



Erick Maklin Machado Távora

**Uso de plugins na integração ACV-BIM para
análise de impactos ambientais: estudo de caso
com tipologias construtivas em madeira.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Alcebíades Negrão Macedo

Belém – Pará – Brasil

2022

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Erick Maklin Machado Távora

**Uso de plugins na integração ACV-BIM para
análise de impactos ambientais: estudo de caso
com tipologias construtivas em madeira.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Belém, 03 de outubro de 2022.

Erick Maklin Machado Távora

**Uso de plugins na integração ACV-BIM para
análise de impactos ambientais: estudo de caso
com tipologias construtivas em madeira.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 03 de outubro de 2020.

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Orientador

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECC

Banca Examinadora

Prof. Dr. Bruno Ramos Zemerio

Examinador Externo

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFPA

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPGAU

Profa. Dra. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

Examinadora Externa

Faculdade de Engenharia Elétrica – UFPA

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPGAU

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Examinador Interno

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECC

Prof. Dr. Márcio Barata

Examinador Externo

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFPA

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPGAU

Profa. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya

Examinadora Externa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais

Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



USO DE PLUGINS NA INTEGRAÇÃO ACV-BIM PARA ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO COM TIPOLOGIAS CONSTRUTIVAS EM MADEIRA

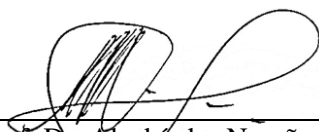
AUTOR:

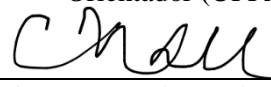
Erick Maklin Machado Távora

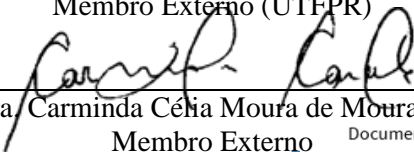

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA
PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ,
COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA
CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

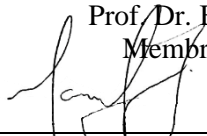
APROVADO EM: 21 / 10 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macedo
Orientador (UFPA)


Profa. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya
Membro Externo (UTEPR)

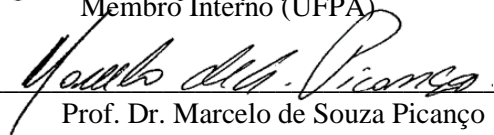

Profa. Dra. Carminda Céia Moura de Moura Carvalho
Membro Externo
Documento assinado digitalmente
 BRUNO RAMOS ZEMERO
Data: 23/11/2022 09:00:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>


Prof. Dr. Bruno Ramos Zemero
Membro Externo (UFPA)


Prof. Dr. Márcio Santos Barata
Membro Externo (UFPA)


Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Membro Interno (UFPA)

Visto:


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T231u Távora, Erick Maklin.
USO DE PLUGINS NA INTEGRAÇÃO ACV-BIM PARA
ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO
COM TIPOLOGIAS EM MADEIRA / Erick Maklin Távora. —
2022.
97 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alcebíades Macêdo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Impactos ambientais. 2. ACV. 3. BIM. 4. Plugin. 5.
Madeira. I. Título.

CESSÃO DE DIREITOS

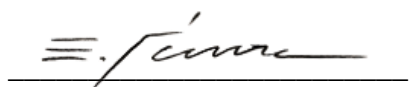
AUTOR: Erick Maklin Machado Távora

TÍTULO: Uso de plugins na integração ACV-BIM para análise de impactos ambientais: estudo de caso com tipologias construtivas em madeira.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Erick Maklin Machado Távora

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa, Claudia,
pelo incentivo e apoio incondicional desde o início deste trabalho.

Aos meus filhos,
pela compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Todo louvor e glória ao Nosso Senhor Jesus Cristo, único Salvador e esperança do mundo. Minha imensa gratidão à Nossa mãe querida de Nazaré, perene intercessora.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo, por ter me recebido tantas vezes de portas abertas em seu ambiente de trabalho para as orientações acadêmicas. E sempre ao final de cada orientação suas palavras confortantes de otimismo.

Ao professor Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués pela colaboração nas orientações acadêmicas e suas insistentes recomendações pra melhoramentos nos métodos de pesquisa. E de certa forma, agradecê-lo pela escolha do tema desse trabalho, sendo que foi em suas aulas que surgiu o interesse inicial em desenvolver essa temática.

Ao Prof. Dr. Bruno Zemero pelas longas, acaloradas e promissoras discussões sobre novas perspectivas tecnológicas para análises ambientais. Agradeço pela coragem, direcionamento e desejo de desbravar o desconhecido na ciência, por antever os resultados e acreditar no potencial dessa pesquisa.

Meu agradecimento à Profa. Dra. Carmina Célio Carvalho pelas valiosas correções em minha escrita acadêmica. E minha especial gratidão pelo consentimento em me ceder um espaço de estudo nas dependências da FEEB – ITEC, local onde foi desenvolvida grande parte dessa pesquisa.

Por fim, sou grato às empresas e particularmente às equipes de consultores dos programas eToolLCD e One Click LCA, pela concessão das licenças para pesquisa e orientações no processo de aprendizagem nas ferramentas.

RESUMO

A construção civil é uma das áreas mais importantes para a economia e o desenvolvimento de um país, porém, os impactos ambientais gerados por ela também são enormes, sendo uma das principais responsáveis pelo consumo de materiais e pelas emissões de gases do efeito estufa. A mensuração do desempenho ambiental pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite estimar o consumo de recursos naturais e energia, compreendendo os impactos gerados durante o ciclo de vida de uma edificação. Todavia, com o uso de tecnologias aplicadas a construção é possível que estes gastos e emissões sejam previstos e mitigados. Nesse sentido, o uso de ferramentas computacionais com informações integradas a modelos digitais permite que essa quantificação se torne menos complexa e mais célere, sendo que a interação entre ferramentas de Modelagem da Informação do Edifício (BIM) e de ACV permite oferecer diretrizes na escolha dos materiais e processos durante a fase de projeto. Com base nisso, foi desenvolvida uma metodologia de análise multicritério para escolha do programa de ACV simplificada, mais adequado às tipologias e ao contexto brasileiro. O principal objetivo desse estudo é a análise comparativa das diferentes categorias de impactos ambientais entre diferentes tipologias em madeira, através da ACV em habitações de interesse social. Então, para a simulação, foram modeladas com auxílio da ferramenta Autodesk Revit três diferentes tipologias construtivas unifamiliares em madeira. O modelo da tipologia em *Wood Frame*, modelo Pré-fabricado em madeira maciça e o modelo em CLT, a partir do modelo R1-B do CUB (SINDUSCON-PA, 2022), com desempenho pela NBR 15575. Também foi modelado uma tipologia em alvenaria, para referência comparativa. Posteriormente os modelos foram compartilhados através de plugin com a ferramenta One Click LCA para a análise ambiental. Os resultados dos impactos ambientais, após análise comparativa e de benchmarks, não apresentaram grandes diferenças entre os três modelos. O Pré-fabricado foi o que apresentou melhor desempenho, enquanto as tipologias em CLT e Wood frame apresentaram resultados aproximados, sendo que o pior desempenho foi o do modelo em Wood frame, e apenas o Pré-fabricado apresentou impactos substancialmente menores, em comparação à alvenaria. O estudo também mostrou que o uso do programa com o plugin One Click LCA simplificou e automatizou o processo de ACV.

Palavras-chave: Impactos ambientais. ACV. BIM. Plugin. One Click LCA. Madeira.

ABSTRACT

Civil construction is one of the most important areas for the economy and development of a country, however, the environmental impacts generated by it are also huge, being one of the main responsible for the consumption of materials and the emissions of greenhouse gases. The measurement of environmental performance by the Life Cycle Assessment (LCA) methodology allows estimating the consumption of natural resources and energy, including the impacts generated during the life cycle of a building. However, with the use of technologies applied to construction, it is possible that these expenses and emissions are predicted and mitigated. In this sense, the use of computational tools with information integrated to digital models allows this quantification to become less complex and faster, and the interaction between Building Information Modeling (BIM) and LCA tools allows offering guidelines in the choice of materials and processes during the design phase. Based on this, a multi-criteria analysis methodology was developed to choose the simplified LCA program, most appropriate for the typologies and the Brazilian context. The main objective of this study is the comparative analysis of different categories of environmental impacts between different types of wood, through LCA in social housing. Then, for the simulation, three different single-family wooden building typologies were modeled with the help of Autodesk Revit tool. The typology model in Wood Frame, Prefabricated model in solid wood and the CLT model, from the CUB model R1-B (SINDUSCON-PA, 2022), with performance by NBR 15575. A typology was also modeled in masonry, for comparative reference. Subsequently, the models were shared through a plugin with the One Click LCA tool for environmental analysis. The results of environmental impacts, after comparative analysis and benchmarks, did not show great differences between the three models. The Prefabricated presented the best performance, while the CLT and Wood frame typologies presented approximate results, with the worst performance being that of the Wood frame model, and only the Prefabricated presented substantially lower impacts, compared to the masonry. The study also showed that using the program with the One Click LCA plugin simplified and automated the LCA process.

Keywords: Environmental impacts. LCA. BIM. Plugin. One Click LCA. Wood.

“Importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê”.

Arthur Schopenhauer

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO	21
1.2 QUESTÕES DO ESTUDO	22
1.2.1 Questão principal	22
1.2.2 Questões secundárias	22
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo geral	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 JUSTIFICATIVAS	23
1.4.1 Justificativa ambiental	23
1.4.2 Justificativas técnicas	23
1.4.3 Justificativa social e econômica	24
1.4.4 Contextualização no Programa	27
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) DE EDIFICAÇÕES	29
2.1.1 Objetivo e Escopo	30
2.1.2 Análise de Inventário	31
2.1.3 Avaliação de Impacto	31
2.1.4 Etapas da ACV para edificações, segundo a EN 15978	32
2.2 ACV-BIM	33
2.3 BUSCA SISTEMATIZADA PARA ACV-BIM	34
2.4 ESTADO DA ARTE	34
3 MÉTODO DE PESQUISA	36
3.1 DELINEAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA	36
3.2 MÉTODO DE SELEÇÃO DAS FERRAMENTAS BIM E DE ACV	38
3.3 TESTAGEM DOS PLUGINS PARA O ESTUDO DE CASO	41
3.3.1 O plugin eToolLCD	42
3.3.2 O plugin One Click LCA	45
3.3.3 Resumo comparativo e definição do plugin para o estudo de caso	52
3.4 MÉTODO DE ABORDAGEM E CATEGORIAS DE IMPACTO	53
3.5 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO DA ACV PARA O ESTUDO DE CASO	55
3.5.1 Escopo da ACV para o estudo de caso	55
4 ESTUDO DE CASO	59

4.1 PADRÃO DA EDIFICAÇÃO PARA OS MODELOS	59
4.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DOS MODELOS	61
4.3 DISTÂNCIAS DOS CENTROS DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS AO LOCAL	62
4.4 MODELOS DIGITAIS EM MADEIRA	64
4.4.1 Modelo em Wood frame	64
4.4.2 Modelo Pré-fabricado em madeira	64
4.4.3 Modelo em CLT (Cross Laminated Timber)	65
4.5 MODELAGEM DA ACV.....	66
5 RESULTADOS	68
5.1 RESULTADOS DA ACV	68
5.1.1 Resultados da ACV no modelo Wood Frame	69
5.1.2 Resultados da ACV no modelo Pré-fabricado	71
5.1.3 Resultados da ACV no modelo em CLT	73
5.2 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE OS MODELOS EM MADEIRA	75
5.3 VALIDADE DOS DADOS E REFERÊNCIAS <i>BENCHMARKS</i>	81
5.4 RESULTADOS COMPARATIVOS COM O MODELO EM ALVENARIA	82
6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	84
6.1 Conclusões quanto ao uso do plugin One Click LCA	84
6.2 Conclusões quanto aos impactos ambientais das edificações	85
6.3 Conclusões sobre validações e comparativos	86
6.4 Considerações finais	87
6.5 Sugestões para estudos e trabalhos futuros	87
REFERÊNCIAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Composição da área de árvores plantadas por seguimento no brasil	26
Figura 2.1 – Fases de uma ACV	30
Figura 2.2 - Diagrama da análise de inventário	31
Figura 3.1 – Delineamento esquemático do método utilizado na pesquisa	38
Figura 3.2 – Interface na web das configurações iniciais do programa eToolLCD	43
Figura 3.3 – Interface do eToolLCD com a aba de navegação nos projetos	44
Figura 3.4 – Interface de associação de materiais do eToolLCD	44
Figura 3.5 – Interface do eToolLCD com o resumo dos resultados da ACV	45
Figura 3.6 – Interface inicial do programa One Click LCA mostrando o registro do atual estudo.....	47
Figura 3.7 – Interface do One Click com a filtragem na base de dados para o inventário de ACV.....	48
Figura 3.8 – Interface do One Click com as etapas para importação de dados	48
Figura 3.9 – Interface do One Click LCA mostrando o nível de integração dos dados	49
Figura 3.10 – Interface do One Click LCA com o resumo dos resultados da ACV	51
Figura 3.11 - Fases pertencentes ao escopo do estudo de ACV no One Click LCA	56
Figura 4.1 - Planta baixa padrão dos modelos em estudo	59
Figura 4.2 - Corte padrão dos modelos em estudo, tipo R1-B	60
Figura 4.3 - Localização geográfica na região metropolitana de Belém	61
Figura 4.4 - Localização da edificação na área do Laboratório de materiais de FEC	62
Figura 4.5 - Vista 3D e esquemática do modelo em Wood frame	64
Figura 4.6 - Vista 3D e esquemática do modelo Pré-fabricado em madeira	65
Figura 4.7 - Vista 3D e esquemática do modelo em painéis de madeira massiva CLT	66
Figura 5.1 - Contribuição de CO ₂ incorporado por estágio do ciclo de vida e por elementos (A1-A3)	71

Figura 5.2 Contribuição de CO ₂ incorporado, por estágio e por elemento construtivo Pré-fabricado	73
Figura 5.3 - Contribuição de CO ₂ incorporado por estágio do ciclo de vida e por elementos (A1-A3)	75
Figura 5.4 - Contribuição de cada categoria de impacto na Avaliação do ciclo de vida, EN-15978	75
Figura 5.5 - Potencial de Aquecimento global por fase do ciclo de vida da edificação (kg CO ₂ eq)	76
Figura 5.6 - Uso total de energia primária por fase do ciclo de vida da edificação (MJ)	77
Figura 5.7 - Comparativo de GWP entre os elementos construtivos (kg CO ₂ eq)	77
Figura 5.8 - Comparativo de consumo de energia primária entre os elementos construtivos (MJ)	78
Figura 5.9 - Comparativo de carbono incorporado (estágio A1-A3) entre os modelos (CO ₂ eq.)	78
Figura 5.10 - Comparativo de Carbono Biogênico entre os elementos construtivos (kg CO ₂ eq bio)	80
Figura 5.11 - Classificação de desempenho de carbono incorporado para wood frame, pré-fabricado e CLT	82
Figura 5.12 - Classificação de desempenho de carbono incorporado para o modelo em alvenaria	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Etapas da avaliação ambiental de edificações conforme definido pela EN 15978	32
Quadro 2.2 – Resumo do Estado da Arte	35
Quadro 3.1 – Classificação da pesquisa	36
Quadro 3.2 - Análise dos plugins segundo os critérios selecionados.....	40
Quadro 3.3 - Características dos indicadores de ponto médio dos métodos de AICV do CML... 2002	54
Quadro 4.1 - Lista de materiais e distâncias dos centros de produção ao local	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Seleção dos plugins	41
Tabela 5.1 Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em Wood Frame	69
Tabela 5.2 - Materiais e CO ₂ eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo Wood Frame	70
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em Pré-fabricado	71
Tabela 5.4 - Materiais e CO ₂ eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo Pré-fabricado	72
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em CLT	73
Tabela 5.6 - Materiais e CO ₂ eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo em CLT	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta dissertação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados ao longo do texto desta pesquisa.

Símbolo	Significado
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AEC	Aquitetura, Engenharia & Construção
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Água
AsBEA	Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CHB	<i>Carbon Heroes Benchmarks</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CM	Centímetros
CO2	Dióxido de Carbono

COP	Conferência do clima da ONU
CUB	Custo Unitário Básico da Construção
DAP	Declarações Ambientais de Produto
DATec	Documento de Avaliação Técnica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FEC	Faculdade de Engenharia Civil
GEE	Gases de Efeito Estufa
GFA	<i>Gross Floor Area</i>
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IBÁ	Associação da Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITEC	Instituto de Tecnologia
KG	Quilograma
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LOD	<i>Level of Development</i>
M²	Metro Quadrado
M³	Metro Cúbico
M	Metro
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>

MM	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
NR	Normas Regulamentadoras
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos
PIB	Produto Interno Bruto
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PVA	<i>Polyvinyl Acetate</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
RCC	Resíduo de Construção Civil
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
RU	Resistente à Umidade
SiMaC Sistemas Construtivos	Sistema de Qualificação de Empresas de Materiais, Componentes e
SiNAT Sistemas Convencionais	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores e
SINDUSCON	Sindicato das Indústrias da Construção
UFPA	Universidade Federal do Pará
VUP	Vida Útil de Projeto

1 INTRODUÇÃO

Em novembro de 2021 a 26ª Conferência das Nações Unidas (ONU) sobre as mudanças climáticas (COP26) aconteceu num contexto de urgência segundo a própria ONU (2021), nela foi aprovado o Pacto de Glasgow, assinado por 200 países com a urgência de reduzir as emissões e conter o impacto das mudanças climáticas a um aumento de no máximo 1,5°C na temperatura média do planeta, comparado ao período pré-industrial. O Brasil na mesma conferência assumiu um novo compromisso de mitigar 50% de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030, além da nova meta, o Ministério do Meio Ambiente apresentou também diretrizes para a agenda estratégica voltada à neutralidade climática. Entre as medidas, estão: zerar o desmatamento ilegal até 2028; restaurar e reflorestar 18 milhões de hectares de florestas até 2030; além de alcançar em 2030 a participação de 45% a 50% das energias renováveis na composição da matriz energética. (WRI Brasil, 2021).

A preocupação com o meio ambiente e um futuro sustentável ganhou mais destaque nas últimas décadas (PAULSEN; SPOSTO, 2014), pois a abundância dos gases que retêm calor na atmosfera mais uma vez atingiu um novo recorde em 2020, com uma taxa anual de aumento acima da média de 2011-2020. Essa tendência continuou em 2021, de acordo com o Boletim de Gases de Efeito Estufa (GEE) da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2021).

O dióxido de carbono é o gás de efeito estufa mais importante na atmosfera, sendo responsável por aproximadamente 66% do efeito de aquecimento do clima (OMM, 2021), principalmente por causa da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento. E o dióxido de carbono continua a se acumular na atmosfera e agora é 50% mais alto do que antes da Revolução Industrial, segundo o serviço nacional de meteorologia do Reino Unido - Met Office (2021).

Segundo Mao et al. (2013), o setor da construção civil e edificações é um dos sete principais contribuintes para emissões de gases do efeito estufa (GEE) no planeta. A construção e operação das edificações somam mais de um terço do consumo final global de energia, e aproximadamente 40% do total de emissões de CO₂ relacionadas à energia e processos (IEA, 2019). E o carbono incorporado dos edifícios contribui com cerca de 11% de todas as emissões globais de carbono (World GBC, 2019).

Por outro lado, devido ao elevado consumo de recursos e à grande quantidade de melhorias que podem ser implementadas, o setor da construção é o que apresenta o maior potencial e oportunidades na economia de energia e redução de emissão de carbono (KYLILI; ILIC; FOKAIDES, 2017). A redução das emissões de GEE necessita de desenvolvimento e

aperfeiçoamento de novas tecnologias mais sustentáveis, utilização de matrizes energéticas e de matérias prima mais eficientes ecologicamente, bem como um controle mais rígido do desmatamento predatório. Então, a maneira mais básica de combate ao aquecimento global ainda é uma das estratégias mais importantes a ser usada, o sequestro de carbono realizado pelo processo de fotossíntese é fundamental para se frear o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera. O cultivo de árvores em larga escala é capaz de absorver grandes quantidades de gás carbônico (FOGGIATO, 2021). A redução das emissões de GEE necessita de desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas tecnologias mais sustentáveis, utilização de matrizes energéticas e de matérias prima mais eficientes ecologicamente, bem como um controle mais rígido do desmatamento predatório (FOGGIATO, 2021). Então o autor esclarece que a maneira mais básica de combate ao aquecimento global ainda é uma das estratégias mais importantes a ser usada, o sequestro de carbono realizado pelo processo de fotossíntese, que é fundamental para se frear o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera. Sendo que o cultivo de árvores em larga escala é capaz de absorver grandes quantidades de gás carbônico.

As florestas plantadas ainda são mais eficientes que as florestas nativas, no que diz respeito à absorção de CO₂, pelo fato de terem maiores taxas de crescimento e por não terem árvores mais velhas em processo de senescência, período que a absorção é menor. Tendo em vista que um dos principais gases do efeito estufa é o dióxido de carbono (CO₂), a utilização da madeira proveniente de florestas plantadas pode contribuir para a mitigação dos efeitos do aquecimento global. O carbono sequestrado pelas florestas pode ser mantido na estrutura da madeira, contando que esse material não apodreça nem seja queimado. (FOGGIATO, 2021, p. 8)

Tendo o Brasil a maior floresta tropical do mundo e sendo um dos maiores produtores de madeira, ficando apenas atrás dos Estados Unidos e Canadá, o uso da madeira passa a ser um material construtivo competitivo, desde que baseado nas modernas técnicas de reflorestamento e manejo florestal aliados ao desenvolvimento de produtos industrializados de madeira (HABOWSKI, 2018). Nos últimos anos nos países chamados desenvolvidos, assiste-se a um renascimento da utilização da madeira no setor da construção, com o aparecimento de uma enorme variedade de soluções construtivas à base de madeira. Enquanto no Brasil, apesar da abundância de recursos florestais, a utilização de madeira em habitações ocorre de forma pouco expressiva, consequência do preconceito devido à falta de conhecimento e execuções errôneas que denegriram e sobrepuseram as vantagens deste material, que não é nem mesmo considerado um material convencional no contexto brasileiro, e também resultado de uma postura conservadora ao utilizar majoritariamente sistemas convencionais de alvenaria. Sendo que

habitações em alvenaria já são consideradas como um sistema ultrapassado em muitos países (RIBASKI, DUDEK & ROTTA, 2017).

Segundo a Fundação João Pinheiro, em 2019 o déficit habitacional no Brasil estava em 5,8 milhões de moradias. Com esse agravamento da crise habitacional brasileira, merecendo não apenas respostas referentes à demanda por quantidade de moradias, como principalmente, o repensar sobre a qualidade destas moradias. Percebe-se uma carência de projetos de qualidade e com materiais sustentáveis direcionados à população de baixa renda no país. Então a madeira como material construtivo aparece como alternativa para suprir a necessidade por habitações de interesse social, com a construção de casas de tamanho, qualidade, conforto e valor estético similares aos da alvenaria, mas com menor geração de resíduos, menor impacto ambiental, tempo de execução e menos recursos financeiros (SANTOS; SOTSEK, 2018).

Mas para quantificar o impacto ambiental do uso da madeira como material de construção, necessitam-se de métodos que analisem os atributos ambientais relacionados à construção. Dentre os métodos existentes, encontra-se a ACV (Avaliação de Ciclo de Vida), que busca entender sistematicamente as consequências da edificação ao longo de todo seu ciclo de vida (LLAVE, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2020). A complexidade da realização de ACV para elementos construtivos era fator limitante para a utilização de dados sobre impactos ambientais (SOUST-VERDAGUER; LLATAS; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2016). O próximo passo foi a simplificação do complexo e demorado processo de ACV (DÍAZ; ANTÓN, 2014) através de ferramentas computacionais. Porém os mecanismos para essa quantificação de impactos ainda não eram majoritariamente automáticos, necessitando a inserção de dados em diferentes programas por meio de bases de dados (VARELA *et al.*, 2021).

Então, a metodologia em BIM (Building Information Modeling) veio na tentativa de auxiliar na automatização do processo de ACV, porém, a interação de ACV e BIM ainda é limitada. E a recente busca pela integração desses dois assuntos ACV-BIM aparece como uma alternativa viável para garantir que profissionais tenham acesso a informações importantes, e possam tomar decisões melhores, baseadas em dados providos por sistemas computacionais (LIMA; SILVA, 2021).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A literatura tem mostrado o surgimento de uma variedade de programas de ACV utilizados no processo de integração à plataforma BIM, mas Maidel (2020) observa que é um mercado ainda a ser desenvolvido e aprimorado. Tais programas apresentam diferentes níveis

de integração, podendo ser dedicados e mais completos, ou através de plugins, que permitem resultados rápidos, mas tem a limitação dos bancos de dados.

Nessa ótica, o presente estudo avança na fronteira do conhecimento, propondo uma metodologia para a escolha criteriosa do programa mais adequado a ser utilizado, o One Click LCA, um plugin para plataforma BIM, com banco de dados baseado em navegador (web browser), ainda pouco utilizado em estudos no Brasil. E avança também em comparar os impactos ambientais entre tipologias construtivas alternativas, e reconhecidamente sustentáveis, tendo a madeira como material característico.

1.2 QUESTÕES DO ESTUDO

1.2.1 Questão principal

Esse estudo como questão principal está interessado em responder ao seguinte questionamento: quais são os quantitativos das diversas categorias de impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida e aos materiais, gerados por diferentes modelos de tipologias de edificações em madeira, e sua comparação em relação à tipologia em alvenaria?

1.2.2 Questões secundárias

Qual a ferramenta de integração BIM-ACV de análise ambiental mais adequada para essa quantificação e comparação entre edificações em madeira para o contexto brasileiro, de maneira simplificada e rápida?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é a análise comparativa dos impactos ambientais entre tipologias construtivas em madeira por meio de ACV, com uso de ferramentas computacionais.

1.3.2 Objetivos específicos

- Como objetivos específicos, esse estudo pretende quantificar e comparar os impactos gerados por diferentes tipologias em madeira e entre tipologia em alvenaria.
- Desenvolver uma pesquisa multicritério para a escolha do plugin mais adequado para a integração BIM-ACV, considerando modelos em madeira, nível de automatização, bancos de dados e usabilidade da ferramenta.

- Simplificar e otimizar o processo de Avaliação de Ciclo de Vida em edificações através da integração ACV-BIM.

1.4 JUSTIFICATIVAS

1.4.1 Justificativa ambiental

O aquecimento global já é uma realidade, e a necessidade de diminuí-lo é cada vez mais urgente, devido a isso, são discutidos no mundo todo ações para reduzir os níveis de emissões dos gases causadores do efeito estufa. E um dos responsáveis por esse aquecimento é a construção civil, que propaga emissões de dióxido de carbono em todo seu ciclo de vida.

A geração de impactos ambientais através da emissão de gases do efeito estufa, dos quais o dióxido de carbono (CO₂) corresponde a 55% das emissões mundiais, se deve principalmente às atividades relacionadas ao setor da construção civil durante as variadas fases do ciclo de vida das edificações (PIVA, 2019).

Então a escolha do tema se justifica, em relação às questões ambientais, pela importância da sustentabilidade relacionada ao setor construtivo e o uso de processos e materiais menos poluentes, como a madeira, já que as florestas desempenham um papel importante retirando o carbono da atmosfera, e o retêm em grande quantidade na madeira. Ao utilizar esse material para fins construtivos, o carbono permanece estocado, impedindo que seja liberado para a atmosfera, na forma de CO₂ e outros gases. (FOGGIATO, 2021).

Já é sabido da sustentabilidade do uso da madeira em processos construtivos, devido seus reduzidos índices de emissões de CO₂, ainda sim, esses devem ser quantificados, comparados e analisados em diferentes processos, e para essa análise a ACV é uma alternativa viável. Consequentemente, quantificar os índices de energia embutida e emissão de CO₂ em diferentes processos construtivos em madeira pode auxiliar na tomada de decisões ainda na fase de projeto para a escolha de processos e materiais mais ambientalmente adequados (LIMA; SILVA, 2021), e propor uma arquitetura que utilize materiais renováveis, como é o caso do uso da madeira, são diretrizes importantes para a promoção de construções mais sustentáveis.

1.4.2 Justificativas técnicas

O estudo considera três justificativas técnicas integradas. A primeira é a própria Avaliação do Ciclo de Vida como uma técnica, quando a ISO 14040 (ABNT, 2009a) refere-se à ACV como uma técnica que contribui para avaliação e interpretação dos impactos ambientais relacionados aos objetivos do estudo, através do levantamento e compilação de entradas (matérias-primas), etapas de produção, consumo e saídas (disposição final) de um sistema de

produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Atualmente é imprescindível o desenvolvimento de métodos para avaliar os impactos ambientais causados pela indústria da construção civil através do conceito da ACV com o auxílio de novas tecnologias. Ao utilizar ferramentas BIM é possível acessar conjuntos de informações necessárias para a análise de parte do ciclo de vida de uma edificação, o que possibilita o cálculo e avaliação instantânea dos resultados, em comparação com cálculos manuais.

Avaliação de Ciclo de Vida apresenta um método sistemático para a identificação do desempenho ambiental, com a dificuldade, porém, de ser necessária a compilação e avaliação de uma quantidade relativamente grande de dados, tornando o trabalho complexo e demorado. Portanto, a recente busca pela integração desses dois assuntos ACV-BIM aparece como uma alternativa viável para garantir que profissionais tenham acesso a informações importantes e possam, assim, tomar decisões melhores, baseadas em dados providos por sistemas computacionais (DE LIMA; SILVA, 2021). O estudo baseado nos métodos da ACV, auxiliados por ferramentas BIM, evoluindo para integração com ferramentas de análise ambiental, é então mais uma justificativa técnica, ou nesse caso, tecnológica.

E a terceira parte integrante da justificativa técnica está na escolha das técnicas construtivas. Sistemas baseados em madeira foram promovidos à construção sustentável, paralelamente, são esperadas aplicações tecnológicas para elevar o ambiente construído a um novo nível de eficiência energética e de recursos (ROVARIS, 2019). Dentre estas inovações destacam-se as técnicas construtivas predominantemente industrializadas, racionalizadas e padronizadas. Enquanto em alguns países assiste-se a um renascimento da utilização da madeira no setor da construção, com o aparecimento de uma enorme variedade de soluções construtivas com um baixo consumo de energia para sua transformação (BRANCO, 2013). Nesse contexto, processos engenheirados e de pré-fabricação em madeira foram escolhidos em virtude de características como a utilização de técnicas e materiais industrializados que proporcionam racionalização, redução de resíduos e agilidade da produção em fábrica e/ou no canteiro de obras (SOTSEK; SANTOS, 2018). Além desse estudo ser um incentivo à aplicação destes sistemas no Brasil para tentar minimizar o preconceito popular equivocado referente a aplicação da madeira na edificação. Pois, mesmo tendo vantagens enquanto material resistente e sustentável, a madeira no Brasil, tradicionalmente está associada com construções de baixa qualidade (ALMEIDA et al., 2021).

1.4.3 Justificativa social e econômica

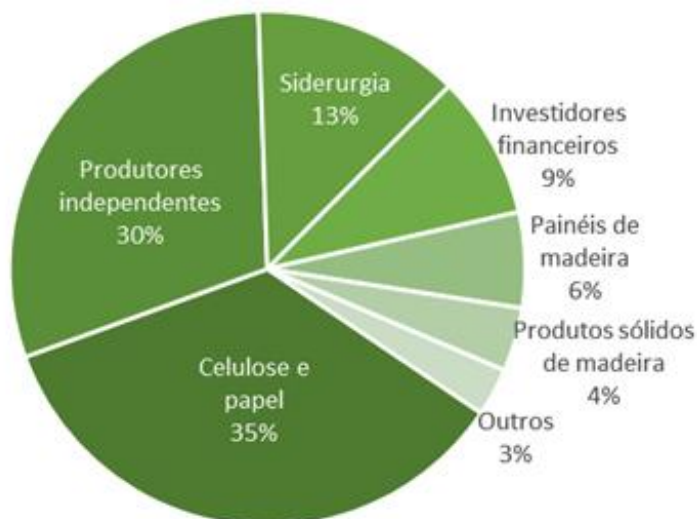
A construção civil representa um dos setores mais importantes para a economia dos países, sendo sinalizador do crescimento social e econômico. Assim como no mundo, o setor da construção civil também se apresenta como ator importante no cenário econômico brasileiro (EVANGELISTA, 2017). Os números indicam o potencial do mercado de trabalho da Construção. Segundo dados do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados - CAGED (2021) divulgados pelo Ministério da Economia: 10% dos trabalhadores brasileiros são empregados da construção civil, 9% de todos os tributos são gerados pelo setor, 7% do PIB Nacional é oriundo da construção civil.

Por outro lado, mesmo com esses números superlativos do setor da construção civil, a ONU alerta que a população mundial em 2100 alcançará 11,2 bilhões de pessoas (UNITED STATES, 2015), ocasionando aumento na demanda de habitações. De acordo com uma pesquisa da Fundação João Pinheiro (2019), o déficit habitacional em todo o Brasil foi de 5,8 milhões de moradias, das quais 79% concentraram-se em famílias de baixa renda. Hoje, o déficit habitacional é o que compõe uma das mais graves mazelas da sociedade brasileira e um dos desafios mais importantes do desenvolvimento urbano, que é justamente oferecer moradias de baixo custo para famílias de baixa e média renda. E uma das alternativas que poderiam contribuir para tentar mitigar o déficit habitacional com moradias de baixo custo seria o uso de sistemas construtivos em madeira.

O setor da indústria madeireira é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde. Apesar disso, apenas uma pequena parcela da produção madeireira é destinada ao setor da construção civil, ainda que esse seja capaz de agregar maior valor aos produtos que tem a madeira como matéria prima. (MAIDEL, 2020). O segmento de florestas plantadas apresenta elevado impacto social e econômico para o Brasil. No entanto, conforme destaca Moreira, Simoni e Oliveira (2017), no cenário nacional ainda é pouco explorado o potencial do setor madeireiro. Isto sem que haja prejuízo nas áreas produtivas ou ainda nas áreas de preservação, o que poderia representar um investimento atrativo tanto para investidores como para a conservação das florestas. Moreira, Simoni e Oliveira (2017) ainda destacam que a atividade apresenta alto potencial de expansão, com geração de renda e emprego, principalmente ao longo da sua cadeia produtiva de transformação da madeira. Acrescente-se o fato de que é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde. Apesar disso, apenas uma pequena parcela da produção madeireira é destinada ao setor da construção civil, conforme pode ser

observado pela Figura 1.1, ainda que esse seja capaz de agregar maior valor aos produtos que tem a madeira como matéria prima (MAIDEL, 2020).

Figura 1.1 – Composição da área de árvores plantadas por seguimento no Brasil.



Fonte: Associação da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2018).

Construções em madeira podem ser uma oportunidade para conectar a comunidade urbana a recursos provenientes do meio rural, por meio da criação de moradias verdes e auxiliando na restauração florestal (DOVETAIL PARTNERS, 2016). Assim, no meio rural, as atividades ligadas à produção e à comercialização de madeira apresentam importante fatia do PIB nacional, sendo que, segundo dados do relatório anual da Associação da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017), a área de reflorestamento atingiu 7,84 milhões de hectares, sendo o setor brasileiro de árvores plantadas responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB industrial no país.

Araújo et al. (2016a) abordam o uso da pré-fabricação para sistemas construtivos em madeira e seu potencial para a construção de habitações de interesse social. Para os autores, a adoção desta tecnologia por parte dos governos de países da América Latina permitiria a expansão do mercado para esse tipo de sistema construtivo. As empresas da cadeia de produção de madeira, ou seja, os fabricantes e fornecedores de matérias-primas também seriam beneficiados. Além da vantagem econômica da utilização de novos sistemas construtivos em madeira, que ocasionam uma redução de aproximadamente 80% no tempo de execução, diminuição no desperdício de material e redução de quase 50% dos custos de produção das habitações de interesse social, do governo brasileiro (ARAÚJO *et al.*, 2016a). Então é justificado que sistemas construtivos em madeira são fundamentais na promoção de uma

habitação acessível, pois permitem produzir moradias a preços mais baixos, com segurança e sustentabilidade, contrapondo o preconceito popular equivocado referente às habitações em madeira (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Outra justificativa econômica para o estudo é o próprio desenvolvimento da Avaliação do Ciclo de Vida com uso de ferramentas computacionais BIM e de ACV, de forma integrada e automatizada, reduzindo assim, o tempo de levantamento de dados para inventário e de execução dos projetos, consequentemente uma redução de custos. A Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC (2016b) define o BIM como uma das mais importantes inovações gerenciais dos últimos anos, que se trata de um novo paradigma para a indústria da construção civil, auxiliando diretamente no aumento da produtividade e, por consequência, no desenvolvimento econômico do país.

1.4.4 Contextualização no Programa

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará tem como objetivo principal contribuir com o desenvolvimento sustentável e a preservação ambiental da Região Amazônica, além de desenvolver e incentivar a produção científica, proporcionando o aprofundamento de estudos tecnológicos e o aprimoramento de profissionais de nível superior no campo da Engenharia Civil, e em especial no que se refere a melhoria da infraestrutura regional. Com isso, gradativamente, o programa está se constituindo na principal referência, sobre questões específicas da Amazônia, dentro da sua área de atuação (PPGECC, 2021).

Este trabalho encontra-se na linha de pesquisa de sustentabilidade no ambiente construído, e busca explorar cenários dos impactos ambientais causado por tipologias construtivas em madeira. E o enfoque desta linha de pesquisa envolve estudos avançados relativos aos materiais da Engenharia Civil e da Construção, com ênfase em assuntos relacionados aos problemas de sustentabilidade e tecnologias, necessária ao desenvolvimento da Região Norte.

Neste contexto, este estudo está inserido dentro da temática da Avaliação de Ciclo de Vida de edificações em madeiras por meio do uso de ferramentas computacionais, no entanto, o que este estudo apresenta de inédito dentro do programa é o uso da integração entre ferramentas BIM e de análise ambiental, em diferentes tipologias construtivas sustentáveis, tendo como material predominante a madeira, aplicada em edificações residenciais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo é destinado a fundamentação teórica acerca das abordagens da integração entre ACV e BIM para quantificação de impactos ambientais. O estudo tem como base as últimas e mais abrangentes Revisões Sistemáticas de Literatura (RSL) e compilações de estudo de caso de aplicações de ferramentas de integração ACV-BIM, considerando tipologias construtivas pré-fabricadas, e tendo a madeira como material predominante.

A literatura tem mostrado a crescente utilização do BIM, devido ao seu potencial para armazenar informações necessárias para a avaliação ambiental dos edifícios. Zimmermann, Bruhn e Birgisdóttir (2021) afirmam que o método comum e padronizado de quantificar os impactos ambientais é pela ACV e que grandes potenciais de eficiência estão associados ao uso de dados de modelos de informação de construção (BIM) para a ACV, mas o desenvolvimento ainda está em estágio inicial. Dalla Mora *et al.* (2020) fazem ressalvas, dizendo que a integração BIM certamente simplifica e facilita a execução, no entanto, deve ser aprimorada para obter resultados mais confiáveis e comparáveis aos obtidos por software dedicado para ACV. Do ponto de vista da ferramenta, a interoperabilidade entre programas BIM e programas de ACV requer melhorias. E quanto aos estudos de caso, Varela *et al.* (2021) realizaram uma compilação para verificar se houveram avanços nas pesquisas sobre integração de BIM-ACV, para verificar as lacunas, limitações para futuras pesquisas e as principais vantagens e desvantagens da integração destas ferramentas. E concluíram que a maioria dos artigos analisados faz menção ao uso da interoperabilidade como uma oportunidade de melhorias no processo da integração do BIM com a ACV.

Wastiels e Decuypere (2019) dividem a integração BIM-ACV em cinco tipos, e Obrecht *et al.* (2020) complementam dividindo com base no grau de automatização. Caldas, Carvalho e Filho (2020) observaram que a maioria ainda é feita manualmente, onde são necessários profissionais de ACV para manipular adequadamente os dados, daí a necessidade de se criar um ambiente automatizado para troca de informações entre BIM e ACV. Obrecht *et al.* (2020) também observam que num estágio mais avançado está a integração conhecida como “one click”, onde a troca de dados é automatizada, e é aplicada com mais frequência através de plugins de ACV, e que esse tipo de integração já é o segundo mais utilizado. Jalaei *et al.* (2021) identificam alguns dos principais problemas que impedem uma aplicação generalizada de plugins, e apontam um caminho: um link automatizado entre ACV e BIM.

Crippa (2019) mostra a necessidade de desenvolver processos automatizados para ACV de edifícios durante a fase de desenvolvimento do projeto. Também reconhecem que a utilização de programas ou plugins que tenham relação direta com o software BIM pode

economizar tempo e auxiliar na escolha da melhor solução, de forma mais assertiva, e que a maioria dos métodos apresentados envolve mais de uma ferramenta, que se complementam para realizar a análise ambiental. Caldas *et al.* (2020) verificaram que a produção do projeto em um único software de arquitetura BIM com plugins específicos de ACV, tende a ser a solução mais simples, no entanto, a qualidade do produto final da ACV pode ser comprometida. No mercado existem diversas ferramentas computacionais de apoio para a realização da ACV, seja para fins genéricos ou outras específicas para a indústria da Arquitetura, Engenharia & Construção (AEC) (BUENO; FABRICIO, 2018), no entanto, uma limitação comum dessas ferramentas é a existência de um banco de dados restrito à realidade que foram criados.

Varela *et al.* (2021) reconhecem que ACV e BIM são ferramentas essenciais para o desenvolvimento sustentável, porém, limitações quanto à operabilidade e compatibilidades dos sistemas devem ser superadas. E sugerem que futuros estudos contemplem a sistematização do fluxo de trabalho para organização das informações, avaliem a interoperabilidade entre os softwares BIM e ACV e a adequação das bases de dados existentes com a regionalidade. Zimmermann, Bruhn e Birgisdóttir (2021) complementam observando que existem poucos estudos sobre o uso prático da integração BIM–ACV.

2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) DE EDIFICAÇÕES

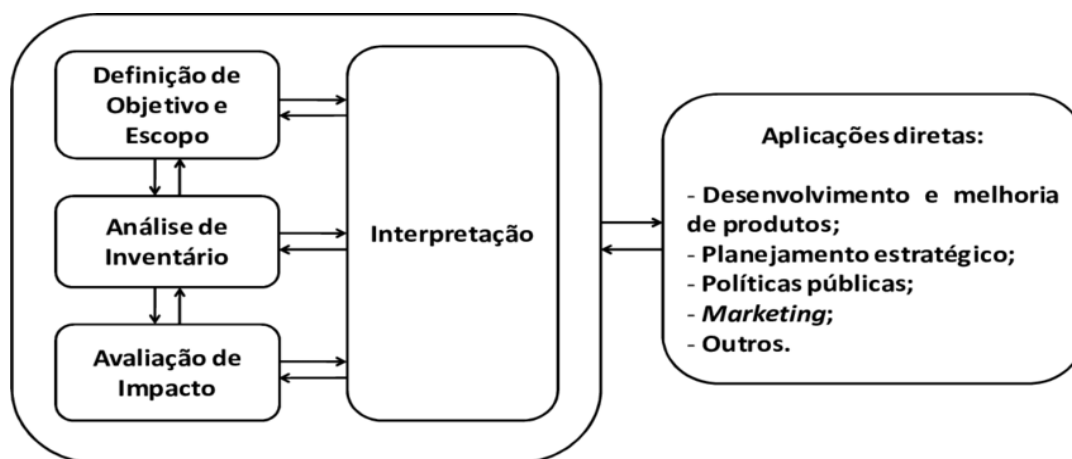
Comumente utilizada pelo mundo e com aplicação relativamente recente nos projetos brasileiros, a ACV é uma ferramenta de gestão ambiental estratégica, que permite demonstrar os impactos ambientais das edificações (SANTOS; AGUIRRE; CANALLI, 2016), englobando e avaliando os potenciais danos que determinado produto pode acarretar ao ecossistema durante todo o seu ciclo de vida (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018), incluindo nessa análise as etapas de produção, uso/operação, demolição e disposição final.

A Avaliação do Ciclo de Vida tem sido bastante difundida no meio acadêmico e em alguns setores industriais, e na indústria da Arquitetura, Engenharia & Construção (AEC). A tarefa de quantificar o impacto ambiental incorporado dos materiais de construção envolve a realização de uma ACV, uma prática relativamente nova e ainda confusa para muitos arquitetos e engenheiros. Ela permite analisar e comparar os impactos ambientais gerados por sistemas diferentes, mas que possuem funções similares, permitindo, sob a ótica ambiental, a comparação entre si, através de inventários do fluxo de matéria e energia desses sistemas.

Segundo as normas NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 (2009b) um estudo de ACV deve ser composto por quatro fases principais: Definição de objetivo e escopo, Análise

de inventário, Avaliação de impactos e Interpretação. Ver na Figura 2.1 a estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Figura 2.1 – Fases de uma ACV.



Fonte: ISO (2006) e ABNT (2009).

2.1.1 Objetivo e Escopo

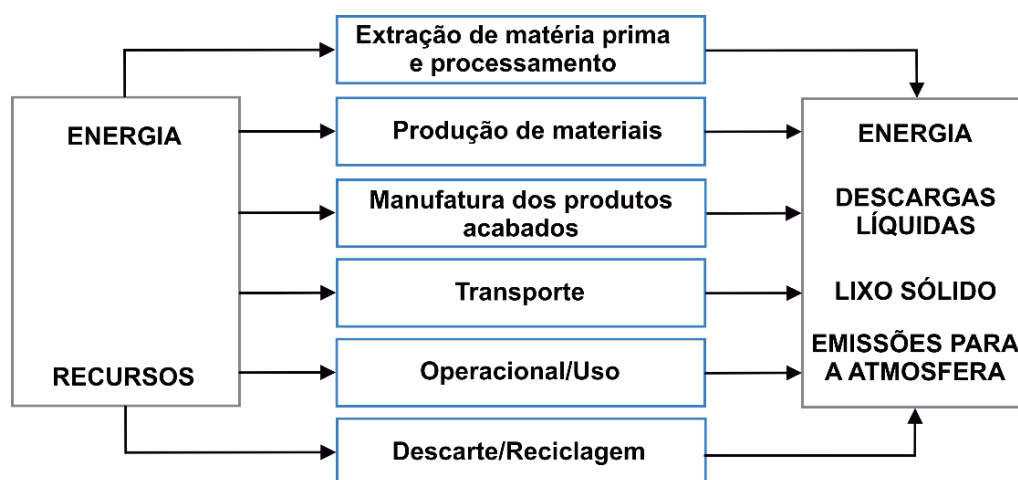
A primeira fase da Avaliação do Ciclo de vida é a definição do objetivo e escopo e deve conter os seguintes elementos: objetivo, escopo, unidade funcional, limites do sistema e qualidade dos dados. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular. (BUENO; ROSSIGNOLO, 2016). A fase de definição do objetivo e escopo refere-se ao processo onde são estipulados os objetivos, limitações e restrições do estudo, na qual se estabelecem algumas definições como: a identificação dos limites do sistema, especificando-se, por exemplo, se o estudo englobará o completo tempo de vida do produto ou se será avaliada somente a fase de produção ou uso; unidade funcional; qualidade de dados; e outros limites (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009). O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo.

A delimitação das fronteiras do sistema especifica quais etapas serão analisadas, ou seja, se esse sistema será avaliado do berço (extração de matérias-primas) ao túmulo (demolição), podendo englobar ainda os processos de produção, distribuição, utilização e reparação eventual (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). A unidade funcional trata dos parâmetros, aos quais todas as entradas e saídas estão relacionadas. Se referindo à construção civil, há diversas possibilidades de definição da unidade funcional que podem ser consideradas, como por exemplo: m², m³, número de ocupantes, entre outros.

2.1.2 Análise de Inventário

Quanto a fase de análise de inventário, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) estabelece diversas etapas, sendo elas: coleta de dados; cálculo de dados (que envolve a validação dos dados coletados, relacionando-os aos processos unitários e à unidade funcional) e procedimentos de alocação no caso de estudos que envolvem sistemas com múltiplos produtos. Segundo Rinkevicius, Morales e Teribele (2021) a escolha dos dados mais apropriados é crítica, pois a qualidade das fontes é de demasiada importância para garantir a correção dos resultados, bem como, em alguns casos, determinar o nível de qualidade do estudo. Em casos de edifícios com produtos complexos, esta etapa se torna mais demorada, pois a coleta de dados inclui todos os dados relacionados a insumo-produto de energia e fluxo de massa e emissões de gases na atmosfera, tais como: obtenção das matérias-primas, fabricação do produto, transporte, uso e descarte (SANTOS *et al.*, 2011). A Figura 2.2 abaixo mostra a representação gráfica da análise de inventário.

Figura 2.2 - Diagrama da análise de inventário.



Fonte: O autor, adaptado de Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice (AIA, 2010).

2.1.3 Avaliação de Impacto

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) utiliza-se dos resultados obtidos na etapa de análise do inventário, e a partir desses dados, avalia a significância dos potenciais impactos ambientais, por meio de modelo e fatores contidos nos métodos de ACV. É neste processo que se envolve a associação de dados do inventário com impactos ambientais específicos e tenta-se compreender estes impactos. Os níveis de detalhe, a escolha dos impactos e as metodologias utilizadas fazem referência às definições propostas no objetivo e no escopo do estudo (SANTOS; AGUIRRE; CANALLI, 2016).

O nível de avaliação midpoint está localizado ao longo do resultado do inventário, antes de chegar ao ponto final, possuindo menor nível de incerteza, enquanto que o nível de avaliação de impacto endpoint possui maior incerteza, apesar de costumeiramente ser mais fácil de entender e interpretar que indicadores do tipo midpoint, por referir-se a um dano específico (MENDES, 2013).

Conforme Mendes, Bueno e Ometto (2016), há diversos métodos de AICV desenvolvidos em sua maioria na Europa e utilizados ao redor do globo, inclusive no Brasil. Cada um desses métodos avalia diferentes categorias de impacto por meio de uma série de modelos de caracterização. Existem dois níveis de avaliação do impacto: Midpoint e Endpoint. Dentre os métodos mais comumente utilizados para avaliar produtos da construção civil podem ser citados: Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Potencial de Eutrofização, Potencial de Destruição de Ozônio, Potencial de Formação de Poluição Atmosférica, Energia Primária (Renovável ou Não-renovável). E nesse estudo considerou-se também o Carbono Incorporado, no caso da madeira, chamado de Carbono Biogênico.

2.1.4 Etapas da ACV para edificações, segundo a EN 15978

O ciclo de vida de uma edificação pode ser dividido em quatro principais etapas (Quadro 2.1). As etapas da ACV de uma edificação, segundo EN 15978 de 2011, são divididas em: Etapa do produto (Módulos A1 ao A3); Etapa de construção (Módulos A4 ao A5); Etapa de uso (Módulos B1 ao B7); Etapa de fim de vida (Módulos C1 ao C4) e Módulo D (opcional) (CEN, 2011).

Quadro 2.1 - Etapas da avaliação ambiental de edificações conforme definido pela EN 15978.

A1. Extração da matéria prima A2. Transporte A3. Fabricação	A4. Transporte da fábrica ao canteiro A5. Construção e instalação do sistema	B1. Uso B2. Manutenção B3. Reparo B4. Substituição B5. Remodelação B6. Energia operacional B7. Água operacional	C1. Demolição C2. Transporte C3. Processamento dos resíduos C4. Disposição (final) D. Reuso, recuperação e potencial de reciclagem
---	---	---	--

Fonte: O autor, baseado em EN 15978: 2011 (2021).

Segundo a EN 15978 (2011) a etapa de produto (A1-A3) abrange toda a fase de fabricação, incluindo a extração de matéria-prima, processamento de materiais, transporte intermediário, fabricação e montagem final. Nesta etapa se exclui as infraestruturas (edifícios e máquinas) necessárias para fabricação e montagem de materiais de construção

(RINKEVICIUS; MORALES; TERIBELE, 2021). O módulo A4 corresponde ao transporte do fabricante até o local da obra, durante a fase de construção da edificação.

O módulo A5 inclui os processos de instalação do edifício, englobando as etapas de terraplanagem e paisagismo, instalações provisórias, transporte dentro do canteiro e a água consumida para limpeza do local ou abastecimento de máquinas. Já a etapa de uso (B1-B5) abrange a manutenção, reparo, substituição e remodelação de elementos.

Os módulos B6 e B7 incorporam a energia, consumo de gás natural e consumo de água previsto no local da construção durante a vida útil da mesma. A etapa de fim de vida corresponde a demolição da edificação, transporte de resíduos da construção para o tratamento de fim de vida, processamento e eliminação de resíduos, disposição final em aterros sanitários e possível recuperação ou reciclagem de materiais (CEN, 2011).

2.2 ACV-BIM

Atualmente é imprescindível o desenvolvimento de métodos para avaliar os impactos ambientais causados pela indústria da construção civil através do conceito da ACV com o auxílio de novas tecnologias, e uma dessas tecnologias é o BIM. Um conjunto de processos e métodos aplicados na concepção da ideia do produto, no desenvolvimento do projeto, na construção, no uso, na operação e na manutenção do empreendimento. Pode ser utilizado para a sustentabilidade do projeto, redução de custos e retrabalho em todas as etapas, viabilização do cumprimento de prazos, além de permitir a criação e o ensaio de cenários variados, dentre outras soluções (FREITAS, 2020). Essa ampla quantidade de possibilidades representa uma revolução no seguimento, em que a plataforma BIM já é considerada padrão global e é essencial que seja absorvida pelos agentes da cadeia produtiva da Construção Civil, visando o aumento de produtividade do setor. (CBIC, 2017a).

Ao utilizar ferramentas BIM é possível acessar conjuntos de informações necessárias para a análise de parte do ciclo de vida de uma edificação, o que possibilita o cálculo e avaliação instantânea dos resultados, em comparação com cálculos manuais. O modelo BIM contém as informações sobre a quantidade e qualidade dos materiais, que são insumos importantes para o cálculo dos impactos ambientais incorporados (HOXHA *et al*, 2020).

Avaliação de Ciclo de Vida apresenta um método sistemático para a identificação do desempenho ambiental, com a dificuldade, porém, de ser necessária a compilação e avaliação de uma quantidade relativamente grande de dados e informações, tornando o trabalho complexo e demorado. Portanto, a recente busca pela integração desses dois assuntos ACV-BIM aparece como uma alternativa viável para garantir que profissionais tenham acesso a informações

importantes e possam, assim, tomar decisões melhores, baseadas em dados providos por sistemas computacionais (DE LIMA; SILVA, 2021).

2.3 BUSCA SISTEMATIZADA PARA ACV-BIM

Com o intuito de investigar as práticas de uma integração de BIM–ACV na literatura para identificar lacunas, como a utilização na realidade amazônica, ainda com poucos estudos realizados dentro do contexto local (SEIXAS *et al.*, 2022), e avançar no desenvolvimento de uma integração automatizada de BIM–ACV, foram feitas pesquisas entre fevereiro de 2021 e julho de 2022, por meio de buscas sistematizadas, com o uso das palavras-chave “ACV ou LCA”, “BIM”, “plugin ou plug-in” e “Madeira ou wood”, em bases de dados digitais relevantes na área de AEC, sendo elas: SciELO, Periódico Capes, Web of Science e Google Acadêmico. Após uma RSL foram encontradas 2867 publicações. Excluindo as não relacionadas ao tema e com mais de 5 anos de publicação, restaram 251 trabalhos. Destes 251, apenas 15 são diretamente relacionados ao estudo de impacto ambiental através de ACV-BIM com uso de plugins, e esses foram lidos para a fundamentação dessa pesquisa. Além das referências em estudos de construções em madeira: Sotsek e Santos (2018), Zadeh *et al.* (2018), Guesser (2019); Lamb *et al.* (2020), Foggiato (2021) e Pelli (2021).

2.4 ESTADO DA ARTE

Crippa *et al.* (2020) observaram que o número de artigos que relacionam métodos de ACV utilizando BIM cresceu, comprovando que o tema atual é relevante, no entanto, por trás da falta de interoperabilidade, há uma falta de pesquisa e desenvolvimento na indústria de construção, onde raramente foi usado um software ou plugin de ACV adequado. O Quadro 2.2 abaixo apresenta como referência os 15 estudos de caso de maior relevância e correspondência com o presente estudo.

Quadro 2.2 – Resumo do Estado da Arte.

Referência	País	Plugin utilizado no estudo
Borges et al (2018)	Brasil	Green Building Studio e DesignBuilder
Bueno e Fabrício (2018)	Brasil	Tally
Nascimento e Caldas (2018)	Brasil	Tally
Santos, Silvestre e Pyl (2018)	Bélgica/ Portugal	Tally
Souza (2018)	Brasil	Tally
Martins (2018)	Portugal	One Click LCA
Najjar et al. (2019)	Brasil / Australia	Tally
Nilsen e Bohne, (2019)	Noruega	One Click LCA
Maidel (2020)	Brasil	Green Building Studio e Tally
Asare et al. (2020)	Inglaterra / EUA	Tally
Llave (2020)	Brasil	Tally e eToolLCD
Santos et al. (2020)	Bélgica / Portugal	Tally
Elamin (2020)	Itália	One Click LCA
Veselka et al. (2020)	República Checa	One Click LCA
Almezeraani (2021)	Eslovênia	One Click LCA

Fonte: O autor.

Os tipos de plugin para ACV, quanto a base de integração, a literatura divide de maneira geral em plugins que funcionam baseados diretamente na interface de um programa BIM, sem a necessidade de exportar arquivos para utilização em um programa externo, para realização da ACV (BUENO; FABRICIO, 2018). Outro tipo é o plugin baseado em nuvens ou redes (navegador web). E quanto ao nível de integração podem ser manuais, semiautomatizados ou totalmente automatizados.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O método científico aplicado à esta pesquisa é o indutivo, já que reúne partes isoladas da literatura dentro de um único conjunto, neste caso, de modo a reunir informações acerca do impacto ambiental comparativo entre edificações em madeira, apresentando como foco da proposta um fenômeno contemporâneo. Esta pesquisa é de natureza aplicada, uma vez que aplica conhecimentos e permite auxiliar profissionais, no entanto, a pesquisa tem objetivo exploratório, uma vez que o campo de estudo relacionado ao tema abordado ainda carece da criação de conhecimento técnico-científico, para que assim se possa compreender melhor um determinado problema.

A estratégia de pesquisa é um estudo comparativo, uma vez que avalia modelos de projeto construtivo em BIM, com diferentes técnicas e materiais a partir de critérios ambientais similares. Portanto, esta pesquisa pode ser caracterizada como de abordagem quantitativa, sendo que, a partir de modelos em BIM serão feitas as Avaliações de Ciclo de Vida para a produção dos materiais e seus usos aplicados às habitações em madeira. O Quadro 3.1 abaixo mostra a classificação da pesquisa.

Quadro 3.1 – Classificação da pesquisa.

MÉTODO CIENTÍFICO: Indutivo Dedutivo Hipotético-dedutivo Abduativo	NATUREZA: Aplicada Básica	OBJETIVO: Exploratória Descritiva Explicativa
ABORDAGEM: Qualitativa Quantitativa	TÉCNICA DE COLETA DE DADOS: Bibliográfica Documental Grupo focal Questionários Observação direta Entrevistas	PROCEDIMENTO TÉCNICO: Estudo de caso Pesquisa-Ação Survey Modelagem Design Science Research

Fonte: O autor, baseado em Maidel (2020).

3.1 DELINEAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA

Na primeira etapa do delineamento do método de pesquisa, partindo da busca sistematizada na literatura, foram identificadas algumas lacunas do conhecimento no referencial teórico. Entre essas lacunas estão a carência de estudos ambientais comparativos entre tipologias alternativas, e reconhecidamente sustentáveis, tendo a madeira como material

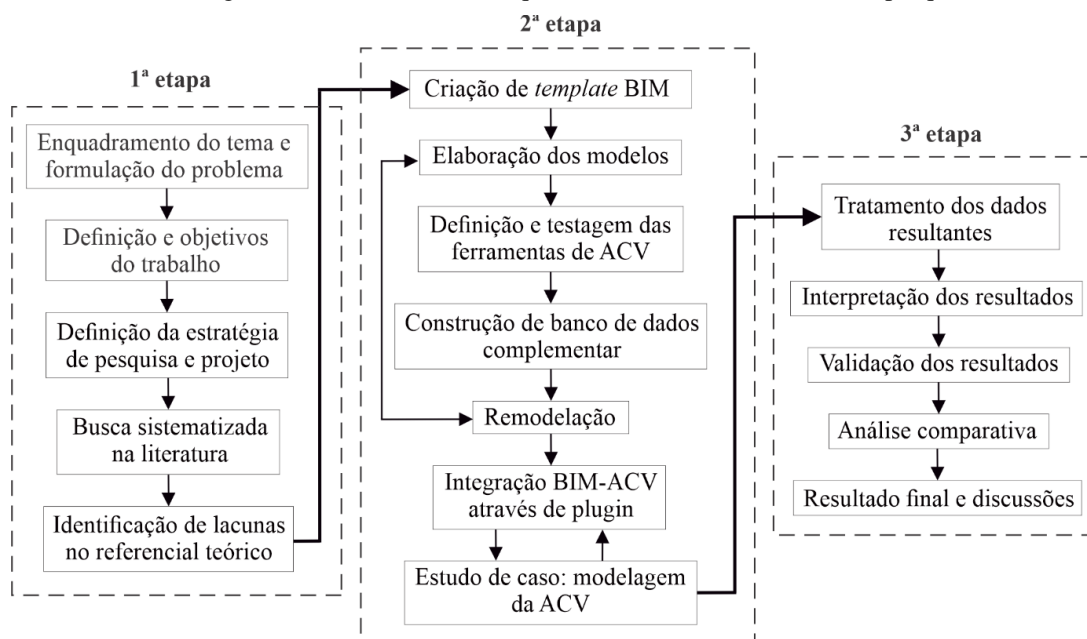
característico. Outra lacuna é a possibilidade de avanço na integração BIM-ACV, de maneira direta, simplificando e agilizando o processo de análise de ciclo de vida, além das limitações dos bancos de dados.

Iniciando a segunda etapa (prática) do delineamento, houve a necessidade de criação de um *template* BIM no programa Revit, específico para modelagens de edificações em madeira. No *template* foram criados previamente os elementos construtivos, com dimensionamentos padronizados e parametrizações intrínsecas a cada elemento, facilitando assim, o processo de modelagem. Então, a partir do *template* foram modeladas quatro tipologias construtivas, três em madeira e uma em alvenaria, para referência comparativa.

Concluída a elaboração dos modelos, foi necessário desenvolver um método de análise de critérios, baseado em pesquisa bibliográfica, para a escolha das ferramentas de ACV. Dos 15 programas previamente selecionados, que possuem potencial de avaliação de ciclo de vida através de BIM, os três melhores ranqueados foram testados. Após a experimentação e construção do banco de dados complementar, foi necessário retornar à fase de modelagem, pois alguns elementos não ficaram adequadas para a análise correta dos programas. Depois das correções os modelos BIM foram integrados com uso de plugins aos programas de ACV para análise, sendo que nesta fase é provável que haja um fluxo intermitente de reintegração BIM-ACV, até a correta análise dos modelos, a depender das definições mais ajustadas de banco de dados e outras informações complementares.

Na terceira etapa, relacionada aos resultados, pode haver a necessidade de tratamento dos dados resultantes, como traduções, melhoramentos gráficos ou de planilhas. Após os tratamentos haverá a interpretação dos dados e suas validações através de análise comparativa ou *benchmarks*, chegando assim, aos resultados finais das análises e as devidas discussões acerca dos impactos ambientais gerados pelos modelos. A Figura 3.1 abaixo mostra o esquema do delineamento do método de pesquisa.

Figura 3.1 – Delineamento esquemático do método utilizado na pesquisa.



Fonte: O autor.

3.2 MÉTODO DE SELEÇÃO DAS FERRAMENTAS BIM E DE ACV

Nesta abordagem, diversos programas foram pesquisados, e alguns utilizados para o cálculo dos impactos, sempre desejando o máximo possível de automatização na integração entre BIM e ACV, ou seja, a extração automática das informações do modelo BIM. As características desejadas em tais programas são:

- Os dados para ICV devem ser retirados automaticamente do modelo BIM;
- Deve apresentar fácil usabilidade;
- Avaliação em tempo real (comparação entre alternativas de modelos);
- Deve ser possível avaliar todo o edifício, com resultados detalhados e específicos;
- Integração entre a informação no modelo BIM e nos bancos de dados de ACV.

Outro diferencial nesse estudo é a abordagem adotada para a integração das ferramentas BIM e ACV. Uma abordagem que permita resultados rápidos e que possam ser usadas nos estágios iniciais do projeto para identificar os impactos importantes. E essa abordagem pode se dar através do uso de programas específicos para ACV utilizados como plugins, que através dos dados dos materiais já calculam automaticamente seus volumes e áreas e utilizam bancos de dados de inventário para calcular os impactos ambientais. Sendo necessário verificar apenas se cada elemento está alocado com seus materiais correspondentes. Todavia, no Brasil ainda existe a limitação do banco de dados de inventário incipiente, que na maioria dos casos usa

dados genéricos, e em sua maioria, utilizam métodos de AICV não regionalizados para o contexto brasileiro. Daí o criterioso estudo para a escolha do programa mais adequado.

Para o desenvolvimento da modelagem arquitetônica 3D utilizou-se o programa Autodesk Revit 2021 como ferramenta de apoio, por ser um software BIM dos mais utilizados por profissionais da construção e um dos mais utilizados para modelagem BIM (QUEIRÓZ, 2016; CRIPPA *et al*, 2017; LARIVOIR, 2017). Uma plataforma que suporta projeto, desenhos e documentação necessários para a modelagem de informações de construção, sendo a ferramenta BIM predominante para integração com ferramentas de ACV (HOXHA *et al*, 2020). Birgisdóttir, Bruhn e Zimmermann (2021) concordam que nas etapas mais detalhadas, quase todas as empresas utilizam o Revit. Eles descrevem o Revit quase como um padrão da indústria ao modelar no estágio de design do projeto.

Considerando o estudo de Avaliação de Ciclo de Vida na área da construção, nesta etapa serão analisadas algumas ferramentas digitais de ACV, selecionadas segundo alguns requisitos gerais: que a ferramenta utilize estritamente o BIM como suporte para a análise; que a inserção de dados seja automatizada ou semiautomatizada; que não necessitem de outras ferramentas externas intermediárias para a integração BIM-ACV; que não necessitem de adaptações nos formatos de exportação, e que não sejam rotinas de programação.

Após a pesquisa bibliográfica das soluções BIM-ACV existentes e consequentemente o conhecimento das potencialidades das ferramentas digitais para auxiliar nesse estudo, foram considerados 9 programas que possuem potencial de avaliação de ciclo de vida através de BIM, e que fazem uso de plugin. Então, foi necessário elaborar um método de análise de critérios, baseado no método de Martins (2018) para auxiliar na tomada de decisões e selecionar os mais adequados para a integração entre o modelo BIM e a ACV. A seleção é regida por critérios fundamentais que o programa tem que obedecer, tais como:

- a) Integração com Autodesk Revit;
- b) Open source ou licença acadêmica gratuita;
- c) Impactos ambientais do berço ao túmulo;
- d) Plugin ou integração baseada em nuvem ou web;
- e) Base de dados de ACV Brasileira ou genérica.

Considerando as condições a serem cumpridas, analisou-se as soluções ou programas pesquisados para verificar se estes cumpriam ou não os critérios (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Análise dos plugins segundo os critérios selecionados.

SOLUÇÃO BIM - ACV	Integração com Autodesk Revit	Open source ou licença acadêmica gratuita	Impactos ambientais do berço ao túmulo	Base de dados brasileira ou genérica	Integração ou plugin baseado em nuvem ou <i>web</i>
Brightway2	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
Caala	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Design Builder	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
eToolLCD	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Green Building Studio	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM
Lesosai	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
SimulEICon	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
One Click LCA	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tally	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO

Fonte: O autor.

A cada critério foi convencionado um “peso”, levando em consideração o nível de importância dado pelo autor, por isso, foram atribuídos percentuais a cada critério de acordo com essa importância. A integração com o Autodesk Revit é fundamental, pois ele é o programa de modelagem BIM já anteriormente definido, e sem ele esse estudo torna-se impossível. Assim, foi creditado a este critério 30%, o maior peso percentual.

O segundo critério de maior importância é que o programa seja open source, ou que seja permitida uma licença gratuita para fins acadêmicos ou de pesquisa. Sendo atribuído um peso de 25%. Quanto aos Impactos ambientais que vão do berço ao túmulo foi atribuído um peso de 20%, pois a intenção desse estudo é fazer uma avaliação de ciclo de vida completa.

Convencionou-se uma importância de 15% aos programas que possuem banco de dados de ACV genéricos ou regionalizados, mais próximo possível do cenário brasileiro. E finalmente, considerou-se também importante que os programas ou plugins façam integração baseada em nuvem ou web, pois um dos objetivos desse estudo é simplificar e agilizar o processo de análise de ACV para edificações, com um percentual de 10%.

Com o objetivo de alcançar resultados finais em números percentuais, visando uma conclusão mais clara e consistente, foram atribuídos valores às respostas da tabela anterior. Em caso de negação atribuiu-se o valor “0” e em caso afirmativo o valor “1”. Posteriormente, ao

realizar a soma das multiplicações dos valores “0” e “1” atribuídos aos pesos de cada critério, obtêm-se os resultados finais percentuais de cada solução BIM-ACV, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Seleção dos plugins.

SOLUÇÃO BIM - ACV	Integração com Autodesk Revit	Open source ou licença acadêmica gratuita	Impactos ambientais do berço ao túmulo	Base de dados brasileira ou genérica	Integração ou plugin baseado em nuvem ou web	Totais
	30%	25%	20%	15%	10%	
1. eToolLCD	1	1	1	1	1	100%
2. One Click LCA	1	1	1	1	1	100%
3. Tally	1	1	1	0	0	75%
4. Brightway2	0	1	1	1	1	70%
5. GBS	1	1	0	0	1	65%
6. Caala	1	0	0	0	1	40%
7. Lesosai	1	0	0	0	1	40%
8. SimulEICon	1	0	0	0	0	30%
9. Design Builder	1	0	0	0	0	30%

Fonte: O autor.

Quanto ao resultado dos “pesos” dos critérios de seleção do programa de ACV para essa pesquisa, os dois primeiros ficaram empatados com percentuais máximos de 100%, já que cumpriram todos os critérios exigidos para o programa a ser escolhido. Então decidiu-se fazer o aprofundamento prático nos dois primeiros, os de maiores pesos percentuais, o eToolLCD e no One Click LCA. O objetivo da experimentação nos dois programas mais bem avaliados, partindo da aprendizagem até a geração de resultados, é a investigação comparativa de outras capacidades intrínsecas a cada um, como a curva de aprendizagem, usabilidade, banco de dados, matrizes energéticas, adequação às normas e metodologias de cálculo. Além da melhor adequação e respostas do plugin para o presente estudo de caso.

3.3 TESTAGEM DOS PLUGINS PARA O ESTUDO DE CASO

Os dois programas mais bem ranqueados na avaliação multicritério fazem uso de plugins ou são baseados na web, características que contribuem com os objetivos desse estudo, que é desenvolver uma análise rápida e simplificada, mas também aproximada do contexto brasileiro, quanto aos impactos ambientais do edifício. Crippa (2019) também observa que utilizar plugins

ou software que possuem essa relação direta com uma ferramenta BIM pode economizar tempo e contribuir para escolha da melhor solução em uma maneira mais assertiva, e que o nível mais avançado na integração BIM-ACV é a utilização de plugins, executados dentro da própria ferramenta de modelagem BIM. Caldas, Carvalho e Filho (2020) complementam, quando dizem que à medida que os softwares de arquitetura em conjunto com os plugins de ACV vão sendo utilizados, diminui-se a necessidade de profissionais altamente especializados em ACV.

Após a experimentação nos plugins é apresentado aqui um comparativo entre os dois, analisando as potencialidades e deficiências de cada um. Considerando como características decisivas, a curva de aprendizagem, usabilidade, automatização, validade e adequação ao estudo em tipologias de madeira. Apoiado nessa análise qualitativa se definiu o plugin a ser utilizado no estudo de caso.

3.3.1 O plugin eToolLCD

Criado pela empresa australiana eToolGlobal, o eToolLCD é uma ferramenta baseada na web para estudos de ACV e custos que vem sendo desenvolvida desde 2009. Possui plugin que estende sua usabilidade ao programa Revit da Autodesk, fazendo assim uma integração em plataforma BIM. Com disponibilidade de licença grátis para estudantes ou pesquisadores. Para usuários de licença comercial e como forma de apoiar os melhoramentos no programa é necessário alcançar uma certificação através de uma revisão de terceira parte do projeto, pagando somente o que for necessário para cada projeto específico.

O eToolLCD é uma ferramenta com uso bastante adaptável, fazendo análise desde uma pequena edificação até a escala de infraestrutura urbana e em diferentes estágios do desenvolvimento do projeto. Sua base de dados é composta de inventário de ciclo de vida ou Declaração Ambiental de Produto (DAP), e segundo os próprios desenvolvedores do programa, permite utilizar diversas bases de dados.

A metodologia de AICV usada é personalizada, e segue as principais normas internacionais de ACV como ISO 14044, EN 15978 e EN15804, além de ser reconhecida pela ferramenta de classificação Green Star e certificada por esquemas de caracterização como o IMPACT, desenvolvido pelo BRE Group (LLAVE, 2020). A base de dados para o Brasil ainda está em desenvolvimento (em dezembro de 2021), tendo o Ecoinvent 3.6 (EN15804 +A2) como banco de dados padrão para o Brasil e regionalizado para América do Norte, mas sem indicar o período que pretende retratar.

O inventário de ciclo de vida eToolLCD consiste em processos de materiais (>200), equipamentos e maquinários, diversos modos de transporte, matrizes regionalizadas de energia

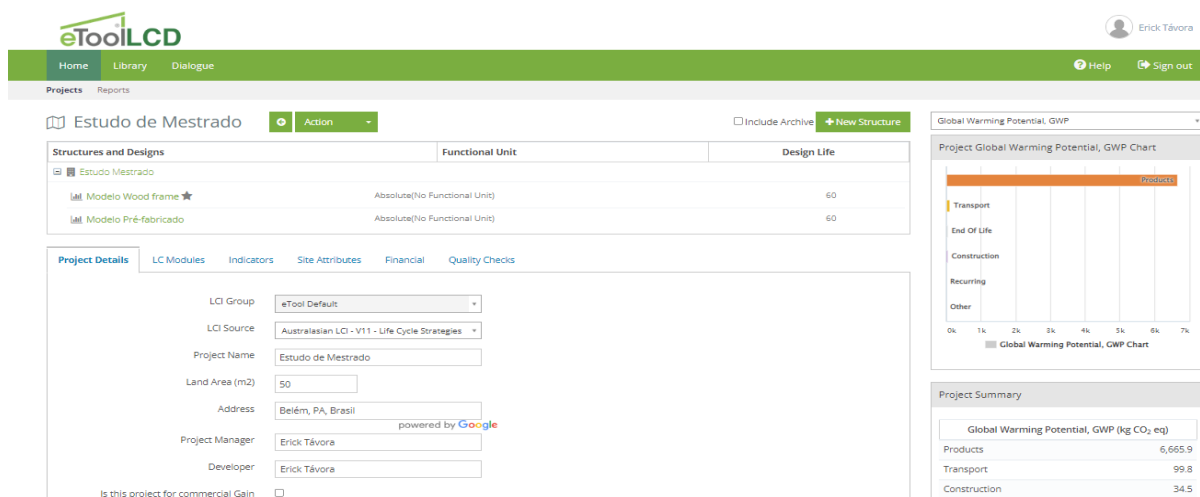
(eletricidade, gás, outras fontes) incluindo o Brasil, além de matrizes regionalizadas de fornecimento e tratamento de água. (ECOINVENT, 2021)

Se a avaliação ambiental for através do processo BIM com modelagem arquitetônica 3D em outro programa, a integração dos dados do projeto com o eToolLCD se dá de forma parcialmente integrada, pois os dados são extraídos do modelo BIM na interface do programa de modelagem Revit para o programa no navegador (web), e posteriormente é necessário associar os quantitativos de materiais importados do Revit às composições do banco de dados do eToolLCD, bem como indicar as unidades de medida. Uma particularidade a ser observada é que o eToolLCD só importa os dados do Autodesk Revit, se este estiver sido instalado no idioma inglês.

Inicialmente é preciso criar um projeto e seu escopo na página web no navegador, numa estrutura organizada em hierarquia, que vai da criação do “Projeto”, passando pela “Estrutura construtiva” até as opções de “Design de ACV”. Assim, o programa permite separar e comparar opções construtivas dentro de uma mesma estrutura, além da finalidade de cada ACV e vida útil do projeto.

Posteriormente fazem-se as configurações gerais como localização, área do terreno, módulos de ciclo de vida e categorias de impacto a considerar (Figura 3.2).

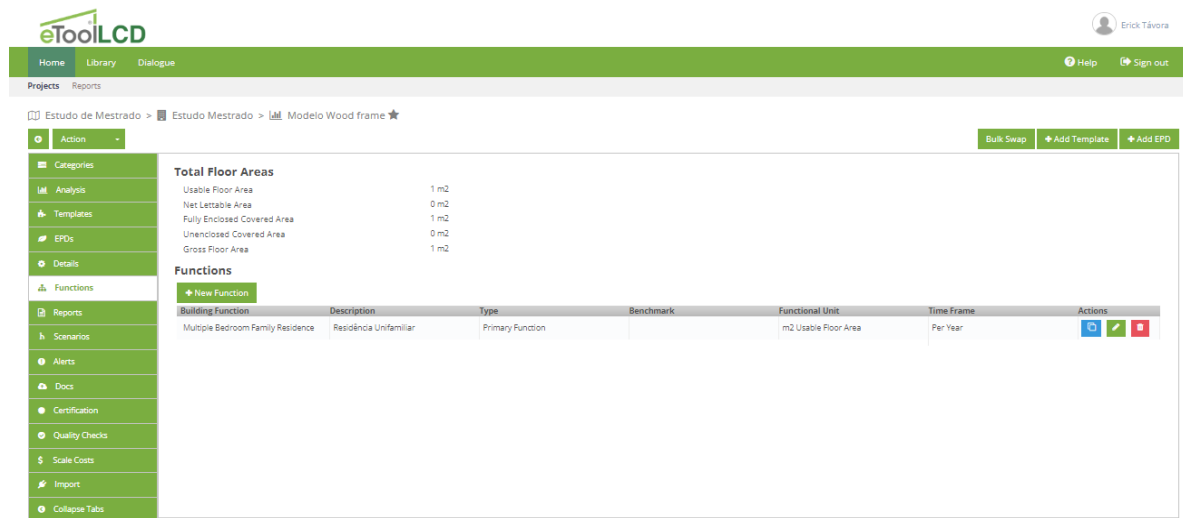
Figura 3.2 – Interface na web das configurações iniciais do programa eToolLCD.



Fonte: Extraído do eToolLCD (2021).

À esquerda da interface localiza-se a aba de navegação do projeto e no item “Funções” fazem-se as configurações de serviços, características, áreas de piso e unidades, como mostrado na Fig. 3.3.

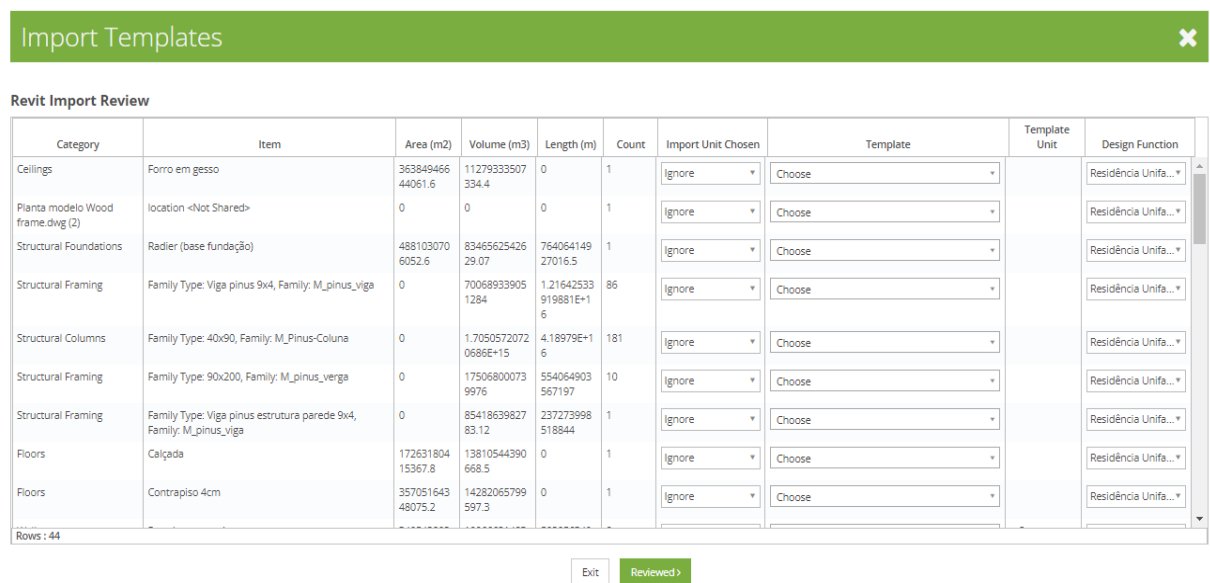
Figura 3.3 – Interface do eToolLCD com a aba de navegação nos projetos.



Fonte: Extraído do eToolLCD (2021).

Concluídas as configurações do projeto dentro da plataforma do navegador, retorna-se a interface do programa de modelagem (Revit) para fazer a associação dos modelos BIM às opções de designs do projeto, anteriormente criados no eToolLCD, através de vinculação (link) e exportação. Então os designs dos projetos serão alimentados com os materiais e seus respectivos quantitativos importados do Revit. Mas, observou-se que a divisão em camadas, realizada pelo Revit nos elementos construtivos foi desconsiderada pelo eToolLCD, só sendo permitido a associação em composições predefinidas, mostrado a seguir na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Interface de associação de materiais do eToolLCD.

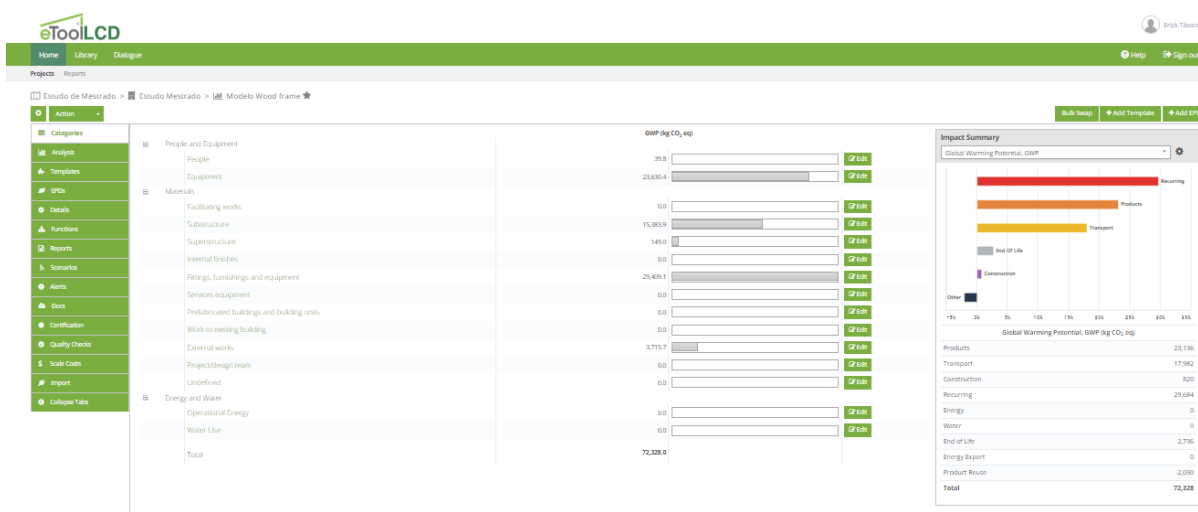


Fonte: Extraído do eToolLCD (2021).

Não é possível modificar os quantitativos referentes aos impactos ambientais dos materiais. No entanto, o eTool permite, limitadamente, editar os materiais de seu banco de dados, como suas densidades, espessuras e vida útil, assim como adicionar e remover materiais nos *templates* predefinidos.

Após configurar toda a integração e associar os materiais, o eToolLCD apresenta em interface web os resultados resumidos inerentes a cada estágio do ciclo de vida, tipo de insumo, equipamentos, materiais e seus sistemas construtivos, energia e água operacionais. Além das categorias de impacto escolhidas previamente, conforme mostra a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Interface do eToolLCD com o resumo dos resultados da ACV.



Fonte: Extraído de eToolLCD (2021).

Quanto ao conteúdo dos resultados do eToolLCD, além do relatório resumido em formato de planilha Excel, há muitas outras opções de relatórios detalhados de edifícios completos, com dados comparáveis de desempenho ambiental, com resultados compatíveis com as normas internacionais. Esses relatórios completos estão em formato PDF, com informações adequadas a cada finalidade de estudo. Gráficos com informações sobre a metodologia de cálculo, alguns parâmetros de análise da qualidade do estudo da ACV, *benchmarks*, listas de conferência da qualidade dos dados e interpretações acerca dos resultados.

3.3.2 O plugin One Click LCA

O One Click LCA é um programa de Avaliação de Ciclo de Vida e de Análise de Custos que vem sendo desenvolvido desde 2012 pela empresa finlandesa Bionova, que em 2021 mudou seu nome para One Click LCA. Utilizado para estudo por engenheiros, arquitetos, fabricantes e especialistas da construção sustentável. O programa permite o cálculo de ACV do berço ao

túmulo em edificações completas, com resultados imediatos. Devido a um processo de automação continuado o One Click permite a integração total com modelos BIM. O programa permite a integração de forma direta, na interface do Revit (plugin) ou no navegador web, além de permitir a importação de dados através dos formatos gbXML e planilhas do Excel.

O One Click LCA oferece diversos tipos de licenças, além das licenças comerciais. Há opções para estudantes, professores e pesquisadores. Na opção de licença para pesquisadores, pode se requerer licença especial para dissertações de mestrado ou teses, recebendo uma chave para ativação do projeto com duração de um ano, mediante preenchimento de relatório com as informações necessárias para o estudo específico. A licença especial de pesquisa é permitida apenas para projeto de edifícios, não sendo possível para produtos e processos. Serviços de suporte ao cliente e treinamentos remotos também não estão disponíveis para esse tipo de licença. Mas a ferramenta é bastante intuitiva, apoiada por tutoriais e bastante informativos sobre cada item na sua interface.

O programa apresenta um amplo banco de dados “*in clouds*” de materiais de construção, sendo globais ou através de Declarações Ambientais de Produto (DAP) verificados por terceiros, de mais de 100 países, incluindo produtos a nível de Brasil. Porém, caso não existam dados de um determinado país, é possível utilizar dados genéricos. E a plataforma ainda permite solicitação de DAP diretamente dos fabricantes, onde os dados passam por processo de verificação e qualificação que garante consistência nas avaliações.

É um programa de análise de ciclo de vida com uma elevada classificação LEED e BREEAM, e está em conformidade com mais de quarenta sistemas de avaliação ambiental. O programa também se encontra em conformidade com as normas ISO 14040/44 e EN 15804, além das EN 15978, ISO 21931-1, ISO 21929-1. (ONE CLICK LCA, 2022)

Para começar a usar o programa o primeiro passo é a criação da conta e registro do projeto, que fica disponibilizado na página web para consultas de outros utilizadores ou revisores, como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 – Interface inicial do programa One Click LCA mostrando o registro do atual estudo.

Project	Certification	Embodied carbon 	Content
 Estudo de ACV para edificações em madeira Área do LEC da FEC - UFPA, Brazil, One-dwelling buildings, 50		B 288 kg CO ₂ e/m ²	4 designs
Public projects			Hide public
 DEMO - CEEQUAL superhighway This is a read only demo project. Create your own project to edit data, Belgium			2 designs
 DEMO - DGNB and LEED project in Germany This is a read only demo project. Create your own project to edit data, Germany, Office buildings, 7 000		B 390 kg CO ₂ e/m ²	6 designs

Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

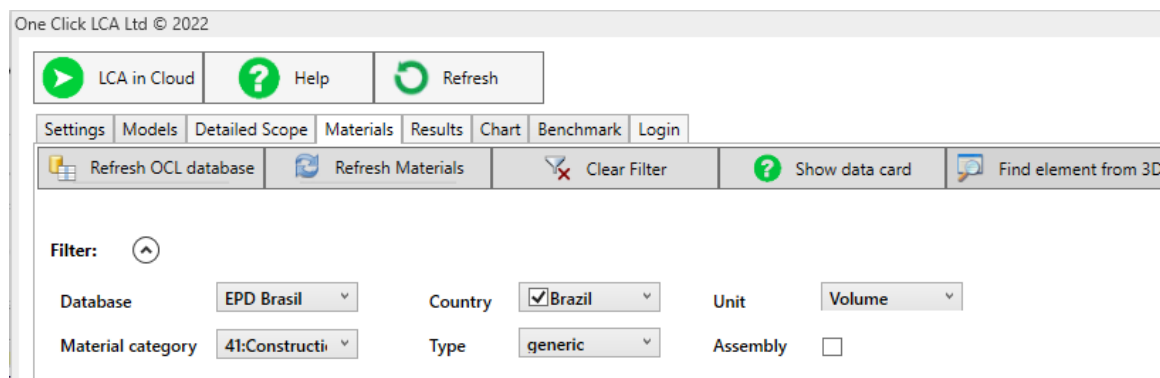
Na interface inicial do plugin, dentro do Revit, é possível inserir as características gerais do projeto, como título, data, autor, companhia, localização, descrição do objetivo e escopo avaliado. Para realizar os estudos de ACV no One Click LCA (versão 4.0.2, de 11 de fevereiro de 2022) a modelagem da edificação foi desenvolvida no programa Autodesk Revit versão 2021. Precisou-se determinar os materiais em camadas e famílias utilizados no projeto da edificação, que neste estudo de caso são: fundação, piso, paredes, forros, cobertura e madeiramento, além das esquadrias e acabamentos. O One Click LCA considera todos os materiais separadamente.

Quanto aos dados de entrada, o programa permite a seleção dos elementos construtivos modelados que são relevantes à ACV. É possível indicar as categorias, fases construtivas e conjuntos desejados, restringindo a análise ao escopo almejado. Para este estudo, foram escolhidas diversas categorias e foram consideradas todas as fases, do berço ao túmulo.

Após se fazer o login na aba de definições iniciais, foi escolhida a base de dados ECOINVENT, o escopo de edifício completo e outras definições. Na aba “models” pode-se escolher as opções de modelos 3D para análise, e as configurações detalhadas do modelo principal, com as fases da construção existente ou nova. Na aba de detalhamento de escopo definiu-se por todos os elementos construtivos do edifício.

Quanto às definições de filtragem para os materiais, definiu-se pela base de dados do próprio One Click (ECOINVENT), carregada “em nuvem”, com “EPD Brasil”, país “Brazil”, tipo “Generic”. E na categoria de materiais, definiu-se a opção “41:construction of buidings” ou materiais de construção do edifício, como mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Interface do One Click com a filtragem na base de dados para o inventário de ACV.

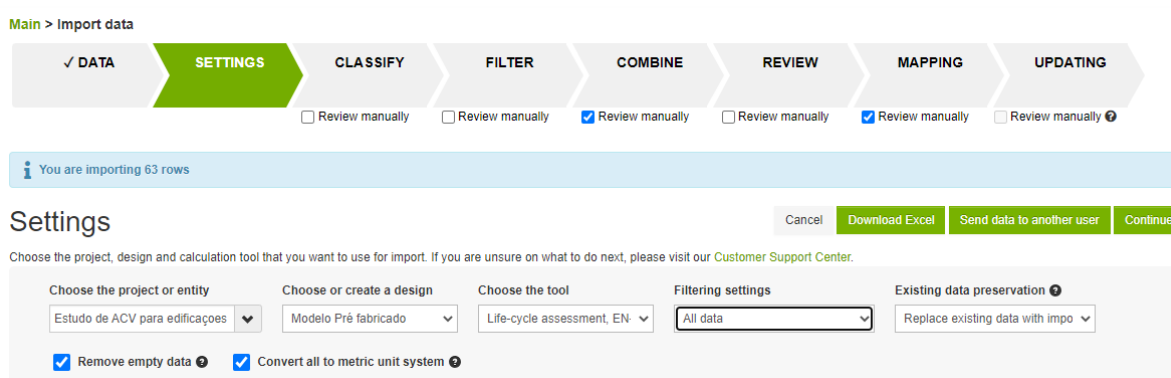


Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

Na aba “Benchmark” definiu-se como país de referência ambiental o Brasil. Entre as opções de tipologias de edifício, definiu-se “One-dwelling Building” ou edifício de apenas uma habitação, com 50m² de área bruta. E entre as opções de referência para carbono incorporado, definiu-se a opção “CH Q1 2020 Global – single house”, sendo a mais apropriada para esse estudo, por se tratar de apenas uma unidade habitacional de uso unifamiliar, como opção de modelo a ser comparado.

Já no navegador web, mostrado na Figura 3.8, tem-se a interface do One Click LCA para a importação de dados. Com algumas etapas a serem cumpridas opcionalmente, como definição, classificação, filtragem, combinação, revisão, mapeamento e atualização.

Figura 3.8 – Interface do One Click com as etapas para importação de dados.



Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

Primeiramente define-se o projeto, as opções de projeto ou designs, a ferramenta de cálculo que se deseja usar para a importação, e outras definições.

A depender da correta modelagem no Revit, e dos critérios de mapeamento (nome, classificação, país, organização, sistema, ou padrões de divisão) os conjuntos de dados podem

ser totalmente identificados de forma automatizada pelo programa. Quanto menos critérios de mapeamentos, mais automatizado se torna o processo. No presente estudo, na primeira testagem, os índices de identificação automática variaram entre 63% e 85%, devido a inexistência de Declaração Ambiental de Produto - DAP brasileira para alguns materiais. Assim, o restante dos materiais não reconhecidos teve que ser veiculado manualmente com dados semelhantes ou genéricos. Mas essa tarefa de encontrar os conjuntos de dados certos para cada material de construção se mostrou demorada, devido ao processo de filtragem no banco de dados não ser tão eficiente, além da enorme variedade de dados que necessitam certo conhecimento dos materiais e seus impactos ambientais. Na Figura seguinte (Figura 3.9), vê-se que 57 materiais, ou 100% do volume está combinado ao banco de dados, após a veiculação manual com dados semelhantes.

Figura 3.9 – Interface do One Click LCA mostrando o nível de integração dos dados.

▼ ✓ Identified data: 57 / 100 % of volume						
Material	Class	Comment	Quantity	Share	Resource name	Mapping basis
concreto	FOUNDATI...	Foundation Slab	7.32 m3	19.81 %	Ready-mix concrete, normal stren	? Your mapping
tábua madeira de eucalipto	EXTERNA...	Basic Wall	174 m2	9.4 %	Treated wooden cladding, generic	? Your mapping
brita	FOUNDATI...	Foundation Slab	3.42 m3	9.24 %	Gravel, dry bulk density, 1680 kg/h	? Your mapping
lã de vidro	ROOF	Basic Roof	52 m2	7.06 %	Glass wool insulation, aluminized	? Your mapping

Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

Ates de fazer o *updating* para os dados de saída, outros dados de entrada devem ser complementados manualmente, como a área da edificação (50 m²), pavimentos (térreo), vida útil da edificação (50 anos), o número de ocupantes (4 moradores) e distância das fábricas de materiais até a obra, sendo que o programa só permite a utilização de um modal de transporte. No quesito transportes o plugin não salva as distâncias, caso haja a atualização no inventário deve-se preencher novamente a distância de cada material até a obra, processo esse que demanda tempo.

O One Click possui ainda um recurso verificador de integridade e plausibilidade de dados, que dá ao projeto uma nota geral, com base em quão completos são os dados em relação aos dados de referência. Podendo assim, serem feitas pesquisas adicionais para melhoramentos e validações manuais.

No programa One Click LCA é necessário que as etapas que podem ser modificadas, complementadas ou que são opcionais sejam completadas conforme características regionais

de consumo. Neste sentido, os itens a seguir são aqueles que tiveram que ser elaborados de modo manual a fim de complementar as informações, como os dados para as etapas de construção e de operação da edificação.

Para o cenário do canteiro de obras o One Click considera os impactos de eletricidade, combustível, água, resíduos e transporte adicional. Mas para o presente estudo foram considerados cenários médios para zona climática tropical, com definições de dados genéricos.

E para as fases de construção e demolição, o One Click também considera o consumo de eletricidade, combustível, água, maquinários e resíduos. Para esse estudo, foram considerados também cenários médios, sendo definidos dados genéricos por área de edificação, para o contexto brasileiro. Pois, para se obter dados mais precisos dessas etapas, dados específicos às tipologias construtivas em madeira para o contexto brasileiro, há a necessidade de um maior aprofundamento dessa pesquisa.

Para o cálculo de energia e água na fase operacional o programa considera o consumo anual, por tipo e finalidade. Nesse estudo, foi convencionado que o padrão de consumo de energia elétrica e água compradas, são os mesmo para as quatro habitações. Justificado pelo perfil socioeconômico dos ocupantes, dimensão e localização das edificações serem consideradas como iguais. As variações térmicas relativas aos materiais dos invólucros como paredes, pisos e forros também não são consideradas. Os valores são inseridos manualmente e o programa considera o contexto brasileiro para água e matriz energética, na quantificação dos impactos ambientais.

Após avançar nas etapas necessárias para importação de dados, finalmente faz-se a “atualização” para uma página com as informações do estudo de ACV, contendo as informações gerais, resultado, referência, dados de cada opção de modelo analisado, que podem ser novamente editados, além dos gráficos da ACV, baseada na EN-15978. Ver Figura 3.10.

Figura 3.10 – Interface do One Click LCA com o resumo dos resultados da ACV.

Main > Estudo de ACV para edificações em madeira Users (1) More actions

Estudo de ACV para edificações em madeira

> General information
 > Results and benchmarking
 ▾ Design phase: 4 designs Parameters + Add a design Compare data (4) Tools

Tool	Unit	3 - Modelo Wood fram	3 - Modelo Pré fabri	3 - Modelo Alvenaria	3 - Modelo em CLT
LCA, EN-15978 Help	kg CO ₂ e	46 149	41 540	48 622	42 379

> Graphs - Life-cycle assessment, EN-15978, Global warming

Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

A EN-15978 utilizada na avaliação é uma norma europeia baseada na metodologia de AICV de ponto médio, a CML 2002. A abordagem da avaliação abrange todas as fases do ciclo de vida do edifício e baseia-se nos dados obtidos nas Declarações Ambientais do Produto (DAP), nos seus “módulos de informação” (EN 15804) e outras informações necessárias e relevantes para a realização da avaliação. Com relatórios separados que incluem todos os produtos, processos, serviços, estágios de uso, energia operacional e fim de vida. Mas a interpretação e os juízos de valor dos resultados da avaliação não estão no âmbito da norma EN-15978.

Os cálculos algébricos relacionados aos quantitativos de materiais e de dióxido de carbono no One Click podem ser visualizados de forma transparente, mas os fluxos de entrada e saída foram elaborados pelos desenvolvedores da metodologia, ou seja, critérios e considerações frente à quantificação das categorias de impacto são particulares aos métodos de cálculo adotados.

Os resultados são visualizados para a maioria dos materiais contribuintes, para cada categoria de impacto, detalhamento do Potencial de Aquecimento Global para diferentes módulos de ciclo de vida e gráficos de acúmulo de resultados ao longo da vida útil do edifício. O One Click pode exportar seus resultados em planilhas Excel, em diversos formatos de arquivos de imagens, além de um modelo de relatório com resultados detalhados.

Além do Verificador de Plausibilidade de dados, o One Click LCA possui o Carbon Heroes Benchmarks em seus resultados. Um recurso que fornece referências de carbono incorporado para diferentes tipos de construção em diferentes países, por área e utilizando o método de caracterização escolhido para o estudo.

3.3.3 Resumo comparativo e definição do plugin para o estudo de caso

Quanto ao plugin eToolLCD, seu fluxo de trabalho não se mostrou intuitivo, apresentando a mais lenta curva de aprendizagem entre todos, devido à escassez de métodos tutoriais, só disponibilizados para detentores de licença comercial. Sobre a praticidade e precisão do plugin em fazer a análise comparativa automatizada em um único projeto, o eToolLCD não permitiu executar a opção de análise comparativa entre os modelo ou “designs”, sendo necessário fazer a análise comparativa baseada nos resultados gerados separadamente para cada modelo, e manualmente, o que pode ser passível de erros. A maior limitação do eToolLCD para uso nessa pesquisa é que ele reconhece os elementos construtivos como materiais homogêneos, não reconhecendo as divisões em camadas de materiais criadas no Revit. E como alguns elementos utilizados nas técnicas construtivas desse estudo fazem uso de camadas, como pisos, paredes em wood frame ou duplas camadas de madeira do modelo pré fabricado. Tais materiais então tiveram que ser adaptados, sendo que existem limitações quanto às opções de materiais existentes, só sendo permitido a associação em composições predefinidas, o que pode comprometer a precisão dos resultados.

Já o plugin One Click LCA faz as comparações das opções de design em um só projeto de estudo. Permite que se realize uma análise, tanto a nível global do edifício, como também a nível comparativo entre possíveis opções de projeto. Observou-se desde o início a facilidade de manuseio da ferramenta, em uma interface de fácil compreensão e sem exigir práticas especiais de modelagem, apoiados por curso de aprendizagem com diversos métodos tutoriais completos. Apenas o One Click LCA teve a capacidade de reconhecimento de todos os materiais de modo automatizado, no entanto para que aconteça, depende do nível de detalhamento e especificações adequadas na modelagem do Revit, ou seja, os modelos devem ser feitos corretamente em função do One Click, com a finalidade de extração correta dos quantitativos. Assim, a vinculação dos materiais não reconhecidos deve ser feita manualmente, e aqui se observou a maior deficiência do plugin. Encontrar o material mais aproximado no banco de dados do One Click se mostrou uma tarefa demorada, devido à variedade de combinações e a falta de filtros melhores para otimizar a busca, em um extenso banco de dados. Outra deficiência está relacionada aos transportes, o plugin não salva as distâncias. Caso haja a atualização no inventário, deve-se preencher novamente as distâncias de cada material até a obra, processo esse que pode se tornar exaustivo.

Entre os dois plugins de ACV baseados na plataforma BIM previamente testados nesse estudo exploratório, o One Click se mostrou de mais fácil manipulação e aprendizagem, mais

automatizado e mais adequado ao contexto brasileiro e dessa pesquisa. Por tudo isso, foi o plugin definido para a realização do estudo de caso.

3.4 MÉTODO DE ABORDAGEM E CATEGORIAS DE IMPACTO

O inventário do ciclo de vida (ICV) no estudo de caso foi elaborado a partir da base de dados ECOINVENT 3.6. A ferramenta suporta a metodologia de *baseline* do Centro de Ciências Ambientais de Leiden CML 2002 (2012 ou mais recente) como método de abordagem de pontos médios para avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV). Apresenta análise somente até a categoria de impacto, sem apresentar análise de categoria de dano. É um método com abrangência global, que também é recomendado pelas normas EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2013) e que provavelmente seria mais adequado no caso do Brasil (CALDA; NASCIMENTO, 2018). Um método amplamente utilizado que fornece uma boa base para comparação de resultados com outros estudos. Além disso, as categorias de impacto da CML não são agregadas por peso, para fornecer transparência (KOULOUMPIS et al., 2020).

A AICV para o estudo de caso considerou seis impactos potenciais do método CML 2002: Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Potencial de Eutrofização, Potencial de destruição de Ozônio, Formação de Ozônio de Baixa Atmosfera, Carbono Biogênico, além da Energia Primária. Ver Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Características dos indicadores de ponto médio dos métodos de AICV do CML 2002.

Categoria de Impacto	Unidade	Descrição
Potencial de Aquecimento Global (gases de efeito estufa) - GWP	kgCO ₂ eq ¹	Descreve mudanças nas temperaturas de superfície locais, regionais ou globais causadas por um aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. As emissões de gases de efeito estufa da queima de combustíveis fósseis, têm sido fortemente correlacionadas com duas outras categorias de impacto: acidificação e formação de fumaça(smog). Muitas vezes chamado de “pegada de carbono”.
Potencial de acidificação - AP	kgSO ₂ eq	Descreve o efeito acidificante de substâncias no ambiente. Substâncias como o dióxido de carbono dissolvem-se facilmente na água, aumentando a acidez, o que contribui para fenômenos globais como a acidificação dos oceanos (IPCC 2014).
Potencial de eutrofização - EP	kgPO ₄ -eq	Descreve o efeito da adição de nutrientes minerais ao solo ou à água, que faz com que certas espécies dominem um ecossistema, comprometendo a sobrevivência de outras espécies e, às vezes, resultando na morte de populações.
Potencial de destruição do ozônio - ODP	kgCFC ₁₁ eq	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera para degradar a camada de ozônio, que absorve e impede que os raios UV solares nocivos atinjam a superfície da Terra.
Formação de ozônio da baixa atmosfera - POCP	kgC ₂ H ₄ eq	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera para criar smog fotoquímico. Também conhecido como smog de verão.
Carbono Biogênico incorporado - Bio-CO₂	kg CO ₂	Carbono absorvido e gerado por fontes biológicas, como as árvores.
Energia primária	MJ	

Fonte: One Click LCA (2018).

¹ Equivalência em dióxido de carbono: CO₂eq, é uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono. A equivalência leva em conta o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO₂ seria emitido se todos os Gases do Efeito Estufa (GEE) fossem emitidos como esse gás. A unidade CO₂eq é usada para comparar as emissões de diversos gases de efeito estufa baseado na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo potencial de aquecimento global, medido em um período de tempo especificado.

3.5 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO DA ACV PARA O ESTUDO DE CASO

Esta seção é destinada à descrição do objetivo e escopo da ACV específicos para esse estudo de caso comparativo, por meio de análise computacional. Para a execução das análises optou-se por avaliá-las em um só projeto na ferramenta digital. O objetivo da ACV realizada neste estudo é comparar indicadores ambientais relativos aos materiais e uso entre diferentes modelos digitais de tipologias construtivas em madeira, além do comparativo em relação à tipologia em alvenaria, sendo seis categorias de impacto avaliadas pelo plugin One Click LCA, já detalhadas anteriormente (Quadro 3.3).

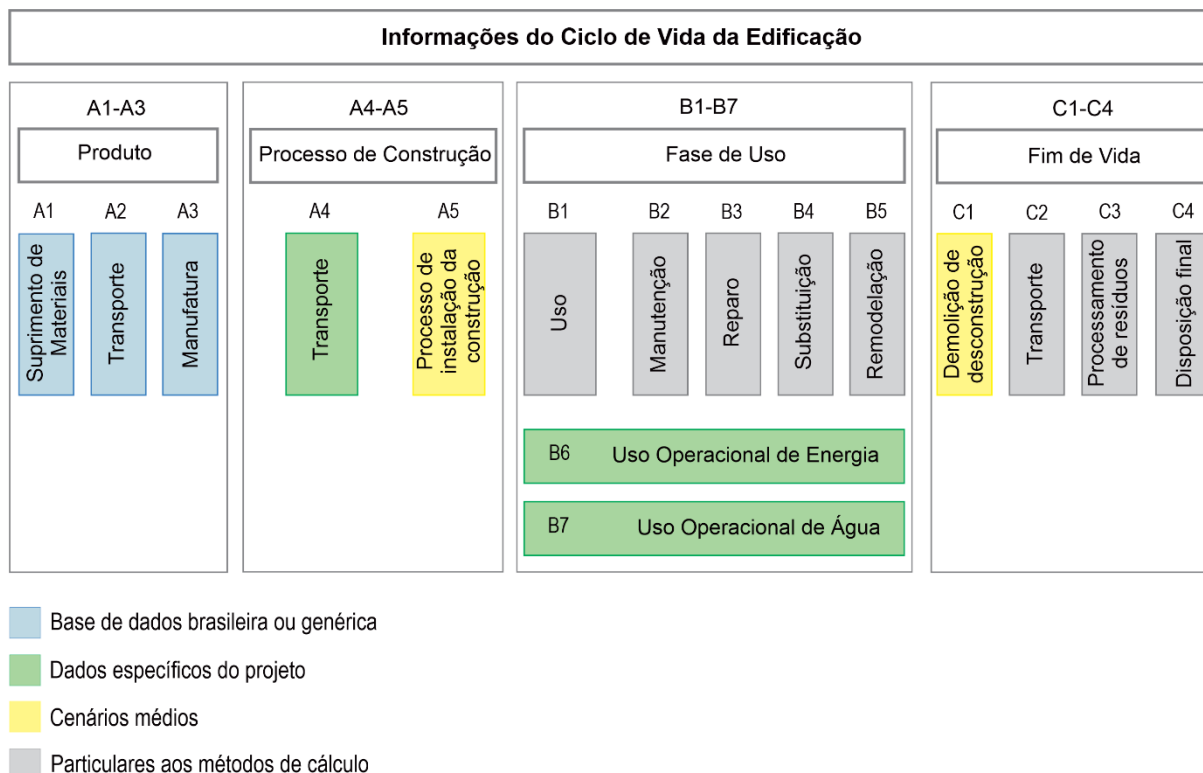
Devido à complexidade de uma ACV na construção civil, e ao fato de que, para o setor, a ACV abrange tradicionalmente dois aspectos principais: os materiais e a fase de operação das edificações (DE AZEVEDO; GERALDI; GHISI, 2020), esse estudo considera a variedade de materiais, sendo a madeira o material predominante, já que representam o maior volume construtivo nesses modelos, e limitou-se aos sistemas de envoltória devido a fase operacional ser considerada a mesma nos quatro sistemas.

O público alvo, ou seja, a quem se pretende comunicar os resultados do estudo é a comunidade acadêmica e desenvolvedores de softwares de análise ambiental e ACV, sendo que existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

3.5.1 Escopo da ACV para o estudo de caso

Seguindo as premissas das normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, o escopo desta ACV engloba todo o ciclo de vida da edificação, ou seja, foi realizada do berço ao túmulo das opções de projeto estudadas, em todos os estágios, incluindo fabricação do material, transporte, manutenção e substituição, e eventual fim de vida. A Figura (3.11) ilustra as fases consideradas neste estudo, com o uso do plugin One Click LCA. A unidade funcional é representada por m² do edifício (de cada residência) com uso por 50 anos. Estimou-se a vida útil de 50 anos para edificação, visto que esta especificação atende ao requisito mínimo de desempenho recomendado pela NBR-15575-1 (ABNT, 2013).

Figura 3.11 - Fases pertencentes ao escopo do estudo de ACV no One Click LCA.



Fonte: O autor (2021).

A seguir são descritos o escopo e os limites do sistema usados para definir cada estágio do ciclo de vida da edificação, desde a aquisição da matéria-prima até a destinação final. Para produtos listados no One Click como Declaração Ambiental de Produto (DAP), os impactos do ciclo de vida completo estão incluídos, mesmo que a DAP publicada inclua apenas o estágio do produto que vai do A1 ao A3

Produto: A1 - A3

Abrange toda a fase de fabricação, incluindo matérias primas, extração e processamento de materiais, transporte intermediário, fabricação e montagens finais. O escopo do estágio do produto está listado para cada entrada, detalhando quaisquer inclusões ou exclusões específicas que se enquadram fora do escopo do berço ao portão. A infraestrutura (edifícios e máquinas) necessária para a fabricação e montagem de materiais de construção não estão incluídos e são considerados fora do âmbito de avaliação. Materiais arquitetônicos e montagens incluem todos os materiais necessários para a fabricação e uso do produto, incluindo estrutura, impermeabilizantes, adesivos, revestimentos e acabamentos. Os materiais são incluídos com um fator de corte de até 1% da massa, exceto para materiais que possuem conhecidamente altos

impactos ambientais em níveis baixos. Nesses casos, foi implementado um corte de 1% do impacto.

Transporte: [A4]

É contabilizado o transporte do fabricante para o local da edificação durante a fase de construção, e pode ser modificado pelo modelador, a qualquer momento, no âmbito de avaliação, sendo que o programa só permite a utilização de um modal de transporte. Nesse estudo foram inseridos dados (distâncias) específicos de projeto.

Instalação de construção: [A5] (opcional)

Para a fase de canteiro de obra, pode ser incluído no programa One Click o consumo de eletricidade, combustível, água, maquinários e resíduos no local, durante o processo de instalação, mas para esse estudo foi considerado apenas o cenário médio do clima e geografia, por m² de área, devido à falta de estudos mais aprofundados sobre canteiros de obra para construções em madeira. Para as fases de construção/montagem e demolição/desmontagem, o One Click também considera o consumo de eletricidade, combustível, água, maquinários e resíduos no local, previstos ou consumidos no local durante o processo de instalação da construção, especificado pelo modelador. Mas vale lembrar novamente que os valores de construção e montagem (A5) não estão computados nos totais de energia consumida, no entanto, estima-se que se estivessem, os valores poderiam ter maior diferença, visto que, é reconhecida a redução de geração de desperdício e tempo em obras pré-fabricadas em madeira. Para esse estudo foram definidos dados genéricos para o cenário médio de zona climática tropical (Brasil), por m² de área de edificação. Pois, para se obter dados mais precisos dessas etapas, dados específicos às tipologias construtivas em madeira para o contexto brasileiro, há a necessidade de um maior aprofundamento dessa pesquisa.

Manutenção e Substituição: [B2-B5]

Engloba a substituição de materiais de acordo com sua vida útil esperada. Isso inclui o tratamento de fim de vida dos produtos existentes, bem como a fabricação, do berço ao portão, e transporte para o local dos produtos de reposição. A vida útil é especificada pela DAP para cada produto. A reforma de materiais marcados como existentes ou recuperados pelo modelador é considerada pela própria metodologia de cálculo CML.

Energia Operacional: [B6] (opcional)

Opcionalmente, os impactos de energia operacional do edifício podem ser incluídos no escopo. Para o cálculo de energia e água na fase operacional (sem consumo de gás) o programa considera o consumo anual, por tipo e finalidade. Nesse estudo, foi convencionado que o padrão de consumo de energia elétrica e água compradas, são os mesmo para as quatro habitações, justificado pelo perfil socioeconômico dos ocupantes, dimensão e localização das edificações, que são consideradas como iguais. O programa considera o contexto brasileiro para água e matriz energética. Nesse estudo foram inseridos dados específicos do projeto, e para o cálculo, foi considerado o consumo de eletricidade residencial, per capita, na região norte, no ano de 2021, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica. E para água foi considerado o consumo residencial, per capita, na região Norte, segundo as Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil. As variações térmicas relativas aos materiais dos invólucros como paredes, pisos e forros também não são consideradas

Fim da Vida: [C2-C4]

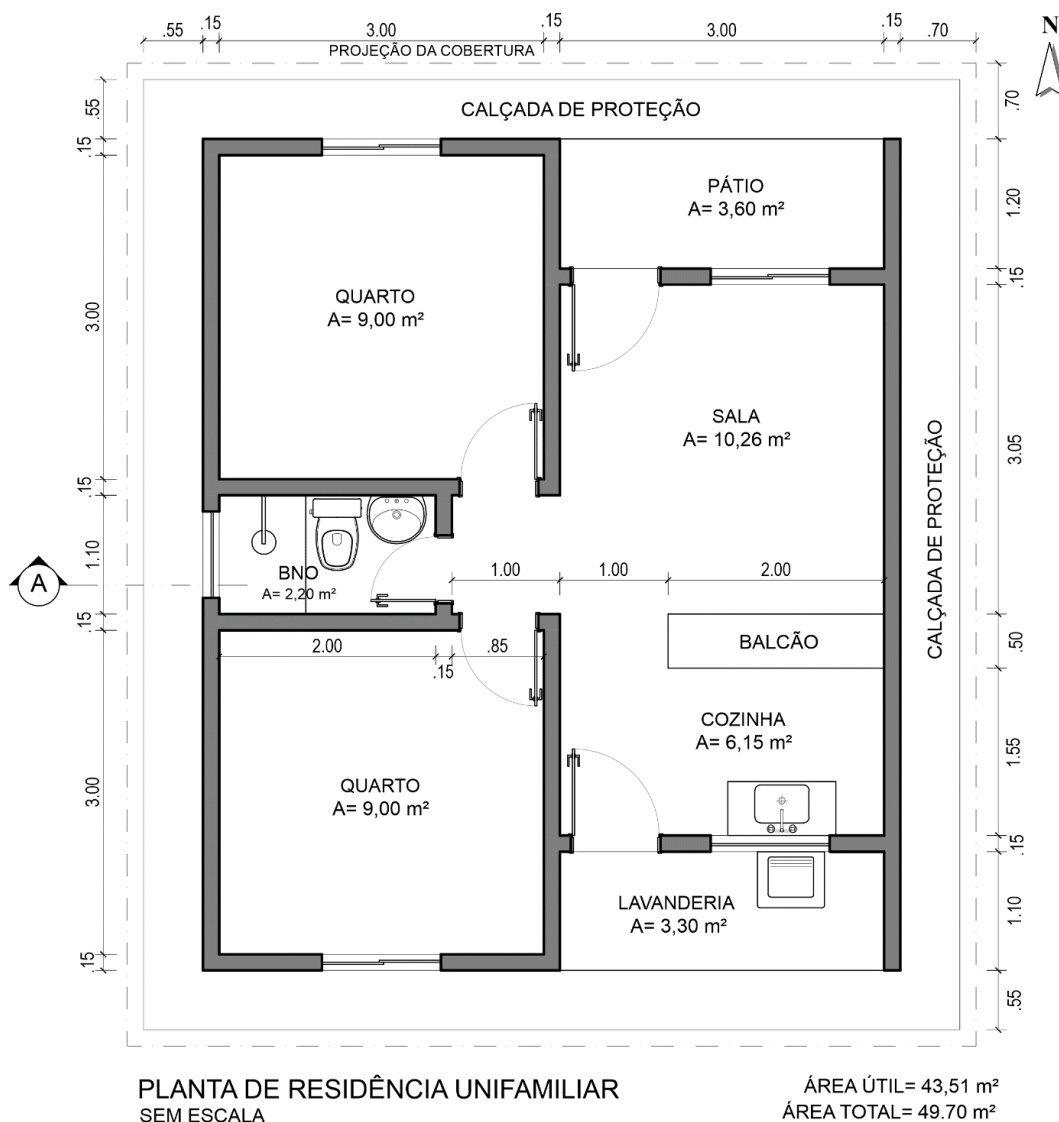
Os impactos associados aos resíduos são com base nas propriedades médias do material, como resíduos plásticos, minerais, metais e outros. O programa permite configurar os resíduos de construção, tipos e quantidades de entrada, transporte e transportes adicionais, podendo escolher os tipos de veículos e distâncias. Pelo desconhecimento de informações específicas quanto a produção de resíduos para construções/montagem em madeira, esse estudo considera apenas o cenário médio global da metodologia de cálculo CML.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 PADRÃO DA EDIFICAÇÃO PARA OS MODELOS

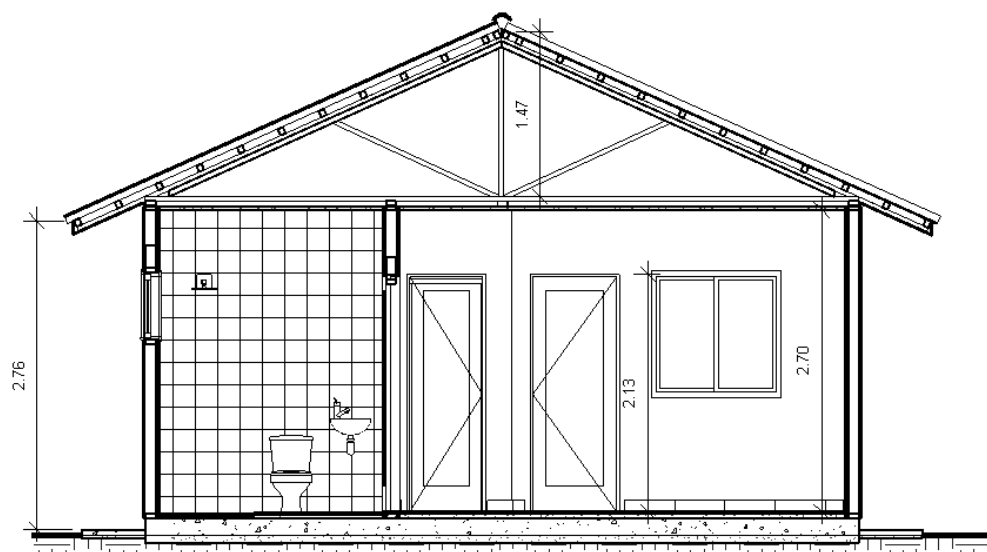
Para este estudo, foram modeladas no Autodesk Revit (2021) quatro diferentes tipologias de edificações residenciais unifamiliares de interesse social, três em madeira e uma em alvenaria de blocos de concreto, para referência comparativa. As edificações térreas possuem a mesma dimensão de 50 m², baseadas no modelo R1-B do CUB (Custo Unitário Básico da Construção), pela NBR-12721 de 2006, padrão utilizado pelo SINDUSCON-PA (Sindicato das Indústrias da Construção Civil do Pará - 2021), com desempenho pela NBR 15575. Abaixo, a Figura 4.1 mostra a planta padrão e a Figura 4.2 mostra o corte padrão, a serem seguidos pelas 4 tipologias.

Figura 4.1 - Planta baixa padrão dos modelos em estudo.



Fonte: O autor, desenvolvido no Revit (2021).

Figura 4.2 - Corte padrão dos modelos em estudo, tipo R1-B.



Fonte: O autor, desenvolvido no Revit (2021).

A edificação R1-B é uma residência térrea unifamiliar de padrão popular, com 50m², enquadrada num programa de necessidade contendo dois dormitórios, sala integrada com cozinha através de balcão, um sanitário, lavanderia externa e pátio. Disposta em posicionamento favorável em relação ao sol, tendo suas aberturas para ventilação voltadas para a frente e fundos, possibilitando assim que o modelo possa ser geminado.

A escolha da edificação R1-B se deu por conta inicialmente de encontrar um modelo simplificado e que retrate a realidade brasileira com relação ao perfil das edificações construídas, assim fomentando a discussão acerca da viabilidade de aplicar novas técnicas construtivas em edificações de cunho coletivo, de financiamento público e de relevância urbana e social.

Todavia, é importante ressaltar que apesar desta edificação ser tomada como base para a modelagem, sua forma e materiais serão adaptados para melhor atender aos pré-requisitos estruturais e funcionais das quatro diferentes tipologias construtivas. Dessa maneira, serão levantadas as principais modificações elaboradas a partir do modelo, já que no modelo indicado pelo CUB todas as paredes são consideradas em drywall, no entanto, se estas forem levadas em consideração nas análises de impacto ambiental, podem evidenciar resultados distintos daqueles desejados a partir da comparação entre edificações em wood frame, pré-fabricadas e em CLT.

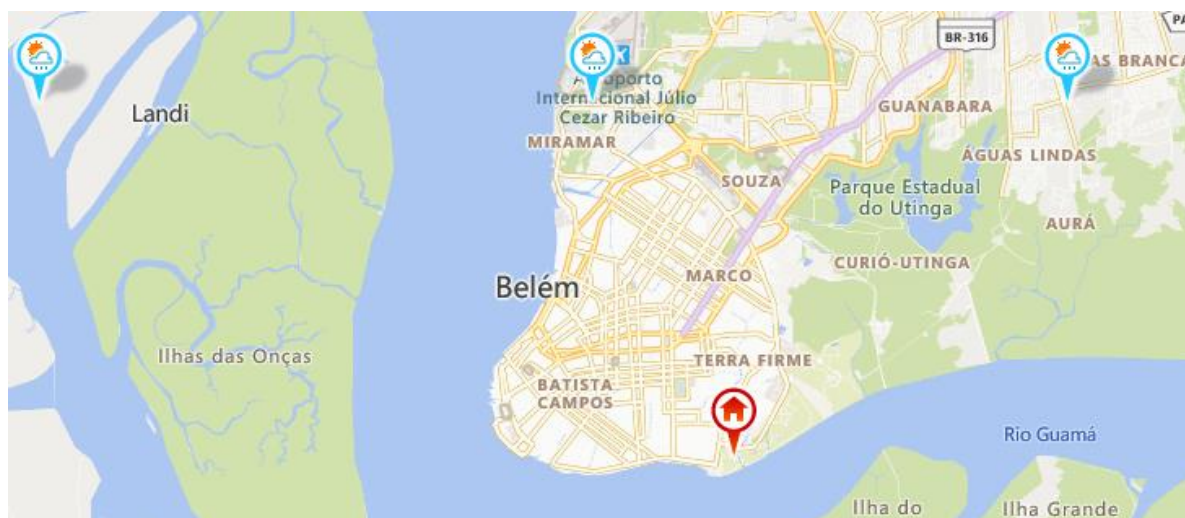
As tipologias foram selecionadas por serem comumente utilizados em construções habitacionais unifamiliares de interesse social no Brasil, conforme demonstrado no estudo de Azevedo (2019). Também foram escolhidas baseadas nos estudos de Condeixa et al. (2014),

Bueno et al. (2016), Souza et al. (2016), Caldas et al. (2016), Azevedo et al. (2020), que analisaram o potencial de sustentabilidade de diferentes sistemas de envoltória para a realidade brasileira. (CALDAS et al., 2017). A análise foi aplicada às quatro opções de sistemas de vedação, como paredes forros, além dos acabamentos e proteções do sistema. Para a execução das análises optou-se por avaliar os sistemas em um projeto único, com a intenção de maior automatização no processo, diminuindo a possibilidade de erros de manipulação de dados, e consequentemente, resultados mais assertivos.

4.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DOS MODELOS

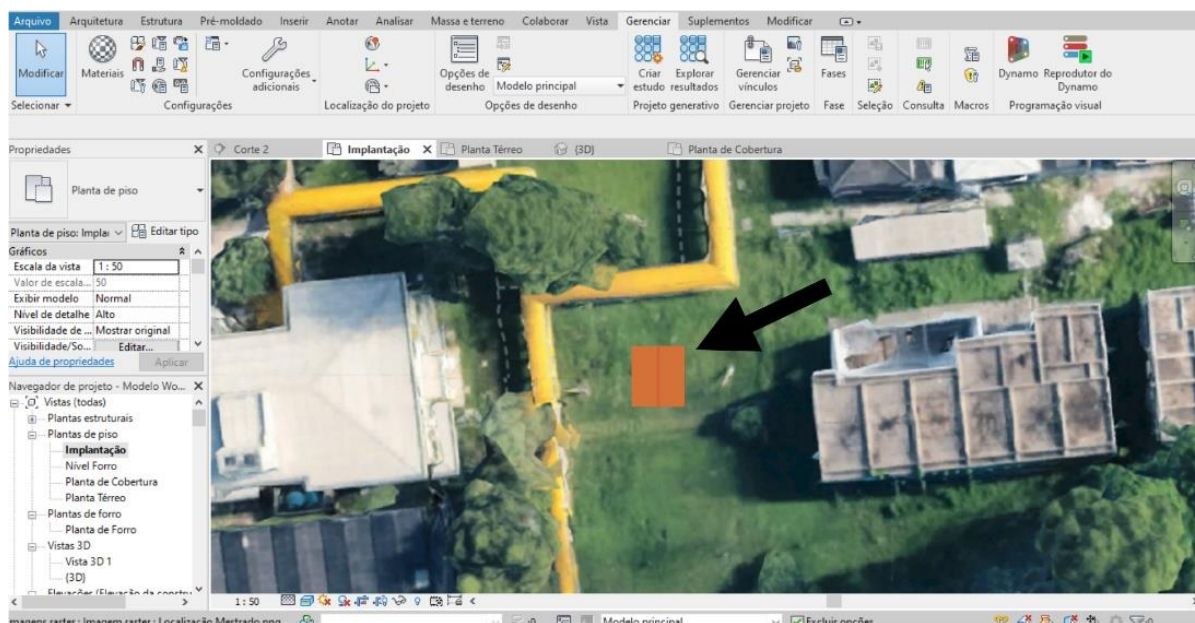
A fim de simular as distâncias percorridas para o transporte de materiais até o canteiro de obras o modelo foi posicionado na área do Laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Civil - FEC, pertencente ao Instituto de Tecnologia – ITEC da Universidade Federal do Pará - UFPA, campus Guamá, Belém – PA, com as seguintes coordenadas geográficas: $-1,48^\circ$ de latitude e $-48,45^\circ$ de longitude, conforme mostram as Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 - Localização geográfica na região metropolitana de Belém.



Fonte: O autor, via Revit (2021).

Figura 4.4 - Localização da edificação na área do Laboratório de materiais de FEC.



Fonte: O autor, adaptado de Google Maps (2022) em Revit (2021).

4.3 DISTÂNCIAS DOS CENTROS DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS AO LOCAL

Para as informações correspondentes às distâncias dos centros de produção dos materiais ao local da obra foram considerados alguns critérios. Considerou-se primeiramente produtos da construção civil de empresas fabricantes certificadas pelo Sistema de Qualificação de Empresas de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC), pertencente ao Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). O segundo critério foi a menor distância, de preferência empresas localizadas na região norte do país. Para as madeiras foram utilizados os mesmos critérios, considerando madeiras para fins industriais, certificadas ou de áreas de reflorestamento. Ver Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Lista de materiais e distâncias dos centros de produção ao local.

Nº	MATERIAL	LOCAL	DISTÂNCIA
01	Argamassa colante de assentamento cerâmico	Benevides – PA -1.3637, -48.2655	39 km
02	Argamassa de Cimento	Belém – PA -1.4753, -48.4630	2 km
03	Bloco de concreto estrutural	São Luiz – MA -2.6315, -44.2580	593 km
04	Brita média para lastro de fundação	Parauapebas – PA -6.0691, -49.9040	720 km
05	Chapa cimentícia	Goiânia – GO -16.7130, -49.3595	1984 km
06	Chapa de gesso acartonado	Feira de Santana – BA -12.3338, -38.8527	2016 km
07	Concreto usinado	Belém – PA -1.4753, -48.4630	2 km
08	Impermeabilizante	Guararapes – PE -8.195476, -34.957882	2042 km
09	Lona de radier contra umidade	São Paulo – SP -23.5950, -46.5430	2929 km
10	Madeira Eucalipto	Dom Eliseu – PA -4.1810, -47.5452	452 km
11	Madeira Pinus	Araucária – PR -25.5662, -49.4102	3333 km
12	Manta em lã de vidro	Santo Amaro – SP -23.6572, -46.7007	2901 km
13	Massa Acrílica e PVA	Benevides – PA -1.3670, -48.2551	33 km
14	<i>Medium Density Fiberboard (MDF)</i>	Paragominas – PA -3.0166, -47.3710	308 km
15	Membrana Hidrófuga	Jundiaí – SP -23.1912, -46.9747	2874 km
16	Painel <i>Cross Laminated Timber (CLT)</i>	Suzano – SP -23.661647, -46.334652	2961 km
21	Pintura de proteção <i>Stain</i>	Benevides – PA -1.3670, -48.2551	33 km
21	Pintura Verniz	Benevides – PA -1.3670, -48.2551	33 km
17	Réguas de PVC para forro	Salto – SP -23.2163, -47.2747	2805 km
18	Revestimento cerâmico	Maracanaú – CE -3.8565, -38.5488	1575 km
19	<i>Oriented Strand Board (OSB)</i>	Itapecerica da Serra – SP -23.7012, -46.8651	2942 km
20	Telha Cerâmica	Uruará Pará – PA -3.7419, -53.7390	1046 km
21	Tinta PVA e Acrílica	Benevides – PA -1.3670, -48.2551	33 km
22	Vidro	Jacareí – SP -23.2856, -45.9392	2941 km

Fonte: O autor.

4.4 MODELOS DIGITAIS EM MADEIRA

4.4.1 Modelo em Wood frame

A tipologia em wood frame (Figura 4.5) segue a diretriz do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais (SiNAT), através do Documento de Avaliação Técnica (DATEc) nº 020 D, contido no Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). O sistema construtivo mescla o uso de madeira na estrutura (frames em madeira pinus) com fechamentos em diversas camadas, que vão das chapas OSB (Oriented Strand Board) às chapas cimentícias, passando pelas chapas de gesso acartonados, além dos acabamentos adequados. Os forros internos são em gesso e externos em régulas de PVC (Policloreto de Vinil).

Figura 4.5 - Vista 3D e esquemática do modelo em Wood frame.

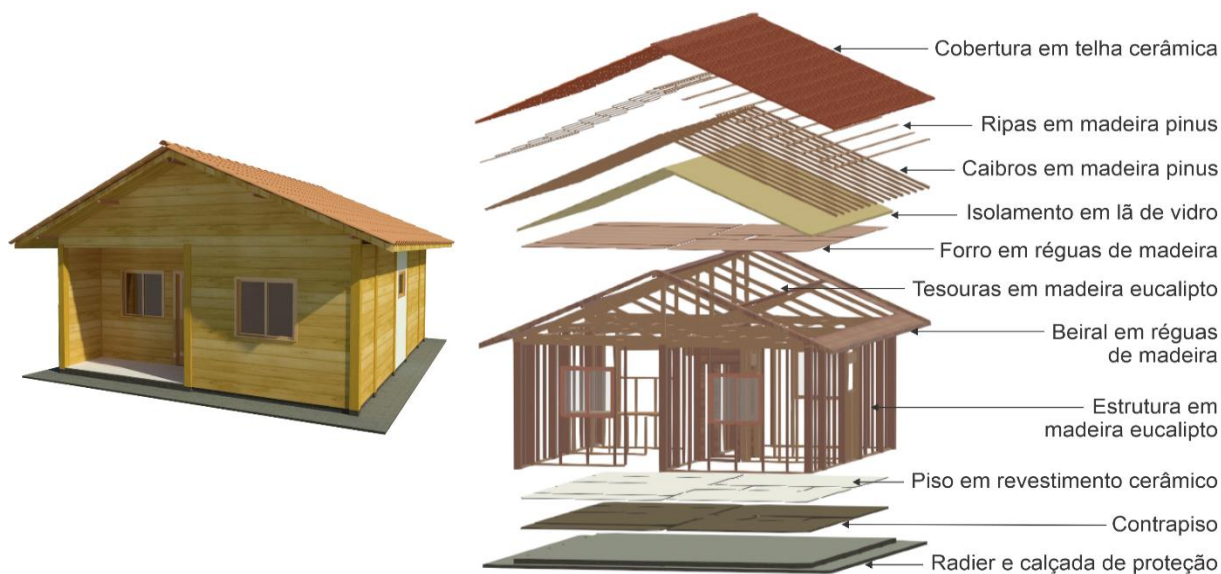


Fonte: O autor, modelado em Revit 2021.

4.4.2 Modelo Pré-fabricado em madeira

O sistema chamado de pré-fabricado (Figura 4.6) é um aperfeiçoamento das antigas técnicas tradicionais em madeira, a mais usual em algumas regiões do país. Suas vedações verticais são feitas em madeira maciça de eucalipto, com paredes duplas de tábuas horizontais com encaixes tipo “macho-fêmea” sobre frames e montadas em sistema de encaixes nos montantes verticais (pilares estruturais em madeira). As paredes das áreas molhadas são feitas internamente em *drywall*, com chapas de gesso resistente à umidade (RU) e externamente em chapas cimentícias. Os forros também são em régulas de madeira de eucalipto.

Figura 4.6 - Vista 3D e esquemática do modelo Pré-fabricado em madeira.



Fonte: O autor, modelado em Revit 2021.

4.4.3 Modelo em CLT (Cross Laminated Timber)

O sistema chamado de CLT (Figura 4.7) é um sistema construtivo relativamente novo no cenário da construção civil, onde os fechamentos são em painéis inteiriços e autoportantes, constituídos de lamelas de madeira pinus maciça, cruzadas perpendicularmente e coladas sobre pressão ainda na indústria, onde são cortadas previamente segundo o projeto e posteriormente transportados para o local da montagem. Como os painéis são estruturais, devem ser protegidos contra umidade, nesse caso, fez-se o uso de paredes externas ventiladas tipo *siding* vertical em madeira eucalipto, impermeabilizadas com *stain*. Nas paredes das áreas molhas fez-se o uso de *drywall* com chapas de gesso RU e cimentícias. Os forros também são em painéis CLT.

Figura 4.7 - Vista 3D e esquemática do modelo em painéis de madeira massiva CLT.



Fonte - O autor, modelado em Revit 2021.

4.5 MODELAGEM DA ACV

Para realizar os estudos de ACV no One Click LCA 2022 (versão 4.0.2) a modelagem da edificação foi desenvolvida no programa Autodesk Revit versão 2021. Os modelos apresentaram nível de desenvolvimento LoD 300, segundo a definição do American Institute of Architecture - AIA (2022). Esse é o nível mais adequado para verificar os impactos ambientais durante os estágios iniciais do projeto, segundo Soust-Verdaguer et al. (2017).

A depender da correta modelagem no Revit e dos critérios de mapeamento, os conjuntos de dados podem ser totalmente identificados (100%) de forma automatizada pelo programa, processo conhecido pelo termo “*one click*” (OBRECHT et al, 2020). Quanto menos critérios de mapeamentos, mais automatizado se torna o processo. No presente estudo os índices de identificação automática variaram entre 63% e 85% dependendo do modelo, e também devido a inexistência de Declaração Ambiental do Produto - DAP brasileira para alguns materiais. Assim, o restante dos materiais não reconhecidos teve que ser veiculado manualmente com dados semelhantes ou genéricos. Outros dados de entrada devem ser complementados manualmente: área da edificação (50 m²), pavimentos (térreo), vida útil da edificação (50 anos), o número de ocupantes (4 moradores) e distância das fábricas de materiais até a obra, sendo que o programa só permite a utilização de um modal de transporte.

Para os cenários de canteiro de obras, construção e demolição, foram definidos no presente estudo, dados genéricos, uma média para zona climática tropical e para o contexto brasileiro, por m² de área. Foram considerados as mesmas definições para as quatro habitações,

pois o perfil socioeconômico dos ocupantes, dimensão e localização das edificações são convencionados como iguais. Pois, para se obter dados mais precisos dessas etapas, dados específicos às tipologias construtivas em madeira para o contexto brasileiro, há a necessidade de um maior aprofundamento dessa pesquisa.

Na fase operacional os valores também são inseridos manualmente e o programa considera o contexto brasileiro para água e matriz energética. Para o cálculo, foi considerado o consumo de eletricidade residencial, per capita, na região norte, no ano de 2021, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 (Ano base 2021), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). O resultado do consumo de energia elétrica é de 558 kWh/hab/ano. E para água foi considerado o consumo residencial, per capita, na região Norte, segundo as Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil (2013 – 2017) da Agência Nacional de Água – ANA e IBGE. O resultado do consumo de água é de 30.660 litros/hab/ano. As variações térmicas relativas aos materiais dos invólucros como paredes, pisos e forros também não são consideradas.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DA ACV

Os resultados gerados pelo através do plugin do One Click LCA podem ser visualizados diretamente na página da web ou através de *download* em diversos formatos de imagem, PDF e planilhas. Para esse estudo alguns gráficos gerados em formato de imagens não ficaram visualmente proporcionais e legíveis. Em alguns casos preferiu-se fazer uso dos resultados em forma de planilha “xls” a serem exportadas para o programa Excel, serem traduzidas do inglês e criados novos tipos de gráficos para análise. Os melhoramentos ocorreram apenas na apresentação, sem alteração alguma nos dados gerados.

Com os resultados gerados pelo One Click LCA, e melhorados graficamente no Excel, é possível analisá-los e interpretá-los em relação às diversas categorias de impacto ambiental: Potencial de Aquecimento Global (GWP), está relacionado com os gases de efeito estufa e medido em kgCO₂ eq.; O Potencial de Acidificação (AP), medido em kgSO₂ eq.; Potencial de Eutrofização (EP), em kgPO₄-eq.; Depleção ou Potencial de destruição de Ozônio (ODP), em kgCFC11eq.; Formação de ozônio da baixa atmosfera (POCP), em kg etileno-eq.; Armazenamento de carbono biogênico ou Carbono incorporado (Bio-CO₂), medido em kgCO₂eq bio, além da Energia primária, relacionada à produção dos materiais e medida em MJ.

As comparações entre os resultados de todos os impactos nos três modelos, de maneira detalhada seria por demais extensa, portanto, são aqui colocados aqueles entendidos como os principais para comparações gerais. Entre as seis categorias de impacto analisadas, as mais comumente quantificadas nos estudos de ACV para a construção, são relativas à emissão de carbono equivalente, quantificadas por meio da análise do Potencial de Aquecimento Global (kg CO₂eq.). O Carbono Equivalente é usado para comparar as emissões de diversos gases de efeito estufa baseado na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo potencial de aquecimento global, medido em um período de tempo especificado. A outra categoria de impacto comumente quantificada na área de construção é o consumo de energia, por meio da avaliação do consumo de Energia Primária (MJ), que é soma da energia primária renovável e não renovável. Esse estudo também analisará mais detalhadamente o Carbono Biogênico incorporado, devido ao material característico das tipologias construtivas, a madeira, que é um material de base biológica.

5.1.1 Resultados da ACV no modelo Wood Frame

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das diversas categorias de impacto ao longo das fases do ciclo de vida do modelo construído em Wood Frame. Interpretando os valores da tabela, conclui-se de forma geral que a fase operacional (B1-B7) é a mais impactante, devido ao consumo de energia, manutenção e reposição dos materiais. Em seguida a fase pré-operacional (A1-A5) se apresenta como a segunda mais impactante, fase relacionada a produção de materiais. E a fase pós-operacional (C1-C4) sendo a menos impactante dentre elas.

Tabela 5.1 Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em Wood Frame.

	Categoria	GWP	AP	EP	ODP	POCP	Energia Primária	Bio-CO2
A1-A3	Materiais de construção	7,81E3	4,41E1	9,78E0	1,4E-3	3,42E0	1,24E5	4,97E3
A4	Transporte para o local	1,39E3	6,36E0	1,38E0	2,74E-4	8,15E-2	3,95E4	
A5	Construção	9,99E2	3,23E0	1,86E0	1,47E-4	1,28E-1	1,8E4	
B1-B5	Manutenção e reposição	4,38E3	3,59E1	4,82E0	1,28E-3	2,93E0	7,77E4	
B6	Uso de energia	2,56E4	1,13E2	1,32E1	3,21E-3	5,94E0	7,09E5	
B7	Uso da água	5,48E3	2,96E1	1,5E1	5,98E-4	1,33E0	1,16E5	
C1-C4	Fim da vida	4,77E2	1,33E0	3,18E-1	5,98E-5	6,06E-2	1,36E4	
D	Impactos externos	-3,06E2	4,4E-1	9,17E-2	1,02E-5	1,98E-2	2,29E3	
	Total	4,61E4	2,33E2	4,64E1	6,97E-3	1,39E1	1,1E6	4,97E3

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

O resultado total do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para o modelo em Wood Frame é de 46,15 tonCO₂ eq. O quantitativo de Energia Primária é de 1.100 GJ e o de Carbono Biogênico é de 4,97 tonCO₂eq bio. Esses valores são quantificados durante os 50 anos de vida útil da edificação de 50m².

A Tabela 5.2 mostra os quantitativos de materiais e suas relativas contribuições em dióxido de carbono equivalente, gerados pelo plugin One Click LCA na fase pré-operacional (A1-A3) do modelo em Wood Frame. O concreto utilizado na fundação se apresenta como o material mais nocivo (22,4 % de CO₂eq) entre todos.

Tabela 5.2 - Materiais e CO₂eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo Wood Frame.

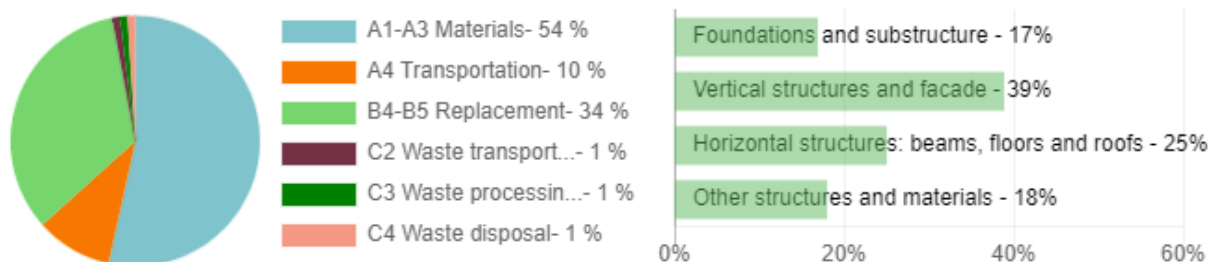
Material	Área	Volume	CO ₂ eq	Contribuição percentual
Concreto	66,07 m ²	8,18 m ³	1800 kg	22,4 %
Gesso acartonado	287,92 m ²	4,23 m ³	990 kg	12,8 %
Revestimento cerâmico	75,95m ²	0,96 m ³	950 kg	12,2 %
Madeira	460,91 m ²	6,19 m ³	930 kg	12,2 %
Membrana hidrófuga	85,37 m ²	0,06 m ³	700 kg	8,9 %
Telha Cerâmica	75,38 m ²	0,60 m ³	670 kg	8,6 %
Chapa cimentícia	85,37 m ²	0,67 m ³	580 kg	7,4 %
Tinta interna e externa	231,02 m ²	0,17m ³	520 kg	6,7 %
Painel OSB	227,64 m ²	2,14 m ³	380 kg	4,8 %
Argamassa de assentamento	42,95 m ²	0,22 m ³	120 kg	1,6 %
Manta de Lã de vidro	49,85 m ²	2,50 m ³	74,0 kg	1,0 %
PVC - forro	25,90 m ²	0,18 m ³	74,0 kg	0,9 %
Brita – lastro de fundação	66,07 m ²	3,94 m ³	25,0 kg	0,3 %
MDF	1,00 m ²	0,05 m ³	9,1 kg	0,1 %
Vidro	7,48 m ²	0,04 m ³	4,6 kg	0,1 %
Total			7,83 tons	100 %

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

Mesmo a edificação em Wood Frame sendo caracterizada como uma tipologia em madeira, e sendo reconhecida como sustentável na indústria da construção, o material gesso acartonado utilizado é o segundo maior contribuinte de CO₂ nessa tipologia construtiva. Enquanto que o seu material característico, a madeira, é apenas o quarto maior contribuinte.

A Figura 5.1 abaixo mostra dois gráficos com os resultados das contribuições percentuais de CO₂ relativos aos estágios do ciclo de vida e dos elementos construtivos do modelo Wood Frame. Os percentuais desconsideram o consumo de energia e água. A produção dos materiais na fase pré-operacional representa mais da metade do total de CO₂ incorporado, enquanto que as substituições dos matérias na fase operacional representam 34% do total. Quanto aos elementos construtivos, as fachadas e estruturas verticais contribuem com a maior parte dos quantitativos de CO₂, seguidas pelas estruturas verticais.

Figura 5.1 - Contribuição de CO₂ incorporado por estágio do ciclo de vida e por elementos (A1-A3).



Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

5.1.2 Resultados da ACV no modelo Pré-fabricado

A Tabela 5.3 mostra os valores das diversas categorias de impacto do modelo Pré-fabricado, e assim como no modelo em Wood Frame, a fase operacional é a mais impactante, devido ao consumo de energia, manutenção e reposição dos materiais. Em seguida a fase pré-operacional se apresenta como a segunda mais impactante. E a fase de fim de vida (C1-C4) sendo a menos impactante dentre elas.

Tabela 5.3 - Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em Pré-fabricado.

	Categoria	GWP	AP	EP	ODP	POCP	Energia Primária	Bio-CO2
A1-A3	Materiais de construção	6,11E3	3,77E1	6,03E0	1,35E-3	2,68E0	9,46E4	7,95E3
A4	Transporte para o local	8,34E2	3,79E0	8,26E-1	1,64E-4	5,05E-2	2,37E4	
A5	Construção	9,99E2	3,23E0	1,86E0	1,47E-4	1,28E-1	1,8E4	
B1-B5	Manutenção e reposição	2,06E3	1,37E1	1,5E0	1,17E-3	1,37E0	3,35E4	
B6	Uso de energia	2,56E4	1,13E2	1,32E1	3,21E-3	5,94E0	7,09E5	
B7	Uso da água	5,48E3	2,96E1	1,5E1	5,98E-4	1,33E0	1,16E5	
C1-C4	Fim da vida	4,43E2	1,37E0	2,87E-1	6,12E-5	5,07E-2	8,87E3	
D	Impactos externos	-3,84E2	5,62E-1	1,16E-1	1,31E-5	2,53E-2	2,73E3	
	Total	4,15E4	2,02E2	3,87E1	6,7E-3	1,16E1	1E6	7,95E3

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

O resultado total do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para o modelo Pré-fabricado é de 41,54 tonCO₂ eq. O quantitativo de Energia Primária é de 1.000 GJ e o de

Carbono Biogênico é de 7,95 tonCO₂eq bio. Esses valores são quantificados durante os 50 anos de vida útil da edificação de 50m².

A Tabela 5.4 mostra os resultados gerados pelo One Click para as quantidades dos materiais e suas relativas contribuições de CO₂ equivalente na fase (A1-A3) do modelo Pré-fabricado. Como as fundações e pisos são os mesmos para os três modelos, o concreto é novamente o material mais nocivo (36,3% de CO₂eq) entre todos da edificação. O gráfico também mostra que no modelo de edificação pré-fabricado a madeira é o material predominante, logo depois do concreto, com contribuição de 18,6 % do total de CO₂.

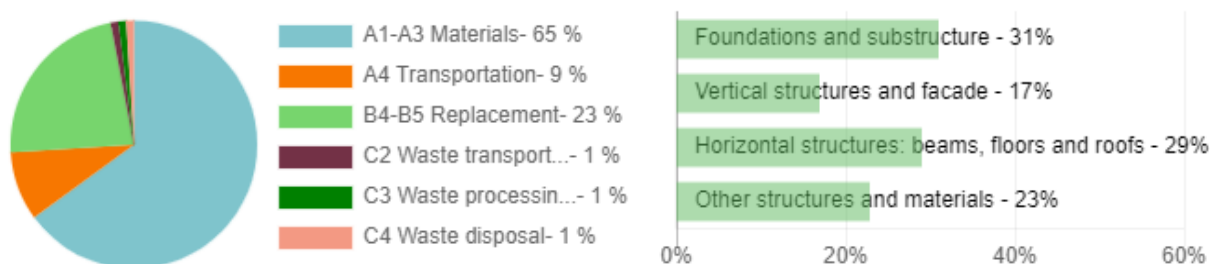
Tabela 5.4 - Materiais e CO₂eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo Pré-fabricado.

Material	Área	Volume	CO₂eq	Contribuição percentual
Concreto	66,03 m ²	8,18 m ³	2240 kg	36,3 %
Madeira	567,32 m ²	9,51 m ³	1130 kg	18,6 %
Revestimento cerâmico	78,33 m ²	1,01 m ³	980 kg	16,1 %
Telha Cerâmica	75,38 m ²	0,60 m ³	690 kg	11,3 %
Argamassa de assentamento	44,22 m ²	0,24 m ³	320 kg	5,3 %
Membrana hidrófuga	6,43 m ²	0,01 m ³	280 kg	4,6 %
Gesso acartonado	61,78 m ²	0,77 m ³	155 kg	2,5 %
Painel OSB	54,37 m ²	0,51 m ³	90 kg	1,5 %
Manta de Lã de vidro	52,20 m ²	2,62 m ³	78 kg	1,3 %
Tinta interna e externa	20,27 m ²	0,03 m ³	66 kg	1,1 %
Chapa cimentícia	6,43 m ²	0,05 m ³	44 kg	0,7 %
Brita – lastro de fundação	66,07 m ²	3,94 m ³	25 kg	0,4 %
MDF	1,00 m ²	0,05 m ³	9,2 kg	0,2 %
Vidro	7.48 m ²	0.04 m ³	4,6 kg	0,1 %
Total			6,11 tons	100 %

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

A Figura 5.2 abaixo mostra os gráficos com resultados das contribuições de CO₂ relativos aos estágios do ciclo de vida e por estruturas do modelo Pré-fabricado. Considerando apenas a produção dos materiais, a contribuição de CO₂ representa 65%, seguida pela substituição dos próprios materiais, que representam 23% durante os 50 anos de vida útil. Considerando as contribuições de CO₂ em cada estrutura da edificação, a fundação e estruturas horizontais como pisos e cobertura se equivalem, enquanto que nas estruturas verticais como paredes e fachadas há uma redução do CO₂ para 17%.

Figura 5.2 Contribuição de CO₂ incorporado, por estágio e por elemento construtivo Pré-fabricado.



Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

5.1.3 Resultados da ACV no modelo em CLT

A Tabela 5.5 mostra os valores das categorias de impacto do modelo construído em CLT. Assim como nos modelos anteriores, a fase operacional continua sendo a mais impactante, devido ao consumo de energia, manutenção e reposição dos materiais. Na fase pré-operacional, o maior impacto vem da produção dos materiais, com destaque para o concreto de fundação e pisos. A fase de fim-de-vida é a que possui o menor valor de impacto durante a vida útil.

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados da avaliação do ciclo de vida do modelo em CLT.

	Categoria	GWP	AP	EP	ODP	POCP	Energia Primária	Bio-CO2
A1-A3	Materiais de construção	6,51E3	2,99E1	4,54E0	1,65E-3	4,43E0	1,29E5	1,11E4
A4	Transporte para o local	1,32E3	6,05E0	1,32E0	2,61E-4	7,8E-2	3,76E4	
A5	Construção	9,99E2	3,23E0	1,86E0	1,47E-4	1,28E-1	1,8E4	
B1-B5	Manutenção e reposição	2,02E3	1,23E1	1,35E0	1,19E-3	2,21E0	1,15E4	
B6	Uso de energia	2,56E4	1,13E2	1,32E1	3,21E-3	5,94E0	7,09E5	
B7	Uso da água	5,48E3	2,96E1	1,5E1	5,98E-4	1,33E0	1,16E5	
C1-C4	Fim da vida	4,21E2	1,24E0	2,6E-1	5,72E-5	4,8E-2	8,38E3	
D	Impactos externos	-3,33E2	4,83E-1	1E-1	1,12E-5	2,18E-2	2,44E3	
	Total	4,24E4	1,95E2	3,75E1	7,12E-3	1,42E1	1,03E6	1,11E4

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

O resultado total do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para o modelo em Wood Frame é de 42,4 tonCO₂ eq. O quantitativo de Energia Primária é de 1.030 GJ e o de Carbono

Biogênico é de 11,1 tonCO₂eq bio. Esses valores são quantificados durante os 50 anos de vida útil da edificação de 50m².

A Tabela 5.6 mostra os quantitativos de materiais e suas relativas contribuições em dióxido de carbono equivalente, gerados pelo One Click na fase pré-operacional (A1-A3) do modelo em CLT. O concreto utilizado na fundação se apresenta como o material mais nocivo (29,0% de CO₂eq). O CLT, mesmo tendo como matéria prima a madeira, o One Click o contabiliza como material separado da madeira, com diferente impacto desta. A madeira contabilizada como item separado do CLT possui considerável contribuição de CO₂, com 11,4%, devido ao uso de paredes ventiladas (sidings) de madeira para proteção das fachadas externas.

Tabela 5.6 - Materiais e CO₂eq. do Berço ao Portão (A1-A3) para o modelo em CLT.

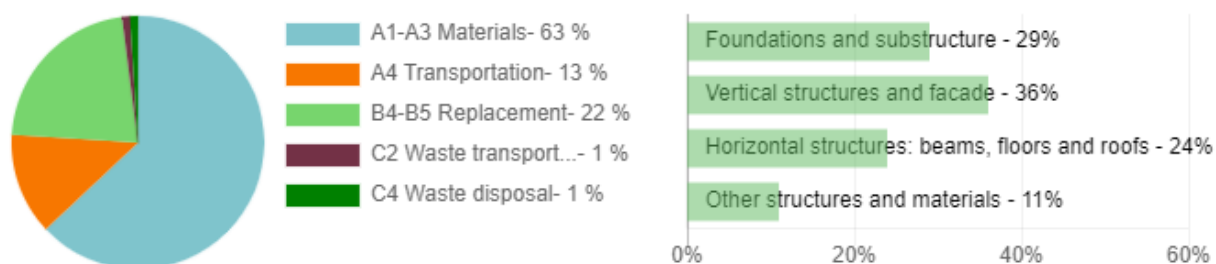
Material	Área	Volume	CO₂eq	Contribuição percentual
Concreto	66,56 m ²	8,26 m ³	1910 kg	29,0 %
Revestimento cerâmico	79,01 m ²	1,03 m ³	990 kg	15,3 %
Chapa de CLT	211,87 m ²	11,54 m ³	940 kg	14,4 %
Madeira	281,11 m ²	3,45 m ³	740 kg	11,4 %
Telha Cerâmica	75,38 m ²	0,60 m ³	690 kg	10,6 %
Argamassa de assentamento	43,83 m ²	0,23 m ³	320 kg	4,9 %
Membrana hidrófuga	6,43 m ²	0,01 m ³	280 kg	4,3 %
Tinta interna e externa	208,01 m ²	0,2 m ³	237 kg	3,6 %
Gesso acartonado	62,87 m ²	0,77 m ³	168 kg	2,6 %
Painel OSB	55,47 m ²	0,53 m ³	93 kg	1,4 %
Manta de Lã de vidro	51,93 m ²	2,60 m ³	77 kg	1,2 %
Chapa cimentícia	6,46 m ²	0,05 m ³	45 kg	0,7 %
Brita – lastro de fundação	66,56 m ²	3,97 m ³	25 kg	0,4 %
MDF	1,00 m ²	0,05 m ³	9,1 kg	0,1 %
Vidro	7,48 m ²	0,04 m ³	4,6 kg	0,1 %
Total			6,53 tons	100 %

Fonte: O autor, extraído de One Click LCA (2022).

Ainda para o modelo em CLT, a figura 5.3 mostra os gráficos com resultados das contribuições percentuais de CO₂ relativos ao estágio do ciclo de vida e por elemento, nomeado pelo One Click como estrutura. Para os estágios do ciclo de vida, desconsiderando os consumos de energia água, a produção dos materiais contribui com 63% de CO₂ incorporado. A substituição dos materiais na fase operacional representa 22% de CO₂ durante os 50 anos de

vida útil da edificação. Considerando a contribuição de CO₂ por elemento construtivo, as estruturas verticais se sobrepõem, devido ao uso elevado de madeira nas paredes e fachadas. As fundações e pisos representam 36% de quantitativo de CO₂, enquanto que as estruturas horizontais como pisos, forro e coberturas representam 24%.

Figura 5.3 - Contribuição de CO₂ incorporado por estágio do ciclo de vida e por elementos (A1-A3).



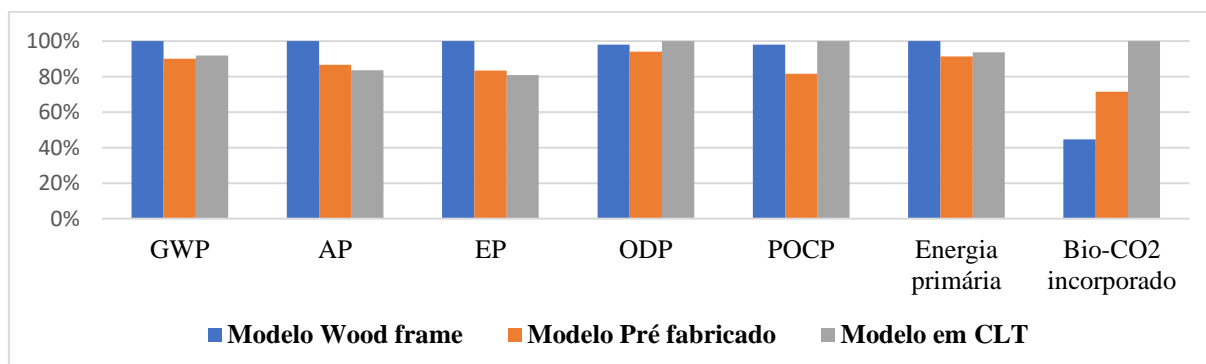
Fonte: Extraído de One Click LCA (2022).

5.2 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE OS MODELOS EM MADEIRA

No sentido de comparar os impactos ambientais totais entre as três edificações a partir da análise de ACV, levando em consideração os valores globais de cada categoria, é possível identificar a contribuição dos impactos causados por cada modelo em determinada categoria, e identificar aqueles que apresentam um melhor desempenho ambiental.

A Figura 5.4 apresenta que as proporções dos quantitativos das categorias nos três modelos analisados apresentam pequenas variações, com exceção do carbono incorporado ou Biogênico (Bio-CO₂). A capacidade de precisão da ferramenta mostra previamente que os impactos ambientais das três tipologias construtivas são aproximados, sem grandes variações.

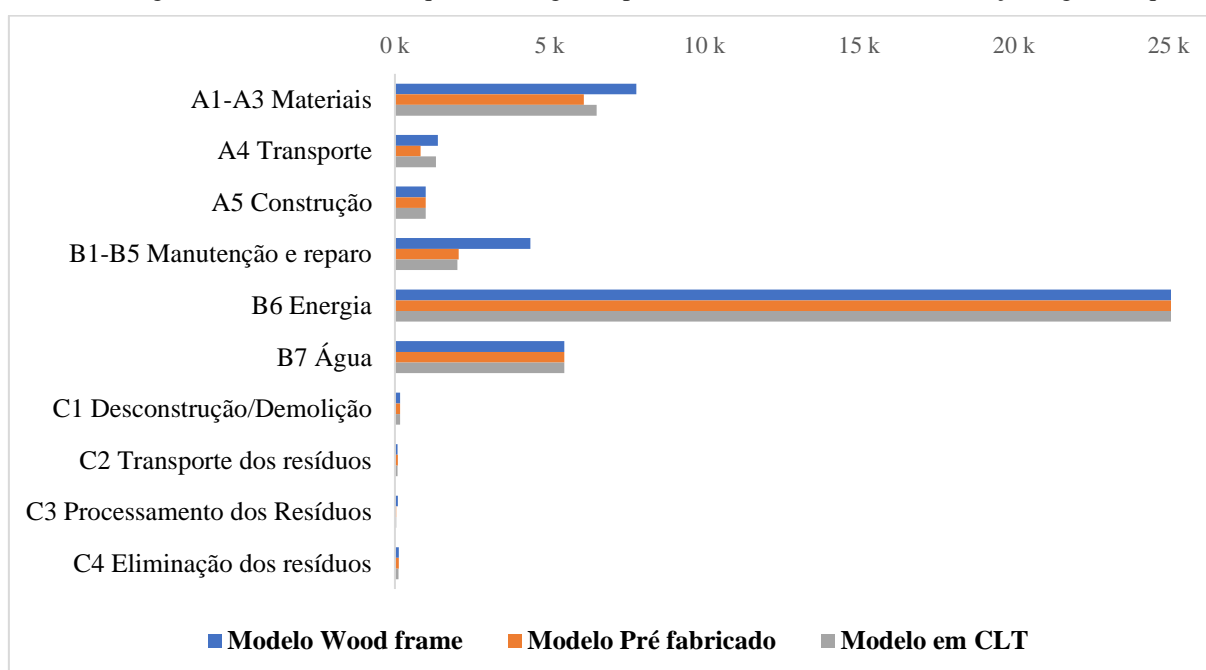
Figura 5.4 - Contribuição de cada categoria de impacto na Avaliação do ciclo de vida, EN-15978.



Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

Na Figura 5.5 observa-se que a fase com maior Potencial de Aquecimento Global é a fase operacional (B1-B5), 69,54% acima da fase pré-operacional, devido ao grande consumo de energia e água, considerando que os consumos de água e eletricidade foram convencionados como iguais para os três modelos por um período também igual de 50 anos. Em seguida vem a fase pré-operacional (A1-A5) como mais impactante, principalmente devido à contribuição da produção dos materiais das diversas camadas constituintes das paredes e fachadas. Também se vê de forma geral, que o modelo em Wood Frame é o maior emissor de dióxido de carbono entre os três modelos, quantitativos a serem detalhados nos próximos resultados.

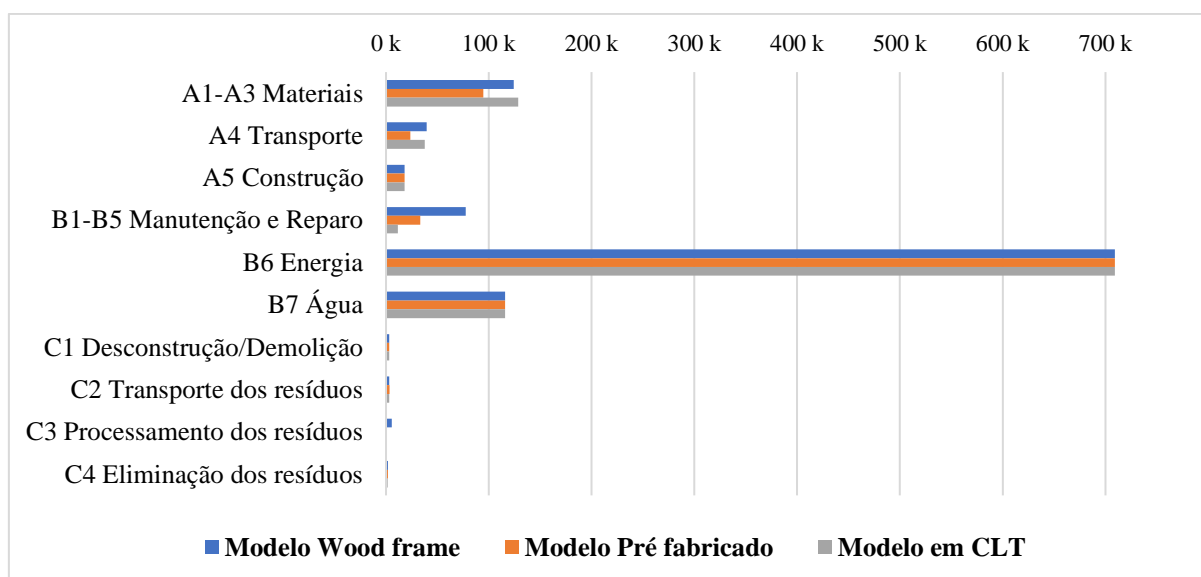
Figura 5.5 - Potencial de Aquecimento global por fase do ciclo de vida da edificação (kg CO₂eq).



Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

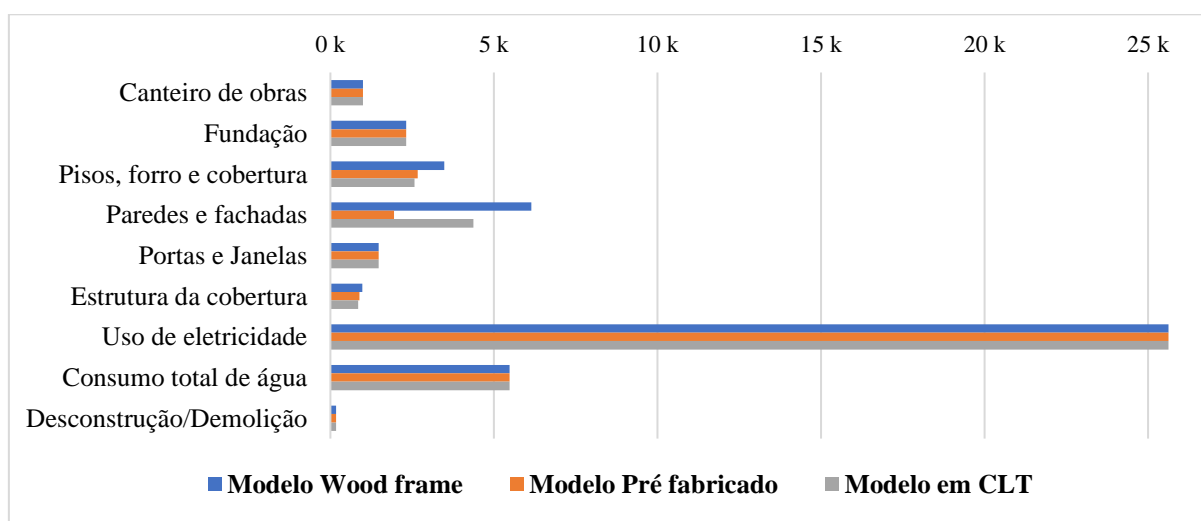
Em relação ao consumo de energia primária entre os modelos, a partir da Figura 5.6 é possível inferir que os resultados obtidos trazem diferenças desproporcionais de energia primária entre as fases operacionais e pré-operacionais. Essa desproporção deve-se aos impactos relacionados aos elevados consumos de eletricidade, nos 50 anos de uso da edificação. Também se constatou diferenças de consumo energético entre os modelos, relacionado ao processamento e fabricação dos materiais, explicado em maiores detalhes no item que coloca o consumo energético de cada material que compõe a ACV da edificação. Quanto ao consumo de energia no processo construtivo ou montagem, convencionou-se o mesmo para os três modelos, e definiu-se apenas a região, onde o One Click considera o cenário brasileiro de forma genérica em seus cálculos.

Figura 5.6 - Uso total de energia primária por fase do ciclo de vida da edificação (MJ).



Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

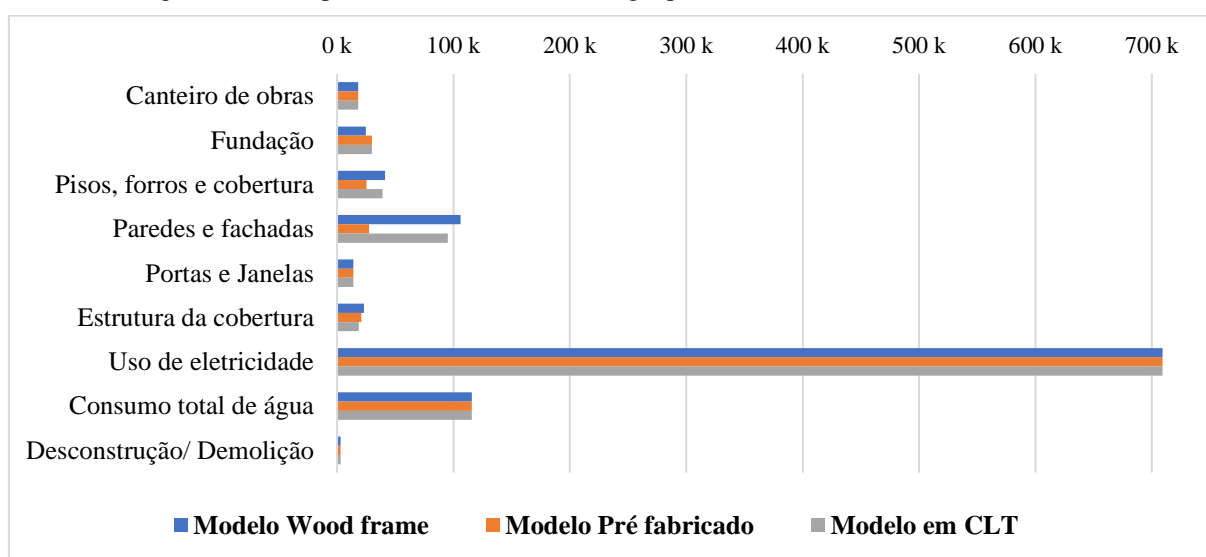
A Figura 5.7 mostra o comparativo de GWP entre os elementos. Excluindo o uso de eletricidade e água, os elementos verticais (paredes e fachadas) são os maiores contribuintes do potencial de aquecimento global. Logo após tem-se a energia primária relativa os elementos horizontais (pisos, forros e cobertura), seguidos pela fundação e estrutura da cobertura. Em relação aos elementos, vê-se previamente que o modelo em wood frame é o mais impactante entre os três, mas quanto a contribuição de cada material, esse estudo será abordado detalhadamente mais à frente.

Figura 5.7 - Comparativo de GWP entre os elementos construtivos (kg CO₂eq).

Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

A Figura 5.8 mostra o comparativo de consumo de energia primária entre os elementos. Como esperado, o consumo de energia é bastante elevado, devido ao consumo de eletricidade em 50 anos para os três modelos. Os elementos verticais (paredes e fachadas) são os maiores consumidores de energia primária. O gráfico também mostra que as paredes e fachadas com maiores consumos de energia primária são as do modelo em wood frame e a construída em CLT, enquanto que as paredes e fachadas do modelo pré-fabricado em madeira é a que menos consome energia para sua produção.

Figura 5.8 - Comparativo de consumo de energia primária entre os elementos construtivos (MJ).



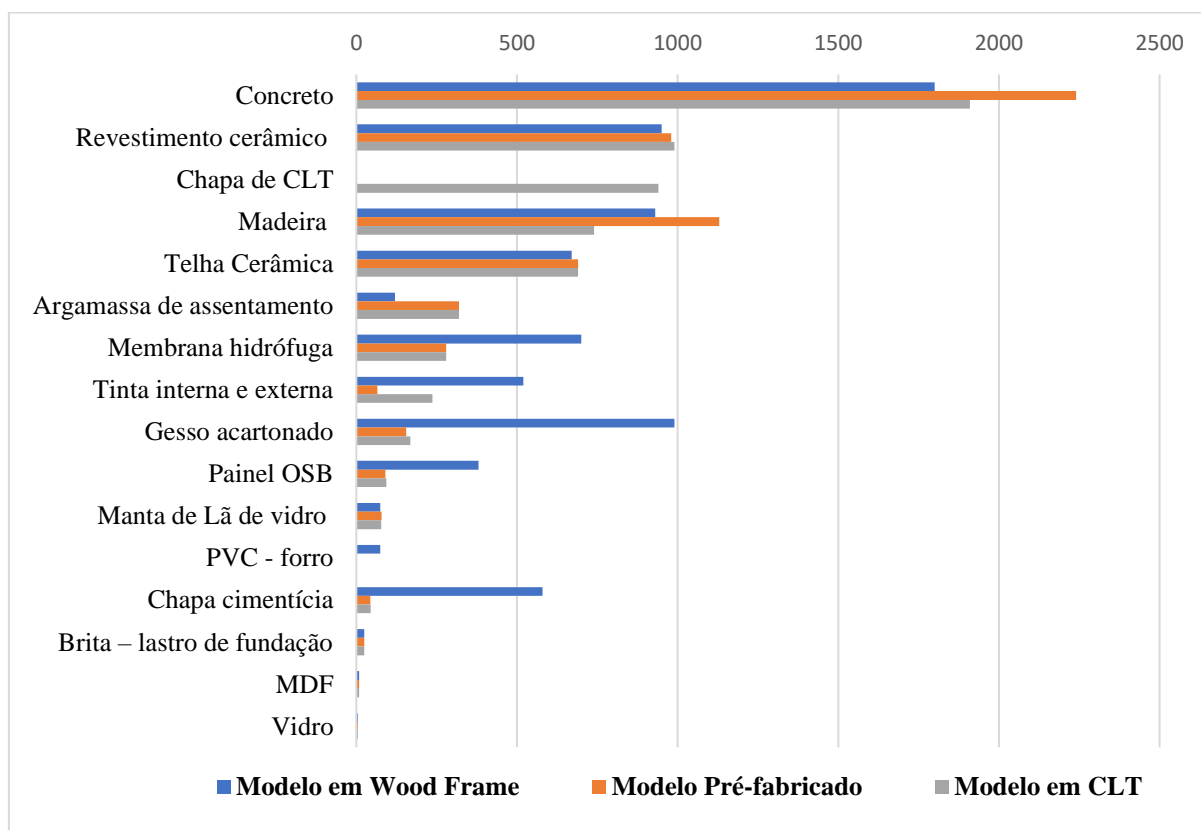
Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

Quanto aos resultados totais da ACV por meio da análise de cada material. Apesar de levantar os dados relativos a todas as etapas de produção da edificação de um modo global, é também importante totalizar os resultados obtidos da composição de cada modelo por meio da análise da participação de cada material em sua composição. Para tanto, cada modelo deve ser avaliado em proporção de composição de massa de cada material incluído para a ACV e em relação a sua proporção na composição dos impactos ambientais gerados pelo carbono incorporado.

A Figura 5.9 faz a comparação dos impactos de carbono incorporado nos materiais, entre as três tipologias construtivas. O concreto é o material com os maiores quantitativos de CO₂ incorporado. Assim como o concreto, os revestimentos cerâmicos também possuem quantidades elevadas de dióxido de carbono incorporado. O impacto de CO₂ incorporado na madeira, material característico dos três modelos, é também o principal material a ser analisado nesse estudo. Foram considerados três tipos de madeira tratada, segundo suas densidades: Pinus

como madeira macia, Eucalipto como madeira média e para portas e janelas foi definido a madeira densa.

Figura 5.9 - Comparativo de carbono incorporado (estágio A1-A3) entre os modelos (CO2eq.).



Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

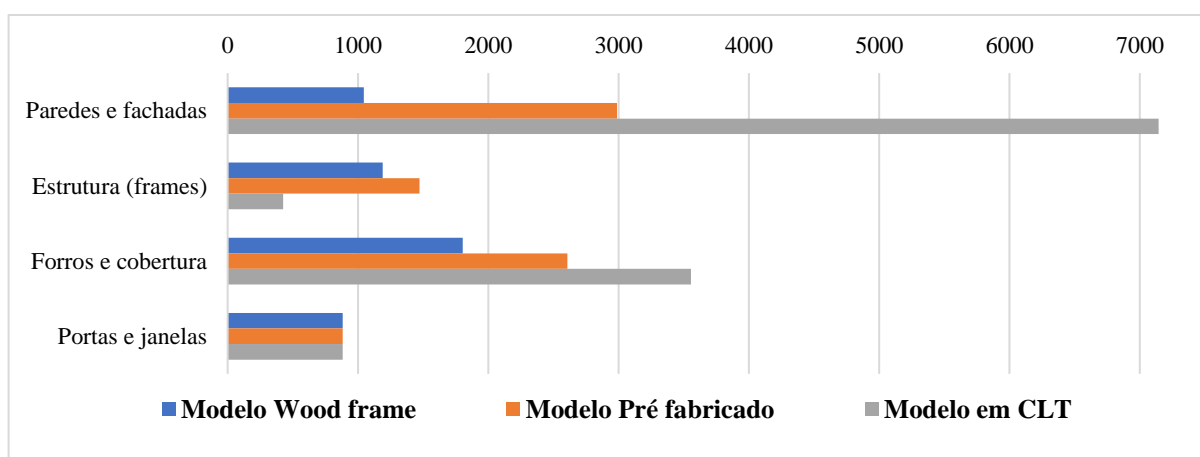
A Figura 5.9 acima, mostra ainda o modelo em CLT como o menos impactante em relação à madeira, pois o volume de madeira considerado no modelo está classificado e contabilizado pelo One Click como material CLT, portanto, a madeira utilizada nos elementos verticais do modelo em CLT tem seu maior impacto nos *sidings* de proteção das fachadas. O modelo com mais CO2 incorporado em relação à madeira é o Pré-fabricado, pois utiliza o material em quase todos os elementos construtivos. Já o modelo em wood frame possui alguns dos materiais mais impactantes quanto ao carbono incorporado. Estes materiais são os outros componentes das paredes, como gesso acartonado, chapas cimentícias, painéis OSB, membranas hidrófugas e os próprios acabamentos ou pinturas.

Este tópico apresenta os resultados das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de materiais de base biológica, como a madeira, chamado de carbono biogênico. Existem duas abordagens para a contabilização do carbono biogênico (KOZLOSKI, 2020). A primeira abordagem é que pode ser considerado neutro e excluído, ou contabilizado como

armazenamento de carbono, levando em consideração que o CO₂ é capturado da atmosfera durante a fotossíntese e retido dentro do material por um número de anos. Esse estudo considera essa segunda abordagem. Como o Carbono biogênico está relacionado diretamente ao volume de madeira utilizado em cada elemento da edificação, as paredes e fachadas se sobressaem, seguidas pelos forros e cobertura, e menos impactantes são as estruturas e esquadrias em madeira.

A Figura 5.10 mostra que quantitativo de carbono biogênico nas paredes e fachadas do modelo em CLT é maior que o dobro do modelo pré-fabricado, que também é o dobro do modelo em wood frame. Essa diferença está relacionada ao volume de madeira nas camadas das paredes e fachadas. O modelo em CLT é constituído por um volume elevado de madeira e colas, também possui chapas com maior espessura, além da necessidade de sidings de proteção, também em madeira. As paredes do modelo pré-fabricado possuem duas camadas de régua (tábuas) de madeira. Já as paredes em wood frame possuem como matéria de base biológica apenas a camada de OSB e a própria estrutura.

Figura 5.10 - Comparativo de Carbono Biogênico entre os elementos construtivos (kg CO₂eq bio).



Fonte: O autor, a partir dos resultados de One Click LCA (2022).

A Figura 5.10 acima, mostra ainda que o Carbono biogênico incorporado nas estruturas. O modelo pré-fabricado possui uma quantidade pouco maior que o modelo em wood frame, devido à espessura e afastamento dos *frames* de sustentação. Enquanto que no modelo em CLT a parede é autoportante, não necessitando de estrutura, ocorrendo apenas nas paredes das áreas molhadas, compostas de OSB, chapas de gesso e cimentícias. O Carbono biogênico nos forros e cobertura do modelo em CLT possui maior quantitativo devido ser também em chapa de CLT, essa com maior espessura que as régua de madeira do forro do modelo pré-fabricado. Enquanto que o forro do modelo em wood frame possui madeira apenas na estrutura de sustentação das

chapas de gesso acartonado. Por fim, tem-se a contribuição do carbono biogênico das portas e janelas, idênticas para os três modelos, produzidas em madeira densa e maciça, e compostas ainda de vidro e verniz de proteção.

5.3 VALIDADE DOS DADOS E REFERÊNCIAS *BENCHMARKS*

O One Click possui um recurso verificador de integridade e plausibilidade de dados, uma checagem através de algoritmo, que dá aos dados de entrada (*inputs*) uma nota geral, com base em quão completos são em relação aos dados de referência. Podendo assim, serem feitas pesquisas adicionais para melhoramentos e validações manuais desses dados.

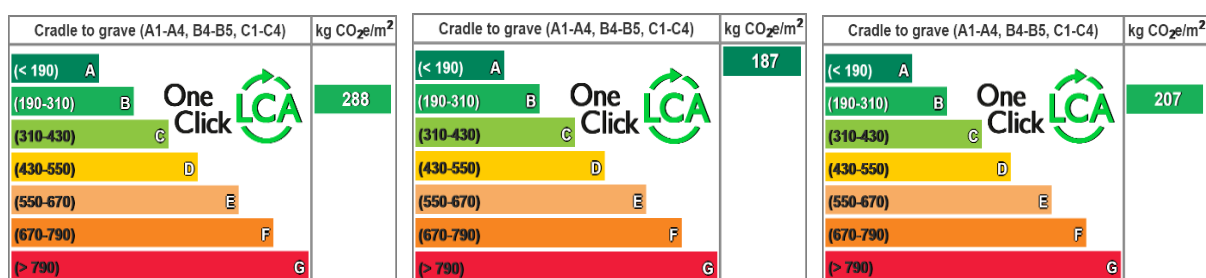
Além do Verificador de Plausibilidade, o One Click possui o Carbon Heroes Benchmarks - CHB como apoio para seus resultados. O CHB é um recurso que fornece referências de linha de base (*baseline*) de carbono incorporado para diferentes tipos de construção em diferentes países, por m² de área bruta interna, utilizando o método de caracterização escolhido para o estudo. O CHB oferece uma análise de *benchmark* de edifícios que usaram o One Click LCA para realizar sua análise de ciclo de vida. Os *benchmarks* são os resultados das entradas de quantidade de material feitas pelos usuários do One Click LCA. O programa implementa os padrões EN 15978/ISO 21930 como base de medição e inclui os estágios do ciclo de vida A1-A3, A4, B4-B5 e C1-C4. (ONE CLICK LCA, 2022).

A ferramenta fornece um *feedback* instantâneo sobre o desempenho ambiental do edifício, em comparação com milhares de projetos de construção semelhantes no mesmo país, região ou globalmente. São projetos anônimos verificados por pares, usando o software One Click LCA. Os dados são incluídos nos benchmarks com base em triagem automatizada ou manual que considera consistência, integridade e plausibilidade. Projetos que exibem valores anormais ou inconsistências são excluídos da amostra.

O CHB mostra a classificação de desempenho, com os impactos de dióxido de carbono incorporado para os três modelos analisados nesse estudo, que vai de “A” a “G”. A métrica de desempenho inclui a faixa de resultados em dois desvios padrão da média para o tipo de edifício. A faixa é dividida em sete bandas igualmente distribuídas. A média dos resultados está dentro da banda “D”, e os extremos inferior e superior do intervalo estão nas bandas “A” e “G”, respectivamente. Nesse estudo, as definições de referência para o carbono incorporado são para projetos globais de edificação unifamiliar de 50 m² de área bruta interna, para o ano de 2021 (CH Q3 2021 Global - single house). Para projetos com referência global, os valores demonstrados são reduzidos em 25%.

A Figura 5.11 abaixo mostra a classificação de desempenho do CHB. O valor total do quantitativo de carbono incorporado para o modelo em wood frame é de 46.149 kg CO₂eq. e de 288 kg CO₂eq por metro quadrado construído, sendo o modelo ficou classificado na banda “B”, que vai de 190 a 310 kg CO₂eq/m². O total para o carbono incorporado para o modelo pré-fabricado é de 41.540 kg CO₂eq. e de 187 kg CO₂eq/m², sendo classificado na banda “A”, para valores abaixo de 190 kg CO₂eq/m². E os valores totais para o modelo em CLT é de 42.379 149 kg CO₂eq. e 207 187 kg CO₂eq/m², também classificado na banda “B”.

Figura 5.11 - Classificação de desempenho de carbono incorporado para wood frame, pré-fabricado e CLT.



Fonte: Extraído de One Click LCA, gerado por Carbon Heroes Benchmarks (2022).

Portanto, segundo as referências do Carbon Heroes Benchmark, os três modelos analisados nesse estudo estão bem classificados, quanto aos seus desempenhos ambientais. Os modelos em CLT e Pré-fabricado apresentaram desempenhos aproximados e o modelo Pré-fabricado mostrou o melhor desempenho, enquanto que o modelo em CLT apresentou um desempenho 9,66% abaixo do Pré-fabricado. O modelo em wood frame mostrou o pior desempenho entre os três, com 28,13% abaixo do CLT e 35,07% abaixo do Pré-fabricado.

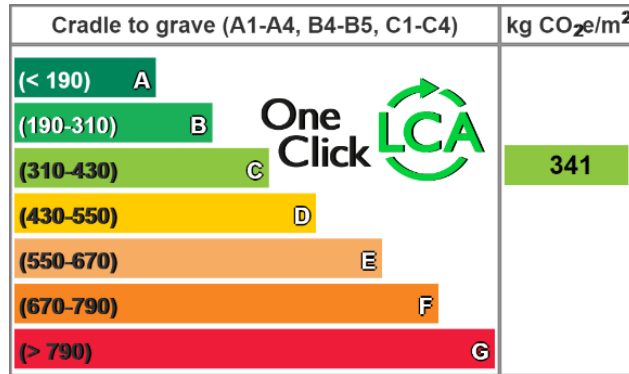
5.4 RESULTADOS COMPARATIVOS COM O MODELO EM ALVENARIA

Para efeitos comparativos *benchmarks* foi analisado também no One Click LCA um modelo em alvenaria de blocos de concreto. O padrão da edificação utilizada como referência também é o R1-B do CUB (SINDUSCON-PA, 2021), com desempenho pela NBR 15575 e seguindo todas as características dimensionais e critérios anteriores, dos três modelos em madeira. A escolha por simular comparativamente também este sistema construtivo se deu por conta de este ser um sistema construtivo autoportante, e pelo sistema ser bastante usual em edificações habitacionais no Brasil. (MAIDEL, 2020).

Na Figura 5.12 abaixo é mostrado o resultado do desempenho ambiental do modelo em alvenaria de blocos de concreto. O valor total do quantitativo de carbono incorporado para o

modelo é de 48.622 kg CO₂eq. e de 341 kg CO₂eq por metro quadrado construído. Assim, o modelo ficou classificado na banda “C” no Carbon Heroes Benchmarks, que vai de 310 a 430 kg CO₂eq/m².

Figura 5.12 - Classificação de desempenho de carbono incorporado para o modelo em alvenaria.



Fonte: Extraído de One Click LCA, gerado por Carbon Heroes Benchmarks (2022).

A análise comparativa comprova que os modelos construtivos em madeira apresentam melhores desempenhos ambientais que o modelo em alvenaria. Este apresentou um desempenho de 15,54% abaixo do modelo em madeira com o pior desempenho, o Wood frame. E em relação ao modelo em madeira com melhor desempenho, o Pré-fabricado, o modelo em alvenaria apresentou um desempenho 45,16% abaixo.

6 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Essa pesquisa se propôs a quantificar e comparar os impactos ambientais através de análise de ACV de três tipologias construtivas em madeira, utilizando ferramentas baseadas em plataforma BIM. Para a integração BIM-ACV foram utilizados o programa modelador Autodesk Revit e a análise da ACV feita pelo plugin One Click LCA.

Vale ressaltar que ainda se tem poucos registros de estudos brasileiros de ACV em BIM com relação às tipologias construtivas em madeira. Este estudo é pioneiro com relação à análise dos impactos ambientais gerados por construções sustentáveis, comparados entre si. Uma das contribuições desse estudo, foi analisar e avaliar as potencialidades e dificuldades de diversas ferramentas do mercado, segundo critérios definidos, para ser ter conhecimento da mais adequada para a realidade brasileira, no estudo de caso de edificações em madeira.

A escolha por uma ferramenta baseada em plugin seria possibilitar uma análise rápida e sucinta dos impactos ambientais, sem muito esforço. Onde o uso da ferramenta e o processo de automatização na transferência de dados tornasse possível analisar os impactos ambientais da vida útil do edifício, mesmo sem muito conhecimento técnico sobre ACV.

6.1 Conclusões quanto ao uso do plugin One Click LCA

Inicialmente não se esperava encontrar maiores dificuldades para alcançar os objetivos, devido a utilização de metodologia BIM representar uma análise mais simples e intuitiva. Contudo, foram encontradas dificuldades ao longo desse estudo. Nem todos os materiais modelados no Revit foram reconhecidos de forma automatizada pelo One Click LCA. E o processo de integração manual dos materiais restantes se mostrou complexo e demorado, devido a um filtro ineficiente para a grande variedade de materiais. Para a escolha, a metodologia só abrange os elementos selecionados e não todos os que estão presentes na base de dados. Para otimizar esse processo de integração automática, há a necessidade de uma modelação mais adequada no Revit. Uma adaptação dos elementos para reconhecimento total e automatizado pelo plugin dos dados modelados torna o uso da ferramenta bastante célere.

Foram verificadas algumas facilidades do plugin, como a identificação dos materiais e estágios do ciclo de vida que mais contribuíram para os impactos das edificações. Todavia, a falta de um banco de dados ou de DAPs completas dos materiais nacionais poderiam trazer maior facilidade a esse estudo, e resultados mais consistentes em relação à realidade nacional da construção civil. No entanto, nesse estudo ainda foi necessário buscar algumas fontes internacionais para avaliar os impactos gerados pelas edificações. Reconhece-se como uma limitação do trabalho a falta de acesso e inexistência de alguns materiais para compor a base de

dados utilizada para obtenção do impacto ambiental dos materiais no Brasil. Utilizar uma base de dados estrangeira pode apresentar padrões distintos da realidade local.

Conclui-se que o uso de plugins apresentam um potencial efetivo de auxílio à elaboração de uma ACV no Brasil, permitindo de forma simplificada a avaliação de diferentes opções construtivas de edificação, identificando onde ocorrem os maiores impactos ambientais e como esses impactos podem ser comparados dentre as diversas opções de materiais. Mas é importante ressaltar que sua maior deficiência ainda se encontra no banco de dados, que em sua maioria são genéricos, possuindo apenas alguns materiais da Construção Civil para o contexto brasileiro.

O One Click mostrou um desempenho satisfatório, apesar de não ser tão confiável quanto um programa de ACV dedicado. Mas é importante ressaltar que seu uso ainda tem muito a evoluir, e que seu desenvolvimento pode auxiliar de maneira rápida e precisa os projetistas durante o processo de tomada de decisão, permitindo que critérios ambientais e de sustentabilidade possam fazer parte do escopo de análise para edificações.

A utilização do One Click LCA pode ser uma ferramenta importante para a difusão da ACV no processo de projeto, já que apresentou aumento da produtividade no que tange a administração de dados de ICV e velocidade de execução de análises de impacto, em comparação com métodos tradicionais de ACV. Mas é necessário, porém, realizar maiores validações a fim de garantir que a integração entre BIM e ACV garanta resultados tão precisos quanto aqueles realizados por ferramentas dedicadas.

6.2 Conclusões quanto aos impactos ambientais das edificações

Quanto aos impactos ambientais, o estudo mostra que nos três modelos a fase operacional se destaca em relação à fase de produção e em relação à fase de fim-de-vida, devido ao elevado consumo de energia na fase operacional na vida útil das edificações. Também houveram grandes diferenças nos resultados do GWP entre as fases pré-operacionais e pós-operacionais, em virtude do quantitativo de madeira em cada tipologia construtiva, ou seja, da capacidade da madeira em armazenar carbono durante o processo de crescimento das árvores. Este resultado demonstra a grande capacidade da madeira, principal matéria prima para a fabricação dos sistemas construtivos, em fazer o sequestro de carbono e, finalmente, de liberar energia apenas ao final de seu ciclo de vida, durante o processo de queima.

O estudo mostra que o resultado total de desempenho ambiental não apresentou grandes diferenças entre os modelos. O Pré-fabricado foi o que apresentou melhor desempenho, enquanto as tipologias em CLT e Wood frame apresentaram resultados aproximados, sendo que

o pior resultado foi o do modelo em Wood frame, que tem uma grande fatia de suas emissões, no processo de industrialização das chapas de gesso e das maiores distâncias do centro de produção para o local de uso.

Quando os revestimentos ou acabamentos são discutidos, é importante destacar que cada tipologia construtiva possui sua própria e adequada proteção, então é necessário lembrar que as indicações dos materiais utilizados estão diretamente relacionadas às necessidades da madeira e, portanto, esse é um fator decisivo dos impactos de cada tipologia. Quanto às proteções contra intempéries e umidades, elas refletem nas quantidades de proteções ou volume de madeira. Desta forma, para determinado modelo há uma necessidade maior de camadas de proteção, (gesso acartonado, membranas impermeáveis ou fachada ventilada tipo *siding*). No caso do CLT, a fabricação dos painéis necessita de processos de autoclavagem e proteção química da madeira, além do uso de colas e adesivos que podem representar o aumento de impacto ambiental no material, assim como os acabamentos (tintas, *stains* e *primers* de proteção).

A coleta de dados relativa à algumas etapas do ciclo de vida de uma edificação em madeira foram determinantes para os resultados deste estudo, tal como a etapa de construção ou montagem da edificação, uma vez que esta precisou ser preenchida de modo manual e seu levantamento precisou ser elaborado em um processo separado. Alie-se a isso a dificuldade em levantar dados relativos à montagem de edificações em madeira. Neste sentido, optou-se por incluir apenas dados globais do cenário construtivo para esta etapa, ainda que isto represente uma fragilidade da pesquisa, visto as grandes diferenças nas técnicas de montagem de cada um dos três modelos.

6.3 Conclusões sobre validações e comparativos

Para verificação de validade dos dados o Verificador de Plausibilidade da ferramenta foi de grande utilidade, mas quanto aos *benchmarks*, não é correto comparar os resultados do One Click com os de outros programas de ACV, ou com resultados de outros autores como referência. Ainda que utilizando os mesmos programas, haveriam diferenças de tipologias construtivas, metodologias de cálculo, base de dados e regiões. No entanto, o recurso Carbon Heroes Benchmarks se mostrou de grande valia, pois forneceu referências de carbono incorporado, sendo possível ranquear os impactos e identificar as edificações que apresentaram um melhor desempenho ambiental. Servindo assim, para apoiar comparações de impactos e configurações de meta de redução de carbono incorporado. Mas é importante entender que a ACV é sempre uma estimativa baseada nos melhores dados disponíveis no momento. Obter resultados razoáveis foi o objetivo do estudo.

6.4 Considerações finais

Sendo assim, pode-se concluir que a pesquisa atingiu seu objetivo, quantificou as emissões de dióxido de carbono nas fases da ACV de três diferentes modelos digitais de edificações em madeira. E com isso, foi possível perceber que das tipologias construtivas em madeira, apenas a Pré-fabricada apresentou impactos ambientais substancialmente menores, em comparação com a tipologias em alvenaria. O fator determinante para que esses impactos não sejam menores em relação à alvenaria, está na necessidade de enquadramento às normas de desempenho, que exigem elevados quantitativos de materiais para proteção da madeira. Outro fator está na própria técnica construtiva, quanto mais industrializado se torna o processo, mais impactante ambientalmente se torna a edificação.

Ainda assim, o uso de tipologias construtivas em madeira é positivo se analisado a partir do aspecto ambiental, em comparação com técnica em alvenaria, em virtude do armazenamento de carbono das árvores e pela redução em massa da edificação. Conclui-se que o uso da madeira pode mitigar os impactos ambientais causados pela construção, mas que ainda são necessários mais estudos acerca do tema, e que outros aspectos a respeito da sustentabilidade da madeira para a construção de habitações sejam considerados. E assim se estabeleçam metas de redução com base no tipo e nas práticas de construção locais, comparando os impactos do ciclo de vida do material e escolha das soluções de baixo carbono.

6.5 Sugestões para estudos e trabalhos futuros

No sentido de prosseguir com os estudos sobre ciclo de vida das edificações, e trabalhos de ACV através da integração ACV-BIM, esforços futuros devem ser direcionados por parte dos desenvolvedores de software, para a ampliação das opções de personalização e da transparência dos métodos de cálculo, e desenvolvimento de metodologias de cálculo regionalizadas. As metodologias empregadas pelas ferramentas devem ser adaptáveis, evitando especificidades, podendo serem usadas em variados contextos. Recomenda-se ainda o desenvolvimento, aprimoramento e divulgação de bases de dados e metodologias que reproduzam o contexto brasileiro, como forma de mitigar as atuais insuficiências da ACV de edificações, integrada a plataformas BIM. Além de Ampliar o banco de dados nacional existente e das declarações ambientais – DAP para produtos da construção civil, é recomendável estabelecer a durabilidade dos materiais, e criar banco de dados digitais, com a inclusão de materiais com parâmetros ambientais para uso em BIM.

E por fim, a sugestão de desenvolver tecnologias mais sustentáveis para construções em madeira. Também elaborar o levantamento do consumo energético e emissão de dióxido de

carbono relativos à etapa de construção ou montagem de edificações em madeira. Comparar ACV de edificações em madeira em diferentes bases de dados, e por meio da utilização de diferentes métodos de cálculo para fins comparativos, além da certificação de que os valores estão em concordância com os resultados obtidos por meio do uso de plugins em BIM para Avaliação do ciclo de vida de edificações.

REFERÊNCIAS

- ABRAIN - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS. **ABRAIN Explica**. 28/06/2021. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/abrainc-explica/2021/06/28/abrainc-explica-a-importancia-da-construcao-civil-para-impulsionar-a-economia-brasileira/>. Acesso em 20 dez. 2021.
- AGÊNCIA CBIC. **Oito pontos sobre o crescimento da construção civil e seu impacto no PIB**. 05/03/2020. Disponível em: <https://cbic.org.br/oito-pontos-sobre-o-crescimento-da-construcao-civil-e-seu-impacto-no-pib/>. Acesso em 20 dez. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA e IBGE. **Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil. (2023 – 2027)**. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/d8637e357d3b6e94d4f353d29cf7212f.pdf. Acesso em: 9 jun. 2021.
- AJAYI, S. O. *et al.* **Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment**. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. v. 6, n. 1, p. 14-24. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1006708>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTURE - **AIA**. Document – 2010. Element Table. *In: AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice 2010*. Disponível em: <https://www.aia.org/resources/7961-building-life-cycle-assessment-in-practice>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTURE - **AIA**. Document G204 – 2022. Element Table. *In: AIA Digital Practice Documents 2022*. Disponível em: <https://www.aiacontracts.org/contract-documents/6524349-model-element-table>. Acesso em: 9 jan. 2022.
- ANTÓN, L. Á; DÍAZ, J. Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 26 -32, Giessen, Alemanha, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.525>. Acesso em: 8 dez. 2021.
- AJAYI, S. O. *et al.* **Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment**. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. v. 6, n. 1, p. 14-24. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1006708>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- ARAÚJO, V. de A. *et al.* **Woodframe: light framing houses for developing countries**. Revista de la Construcción, v. 15, n. 2, p. 78-87, Scielo. 2016. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718915X2016000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 05 jan. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6063**: Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/40070/1837975/ABNT+NBR+6023+2018+%281%29.pdf/3021f721-5be8-4e6d-951b-fa354dc490ed>. Acesso em: 02 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/176706/>. Acesso em: 03 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040 (2009)**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-14.040-Gest%C3%A3o-Ambiental-avaliac%C3%A3o-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044 (2009-b)**. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/28378/abnt-nbriso14044-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-requisitos-e-orientacoes>. Acesso em: 02 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1 2021**. Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1. Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/523013017/NBR-15575-1-2021-Edificacoes-Habitacionais-Desempenho-Parte-1-Requisitos-Gerais>. Acesso em: 02 mar. 2021.

AYRES, F. C. **Acesso ao Modelo Integrado do Edifício**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 149 p. - ST-UFPR. Curitiba, PR. 2009. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/20219>. Acesso em: 13 set. 2021.

BOWYER, J. *et al.* **Modern Tall Wood Buildings: Opportunities for Innovation**. Relatório técnico. Dovetail Partners. Janeiro de 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312136949_Modern_Tall_Wood_Buildings_Opportunities_for_Innovation. Acesso em: 27 jan. 2022.

BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B.; CRUZ, H.; NUNES, L. **Casas de madeira. Da tradição aos novos desafios**. Seminário Casas de Madeira. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães. Portugal. 2013. Disponível em: http://www.hms.civil.uminho.pt/events/casas_madeira/7586.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

BUENO, C.; FABRICIO, M. M. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. **Automation in Construction**, v. 90, jun. 2018, p. 188-200. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>. Acesso em: 03 abr. 2021.

CALDAS, L.; TOLEDO FILHO, R. D.; CARVALHO, M. T. M. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. In: **Paranoá**, nº 28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n28.2020.09>. Acesso em: 22 nov. 2021.

CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras**. Implementação BIM - Parte 2. Brasília, DF. 2016b. Disponível em: <https://cbic.org.br/faca-o-download-da-coletanea-bim-no-site-da-cbic/>. Acesso em 11 nov. 2021.

CHENG, J. C. P.; WON, J. **Evaluating the Design of Low Carbon Buildings of Different Configurations Using Building Information Modeling (BIM)**. In: 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. **Anais...** Osaka, Japão. 2016. Disponível em: http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeit/icccbe2016/Proceedings/Full_Papers/053-339.pdf. Acesso em: 22 out. 2021.

CRIPPA, Julianna. **Integração BIM-ACV como apoio à tomada de decisão na fase de concepção de projeto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, 113 p. Curitiba, PR, 2019. In: Acervo Digital da UFPR, 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/62546>. Acesso em: 04 jan. 2021.

CRIPPA, J.; ARAÚJO, A. M. F.; BEM, D.; UGAYA C. M. L.; SCHEER, S. A systematic review of BIM usage for life cycle impact assessment. In: **Built Environment Project and Asset Management**, vol. 10 No. 4, pp. 603-618, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BEPAM-03-2019-0028>. Acesso em: 12 mar. 2022.

DALLA MORA, T.; BOLZONELLO, E.; CAVALLIERE, C.; PERON, F. Key Parameters Featuring BIM-LCA Integration in Buildings: A Practical Review of the Current Trends. **Sustainability**, 12, 7182, Veneza, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12177182>. Acesso em: 02 ago. 2021.

DE AZEVEDO, L. D.; GERALDI, M. S.; GHISI, E. Avaliação do Ciclo de Vida de diferentes envoltórias para habitações de interesse social em Florianópolis. In: **Ambiente Construído – Edição Especial ANTAC**, 20 (4), out - dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400463>. Acesso em: 28/11/2021. Acesso em: 02 ago. 2021.

DE AZEVEDO, N. C. **Avaliação do ciclo de vida energético e de CO₂ através da modelagem da informação da construção (BIM) e simulação termo energética de uma habitação unifamiliar em wood frame**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal do Paraná. 157 páginas. Curitiba, PR. 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/64246>. Acesso em: 02 nov. 2021.

DE LIMA, M. G.; SILVA, B. T. R. V. **Proposta de integração entre BIM e ACV utilizando composições de serviço**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8659910>. Acesso em: 03 nov. 2021.

DESIGNBUILDER. **Import 3-D BIM Data (gbXML)**. Junho de 2019. Disponível em: https://designbuilder.co.uk/helpv4.6/Content/Import_3-D_CAD_Data.htm. Acesso em: 27 fev. 2022.

DESIGNBUILDER. **Tutorial DesignBuilder Revit – gbXML**. Junho de 2019. Disponível em: https://designbuilder.co.uk/downloads/db_revit_tutorial_v1.pdf. Acesso em 27 fev. 2022.

DUDEK, L. C.; RIBASKI, N. G.; ROTTA, C. E. **O sistema wood frame e o setor madeireiro paranaense**. Brazilian Applied Science Review. v. 1, nº 2, p. 34-41. ISSN: 2595-3621. 2017. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/190>. Acesso em: 09 set. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ELÉTRICA – EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 (Ano Base 2021)**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **European Standard EN 15804:2012+A1:2013**. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2013. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/a7de5991-2e9f-4e93-b34c-f1d794cbca02/en-15804-2012a1-2013>. Acesso em: 11 mar. 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **European Standard EN 15978: 2011**. Sustainability of construction works – assessment of environmental performance of buildings – Calculation method, 2011. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c22cef-5666-4719-91f9-c21cb6aa0ab3/en-15978-2011>. Acesso em: 12 mar. 2021.

EVANGELISTA, P. P. de A. **Desempenho ambiental na construção civil: parâmetros para a aplicação da avaliação do ciclo de vida em edificações residenciais brasileira**. Tese de doutorado em ciências, energia e ambiente. Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA. 2017. Disponível em: <http://www.cienam.ufba.br/sites/default/files/TESE%20FINAL%20-%20PATRICIA%20EVANGELISTA.pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.

FOGGIATO, W. S. **Apreensão de Carbono em Construções de Madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). 41 p. Santa Maria, RS. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22452>. Acesso em: 11 mar. 2021.

GUESSER, I. **Estudo de caso: modelagem em BIM de uma edificação aplicando o sistema Wood Frame**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2019, 136 p. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1838/TCC_ISABEL%20GUESSE%20R_ESTUDO%20DE%20CASO%20MODELAGEM%20EM%20BIM%20DE%20UMA%20EDIFICA%C3%87%C3%83O%20APLICANDO%20O%20SISTEMA%20WOOD%20FRAME.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 01 mar. 2022.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório da Indústria Brasileira de Árvores**. 80 páginas. Brasília. 2017. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2022.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global CO2 emissions in 2019**. 11/02/2020. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>. Acesso em: 12 dez. 2021.

JALAEI, F.; ZOGHI, M.; KHOSHAND, A. Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM).

International Journal of Construction Management. 1–18 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1583850>. Acesso em: 05 out. 2021.

KYLILI, A.; ILIC, M.; FOKAIDES, P. A. **Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 169-177. janeiro de 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344519256_Avaliacao_do_Ciclo_de_Vida_de_diferentes_envoltorias_para_habitacoes_de_interesse_social_em_Florianopolis. Acesso em: 22 dez. 2021.

KOZLOSKI, Cássia L. **Emissão de CO₂ de materiais de construção civil no Brasil: estimativas na etapa projetual de edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 273 p. Santa Maria, RS, 2020. In: Manancial – Repositório Digital da UFSM, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22670>. Acesso em: 04 jun. 2021.

LAMB, A. L.; ASSENHEIMER, B. F.; ENDERLE, T. P.; PEDROZO, É. C. Estudo sobre o sistema construtivo wood frame e suas vantagens e desvantagens. *In: XXVIII Seminário de Iniciação Científica do Salão do Conhecimento – UNIJUÍ*, v. 6 n. 6, 2020. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/18377>. Acesso em: 22 jun. 2022.

LARIVOIR, L. do C. B. de P. **A utilização de sistemas BIM na fase de projeto de edificações para análise de impactos ambientais dos materiais de construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). 95 páginas. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2017. disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2500.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2021.

LLAVE, M. C. **Ferramentas de Avaliação de Ciclo de Vida integradas a plataforma BIM: estudo de caso de edificação unifamiliar**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2020. Repositório Institucional UFSCar. 185 p. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13711?show=full>. Acesso em: 11 out. 2021.

MAIDEL, Bruna. **Avaliação do Ciclo de Vida de edificações verticais: estudo comparativo entre CLT (Cross-Laminated Timber), e alvenarias convencionais a partir do projeto em BIM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná. 194 p. Curitiba, PR, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69610>. Acesso em: 27 set. 2021.

MARTINS, Bruno Filipe. B. **Utilização de BIM e métodos de sustentabilidade em elementos na construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em construções). Universidade do Porto, 114 p. Porto, Portugal, 2018. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~gequaltec/w/images/Utiliza%C3%A7%C3%A3o_de_BIM_e_m%C3%A9todos_de_sustentabilidade_em_elementos_na_constru%C3%A7%C3%A3o_Bruno_Martins_Disserta%C3%A7%C3%A3o_Mestrado_MIEC_FEUP.pdf. Acesso em: 04 jan. 2021.

MENDES, Natália C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos - UFSCar. 149 p. São Carlos,

SP, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-15102013-085143/publico/NataliaCrespoMendesDEFINITIVO.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

METOFFICE - SERVIÇO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO REINO UNIDO. **Atmospheric carbon dioxide at record high levels despite reduced emissions in 2020**. 07/04/2021. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/news/2021/record-co2-levels-despite-lower-emissions-in-2020>. Acesso em 11 nov. 2021.

MOLINA, J. C.; CALIL, C. **Sistema construtivo em "wood frame" para casas de madeira**. Artigo no Seminário Ciências Exatas e Tecnológicas. São Paulo, SP. Outubro de 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277982862>. Acesso em: 08 ago. 2021.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, E. B. **Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro**. Revista Floresta. Biblioteca Digital de Periódicos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. v. 47. ISSN 1982-4688. 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/47687>. Acesso em: 04 nov. 2022.

NASCIMENTO, M. L. M.; CALDAS, L.; DE MOURA, L. V. O. BIM e avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no projeto de edificações: Estudo de caso para plug-in Tally. 2018. In: VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327164554>. Acesso em: 11 mar. 2022.

OBRECHT, T. P.; RÖCK, M.; HOXHA, E.; PASSER, A. BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, 12, 5534, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5534>. Acesso em: 10 dez. 2020.

OLIVEIRA, F. de A.; MAUÉS, L. M. F.; ROSA, C. C. N.; SANTOS, D. de G.; SEIXA, R. de M. Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. In: **Ambiente Construído – ANTAC**, v. 20, n. 4, p. 157-176, out. - dez. Porto Alegre, 2020. ISSN 1678-8621. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400465>. Acesso em: 23 set. 2022.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. **Embodied Energia incorporada em habitações de interesse social na fase de pré uso: o caso do programa Minha Casa Minha Vida no Brasil**. Revista Oculum Ensaios, Campinas, SP. v. 11, n. 1, p. 39 – 50, 2014. Disponível em: <https://seer.sis.puc-campinas.edu.br/oculum/article/view/2281>. Acesso em: 23 set. 2021.

PELLI, P. Service innovation and sustainable construction: Analyses of wood vis-à-vis other construction projects. **Cleaner Engineering and Technology**. vol. 2, jun. 2021, 100061. Joensuu, Finlândia, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100061>. Acesso em: 15 nov. 2021.

PIVA, G. O. **Sustentabilidade na Construção Civil: Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO2 em Edificação Histórica de Origem Portuguesa e Contemporânea**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS. 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/8916>. Acesso em: 10 out. 2021.

PRETTI, A. L. M. **Interoperabilidade BIM e BEM: avaliação de eficiência do sistema na análise energética de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. 210 páginas. Vitória, ES. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/10689>. Acesso em: 11 out. 2021.

REVISTA ECODEBATE. **Boletim Diário**. ISSN 2446-9394. 26/10/2021. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/10/26/aumento-das-concentracoes-de-gases-de-efeito-estufa-prejudica-metas-do-acordo-de-paris/>. Acesso em 20 dez. 2021.

SANTOS, A. de P. L.; SOTSEK, N. C. **Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil**. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300283>. Acesso em: 28 nov. 2021.

SEIXAS, R. de M.; MAUÉS, L. M. F.; ROSA, C. C. N.; OLIVEIRA, F. de A. Building Information Modeling (BIM) para gestão da segurança do trabalho em obras de habitações populares. In: **Ambiente Construído – ANTAC**, v. 22 (3), jul.- sep. Porto Alegre, 2022. ISSN 1678-8621. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000300617>. Acesso em: 24 set. 2022.

SHEN, L. *et al.* **Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects**. Energy and Buildings. v. 66, p. 165-176. Novembro de 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033>. Acesso em: 11 nov. 2021.

SILVA, B. T. R. V.; LIMA, M. G. de. Proposta de integração entre BIM e ACV utilizando composições de serviço. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, n. 00, p. e021017, Campinas, SP, 2021. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8659910>. Acesso em: 03 mar. 2022.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. Building and Environment. **Energy and Buildings**, v. 136, p. 110-120, fev. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>. Acesso em: 07 dez. 2021.

TINTI, V. P. **Efeitos da temperatura e adesivos na qualidade de painéis aglomerados produzidos com resíduos de madeira de eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro, ES. 2015. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/5063/1/tese_8919_DISSERTA%C3%87%C3%83O_Vers%C3%A3o_Final_Vinicius%20Tinti.pdf. Acesso em: 03 jan. 2022.

VARELA, M.; MACIEL, V. G.; PASSUELLO, A.; ISATTO, E. L. et al, 2021. Avaliação do ciclo de vida de edificações e sua integração em BIM: compilação de estudos de caso. In: VII-CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DO CICLO DE VIDA. Gramado, RS, 2021. **Anais eletrônicos...GCV-20/21**, vol. 1. out. 2021, Gramado. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/348481238>. . Acesso em: 12 dez. 2021

ZADEH, P. A.; CALDERON, F.; STAUB-FRENCH, S.; CHIKHI, I. Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber

Construction. *In*: BIM TOPiCS Research Lab University of British Columbia, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329337062>. Acesso em: 15 nov. 2021.

ZIMMERMAN, R. K.; BRUHN, S.; BIRGISDÓTTIR, H. BIM-Based Life Cycle Assessment of Buildings - An Investigation of Industry Practice and Needs. **Sustainability**, 13, 5455, Copenhagen, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13105455>. Acesso em: 15 nov. 2021.

WASTIELS, L; DECUYPERE, R. Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. *In*: IOP Conference Series Earth and Environmental Science 323(1):012101 2019. **Anais eletrônicos** [...]. Graz, Áustria, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/323/1/012101>. Acesso em: 15 dez. 2021.