de acesso terrestre do estado do Acre em relação aos outros estados brasileiros. A rodovia BR 364 se inicia na cidade de Limeira, no interior do estado de São Paulo, e termina na cidade de Mâncio Lima - município do estado do Acre considerado o mais ocidental do país atingindo, em sua totalidade, 4.325 km de extensão, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2019). A estrada se faz presente em 6 estados brasileiros, um importante modal para transporte não somente para o estado do Acre, mas para toda a ligação do sudeste à região centro-oeste e norte do país.

O estado do Acre conta com dois aeroportos internacionais, administrados pela

Infraero, o Aeroporto Internacional de Cruzeiro do Sul (localizado no município de Cruzeiro do Sul, ao oeste do estado) e o Aeroporto Internacional de Rio Branco – Plácido de Castro, localizado na capital acreana.

**Figura 6:** Mapa da rodovia BR 364, único meio de acesso terrestre entre a região Sudeste e Rio Branco.



**FONTE:** Elaborado pela autora.

Os materiais da construção civil, objetos de estudo, são importados, em sua maioria, e transportados pelo modal terrestre (BR 364). O aço, particularmente, é importado do estado de São Paulo, percorrendo uma distância de cerca de 3.500 km entre os estados. A brita é normalmente trazida do estado de Rondônia, e o restante dos materiais provenientes também de outros estados. Somente a areia e a madeira são produzidas e extraídas do próprio estado. É notável que o sistema de logística de materiais e produtos para região amazônica apresenta-se como desafio no setor construtivo da região, apontando o enorme grau de dependência de outros estados. Por sua vez, nada é importado de países vizinhos, por questões burocráticas/legais e pela situação em que se

encontra as estradas até a fronteira com Bolívia e Peru.

É importante mencionar que para os materiais chegarem ao Acre, é cobrado o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), pela circulação de mercadorias e prestação de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de Comunicação. Duarte (2018) afirma que a cobrança deste imposto fica por conta dos Estados da União e, com isso, cada unidade pode fazer suas próprias regras a respeito da arrecadação e das taxas que serão cobradas. Por isso, a alíquota pode variar entre um estado e outro, embora geralmente fique entre 17% e 18% do preço da mercadoria. O imposto deve ser pago ao estado de origem do produto, elevando os custos dos materiais para construção civil no estado do Acre.

Esse panorama afeta o setor de construção civil do Acre e as obras de maior porte, provocando impactos ambientais, econômicos e sociais, pois afeta o acesso à moradia própria pela população mais vulnerável.

Para amenizar o déficit de moradias nessa capital, em 2011, Rio Branco apresentou uma nova política habitacional. Trata-se de um projeto de construção de um novo bairro para a capital acreana, prevendo a construção de 10.518 lotes residenciais, de equipamentos públicos comunitários e infraestrutura urbana. Esse foi o maior projeto habitacional idealizado no estado do Acre, com o objetivo de diminuir o déficit habitacional na cidade, quantificado em 46.048 moradias segundo estudo feito pelo Plano Municipal de Habitação de Interesse Social de Rio Branco – PMHIS-RB, em 2011.

O projeto do novo bairro intitula-se “Cidade do Povo” (Figura 7), localizado em uma região afastada cerca de 12 km do centro da cidade, na qual se encontram os principais equipamentos e instituições públicas, na porção sudeste do município.

Até o ano de 2020, o projeto Cidade do Povo não foi concluído. Foram entregues 3.348 casas para a população, cerca de 35% do total previsto no projeto original, e atualmente não se tem previsões para entrega de novas casas, segundo dado coletado na Secretaria de Estado de Infraestrutura e Desenvolvimento Urbano (SEINFRA), em 2019.

**Figura 7:** Projeto Urbanístico do Empreendimento Cidade do Povo.



FONTE: MASTERPLAN 2012.

#### 4.2 Tipologias selecionadas para o estudo

No projeto do bairro “Cidade do Povo” existem diferentes tipologias arquitetônicas (Figura 8), todas atendendo às especificações do programa federal de construção de casas populares do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), o qual estava em vigência na época da elaboração do projeto. Essas tipologias consistem em uma área construída de aproximadamente 40m<sup>2</sup> e os seguintes cômodos: uma sala de estar/refeições, uma cozinha, um banheiro, dois dormitórios e área de serviço.

É importante salientar que o programa prevê adaptações nos projetos para pessoas portadoras de deficiência, conforme ABNT NBR 9050:2015 de acessibilidade (legislação em vigor na época da elaboração do projeto), e a instalação obrigatória de sistema de aquecimento solar em todas as unidades habitacionais.

**Figura 8:** Tipologias executadas no empreendimento Cidade do Povo.

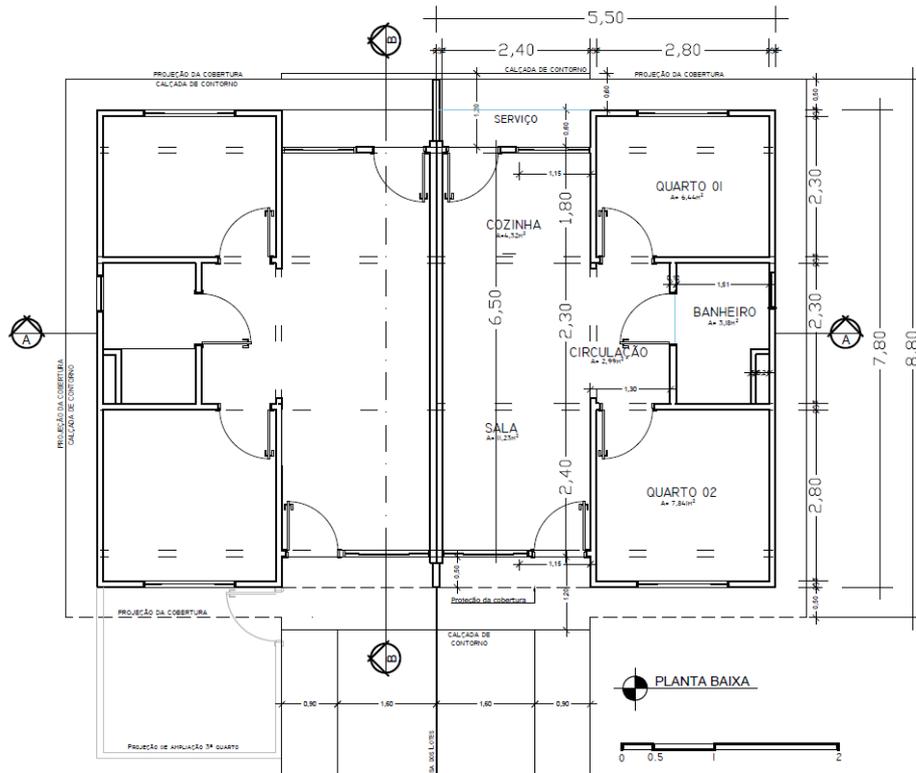


**FONTE:** Acervo pessoal, dezembro 2020.

As tipologias adotaram materiais diferentes, mas que se resumem aqueles mais usuais na construção civil. Quanto à cobertura, foram adotadas telhas de cerâmica e fibrocimento; esquadrias de madeira, alumínio e vidro; paredes com alvenaria e bloco estrutural de concreto. Todas as tipologias atenderam às especificações mínimas do Programa Minha Casa Minha Vida – PMCMV do Governo Federal, o qual se encontrava em vigor no ano executado.

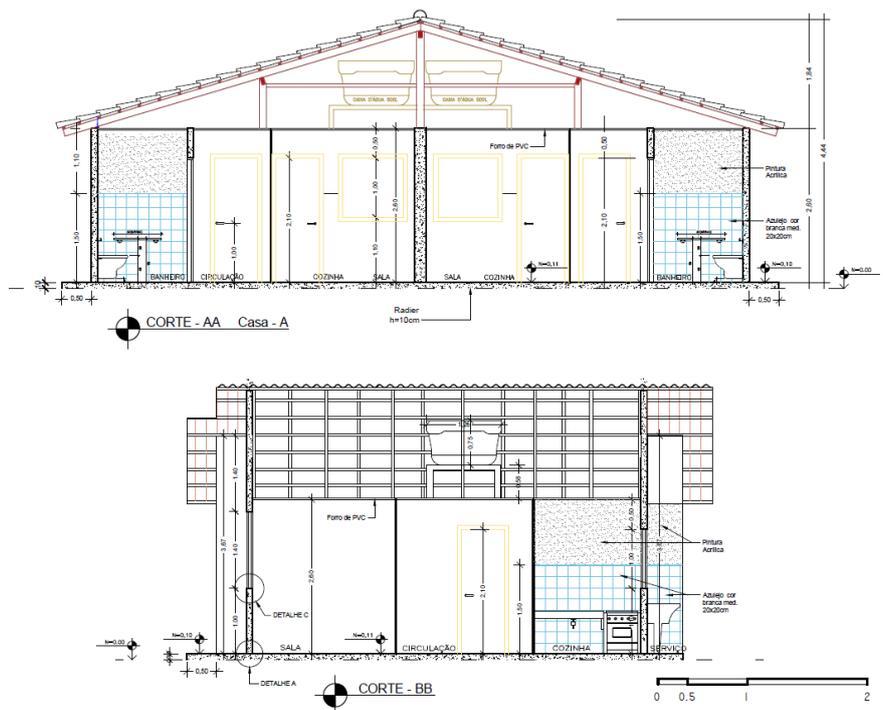
Para a avaliação dos impactos ambientais, foi adotada uma das tipologias implementadas no empreendimento da Cidade do Povo em Rio Branco, Acre (Figura 8A). A tipologia, assim como as outras, contempla uma casa térrea e geminada (tipo de residência que abriga 2 unidades habitacionais simétricas e compartilham a mesma estrutura, alvenaria e cobertura, sendo uma ‘espelhada’ a outra), com cerca de 40m<sup>2</sup> (Figuras 9 e 10). A estrutura da tipologia em questão consiste em bloco de concreto armado pré-moldado. Essa tipologia norteou todo o processo de estudo de avaliação de ciclo de vida, sendo adotada como a unidade funcional do trabalho de ACV.

**Figura 9:** Planta Baixa da tipologia implementada no projeto da Cidade do Povo, tomada como base de cálculos de impactos ambientais.



Fonte: SEINFRA, 2019. Adaptado pela autora.

**Figura 10:** Cortes de uma da tipologia implementadas no projeto da Cidade do Povo, tomada como base de cálculos de impactos ambientais.



Fonte: SEINFRA, 2019. Adaptado pela autora.

### 4.3 Elaboração do Projeto Arquitetônico e Estrutural da Casa com a inserção de Bambu

Desenvolveu-se um projeto arquitetônico com base em uma das tipologias apresentadas no projeto “Cidade do Povo” (Figura 9), sem acréscimo de área construída, aplicando o bambu em substituição ao aço tanto como estrutura como vedação, com base na solução em pórticos estruturais com varas de bambu *Guadua angustifolia*.

Foi feito um pré-dimensionamento estrutural com o bambu, calculado tanto para elementos estruturais de pilares como de vigas, formando um sistema denominado “pórticos estruturais”, quanto para o sistema de vedação com esteiras de bambu, no qual pode ser feito acabamento de reboco e pintura. Esse tipo de construção tem tempo de uso indeterminado, igualmente como se fosse aplicado o sistema convencional em aço.

O pré-dimensionamento da estrutura com pórticos estruturais de bambu considerou os requisitos de construção conforme o título G-12 do Regulamento Colombiano da Construção Sismo-resistente NSR-10. Foi utilizado o modelo colombiano, que contém tabelas de cálculos de esforços admissíveis de flexão, tração, compressão e cisalhamento, em razão de o Brasil ainda não apresentar norma específica para construção com esse material.

O regulamento Colombiano da Construção Sismo-resistente NSR-10, adota valores de esforços admissíveis para dimensionamento da estrutura com Bambu *Guadua*, sendo estabelecidos para de forças de Flexão admissível de 15 Mpa, força de Tração de 18 Mpa, força de Compressão paralela ao eixo longitudinal da peça de 14 Mpa, força de Compressão perpendicular ao eixo longitudinal da peça de 1.4 Mpa e força de Cisalhamento no valor de 1.2 Mpa como tensões admissíveis seguros para construção da estrutura (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2010). Dessa forma foi possível estabelecer a quantidade de varas para suprir os esforços de compressão e tração aplicados em elementos estruturais que atuam como pilares e vigas. Além de ser realizado o encaixe e conexão das peças para reforçar a melhor absorção desses esforços, substituindo inteiramente o aço da estrutura convencional adotada na tipologia escolhida. É importante mencionar que foram adotados valores estruturais para residência com somente 1 pavimento, exatamente como descrito na tipologia estudada, para suportar seu peso próprio e o peso da estrutura de cobertura.

Foram utilizados os *softwares* AutoCAD 2017 e SketchUp para o desenho técnico, dimensionamento e modelagem em três dimensões do projeto arquitetônico e estrutural, desenvolvido em bambu.

Sobre a vedação, foram projetados painéis de esteiras de bambu, posicionados entre as varas, podendo ser feito o acabamento com reboco e pintura. Conforme mencionado na revisão bibliográfica e nas Figuras 3 e 4.

Foi adotado um padrão pré-estabelecido de varas de bambu de 6 metros de comprimento, o mesmo comercializado na construção civil. A partir dessa premissa, pode-se calcular a quantidade de material necessária para a estrutura, cortando-a e reaproveitando as varas para outras funções construtivas da residência.

#### **4.4 Objetivo e escopo do estudo de ACV conforme ISO 14.040**

##### *4.4.1 Objetivo do estudo*

O presente estudo objetivou avaliar os impactos potenciais da construção de habitação popular na região amazônica. Esse estudo apresenta uma avaliação de ciclo de vida atribucional e comparativa entre uma habitação de interesse popular feita com materiais utilizados convencionalmente na construção civil em relação à alternativa estrutural apresentada de bambu, disponível na região de Rio Branco - AC, como material renovável.

##### *4.4.2 Escopo do estudo*

A função do sistema do estudo proposto consistiu em avaliar os potenciais impactos ambientais na construção civil de habitações populares na Amazônia, estudo localizado no município de Rio Branco, estado do Acre.

A unidade funcional é parte imprescindível do estudo de ACV para quantificar as funções identificadas, para determinar a coleta de dados de entradas e saídas do sistema. Conforme estudos analisados de ACV, foi possível determinar que a unidade funcional para este estudo foi de 1 (uma) casa geminada (que engloba 2 unidades habitacionais) com a tipologia e características anteriormente apresentada, do projeto “Cidade do Povo” apresentado pela prefeitura de Rio Branco em 2011.

A partir da análise da unidade funcional do estudo de ACV, pode-se então determinar o fluxo de referência que é a quantidade de produto necessária para atender a

unidade funcional. Os fluxos de referência para a casa vão se nortear na quantidade necessária de matéria prima para a construção da mesma, sendo calculada a quantidade de materiais convencionais utilizados na construção civil em comparação com a quantidade de materiais alternativos renováveis (bambu).

As fronteiras e determinações do estudo dessa ACV contemplam desde a extração da matéria prima (no caso o bambu), até a entrega das chaves ao morador, em uma abordagem berço ao portão, considerando entradas e saídas do processo de construção da casa (chegada de materiais, cálculo estimado de resíduos durante o processo de construção, água e energia utilizados no processo). Não foi considerado o período de uso e destinação final (demolição) pela impossibilidade de estimar a quantidade de resíduo de bambu *Guadua angustifolia*, e pela ausência de trabalhos na literatura científica.

#### 4.4.2.1 *Software, método de avaliação de impactos e base de dados de ACV*

Para o inventário do ciclo de vida foi utilizado o *Software* holandês SIMAPRO v 9.1. Devido à sua ampla base de dados, esse *software* tem seus valores reconhecidos internacionalmente para qualquer tipo de estudo (FERREIRA, 2015). Foi utilizada a licença existente na Universidade Estadual Paulista – UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia, Campus de Sorocaba. Gianelli (2014) reforça que o *software* em questão permite a avaliação de ciclos de vida complexos, comparando diferentes ciclos e permitindo ao usuário a simulação de diversos cenários possíveis, seguindo as recomendações da normativa ISO 14040.

A base de dados Ecoinvent 3 foi utilizada no *software* SIMAPRO, por possuir maior quantidade necessária de dados de entrada e saída para sistemas localizados fora do continente europeu.

Segundo Llantoy (2020), o objetivo principal do método ReCiPe 2016 é transformar a longa lista de resultados de inventário de ciclo de vida, em um número limitado de pontuações de indicadores. Estas pontuações de indicadores expressam a gravidade relativa em uma categoria de impacto ambiental, por abordagem *midpoint* e *endpoint*. A categoria *midpoint* avalia o impacto no meio do processo, para discussão da modificação no meio ambiente. A categoria *endpoint*, avalia o impacto até chegar no dano ambiental, podendo haver maior grau de subjetividade no processo. Para o estudo, foi considerada a categoria *midpoint*.

#### 4.4.2.2 *Determinação das categorias de impacto*

Para a correta interpretação dos resultados da fase de inventário de ciclo de vida, é necessário que o estudo englobe as categorias de impacto que de fato são afetadas com a produção do produto ou processo. (GIANELLI, 2014).

Ingrao et al. (2018) selecionou as seguintes categorias de impactos ambientais para serem avaliadas em ACV de edificações: Depleção abiótica, Acidificação, Eutrofização, Mudança climática e Utilização de energia. Já Dong et al. (2021) afirmou que para cálculo de impactos ambientais no setor da construção civil devem ser consideradas categorias que englobem as três principais dimensões: saúde humana; ecossistemas e recursos naturais. Esse critério segue a recomendação da norma inglesa EN 15804 a qual estabelece regras de categorias de produtos para declaração ambiental em edificações (BUILDING, 2013). Para isso, devem ser consideradas categorias de impactos globais e regionais que são relevantes a metodologia ReCiPe na abordagem *midpoint* (a mesma adotada no presente trabalho), destacando-se: Mudança climática, Depleção do Ozônio, Formação de material particulado, Toxicidade humana, Eutrofização de Água Doce e Esgotamento de Recursos Minerais.

Para o cenário local, Passuelo et al. (2014) indica a relevância das categorias de impacto selecionadas para estudo de ACV na construção civil com base na norma inglesa EM 15804. Todavia, esses autores afirmam que com a criação do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), foi feita uma relação de categorias para o cenário brasileiro. A CBCS relaciona várias categorias de impactos relevantes já mencionadas nos estudos internacionais, porém ela ressalta a categoria de Consumo de água, visto que o Brasil possui uma das maiores reservas hídricas superficial do planeta. (CBCS, 2014).

Com base nessas informações, foi possível determinar as seguintes categorias de impacto, presentes na base de dados do *software* SIMAPRO e necessárias para o estudo de ACV, totalizando sete categorias estudadas:

- Mudança Climática;
- Depleção do Ozônio Estratosférico;
- Formação de Material Particulado;
- Eutrofização de Água Doce;
- Toxicidade Humana Cancerígena;
- Esgotamento de Recursos Minerais e
- Consumo de Água.

#### 4.5 Coleta de dados para inventário de ciclo de vida

A elaboração do inventário de ciclo de vida baseou-se em dados primários, por meio da coleta *in loco* de informações na cidade de Rio Branco, e dados secundários, baseados na literatura e consulta a especialistas.

Os dados do projeto do bairro “Cidade do Povo” foram coletados na Secretaria de Infraestrutura do Governo do Acre (SEINFRA). Dados de estudos locais sobre propagação e desenvolvimento do bambu foram coletados na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-Acre), na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), com a realização de entrevistas não estruturadas com especialistas na área do estudo.

Dados primários relacionados ao plantio, manejo e tratamento do bambu *Guadua angustifolia* em Rio Branco, foram obtidos *in loco* no Viveiro de Bambu, e estimados junto à especialistas, engenheiros florestais na região, pela inconsistência de estudos científicos feitos com o manejo do bambu no solo acreano.

Para avaliação dos dados quantitativos de material, foi realizado estudo de levantamento de dados secundários referentes à referências de literatura e assim, pode-se calcular com base no projeto da tipologia da casa (unidade funcional), a partir de valores médios da tabela SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) para o estado do Acre.

O SINAPI tem por objetivo a produção de séries mensais de custos e índices para o setor habitacional, e de séries mensais de salários medianos de mão de obra e preços medianos de materiais, máquinas e equipamentos e serviços da construção para os setores de saneamento básico, infraestrutura e habitação. O Sistema é uma produção conjunta do IBGE e da Caixa Econômica Federal - Caixa, realizada por meio de acordo de cooperação técnica, cabendo ao Instituto a responsabilidade da coleta, apuração e cálculo, enquanto à Caixa, a definição e manutenção dos aspectos de engenharia, tais como projetos, composições de serviços etc. (IBGE, 2010).

Os dados quantitativos de material de bambu foram calculados a partir do projeto estrutural proposto para a casa (unidade funcional), considerando o bambu como sistema de estruturas em pórtico e auxílio na vedação, eliminando assim, o aço na construção da habitação popular.

## 4.6 Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida

### 4.6.1 Cadeia produtiva de bambu

Considerando que a cidade de Rio Branco não possui um sistema industrial de produção de bambu para construção civil, foi estudada a cadeia produtiva de bambu local, tendo como base o viveiro de bambu já existente que atende pequenas demandas do material.

Para a modelagem do inventário de ciclo de vida da cadeia produtiva de bambu *Guadua angustifolia* em Rio Branco, foi necessário criar um diagrama de fluxos de entrada e saída do sistema produtivo, desde o plantio da muda de bambu até o produto final tratado (vara de bambu para construção civil).

No diagrama de fluxos foram considerados os seguintes aspectos da produção de bambu local:

- a) quantidade e concentrações de fertilizantes no preparo do solo para o plantio (calcário e NPK),
- b) quantidade necessária de água no processo,
- c) quantidade necessária de ácido bórico e borax para tratamento das varas,
- d) estimativa de resíduos de bambu durante o processo.

Os dados foram obtidos junto ao produtor e também engenheiro agrônomo Emanuel Amaral, proprietário do viveiro de bambu em Rio Branco. É importante mencionar que não foi necessário adicionar qualquer defensivo agrícola, pelo manejo do sistema de cultivo, características de rusticidade da cultura e relato do produtor. O processo para a extração do bambu é completamente manual.

Parte da coleta de dados local foi realizada em um evento no viveiro de bambu, em Rio Branco. Neste evento foi possível avaliar as fases operacionais do material desde a escolha e retirada da matéria prima, corte, limpeza, acabamentos até o seu tratamento final, analisando a trabalhabilidade da espécie e aplicabilidade da mesma na construção civil (Figura 11).

**Figura 11:** Área de produção da cultura (esquerda) e a coleta e transporte do material (direita) no viveiro de bambu, em Rio Branco, Acre.



Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.6.2 *Inventário da Habitação de interesse popular*

Na elaboração do inventário da habitação de interesse popular foram consideradas as estimativas de materiais e energia elétrica no processo de construção de ambos os projetos avaliados (casa com materiais convencionais e casa com estrutura de bambu). Nesse contexto, além de consulta a relatório da Secretaria de Obras, fez-se uma consulta a especialista na área de construção civil (engenheiro civil) no Acre, com 10 anos de experiência nesse tipo de obra, a fim de levantar informações sobre desempenho da mão de obra local.

No transporte de materiais da região Sudeste até o município de Rio Branco, considerou-se somente metade do percurso de ida e volta, pois o caminhão que levava os materiais até o Acre, retornava com outras cargas para a região Sudeste (madeira, produtos de reciclagem, etc.). Para o aço foi utilizado caminhão com capacidade superior a 20 toneladas, considerando 80% de capacidade. No transporte do bambu, desde o viveiro até o local da obra, foi considerado um caminhão com capacidade superior a 10 toneladas e 80% da capacidade, e com retorno de mercadoria (provavelmente, resíduos da construção civil)

O Simapro apresenta várias categorias de fator de emissão de CO<sub>2</sub> por veículos de transporte de cargas, sendo elas classificadas como: EURO 1, EURO 2, EURO 3, EURO 4, EURO 5 e EURO 6. O sistema EURO corresponde a um de grupo de regulamentações

para a redução de emissão de poluentes de veículos movidos a diesel. Foi selecionado o sistema EURO5, pois ele corresponde aquele adotado no Brasil e oficialmente denominado Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, o PROCONVE P-7, desde 2014 (ARAÚJO et al., 2019).

#### **4.7 Coleta de dados para Transição de Ecoeficiência**

Foram coletados os dados econômicos a partir do estudo quantitativo de cada material utilizado para a construção da residência (unidade funcional do estudo) tanto em estrutura de bambu quanto em estrutura de aço.

O valor econômico dos materiais foi estimado com base na tabela SINAPI, referente ao mês de junho de 2021, que apresenta os custos médios para construção civil praticados no estado do Acre e em outros da Federação, além de considerar o relativo aumento identificado nos valores de materiais da construção civil após o início da pandemia de COVID-19. A tabela SINAPI também inclui os valores médios de transporte de materiais proveniente de outros estados, acrescidos dos valores de imposto sobre os mesmos (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS), e os encargos sociais de trabalhadores horistas e mensalistas na execução da obra.

No levantamento de custos para a construção da estrutura em bambu, foi consultado o valor médio praticado por produtores locais das varas de bambu adequadas para a construção civil, devidamente tratadas. Os valores coletados englobam a produção das varas estruturais, transporte ao local da obra e a confecção das esteiras de bambu *in loco*, produzidas por mão de obra qualificada para aproveitar os cortes das varas provenientes de outros elementos estruturais.

Com isso foi possível a identificação dos valores econômicos compatíveis com o estudo proposto, para que fosse possível a realização da Transição de Ecoeficiência.

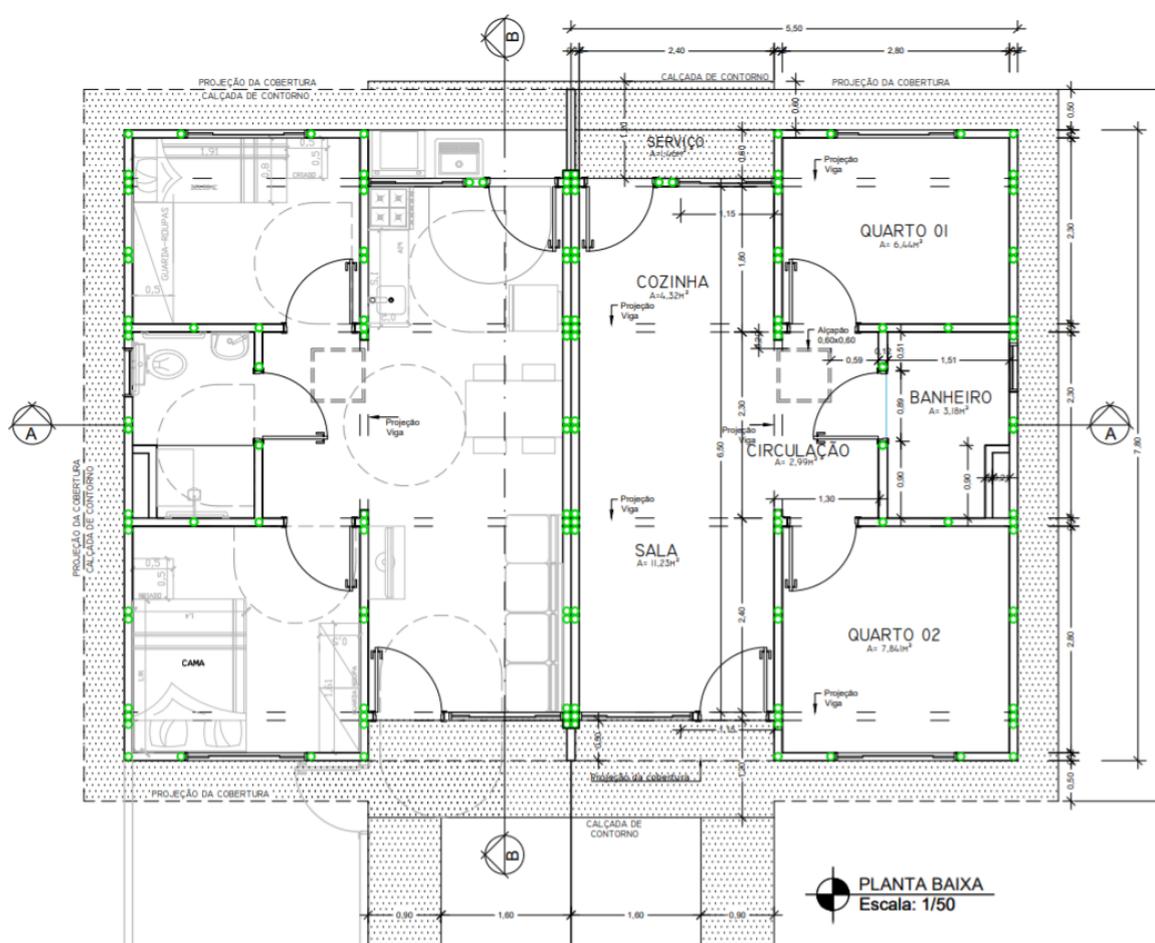
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Projeto arquitetônico e estrutural em bambu

A Figura 12 apresenta a planta da tipologia estudada, com os elementos estruturais de bambu (pilares) demarcados em verde, dimensionados com o diâmetro adotado de 12 cm (padrão dessa espécie), de acordo com pré-dimensionamento para o bambu *Guadua angustifolia*. A Figura 13, apresenta imagem tridimensional das estruturas de bambu, sistema de pórtico (união pilar e viga) e o detalhamento de conexões.

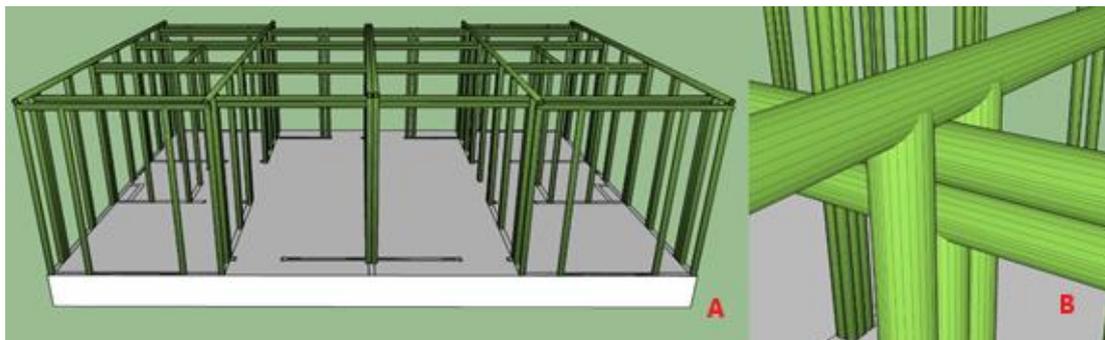
Para a mesma unidade habitacional, foi possível calcular o uso de 1.251,90 kg de vergalhão de aço, a serem substituídos por varas estruturais de bambu *Guadua angustifolia*.

**Figura 12:** Planta da unidade habitacional. Os elementos em verde representam as varas estruturais de bambu.



**Fonte:** Secretaria de Estado de Infraestrutura e Desenvolvimento Urbano (SEINFRA), adaptado pela autora.

**Figura 13:** Imagem tridimensional representando as estruturas em pórtico (A) e seu detalhamento de encaixe/conexão (B).



**Fonte:** Elaborado pela própria autora.

A Tabela 1 apresenta as quantidades de varas de bambu estimadas para a elaboração das peças construtivas da unidade habitacional. A construção demandaria 147 varas de bambu de 6 m e 176 esteiras.

**Tabela 1:** Quantidade de varas de bambu necessárias para a unidade habitacional

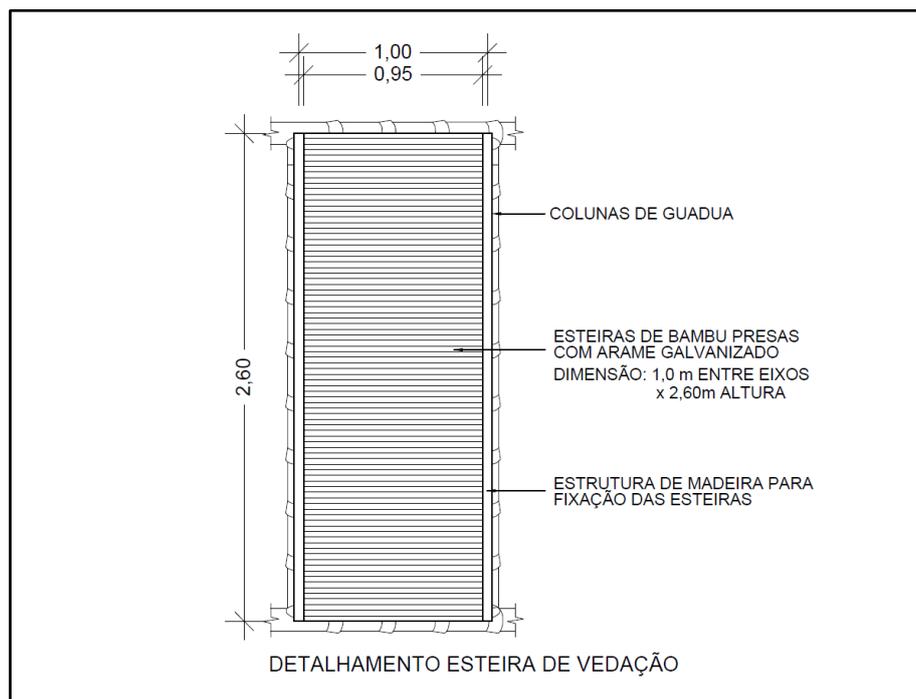
PEÇAS	QUANTITATIVO
Pilares	116 varas de 4 metros
Vigas de travamento	12 varas de 4 metros e 2 varas de 2,90
Vigas estruturais	16 varas de 5,5 metros e 4 varas de 2,90
Esteiras para vedação	176 esteiras

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Como foi utilizado pilares de 4 m e varas de bambu de 6 metros, os cortes das varas serão reaproveitados para utilização em outras peças construtivas e todas as sobras podem ser aproveitadas na confecção das esteiras de bambu para a vedação, tendo o máximo de aproveitamento possível do material.

A Figura 14, demonstra o detalhamento da esteira de bambu e seu posicionamento entre as colunas estruturais de bambu, utilizado no projeto.

**Figura 14:** Detalhamento da esteira de bambu: dimensões e posicionamento.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Para efeito de resíduo de obra é calculado 10% a mais de material caso haja algum problema de transporte (fissura de varas). Essa informação foi adicionada no cálculo de inventário da obra com inserção de bambu.

A partir dos dados da Tabela 1, foi possível o cálculo do metro linear de bambu necessário para cada residência, chegando no valor de 1.674 metros de bambu por unidade habitacional, calculando então o valor em quilos com base na sua densidade linear de 2,5kg/m, resultando num peso total de 4.185 kg por residência.

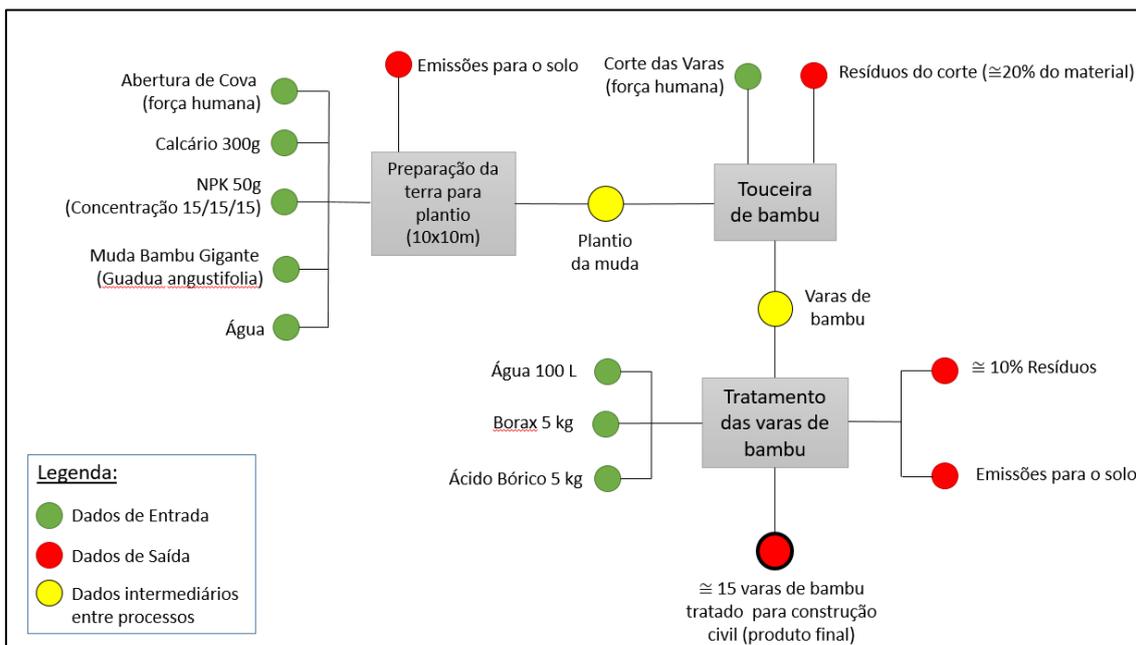
Com esses dados foi possível estimar os dados de entrada necessários para a elaboração do estudo comparativo de Avaliação de Ciclo de Vida entre as duas casas que abrangem cada uma, duas unidades habitacionais. A primeira casa construída no sistema tradicional, com vergalhões de aço. A segunda casa construída com pórticos de bambu no lugar do vergalhão de aço.

## 5.2 Cadeia Produtiva de Bambu em Rio Branco, Acre

Com a coleta de dados para elaboração de inventário, pode-se montar o diagrama de fluxo da cadeia produtiva das varas de bambu para construção civil, considerando os valores obtidos e dados estimados juntamente com o produtor local de bambu, no

ambiente do viveiro, o que é caracterizado como sistema de produto no estudo de ACV. Esse diagrama de fluxo foi elaborado tendo como base a produção de 15 varas de bambu para construção civil, pois corresponde ao número médio que uma touceira de bambu pode produzir (Figura 15).

**Figura 15:** Fluxo de inventário da cadeia produtiva do bambu, considerando a produção de 15 varas de bambu de 6 metros em Rio Branco, Acre.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Com a produção desse fluxo, foi possível introduzir essas informações no *software* SIMAPRO para o cálculo de potenciais impactos ambientais. O Quadro 2, mostra o inventário da produção de bambu, contendo as informações necessárias de entrada e saída, além da correspondência de cada elemento em inglês, como encontrado no *software* SIMAPRO, para a avaliação do processo, calculado com base de 1 kg de Bambu.

**Quadro 2:** Inventário da cadeia produtiva artesanal de varas de bambu para a produção de 1 kg de bambu beneficiada no Acre.

<b>Produto/Processo de entrada</b>	<b>Produto/Processo de entrada correspondente no software SIMAPRO.</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Composto NPK concentração 15/15/15	<i>NPK compound (NPK 15-15-15), at regional storehouse/RER Mass</i>	0,0003	kg
Calcário	<i>Lime fertilizer, at plant/RER Economic</i>	0,002	kg
Água	<i>Process water, ion exchange, production mix, at plant, from surface water RER S</i>	0,67	L
Ácido bórico	<i>Boric acid, anhydrous, powder {GLO}  market for   APOS, U</i>	0,0003	kg
Borax	<i>Borax, anhydrous, powder {RER}  production   APOS, U</i>	0,0003	kg
<b>Produto/Processo de saída - emissões para o solo</b>	<b>Produto/Processo de saída - SIMAPRO -emissões para o solo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Nitrogênio	<i>Nitrogen</i>	0,0003	kg
Fósforo	<i>Phosphorus</i>	0,0003	kg
Potássio	<i>Potassium</i>	0,0003	kg
<b>Saídas - resíduos e emissões</b>	<b>Saídas - resíduos e emissões - SIMAPRO</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Aparas e cortes residuais de madeira e massa seca para tratamento das varas	<i>Shavings, hardwood, loose, measured as dry mass {GLO}  market for   APÓS, S</i>	0,2	kg
Varas de bambu descartadas.	<i>Waste wood, post-consumer {CH} treatment of, sorting and shredding   APOS, S Wood waste (foi utilizado resíduo de madeira em razão do SIMAPRO não conter bambu na base de dados)</i>	0,13	kg

**Fonte:** Elaborado pela autora.

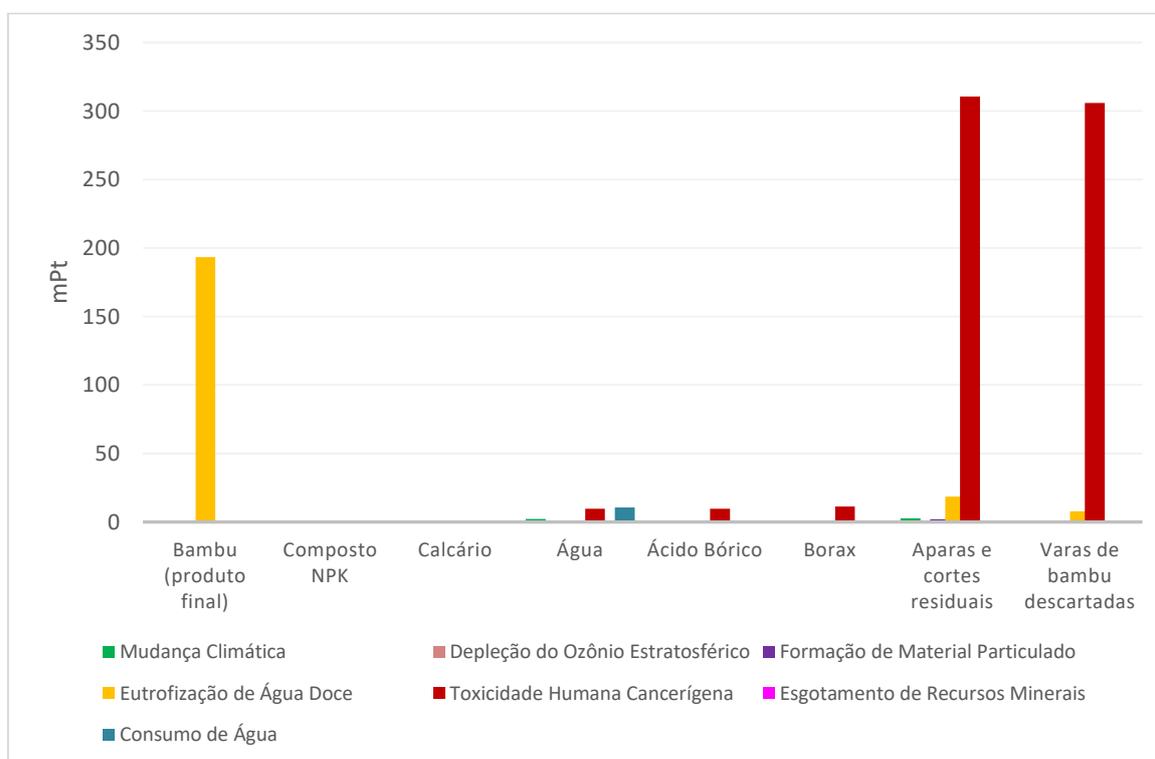
Foram introduzidos os dados apresentados no Quadro 2 no SIMAPRO e, posteriormente, os impactos foram calculados conforme metodologia ReCiPe *midpoint* (h). O processo e o quantitativo de material referente a unidade funcional estudada (habitação popular), correspondeu a 4.185kg de bambu. Foram consideradas as categorias de impacto já estabelecidas para o estudo (Mudança Climática, Depleção do Ozônio Atmosférico, Formação e Material Particulado, Eutrofização de Água Doce, Toxicidade Humana Cancerígena, Esgotamento de Recursos Minerais e Consumo de Água). Os resultados demonstrados são os resultados pelo método de normalização de unidades (*millipoint*) para que os impactos sejam equiparados entre si pelo mesmo impacto ambiental, presentes na Tabela 2 e Figura 16.

**Tabela 2:** Impactos ambientais da produção do bambu para atender a unidade funcional (habitação popular).

Materiais - Cadeia Produtiva Bambu	UNIDADE	Categorias de Impacto						
		Mudança Climática	Depleção do Ozônio Estratosférico	Formação de Material Particulado	Eutrofização de Água Doce	Toxicidade Humana Cancerígena	Esgotamento de Recursos Minerais	Consumo de Água
<b>Bambu (produto final)</b>	mPt	0	0	0	193,347	0	0	0
<b>Composto NPK</b>	mPt	0,150660822	0,316415451	0,035028	0,04264	0,15079	1,19E-04	2,72E-03
<b>Calcário</b>	mPt	0,01484896	1,74E-03	9,05E-03	4,18E-05	0,010339	2,65E-08	0,031776
<b>Água</b>	mPt	2,319466157	0,123505742	0,512414	0,017153	9,66151	1,94E-05	10,702441
<b>Ácido Bórico</b>	mPt	0,135918166	0,009226965	0,213908	0,736316	9,720795	3,37E-05	0,1245694
<b>Borax</b>	mPt	0,216271528	0,011526492	0,093009	0,90329	11,38131	4,00E-06	0,0348536
<b>Aparas e cortes residuais</b>	mPt	2,753381512	0,149073559	1,952532	18,45546	310,558	1,08E-04	0,5581615
<b>Varas de bambu descartadas</b>	mPt	0,642319257	0,0467413	0,331119	7,926075	305,9368	1,50E-04	0,3212977
<b>TOTAL</b>	<b>mPt</b>	<b>6,232866401</b>	<b>0,65822632</b>	<b>3,147057</b>	<b>221,428</b>	<b>647,4196</b>	<b>0,0004341</b>	<b>11,775814</b>

Fonte: Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

**Figura 16:** Gráfico impactos da cadeia produtiva de bambu.



Fonte: Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

A principal categoria de impacto ambiental observada foi a Toxicidade Humana Cancerígena, responsável por 73% do total estimado (647,42 mPt). Esse resultado se deve aos materiais de origem residuais: aparas e cortes e varas de bambu descartadas no processo; juntamente com os materiais químicos utilizados no processo de tratamento das varas (ácido bórico e borax). Portanto, a gestão dos resíduos do processo deve ser analisada para mitigação dos impactos gerados.

A segunda categoria de impacto que mais se destacou refere-se à Eutrofização de Água Doce, responsável por 24% do impacto total. Essa categoria está mais presente no produto final do bambu, pelo uso do NPK para adubação da cultura, o que pode levar ao carreamento de nutrientes para os corpos d'água, intensificando o fenômeno da eutrofização. Portanto, as categorias de impacto Toxicidade Humana Cancerígena e Eutrofização de Água Doce representaram cerca de 97% do impacto total da unidade de produção artesanal do bambu.

A categoria de impacto consumo de água representou 1,3% do impacto total da cadeia de produção artesanal. O bambu é uma cultura que demanda água durante seu crescimento e desenvolvimento, além da utilização desse recurso no tratamento dos colmos. Todavia, no ambiente amazônico a pluviometria média ultrapassa 2000 mm.ano<sup>-1</sup> (OLIVEIRA et al., 2021), suprimindo as necessidades hídricas dessa cultura e dispensando a suplementação por irrigação. Esse resultado indica que uma evolução na eficiência do uso da água no processo de beneficiamento poderia reduzir os impactos da cadeia de produção artesanal do bambu, no ambiente amazônico.

O bambu por ser um material que apresenta potencial armazenamento de carbono e pelo fato de ser adequado o cultivo em áreas degradadas pode justificar a ausência de impacto ambiental na categoria Esgotamento dos Recursos Minerais do presente trabalho e a razão da categoria de Mudança climática ter apresentado 0,7% do impacto ambiental total. As categorias Depleção do Ozônio Estratosférica e Formação do Material Particulada, somadas, representaram cerca de 1% de todo o impacto gerado na UP avaliada.

### **5.3 Análise da habitação popular com estrutura em aço**

Para a análise da habitação popular com material convencional, foi feito um inventário de coleta de dados de materiais da obra da habitação popular (unidade

funcional), considerando os valores obtidos e dados estimados juntamente com profissionais especialistas em construção civil no Acre. O Quadro 3 apresenta os dados de inventário coletados em conjunto com a correspondência dos materiais no SIMAPRO e o seu quantitativo.

**Quadro 3:** Inventário da habitação popular com o aço.

<b>Produtos / processos de entrada</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Produtos / processos de entrada - SIMAPRO</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Aço ca-50, 6,3 mm, vergalhão	1.252	kg	<i>Steel engineering steel/GLO</i>	1252	kg
Cimento <i>portland</i> composto cp ii-32	6.336,5	kg	<i>Cement, Portland {CA-QC}/ production / APOS, S</i>	6.336,5	kg
Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	11,49	m <sup>3</sup>	<i>Crushed stone 16/32 mm, open pit mining, production mix, at plant, undried RER S</i>	11,49	kg
Tinta látex pva premium, cor branca	115,5	L	<i>Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {GLO}/ market for / APOS, S</i>	121	kg
Massa corrida pva para paredes internas	206,6	L	<i>Base plaster {CH}/ production / APOS, S</i>	250	kg
Selador pva paredes internas	56	L	<i>Vinyl acetate {GLO}/ market for / APOS, S</i>	56	kg
Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	15,49	m <sup>3</sup>	<i>Sand {GLO}/ market for / APOS, S</i>	15490	kg
Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	29,25	kg	<i>Steel wire rod/GLO</i>	29,25	kg
Cal hidratada ch-i para argamassas	16	kg	<i>Hydrated Lime EU 2007, production at plant RER S</i>	16	kg
<b>SAÍDAS – RESÍDUOS E EMISSÕES</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>SAÍDAS - RESÍDUOS E EMISSÕES - SIMAPRO</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Energia elétrica até 2000 kwh industrial, sem demanda	66,5	kWh	Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV/BR Energy	66,5	kWh
Transporte caminhão >20 toneladas	4370	tkm	<i>Transport truck &gt;20 t, EURO 5,</i>	4370	tkm

				<i>LF 80% default / GLO mass</i>		
--	--	--	--	--------------------------------------	--	--

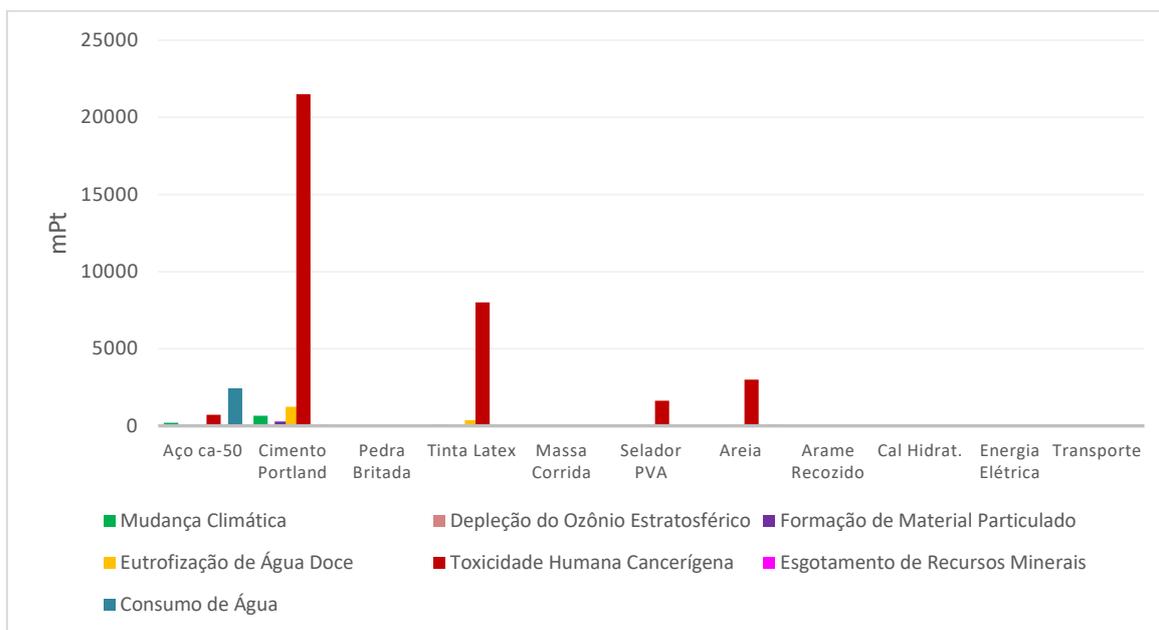
**Fonte:** Elaborado pela autora. Foi utilizada abordagem GLO por ser de referência global.

Foram introduzidos os dados apresentados no Quadro 3 no *software* SIMAPRO e foi calculado conforme metodologia ReCiPe *midpoint* (h). Os resultados demonstrados são os resultados pelo método de normalização de unidades em mPt (*millipoint*), presentes na Tabela 3 e Figura 17.

**Tabela 3:** Resultados do cálculo de impactos ambientais para a habitação com aço.

Materiais - habitação em aço	UNIDA DE	Categorias de Impacto						
		Mudança Climática	Depleção do Ozônio Estratosférico	Formação de Material Particulado	Eutrofização de Água Doce	Toxicidade Humana Cancerígena	Esgotamento de Recursos Minerais	Consumo de Água
<b>Aço CA-50</b>	mPt	203,7663	4,514105996	63,34136	1,731568	729,9625	0,349733	2.430,572
<b>Cimento Portland</b>	mPt	654,9602	5,431416235	288,7943	1.231,46	21.503,38	0,136591	102,3492
<b>Pedra Britada</b>	mPt	20,38406	2,384224161	12,42091	0,057315	14,19295	3,51E-05	43,62077
<b>Tinta Latex</b>	mPt	103,7187	14,12007102	61,85228	367,3452	7.998,776	0,234758	34,97394
<b>Massa Corrida</b>	mPt	0,804306	0,016942462	0,17801	1,626376	31,44734	9,17E-05	0,223036
<b>Selador PVA</b>	mPt	16,98745	0,848778547	8,457861	73,959	1.630,545	2,91E-03	11,8689
<b>Areia</b>	mPt	23,11043	1,449630978	15,23577	63,69262	3.000,557	4,95E-03	83,55472
<b>Arame Recozido</b>	mPt	8,314722	0,070630076	2,14655	0,065414	5,676931	0,014122	3,660698
<b>Cal Hidrat.</b>	mPt	1,794949	0,07391664	0,123696	9,72E-04	1,936705	2,43E-07	0,030911
<b>Energia Elétrica</b>	mPt	1,16042	0,010376573	0,836336	9,00E-05	2,486927	9,78E-06	5,85E-03
<b>Transporte</b>	mPt	37,88308	1,130677021	9,974556	0,248054	37,12626	8,12E-05	0,10163
<b>TOTAL</b>	<b>mPt</b>	<b>1.072,885</b>	<b>30,05076971</b>	<b>463,3616</b>	<b>1.740,187</b>	<b>34.956,08</b>	<b>0,743287</b>	<b>2.710,962</b>

**Fonte:** Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

**Figura 17:** Impactos ambientais da habitação em aço.

**Fonte:** Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

Os resultados destacam a categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena (34.956 mPt) e Eutrofização da Água Doce (1.740 mPt), presentes principalmente nos seguintes materiais: cimento, tinta látex e selador PVA. Esses materiais apresentam consideráveis níveis de toxicidade, sendo relacionados ao grau de resíduos danosos, por emitirem gases tóxicos ao meio ambiente se não forem descartados da forma correta, o que pode gerar o processo de poluição dos corpos hídricos. Essas categorias somam 89% do total de impactos avaliados.

Destaca-se também a categoria Consumo de água no material aço, devido ao seu sistema de produção.

O transporte nessa avaliação também apresenta maior impacto com relação a mudança climática, porém esse impacto fica minimizado em comparação às outras categorias avaliadas.

Não foram identificados impactos expressivos nas demais categorias avaliadas.

#### 5.4 Análise da habitação popular com estrutura em bambu

Na análise da habitação popular com o bambu foi realizado um cálculo de material com base no projeto de pré-dimensionamento estrutural, além de cálculos específicos de quantitativos de materiais que poderiam ser reduzidos com a inserção do mesmo. Foi

então produzido o inventário de dados de materiais da obra da habitação popular (unidade funcional) com a estrutura de bambu, considerando os valores obtidos e dados estimados junto a especialistas em construção civil no Acre. O Quadro 4 apresenta os dados deste inventário, coletados em conjunto com a correspondência dos materiais no SIMAPRO e o seu quantitativo.

**Quadro 4:** Inventário da habitação popular com o bambu.

<b>Produtos / processos de entrada</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Produtos / processos de entrada - SIMAPRO</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Bambu	4.185,0	kg	<i>Bambu</i>	4.185,0	kg
Cimento <i>portland</i> composto cp ii-32	5.385,0	kg	<i>Cement, Portland {CA-QC} / production / APOS, S</i>	5.385,0	kg
Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	11,49	m <sup>3</sup>	<i>Crushed stone 16/32 mm, open pit mining, production mix, at plant, undried RER S</i>	11490	kg
Tinta látex pva premium, cor branca	115,5	L	<i>Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {GLO} / market for / APOS, S</i>	121	kg
Massa corrida pva para paredes internas	206,6	L	<i>Base plaster {CH} / production / APOS, S</i>	250	kg
Selador pva paredes internas	56	L	<i>Vinyl acetate {GLO} / market for / APOS, S</i>	56	kg
Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	15,49	m <sup>3</sup>	<i>Sand {GLO} / market for / APOS, S</i>	15490	kg
Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	29,25	kg	<i>Steel wire rod/GLO</i>	29,25	kg
Cal hidratada ch-i para argamassas	16	kg	<i>Hydrated Lime EU 2007, production at plant RER S</i>	16	kg
<b>SAÍDAS – RESÍDUOS E EMISSÕES</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>SAÍDAS - RESÍDUOS E EMISSÕES - SIMAPRO</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Energia elétrica até 2000 kwh industrial, sem demanda	66,5	kWh	<i>Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, &lt; 1kV/BR Energy</i>	66,5	kWh
Transporte caminhão <10 toneladas	104,625	tkm	<i>Transport truck &lt;10 t, EURO 5, LF 80% default / GLO mass</i>	104,625	tkm

**Fonte:** Elaborado pela autora. Foi utilizada abordagem GLO por ser de referência global.

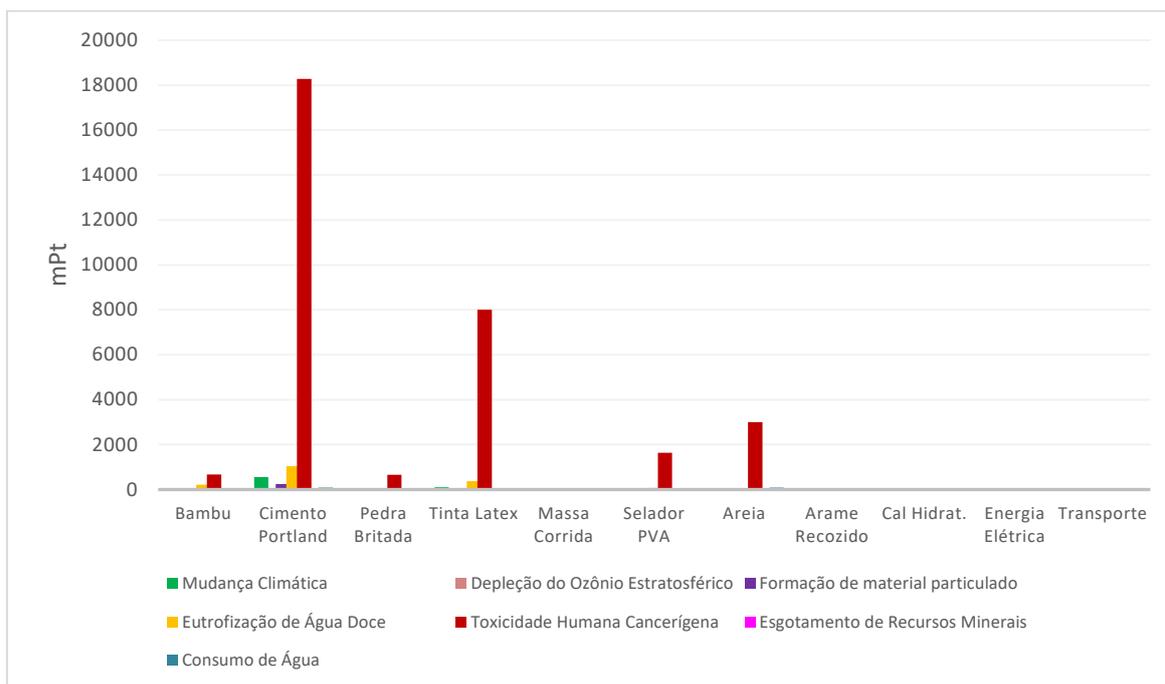
Os dados obtidos da coleta de inventário apresentados no Quadro 4 foram introduzidos no *software* SIMAPRO a fim de analisar os impactos ambientais, utilizando

o método ReCiPe *midpoint* (H). Os resultados obtidos pelo método de normalização, em mPt (*millipoint*), para que os impactos sejam comparáveis, são apresentados na Tabela 4 e Figura 18.

**Tabela 4:** Resultados do cálculo de impactos ambientais habitação com bambu.

Materiais– Habitação em Bambu	UNIDADE	Categorias de Impacto						
		Mudança Climática	Depleção do Ozônio Estratosférico	Formação de Material Particulado	Eutrofização de Água Doce	Toxicidade Humana Cancerígena	Esgotamento de Recursos Minerais	Consumo de Água
<b>Bambu</b>	mPt	6,273508	0,661008343	3,180109	221,9399	667,1129	4,96E-04	11,78717
<b>Cimento Portland</b>	mPt	556,6103	4,615825207	245,4284	1.046,542	18.274,39	0,11608	86,9803
<b>Pedra Britada</b>	mPt	20,38406	2,384224161	12,42091	0,057315	661,0083	3,51E-05	43,62077
<b>Tinta Latex</b>	mPt	103,7187	14,12007102	61,85228	367,3452	7.998,776	0,234758	34,97394
<b>Massa Corrida</b>	mPt	0,670255	0,014118718	0,148342	1,355313	26,20612	7,65E-05	0,185863
<b>Selador PVA</b>	mPt	16,98745	0,848778547	8,457861	73,959	1.630,545	2,91E-03	11,8689
<b>Areia</b>	mPt	23,11043	1,449630978	15,23577	63,69262	3.000,557	4,95E-03	83,55472
<b>Arame Recozido</b>	mPt	8,300533	0,070509547	2,142887	0,065302	5,667243	0,014098	3,654451
<b>Cal Hidrat.</b>	mPt	1,794949	0,07391664	0,123696	9,72E-04	1,936705	2,43E-06	0,030911
<b>Energia Elétrica</b>	mPt	1,16042	0,010376573	0,836336	9,00E-05	2,486927	9,78E-06	5,85E-03
<b>Transporte</b>	mPt	3,305238	0,091170076	0,833432	0,021674	1,833184	7,10E-06	8,88E-03
<b>TOTAL</b>	<b>mPt</b>	<b>742,3158</b>	<b>24,33962981</b>	<b>350,66</b>	<b>1.774,979</b>	<b>32.270,52</b>	<b>0,373427</b>	<b>276,6718</b>

Fonte: Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

**Figura 18:** Impactos ambientais da habitação em bambu.

**Fonte:** Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

Os resultados, assim como para o aço, destacaram a categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena e Eutrofização da Água Doce, presentes nos mesmos materiais avaliados (cimento, tinta látex, selador PVA e areia) pelos motivos já apontados. Todavia é possível observar que houve uma diminuição dos resultados dessas categorias, com a introdução do bambu, quando comparado ao aço. Pode-se também notar que essas categorias apresentam maior percentual no total de impactos em relação à estrutura em aço, somando 96% dos impactos em contraste com outras categorias avaliadas. Isso deve-se ao fato da introdução do bambu proporcionar redução de impactos em relação à sua cadeia produtiva e pelo fato de ser um material renovável com capacidade de armazenamento de carbono.

É possível também observar que houve uma diminuição significativa na categoria de consumo de água pela introdução do bambu, proporcionando um ganho ambiental.

Também se observa a relevância do material do cimento na categoria de mudança climática, devido ao seu processo de produção que emite gases de efeito estufa.

Por fim, destaca-se o processo de transporte nesse cenário, que apesar de não aparecer no gráfico por se mostrar minimizado em comparação às outras aferições, apresenta diminuição de impactos quando comparados ao aço, em razão do tamanho do veículo e da distância percorrida desde a unidade produtora até o destino.

## 5.5 Cenário Comparativo das habitações em aço e em bambu

Nesse cenário, foram avaliados comparativamente os inventários da casa com estrutura de aço e casa aquela com bambu, pelo método de normalização onde todas as unidades são avaliadas em mPt (*millipoint*).

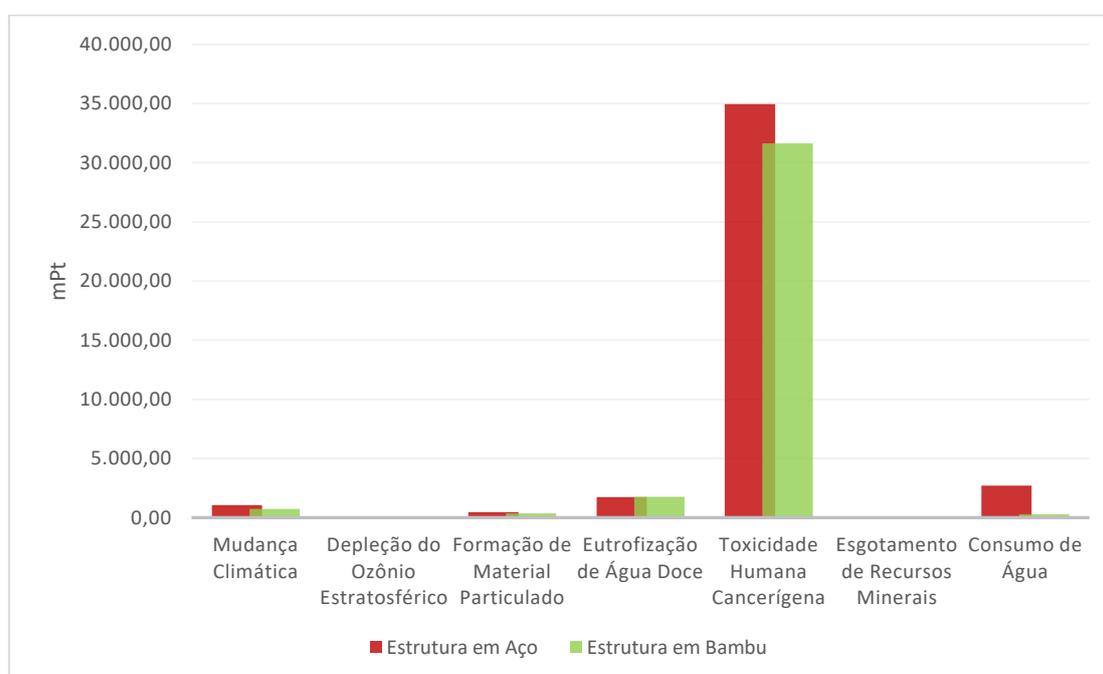
A Tabela 5 e a Figura 19 apresentam os resultados provenientes da comparação entre os dois processos.

**Tabela 5:** Análise comparativa de impactos ambientais das habitações em aço e em bambu.

Categoria de impacto	Unidade	Estrutura em Aço	Estrutura em Bambu	%
<b>Mudança Climática</b>	mPt	1.072,88	742,3157691	30,81%
<b>Depleção do Ozônio Estratosférico</b>	mPt	30,05076971	24,33962981	19,00%
<b>Formação de Material Particulado</b>	mPt	463,3615836	350,6600223	24,32%
<b>Eutrofização de Água Doce</b>	mPt	1.740,19	1.774,98	-2,00%
<b>Toxicidade Humana cancerígena</b>	mPt	34.956,08	31.623,71	9,53%
<b>Esgotamento de Recursos Minerais</b>	mPt	0,743289	0,373427154	49,76%
<b>Consumo de Água</b>	mPt	2.710,96	276,6717613	89,79%
<b>TOTAL</b>	<b>mPt</b>	<b>40.974,27335</b>	<b>34.793,0461</b>	<b>15,09%</b>

Fonte: Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

**Figura 19:** Análise comparativa de impactos ambientais das habitações em aço e em bambu.



Fonte: Elaborado pela autora. Unidade mPt = *millipoint*.

A partir da análise dos dados comparativos na categoria de Mudança Climática, é

possível perceber uma redução de 30,8% no impacto total pela introdução do bambu, como elemento estrutural. Isso se dá principalmente pela contabilização de impactos provenientes das emissões de GEE (gases de efeito estufa) durante a logística de transporte do material aço, que viaja cerca de 3.500 km para chegar à capital acreana e também pelo fato de ser um biomaterial que sequestra carbono ao longo do seu ciclo. O processo de fabricação e o transporte do aço colaboram pra emissões de GEE, como Dióxido de carbono (produzido por veículos automotores além da queima de carvão mineral), o que causa o aumento do seu impacto nessa categoria.

A produção brasileira de aço bruto chega a 31 milhões de toneladas por ano conforme dados do Instituto Aço Brasil (2021) e, segundo Gasques et al. (2014), o que representa um impacto ambiental com relação às emissões atmosféricas, dentre os poluentes, destacam-se: organoclorados: dioxinas e furanos; ftalatos; compostos orgânicos voláteis (COVs). O impacto negativo que provém da extração de matéria-prima para uso na indústria da construção civil é considerável. Esse dado justifica então a redução de 19% do impacto de Depleção do Ozônio atmosférico quando a estrutura é apresentada em bambu.

A categoria avaliada de Eutrofização da Água Doce foi a única que apresentou um valor superior na habitação com estrutura de bambu em relação àquela com aço, apesar da pequena diferença relativa, de apenas 2%. Segundo a ABNT NBR ISO 14044:2009, consideram-se desprezíveis diferenças de valor de categorias de impacto inferiores a 2,5%.

A categoria mais impactante de todas as avaliadas foi a Toxicidade Humana cancerígena, apresentando consideráveis impactos em ambas residências. Todo o processo industrial do aço e da cadeia produtiva de bambu contribuem para emissões de gases nocivos à saúde humana que podem ser classificadas com alto perigo de desenvolvimento de doenças cancerígenas, devido aos agentes químicos nocivos que são utilizados no processo. É importante ressaltar que nessa categoria a habitação em bambu apresentou redução de 9,5%, o que é considerado de pouca relevância por estar abaixo de 10% de diferença, conforme a ABNT NBR ISO 14044:2009.

Apesar da categoria representada por Esgotamento de Recursos Minerais não apresentar altos índices de impacto em comparação a outras categorias avaliadas, ela se mostra uma das categorias que mais demonstra diferença percentual na comparação das residências, totalizando uma redução de 49,8%, em razão do próprio aço ser produzido através de recursos minerais não renováveis, como minério de ferro, carvão e cal.

A última categoria apresentada, Consumo de Água, demonstrou significativa discrepância, resultando na redução de 89,8% de impactos na habitação com estrutura de bambu em relação àquela com aço. O processo industrial do aço consome mais água em relação aquele estudado para o bambu no presente trabalho.

Por fim, quando somados o total de impactos das duas habitações, percebe-se a redução total de 15,1% de impactos ambientais na residência projetada em bambu em relação ao aço.

## 6 TRANSIÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA

### 6.1 Dados Econômicos da Habitação em Aço

Para análise de dados econômicos dos materiais necessários para atender a unidade funcional (habitação popular com a estrutura em aço), foram relacionados os custos por ordem de importância e valor (caracterizado como Curva ABC), apresentados na Tabela 6, com referência aos valores médios referentes ao SINAPI para o estado do Acre.

**Tabela 6:** Tabela de Materiais da habitação em Aço – Curva ABC

Material	Preço	Quantidade	Unidade	P.Total (R\$)
Aço CA-50, 6,3 mm, vergalhão	12,67	1.251,90	kg	15.861,57
Cimento Portland composto cp ii-32	0,95	6.336,45	kg	6.019,63
Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	223,32	11,49	m <sup>3</sup>	2.565,95
Tinta latex pva premium, cor branca	20,23	115,5	L	2.336,57
Massa corrida PVA para paredes internas	75,99	11,48	18L	872,37
Selador acrílico paredes internas/externas	7,5	56	L	420,00
Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	74,84	15,49	m <sup>3</sup>	1.159,27
Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	21,65	29,25	kg	633,26
Energia elétrica até 2000 kWh industrial, sem demanda	0,82	66,5	kWh	54,53
Cal hidratada ch-i para argamassas	1,22	16	kg	19,52

**Fonte:** Elaborado pela autora.

É possível aferir que a quantidade de aço e seu valor tiveram aumento expressivo em decorrência da pandemia de COVID-19, ainda mais por ser uma *Commodity*, ou seja, o produto é comercializado em bolsas de valores em todo o mundo e por isso tem seu valor definido pelo mercado externo, em dólar.

O somatório dos materiais da residência em estrutura de aço atingiu um valor total de 29.942,66 R\$.

## **6.2 Dados Econômicos da Habitação em Bambu**

Para análise de dados econômicos dos materiais necessários para atender a unidade funcional, habitação popular com a estrutura em bambu, foram relacionados os custos por ordem de importância e valor (caracterizado como Curva ABC), apresentados na Tabela 7, com referência aos valores médios referentes ao SINAPI para o estado do Acre.

Com relação aos dados econômicos obtidos pela produção do bambu próprio para construção civil, com tratamento das varas e com o acabamento lixado, foram considerados os valores médios praticados por produtores locais, considerando o menor valor possível em razão do quantitativo necessário. O valor é apresentado em metro linear, o que foi calculado que uma habitação necessitaria o correspondente a 1.674 metros por unidade habitacional, considerando o quantitativo de varas e suas dimensões além do valor necessário para produção das esteiras de vedação.

**Tabela 7:** Tabela de Materiais da habitação em Bambu – Curva ABC

Material	Preço (R\$)	Quantidade	Unidade	P.Total (R\$)
Bambu	13,50	1.674	m	22.599,00
Cimento Portland composto cp ii-32	0,95	5.385,0	kg	5.115,75
Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	223,32	11,49	m <sup>3</sup>	2.565,95
Tinta latex pva premium, cor branca	20,23	115,5	L	2.336,57
Massa corrida pva para paredes internas	75,99	11,48	18L	872,37
Selador acrílico paredes internas/externas	7,5	56	L	420,00
Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	74,84	15,49	m <sup>3</sup>	1.159,27
Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	21,65	29,25	kg	633,26
Energia elétrica até 2000 kWh industrial, sem demanda	0,82	66,5	kWh	54,53
Cal hidratada ch-i para argamassas	1,22	16	kg	19,52

**Fonte:** Elaborado pela autora.

É possível aferir que o valor da estrutura de bambu encontra-se 29,8% mais elevado que o valor da estrutura em aço. A justificativa é que além do aço já ter uma cadeia produtiva e um sistema de logística, o bambu ainda se encontra em estágio de produção embrionário no estado do Acre.

Com relação aos valores correspondentes do bambu no estado de São Paulo, o preço médio reduz de R\$ 13,50 (valor praticado no Acre) para R\$ 8,33 o metro linear. Esse valor foi coletado em consulta a uma indústria que comercializa bambu para construção civil, presente na cidade de Tatuí (SP) na condição de fornecimento de no mínimo 1200 peças de 6 metros. O valor estimado do frete dessas peças para o estado do Acre é de R\$15.000 reais, o que encareceria o somatório, em comparação com o valor do fornecimento local.

Nota-se também uma redução de 15,0% do valor de cimento, em razão da habitação com bambu demandar menos cimento que a habitação em aço.

O somatório dos materiais da residência em estrutura de bambu apresenta um valor total de R\$ 35.776,21, representando um aumento de 16,31% em comparação ao valor total da habitação em estrutura de aço.

### 6.3 Análise comparativa – Transição de Ecoeficiência

A partir dos dados coletados na Tabela 5, pode-se chegar no resultado de cargas ambientais provenientes de cada processo comparado, tanto da residência em bambu, quanto da residência em aço. A partir dos valores econômicos coletados dos dois processos comparativos, pode-se elaborar a Tabela 8, que relaciona o somatório do quantitativo de carga ambiental em razão dos valores econômicos referentes aos processos de habitação em aço e em bambu, respectivamente.

**Tabela 8:** Custos e Carga Ambiental dos processos de estrutura em aço e bambu.

<b>Parâmetros de Ecoeficiência</b>	<b>Unidade</b>	<b>Habitação em Aço</b>	<b>Habitação em Bambu</b>
Carga Ambiental	mPt	40.974,27	34.793,05
Custos	R\$	29.942,66	35.776,21
<b>Ecoeficiência</b>	<b>mPt/R\$</b>	<b>1,37</b>	<b>0,97</b>

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Os dados apresentados na Tabela 8 demonstram os valores absolutos de Carga ambiental por valor econômico (Moeda: Real). A habitação em bambu mostrou um valor de 0,97 mPt/R\$ enquanto que a habitação em aço mostrou um valor de 1,37 mPt/R\$. Considerando que a ecoeficiência está relacionada ao valor mínimo em razão da carga ambiental, quanto mais próximo de zero, melhor será seu desempenho ambiental, o que demonstra que a habitação em bambu se mostra mais ecoeficiente em relação a habitação em aço, pela razão dos valores ambientais empregados no cálculo.

## 7 CONCLUSÃO

Os cenários demonstrados no presente trabalho mostram que a habitação com inserção da estrutura em bambu apresenta reduções significativas de impactos ambientais em praticamente todas as categorias avaliadas, seguindo a metodologia ReCiPe *midpoint* e seleção de categorias condizentes com o nicho de estudo: construção civil, além de ter se mostrado mais ecoeficiente que o material aço, em razão da mensuração econômica da carga apresentada pelo mesmo.

Em contraste, é importante mencionar que apesar de se mostrar viável ambientalmente, a cadeia produtiva de bambu no estado do Acre ainda não apresentaria produção necessária para suprir a realização de um projeto de larga escala de habitação popular, promovida pelo setor público. Outro fator importante a ser pontuado é a questão da produção de elementos construtivos em bambu, como a esteira de vedação, que teria que ser produzida *in loco* na obra por não apresentar uma indústria de placas pré-moldadas desse material na região, como pode ser encontrada em países como Colômbia e China. Dessa forma, a construção das habitações tomaria um tempo útil de construção relativamente maior do que uma casa feita com material convencional, além de ser muito mais difícil encontrar mão de obra especializada no material como o bambu.

No entanto a realização de políticas públicas no incentivo da cadeia produtiva de bambu local tende a favorecer o crescimento da demanda do bambu pela construção civil na Amazônia, e assim, um aumento das unidades produção e, assim, um incremento na empregabilidade local. Esse incentivo pode-se dar por legislações urbanísticas e habitacionais relacionadas à construção civil local, como por exemplo, Plano Diretor Municipal. Esse incentivo legal pode então favorecer o desempenho ambiental, a economia local e assim, uma melhor transição de ecoeficiência nas construções civis no ambiente amazônico.

Por fim, conclui-se que o trabalho atingiu o objetivo que demonstrar os comparativos de impactos ambientais avaliados tanto na residência popular com estrutura convencional com aço e a mesma com estrutura proposta em bambu, conforme projetado no trabalho proposto, no ambiente amazônico, proporcionando redução de 15,09% de impactos ambientais totais em relação ao aço, podendo esse número ser melhor quando apresentada soluções de melhorias na gestão de resíduos da cadeia produtiva de bambu artesanal. Foi possível observar as reduções de impactos em diferentes categorias e como

o bambu proporciona uma cadeia produtiva que possibilitaria um ganho ambiental na redução de impactos ambientais na construção civil acreana.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14.040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001. 10 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14.044**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009. 46 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AFONSO, D. G. **Bambu Nativo (*Guadua* spp.): Alternativa de desenvolvimento econômico e sustentável para o Estado do Acre**. 2011. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Curso de Pós Graduação em Gestão da Indústria Madeireira, Departamento de Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná.

ARAÚJO, L.M.; MEDEIROS, G.A.; GIANELLI, B.F. Avaliação do potencial da introdução do bambu na construção de habitações populares na Amazônia: estudo de caso em Rio Branco, Acre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 10., 2019, Fortaleza. **Anais...** Bauru: IBEAS, 2019. 5p.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. **NSR-10**. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Bogotá: AIS, 2010.

BEM-ZHI, Z. et al. Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. **Journal of Forestry Research**, v. 16, p.143–147, 2005.

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) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BENAVIDES, A. S. J.; CEOLIN, E. D. Coordenação Modular aplicada à habitação de interesse social com estrutura de bambu *Guadua* roliço. In: SEMINÁRIO DE

BERALDO, A. L. & ALEIXO, L. R. P. **Bambu: Características e aplicações na construção civil e em arquitetura**. Bauru, SP: Canal6, 2019. 108p.

BRIBIÁN, I.Z.; CAPILLA, A.V.; USÓN, A.A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v.46, p. 1133-1140, 2011.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. 2014. 266p. Dissertação (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012**. Watford: BRE, 2013.

CARVALHO, A.L. et al. Bamboo-Dominated Forests of the Southwest Amazon: Detection, Spatial Extent, Life Cycle Length and Flowering Waves. *PLoS ONE*, v.8, p.1-13, 2013.

CARVALHO, J.M.F. et al. Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v.257, 120530, 2020

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**. Disponível em: [http://www.cbcs.org.br/\\_5dotSystem/userFiles/MMA-Pnuma/Aspectos%20da%20Construcao%20Sustentavel%20no%20Brasil%20e%20Promocao%20de%20Politicass%20Publicas.pdf](http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/MMA-Pnuma/Aspectos%20da%20Construcao%20Sustentavel%20no%20Brasil%20e%20Promocao%20de%20Politicass%20Publicas.pdf). Acesso em: 15 de outubro de 2020.

CECCON, E.; RUIZ, P.A.G. Las funciones ecológicas de los bambúes en la recuperación de servicios ambientales y en la restauración productiva de ecosistemas. *Biología Tropical*, v. 67, p. 679-691, 2019.

CHANG, F. et al. Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. v. 64. p. 60-69. 2018.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

COSTA, M.P.; SCHOENEBOOM, J.C., OLIVEIRA, S.A.O.; VIÑAS, R.S.; MEDEIROS, G.A. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA. *Journal of Cleaner Production*, v. 171, p. 1460-1471, 2018.

CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 4, 2015, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: IMED, 2015. 10p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Planejamento e pesquisa: mapas multimodais 2019**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo/mapas-multimodais/mapa-do-brasil>. Acesso em 06 de novembro de 2020.

DRUMOND, P. M; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. -. 1. ed. - Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655p.

DUARTE, A. C. **ICMS, o que é e quem deve pagar ?** 2018. Disponível em: <https://blog.quantosobra.com.br/icms-o-que-e-e-quem-deve-pagar/>. Acesso em 10 de novembro de 2020.

DONG, Y. et al. An Index of Completeness (IoC) of life cycle assessment: Implementation in the building sector. *Journal of Cleaner Production*. v. 283, p. 124672, 2021.

ESCAMILLA, E. Z. et al. Industrial or Traditional Bamboo Construction? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bamboo-Based Buildings. **Sustainability**, v. 10. 3096, 2018.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE OF THE (EC-JRC). **International Reference Life Cycle System (ILCD) Handbook** – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. 2010.

FAÇANHA, C. **Euro VI for Brazil: A clear path for cleaner skies**. 2017. Disponível em: <https://theicct.org/blogs/staff/euro-VI-for-brazil-a-clear-path-to-cleaner-skies>. Acesso em 03 de setembro de 2019.

FERREIRA, H; LEITE, M.G.P. A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. **Journal of Cleaner Production**, v.108, p.1081-1091, 2015.

GASQUES, A. C. F., et al. Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. **Revista Tecnológica Maringá**. v. 23, p. 13-24, 2014.

GIANELLI, B. F. **Avaliação de ciclo de vida comparativa dos processos de anodização e oxidação eletrolítica em plasma de liga de alumínio**. 2014. 120f. Dissertação (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba. 2014.

GÚZMAN, H. O. et al. Características epidemiológicas da leishmaniose tegumentar americana na fronteira amazônica: estudo retrospectivo em Assis Brasil, acre. **Revista de Patologia Tropical**, Goiânia, v. 42, p. 187-200, 2013.

HIDALGO, Oscar. **Bamboo: The gift of the gods**. Colombia: Oscar Hidalgo, 2003. 553p.

HSIEH, T. et al. Eco-Efficiency Model for Green Building Material in a Subtropical Climate. **Environmental Engineering Science**, v. 30, n. 9, 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. **Panorama do município de Rio Branco 2018**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ac/rio-branco/panorama>. Acesso em 05 de junho de 2020.

INGRAO, C. et al. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. **Journal of Cleaner Production**. v. 201, p. 556-569, 2018.

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. **A importância das florestas em pé na Amazônia**. Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/a-importancia-das-florestas-em-pe/>. Acesso em: 23 jul. 2020.

JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. International Network for bamboo and Rattan (INBAR). Technical report no 20. Beijing. China. 2000.

KABONGO, J. D.; BOIRAL, O. Doing More with Less: Building Dynamic Capabilities for Eco-Efficiency. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, p. 956–971, 2017.

KICHERER, A. et al. Eco-efficiency. **The International Journal of Life Cycle Assessment** v.12, p. 537, 2007.

LIMA, R.A.F. et al. Bamboo overabundance alters forest structure and dynamics in the Atlantic Forest hotspot. **Biological Conservation**, v. 147, p. 32–39, 2012.

LLANTOY, N. et al. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. **Energy and Buildings**. Lleida, v. 225, n. 110323, 2020.

MANCINI, S.D.; MEDEIROS, G.A.; PAES, M.X. et al. Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, p. 261-282, 2021.

MARÇAL, V.H. S. **Análise comparativa de Normas Técnicas Internacionais para o emprego do bambu – colmo em estruturas prediais**. 2018. 178p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

OLIVEIRA, B. O . S. et al. Integrated municipal and solid waste management in the Amazon: addressing barriers and challenges in using the Delphi method. **International Journal of Environmental Impacts**, v. 4, n. 1, p. 49–61, 2021.

OMETTO, A.R. **Avaliação de ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 2005. 209f. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, 2014.

PEREIRA, M. A. dos R. & BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru, SP: Canal6, 2007. 240 p.

PMHIS-RB – Plano Municipal de Habitação de Interesse Social de Rio Branco. Disponível em: <http://portalcgm.riobranco.ac.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/02/Plano-Municipal-de-Habita%C3%A7%C3%A3o-de-Interesse-Social-de-Rio-Branco-PMHIS1.pdf>. Acesso 10 de junho de 2019.

POLO, F., PANAYFO, J. MÉNDEZ, A. Experiencias sobre la silvicultura y usos del bambú en Colombia. **Xilema**, v.27, p.17-23, 2014.

RYBERG, M.W. et al. Comparative life cycle assessment of four buildings in Greenland. **Building and Environment**, v.204, 108130, 2021

RIO BRANCO (AC). **Lei nº 2.222, de 26 de dezembro de 2016. Institui o Plano Diretor de Rio Branco**. Disponível em: <http://portalcgm.riobranco.ac.gov.br/portal/legislacao/plano-diretor/>. Acesso em: 05 jul. 2020.

SAKAMOTO, Hugo Mitsuo. **Análise de ecoeficiência de rota processual para recuperação de água em planta petroquímica**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência), da Universidade de São Paulo – USP, 2019, 232p

SCURLOCK, J. M. O. et al. Bamboo: An overlooked biomass resource? **Biomass and Bioenergy**, v.19, p.229-244, 2000.

SILVA, P. G. S. **Inovação ambiental na gestão de embalagens de bebidas em Portugal. Tese de Doutorado**. Universidade Técnica de Lisboa. 2002

SOUZA, C.M; ARAUJO, E.A; MEDEIROS, M.F.S.T; MAGALHÃES, A.A. **Recursos Naturais: Biodiversidade e Ambientes do Acre**. 2010. Disponível em [https://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes\\_estados/Acre/Fase%202/Livro\\_Tematico\\_ZEE\\_Biodiversidade\\_Volume\\_3.pdf](https://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Livro_Tematico_ZEE_Biodiversidade_Volume_3.pdf). Acesso em: 22 de maio, 2019.

VAN DER LUGT, P. et al. Environmental Assessment of Industrial Bamboo Products. Life Cycle Assessment and Carbon Sequestration. In: **Proceedings of the 10th World Bamboo Congress** (pp 1-16). World Bamboo Organization, Korea, 2015.

YU, D. et al. A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission. **Energy and Buildings**, v. 43, p.

WASKOW et al. Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate. **Journal of Environmental Management**, v.295, 113094, 2021.

ZHANG, X.; BISWAS, W.K. Development of eco-efficient bricks – A life cycle assessment approach. **Journal of Building Engineering**, v.42, 102429, 2021.