

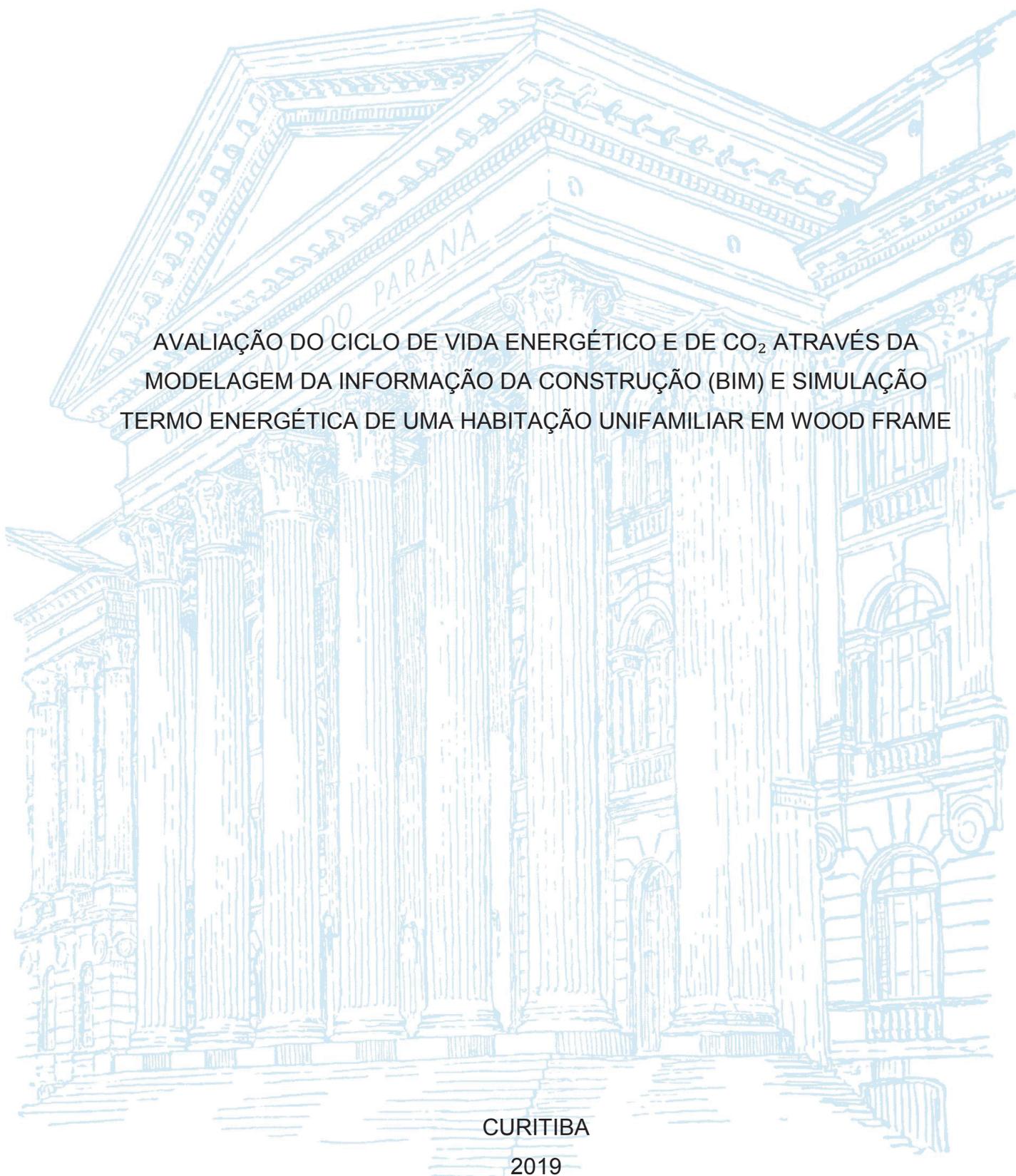
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATHALIA CARDOSO DE AZEVEDO

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

CURITIBA

2019



NATHALIA CARDOSO DE AZEVEDO

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 apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A994a

Azevedo, Nathalia Cardoso de

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 [recurso eletrônico] / Nathalia Cardoso de Azevedo. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, 2019.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares.

1. Modelagem de informação da construção. 2. Estruturas de madeira (Construção civil). 3. Autodesk Revit (Programa de computador). I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sérgio Fernando. III. Título.

CDD: 692.5

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de NATHALIA CARDOSO DE AZEVEDO intitulada: 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, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Abril de 2019.

SÉRGIO FERNANDO TAVARES

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

SÉRGIO SCHEER

Avaliador Interno (UFPR)

CARLOS ROBERTO SANQUETTA

Avaliador Externo (UFPR)

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram e apoiaram neste momento importante. Em especial ao meu companheiro Vitor e minha mãe Marisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sempre estar comigo e por tudo ter se encaminhado perfeitamente para que eu pudesse seguir em frente e alcançar esta conquista.

Ao professor Sérgio Tavares pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo auxílio, motivação, paciência, dedicação e apoio.

A minha família, em especial minha mãe Marisa por tudo que tenho, pelo apoio e por sempre me incentivar.

Ao meu esposo Vitor pela motivação durante toda essa jornada, carinho, companheirismo e paciência.

Aos amigos que mesmo longe me apoiaram, e aos amigos que conquistei aqui, em especial Anna Cláudia, Thaís, Lorena, Lílian, Bruna e Aline, por todo amparo, risadas e troca de conhecimento.

Por fim, agradeço a CAPES pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa e ao programa PPGCEC.

Um leitor vive mil vidas antes de morrer. O homem que nunca lê vive apenas uma.

(George R.R. Martin)

RESUMO

O ambiente construído é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE) como resultados dos processos de construção, manutenção e energia utilizada pelas edificações durante a operação. A Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e de CO₂ (ACVCO₂) permite identificar, quantificar e analisar de forma simplificada a energia consumida e o impacto gerado durante todo o ciclo de vida de uma edificação. A Modelagem da Informação da Construção (BIM) pode beneficiar a construção civil em possíveis economias de recursos durante a fase de projeto, auxiliando nas tomadas de decisões em busca de melhores alternativas, através da informação integrada a objetos que permitam a interação entre ferramentas utilizadas para arquitetura, estrutura, mecânica e elétrica. O sistema construtivo *wood frame*, ainda em expansão no Brasil, tem a madeira como material característico. Este sistema pode contribuir para o desenvolvimento de ambientes construídos mais sustentáveis, minimizando os atuais impactos da construção civil, considerada a maior consumidora de recursos e matérias-primas. Com base nisso, o objetivo principal desta pesquisa é desenvolver a ACVE e a ACVCO₂ do berço ao túmulo de uma Habitação de Interesse Social (HIS) em *wood frame*, com o auxílio da ferramenta BIM *Autodesk Revit* e *OpenStudio* para simulação termo energética. Por meio do referencial teórico foi possível levantar dados para a Energia Embutida (EE) e emissões de CO₂ associadas aos materiais empregados na habitação, transporte, obra, manutenção, operação e fim da vida. A habitação foi modelada na ferramenta *Revit*, com o intuito de extrair os volumes dos materiais e criar parâmetros para inserir os dados de entrada necessários na quantificação das etapas: pré-operacional, manutenção e pós-operacional. Através da interoperabilidade entre as ferramentas *Revit* e *OpenStudio*, foi possível avaliar o consumo energético durante a etapa operacional do edifício ao longo de um ciclo de vida de 50 anos. Os resultados mostraram que a edificação de 46,50m² consumiu 844,05 GJ de energia e emitiu 43,18 tCO₂ durante todo seu ciclo de vida. Considerando o CO₂ armazenado nos produtos de madeira, 11% (4,87 tCO₂) das emissões de CO₂ totais foram reduzidas, resultando 38,31 tCO₂. A etapa operacional, incluindo a manutenção da edificação, uso de equipamentos elétricos e cocção, correspondeu a 75% da EE e 68% do CO₂; a etapa pré-operacional à 24% da EE e 27% do CO₂; e a pós-operacional apenas a 1% da EE e 5% do CO₂ emitido. Foi possível observar que os materiais que mais contribuíram para os índices de EE e emissões de CO₂ foram a placa de gesso, tintas, concreto presente na fundação e telha cerâmica. Além disso, a habitação emitiu menos CO₂ em relação a outros estudos que aplicaram concreto e aço como materiais principais. Pode-se concluir que o uso do BIM e simulação termo energética auxiliaram na análise e estimativa dos impactos causados pela habitação em *wood frame* durante seu ciclo de vida. Com isso, o fluxo de trabalho pode ser facilitado para as avaliações ambientais, garantindo aos profissionais do ramo da construção melhores alternativas ainda durante a etapa de projeto.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção. Avaliação do Ciclo de Vida. *Wood frame*. *Revit*. *OpenStudio*.

ABSTRACT

The built environment is one of the main responsible sectors for greenhouse gas emissions (GHG) as a result of the construction, maintenance and energy used by the buildings during operation. The Life Cycle Energy Analysis (LCEA) and CO₂ (LCCO₂A) allow to identify, quantify and analyze in a simplified way the energy consumed and the impact generated throughout the life cycle of a building. Building Information Modeling (BIM) can benefit civil construction in possible resource savings during the design phase, by helping in decision making in search of better alternatives, through integrating information to objects and thus allowing the interaction between tools used for architecture, structure, mechanics and electrical. The wood frame construction system, still in expansion in Brazil, uses wood-based materials as main input. This system can contribute to the development of more sustainable built environments, minimizing the current impacts of civil construction, considered the largest consumer of resources and raw materials. Based on this, the main goal of this research is to develop cradle-to-grave LCEA and LCCO₂A of a wood-framed Social Interest Housing (SIH), with the help of BIM Autodesk Revit tool and OpenStudio for thermo-energy simulation. By means of the scientific literature it was possible to collect data for Embodied Energy (EE) and CO₂ emission associated to the materials applied to the building, transport, construction, maintenance, operation and end-of-life destination. The building was modeled in Revit tool in order to extract the material volumes and create parameters to enter the necessary input data in each of the following building phases: pre-operational, maintenance and post-operational. Given the interoperability between the Revit and OpenStudio tools, it was possible to evaluate the energy consumption during the operational stage of the building over its 50-year life cycle. The results showed that the 46.50m² building consumed 844.05 GJ of energy and emitted 43.18 tCO₂ throughout its life cycle. Considering the CO₂ stored in wood products, 11% (4.87 tCO₂) of total CO₂ emissions were reduced, resulting in 38.31 tCO₂. The operational phase, including building maintenance, use of electrical equipment and energy used for cooking, accounted for 75% of EE and 68% of CO₂; the pre-operational stage 24% of EE and 27% of CO₂; and the post-operational for only 1% of EE and 5% of CO₂ emissions. It was possible to notice that the materials which most contributed to EE indexes and CO₂ emissions were plasterboard, paints, concrete foundation and ceramic tiles. In addition, the wood-framed building emitted lower amounts of CO₂ compared to other studies that considered concrete and steel as main materials for the building. It can be concluded that the use of BIM and thermo-energy simulation aided in the analysis and estimation of the impacts caused by the building during its life cycle. As a result, workflow can be facilitated for environmental assessments, and thus, provide construction professionals with better alternatives during the design stage.

Keywords: Building Information Modelling. Life Cycle Assessment. Wood frame. Revit. OpenStudio.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FASES DA ACV.....	26
FIGURA 2 - CICLO DE VIDA E DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS	28
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ANÁLISE DE INVENTÁRIO	29
FIGURA 4 - FASES DA ACVE	32
FIGURA 5 – CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS DE MADEIRA	39
FIGURA 6 - CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO COM O USO DA TECNOLOGIA BIM	45
FIGURA 7 - NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO (LOD) DO PROJETO.....	47
FIGURA 8 - CONSTRUÇÃO ENXAIMEL	51
FIGURA 9 - PROCESSO DE CONSTRUÇÃO <i>BALLOON FRAME</i>	52
FIGURA 10 - PROCESSO DE CONSTRUÇÃO <i>PLATFORM FRAME</i>	52
FIGURA 11 - SUBSISTEMAS DA TÉCNICA CONSTRUTIVA EM <i>WOOD FRAME</i> ..	55
FIGURA 12 - VARIAÇÕES DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA PAREDE	60
FIGURA 13 - ESTRUTURA DA PESQUISA.....	75
FIGURA 14 - TIPOS DE PAINÉIS BÁSICOS E SEUS COMPONENTES	76
FIGURA 15 - HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL EM <i>WOOD FRAME</i>	77
FIGURA 16 - COMPONENTES DA FUNDAÇÃO.....	77
FIGURA 17 - COMPONENTES DA PAREDE	78
FIGURA 18 - COMPONENTES DA COBERTURA	79
FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA HABITAÇÃO UNIFAMILAR	79
FIGURA 20 – PROCESSO ADOTADO PARA ALCANÇAR A INTEROPERABILIDADE ENTRE AS FERRAMENTAS <i>REVIT</i> E <i>OPENSTUDIO</i>	81
FIGURA 21 – ACESSO AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	97
FIGURA 22 – TEMPLATE PARA A HABITAÇÃO EM <i>WOOD FRAME</i>	97
FIGURA 23 – EVOLUÇÃO DO MODELO	98
FIGURA 24 – PARÂMETROS DE TIPO E INSTÂNCIA	99
FIGURA 25 – PARÂMETROS COMPARTILHADOS	100
FIGURA 26 – PARÂMETROS CRIADOS PARA A FAMÍLIA DE ARMADURAS.....	102
FIGURA 27 – LEVANTAMENTO DE MATERIAL COM OS PARÂMETROS INICIAIS E CALCULADOS	103
FIGURA 28 – ABA PARA EXPORTAÇÃO NO FORMATO GBXML	104

FIGURA 29 – JANELA DE CONFIGURAÇÃO PARA EXPORTAÇÃO DO MODELO	105
FIGURA 30 – VIZUALIZAÇÃO DO MODELO EXPORTADO DENTRO DA FERRAMENTA SKETCHUP COM O PLUG-IN DO OPEN STUDIO	106
FIGURA 31 - INSERÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, CRONOGRAMAS E CARREGAMENTOS NOS TIPOS DE ESPAÇOS (SPACE TYPE) DA HABITAÇÃO	108
FIGURA 32 – INSERÇÃO DAS MEDIDAS (<i>MEASURES</i>) A SEREM UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO	109
FIGURA 33 – POSSIBILIDADES DE RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO	110

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PERCENTUAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DO SETOR INDUSTRIAL.....	22
GRÁFICO 2 - PRODUTIVIDADE E ROTAÇÃO MÉDIA DO BRASIL E DE OUTROS PARTICIPANTES MUNDIAIS	23
GRÁFICO 3 – TEMPERATURA PARA O MÊS DE JANEIRO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA.....	111
GRÁFICO 4 - TEMPERATURA PARA O MÊS DE JULHO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA.....	112
GRÁFICO 5 – PERCENTUAIS DA EE E CO ₂ EM CADA FASE DA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL	115
GRÁFICO 6 - PERCENTUAIS DA EE E CO ₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL	116
GRÁFICO 7 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA EE E CO ₂ NAS ETAPAS PRÉ-OPERACIONAL, OPERACIONAL (MANUTENÇÃO, EQUIPAMENTOS E COCÇÃO) E PÓS-OPERACIONAL	120
GRÁFICO 8 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA A EE E CO ₂ POR M ² PARA TODO O CICLO DE VIDA EM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS.....	123
GRÁFICO 9 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA A EE E CO ₂ PARA A ETAPA PRÉ-OPERACIONAL.....	123
GRÁFICO 10 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA CO ₂ NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL CONSIDERANDO O CARBONO ESTOCADO	125

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - RESUMO DO ESTADO DA ARTE	66
QUADRO 2 - EXTRAÇÃO E BENEFICIMENTO DA MADEIRA.....	67
QUADRO 3 - RECURSOS PARA A FABRICAÇÃO DE 1m ³ DE OSB	70
QUADRO 4 - DELIMITAÇÃO DO ESCOPO.....	80
QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	92
QUADRO 6 – CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS CONFORME O CONAMA, DESTINO DO MATERIAL E DISTÂNCIA DO TRANSPORTE	93
QUADRO 7 – FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE PRÉ- OPERACIONAL	94
QUADRO 8 - FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE OPERACIONAL	95
QUADRO 9 – FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE PÓS- OPERACIONAL	95
QUADRO 10 – FÓRMULAS PARA CÁLCULOS DAS TOTAIS PARA CADA FASE.	95
QUADRO 11 – PARÂMETROS CRIADOS NA FERRAMENTA <i>REVIT</i>	100
QUADRO 12 – PARÂMETROS CALCULADOS	101
QUADRO 13 – PARÂMETROS CALCULADOS DOS VALORES FINAIS	101
QUADRO 14 – CONFIGURAÇÕES EFETUADAS NA FERRAMENTA OPENSTUDIO PARA REALIZAR A SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA DA HABITAÇÃO	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ENERGIA EMBUTIDA NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DE MADEIRA.	68
TABELA 2 - EMISSÕES DE CO ₂	69
TABELA 3 - ENERGIA EMBUTIDA.....	69
TABELA 4 - RESULTADOS OBTIDOS POR OLIVEIRA (2016).....	70
TABELA 5 - DADOS DE INVENTÁRIO PARA 1m ³ DE OSB.....	70
TABELA 6 - RESUMO ESTADO DA ARTE.....	71
TABELA 7 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A MADEIRA SERRADA E O OSB ...	72
TABELA 8 - DADOS DA DENSIDADE, ENERGIA EMBUTIDA DOS MATERIAIS E TRANSPORTE E DESPERDÍCIO.....	82
TABELA 9 – DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FÁBRICA - FÁBRICA WOOD FRAME).....	84
TABELA 10 – DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FABRICA – CANTEIRO DE OBRAS).....	85
TABELA 11 - PADRÃO DE OCUPAÇÃO E DE ILUMINAÇÃO	87
TABELA 12 - DADOS DO CONSUMO MÉDIO DE CADA EQUIPAMENTO.....	88
TABELA 13 - PROPRIEDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS	89
TABELA 14 – VIDA ÚTIL DE PROJETO (VUP) E FATOR DE REPOSIÇÃO (FR) DOS COMPONENTES DA HABITAÇÃO.....	91
TABELA 15 - HORAS GASTAS EM CADA FAIXA DE TEMPERATURA.....	113
TABELA 16 - HORAS GASTAS EM CADA FAIXA DE UMIDADE	113
TABELA 17 – CONSUMO ENERGÉTICO DOS EQUIPAMENTOS, ILUMINAÇÃO E COCÇÃO	114
TABELA 18 – EE E CO ₂ EM CADA FASE NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL	115
TABELA 19 – EE E CO ₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA ETAPA PRÉ- OPERACIONAL	116
TABELA 20 – EE E CO ₂ DA CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA HABITAÇÃO	117
TABELA 21 - EE E CO ₂ NA ETAPA OPERACIONAL	118
TABELA 22 – EE E CO ₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA FASE DE MANUTENÇÃO.....	118

TABELA 23 – EE E CO ₂ DA CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA HABITAÇÃO NA ETAPA DE MANUTENÇÃO	118
TABELA 24 – EE E CO ₂ NA ETAPA PÓS-OPERACIONAL	119
TABELA 25 – EE E CO ₂ TOTAIS E POR METRO QUADRADO PARA A HABITAÇÃO EM <i>WOOD FRAME</i>	122
TABELA 26 – CO ₂ FIXADO NOS COMPONENTES DE MADEIRA PRESENTES NA HABITAÇÃO	124

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	20
1.2 PRESSUPOSTO	20
1.3 OBJETIVO.....	21
1.4 JUSTIFICATIVAS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)	25
2.1.1 Histórico	25
2.1.2 Fases da Avaliação do Ciclo de Vida	26
2.1.2.1 Objetivo e Escopo.....	27
2.1.2.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....	29
2.1.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	30
2.1.2.4 Interpretação	31
2.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE)	32
2.2.1 Energia Embutida nos materiais.....	34
2.2.2 Energia Embutida na Obra	34
2.2.3 Energia Embutida nos transportes	35
2.2.4 Energia Embutida na Manutenção	36
2.2.5 Energia Operacional.....	36
2.2.6 Energia de Demolição	37
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EMISSÕES DE CO ₂ (ACVCO ₂).....	37
2.4 FERRAMENTAS PARA ACV	40
2.5 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM).....	42
2.5.1 O Modelo BIM	43
2.5.2 O Ciclo de Vida do edifício com o uso de BIM	44
2.5.3 Nível de desenvolvimento (LOD).....	45
2.5.4 Interoperabilidade.....	47
2.6 INTEGRAÇÃO BIM E ACV.....	48
2.7 WOOD FRAME	51
2.7.1 <i>Wood frame</i> no Brasil	53
2.7.2 Descrição do sistema construtivo.....	54
2.7.2.1 A Madeira empregada	55

2.7.2.2	Fundação.....	58
2.7.2.3	Piso.....	59
2.7.2.4	Parede e Revestimento	59
2.7.2.5	Cobertura.....	61
2.8	ESTADO DA ARTE	62
2.8.1	BIM e ACV.....	62
2.8.2	ACV e Wood Frame	67
2.8.2.1	Conclusão do Estado da Arte ACV e <i>Wood Frame</i>	71
3	MÉTODO DE PESQUISA	74
3.1	REFERENCIAL TEÓRICO	75
3.2	ESCOLHA DO CASO	76
3.3	MÉTODO ACV	79
3.4	ESCOLHA DO SOFTWARE BIM E SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA.....	80
3.5	COLETA DE DADOS	82
3.5.1	Fase pré-operacional.....	82
3.5.1.1	Índices de Energia Embutida e CO ₂ nos materiais.....	82
3.5.1.2	Índices de Energia Embutida e CO ₂ no transporte	83
3.5.1.3	Índices de Energia Embutida e CO ₂ na fábrica e na obra	86
3.5.2	Fase operacional.....	86
3.5.2.1	Energia Operacional.....	87
3.5.2.2	Energia de Manutenção.....	91
3.5.3	Fase pós-operacional	91
3.5.3.1	Índices de Energia Embutida e CO ₂ para a desconstrução da habitação	91
3.5.3.2	Destino final dos materiais e índices de EE e CO ₂ para o transporte.....	92
3.5.4	Cálculo do consumo energético e emissões de CO ₂ para ACVE e ACVCO ₂ ..	94
3.6	APLICAÇÃO NO CASO	96
3.6.1	Definição no Nível de Desenvolvimento (LOD) do modelo.....	96
3.6.2	Desenvolvimento do <i>template</i> e modelagem da habitação na ferramenta <i>Revit</i>	96
3.6.3	Criação dos parâmetros para cálculo da ACVE e ACVCO ₂	99
3.6.4	Simulação termo energética da habitação	103
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	111
4.1	RESULTADOS GERADOS PELO <i>OPENSTUDIO</i>	111
4.2	RESULTADOS GERADOS PELO <i>REVIT</i>	114

4.2.1 Pré-operacional	114
4.2.2 Operacional	117
4.2.3 Pós-operacional	119
4.3 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS ETAPAS DO CICLO DE VIDA.	119
5 DISCUSSÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	121
5.1 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO	121
5.2 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS DURANTE A COLETA DE DADOS.....	125
5.3 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS NAS FERRAMENTAS ADOTADAS	127
5.4 FIM DA VIDA DA MADEIRA TRATADA.....	129
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
REFERÊNCIAS.....	136
APÊNDICE 1 – DISTÂNCIA TRANSPORTE (FÁBRICA – FÁBRICA WOOD FRAME / FÁBRICA - CANTEIRO DE OBRAS)	147
APÊNDICE 2 - TABELA DE MATERIAIS E QUANTITATIVOS GERADOS PELO REVIT	150
APÊNDICE 3 – CRONOGRAMAS CRIADOS PARA SIMULAÇÃO NO OPENSTUDIO.....	151
APÊNDICE 4 - RESULTADOS DAS TEMPERATURAS MENSAIS SIMULADAS PARA CADA AMBIENTE DE PERMANÊNCIA PROLONGADA.....	154
ANEXO 1 - GERAÇÃO DE CO₂ POR USO DE FONTES COMBUSTÍVEIS	157

1 INTRODUÇÃO

O setor de construção civil utiliza muita energia e emite grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. A energia é empregada para extrair, transportar, processar e produzir materiais, enquanto o CO₂ é emitido pela queima de combustíveis fósseis, práticas de uso da terra e reações de processos industriais (GUSTAVSSON; SATHRE, 2005). A partir disso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite mensurar os impactos gerados pelo processo de construção, através da quantificação das entradas (consumo de matéria prima e energia) e saídas (emissões, resíduos, entre outros).

Na construção civil este método demanda tempo e depende da disponibilidade dos dados (AIA, 2010). Além disso, a edificação é única e constituída por vários tipos de materiais, produzidos por inúmeros fabricantes que utilizam diferentes processos de manufatura (HOLLBERG; RUTH, 2016). No Brasil a falta de bancos de dados atualizados dificulta o desenvolvimento da ACV.

Outra questão é que grande parte dos impactos causados pelas edificações são ocasionadas por escolhas tomadas na etapa de projeto. O processo do projeto e a comunicação entre os envolvidos, ainda acontece de maneira fragmentada, fazendo com que as informações do projeto levem um tempo considerável para serem definidas.

A Modelagem da Informação da Construção (BIM) tem o potencial de modificar o processo do projeto, pois integra as informações de todas as atividades em um modelo central. Também auxilia os profissionais da indústria da construção em práticas mais sustentáveis com uso de simulações termo energéticas e na quantificação desses impactos, já que seus objetos são inteligentes e carregam informações com características próprias. Porém, ainda existem alguns impasses, principalmente relacionados à interoperabilidade entre ferramentas para simulações e ACV.

Além disso, novos sistemas construtivos têm sido adotados nas edificações brasileiras, tal como o *wood frame*. Estudos sugerem que a construção com material à base de madeira pode resultar em menor uso de energia e emissões de CO₂ em comparação com outros materiais, como concreto, tijolo ou aço (GUSTAVSSON; SATHRE, 2005). Este tipo de construção que na Alemanha e em outros países é

tratado como uma técnica tradicional, no Brasil ainda possui muitas barreiras, sobretudo culturais onde se utiliza mais alvenaria e concreto armado (ABDI, 2015).

A falta de conhecimento sobre o produto traz pensamentos errôneos quanto à exploração da madeira, preocupações relacionadas a incêndio e durabilidade devido à presença de insetos (MOLINA; CALIL JÚNIOR, 2010).

Este sistema destaca-se por sua construção simples, leve, limpa e rápida, pois suas paredes são constituídas de módulos pré-fabricados. Além disso, grande parte de seus materiais são provenientes da madeira, considerada um material renovável onde a árvore, matéria-prima, estoca carbono da atmosfera durante seu crescimento através da fotossíntese.

Com base nisso, se faz necessária a avaliação dos impactos ambientais gerados durante todo o seu ciclo de vida, desde a extração, manufatura, uso, manutenção e fim da vida dos componentes que compõem este sistema construtivo. Os resultados apresentados podem auxiliar na tomada de decisões dos profissionais por produtos que gerem menor impacto.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

A questão principal da pesquisa é: Como desenvolver a Análise de Ciclo de Vida Energético (ACVE) e Análise de Ciclo de Vida de CO₂ (ACVCO₂) do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) de uma habitação unifamiliar em *wood frame* utilizando BIM e simulação termo energética?

1.2 PRESSUPOSTO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é considerada uma metodologia mais adequada para análise de impacto ambiental dos materiais, pois permite quantificar os recursos, a energia utilizada, as emissões e resíduos gerados durante todo o ciclo de vida de um produto. BIM não é apenas um software 2D ou 3D, mas tem como objetivo melhorar as trocas de informações, otimizar o processo, e ser implantado durante todo o ciclo de vida da edificação. A integração entre esses dois conceitos auxiliaria os profissionais do ramo da construção civil na tomada de decisão por escolha de materiais mais sustentáveis, além de aperfeiçoar o processo, visto que a ACV realizada de maneira tradicional é complexa e demanda tempo. Para complementar, construções em madeira em relação a outros materiais empregados

na construção civil possuem menores níveis de energia embutida e também retém carbono durante o crescimento da árvore, pois é um material orgânico e processa dióxido de carbono pela fotossíntese. Tecnologias como o sistema construtivo *wood frame* são inovações que visam a sustentabilidade em relação à prática construtiva no Brasil.

1.3 OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver Análise de Ciclo de Vida Energético e de CO₂ do berço ao túmulo de uma habitação unifamiliar em *wood frame* utilizando o BIM e simulação termo energética.

1.4 JUSTIFICATIVAS

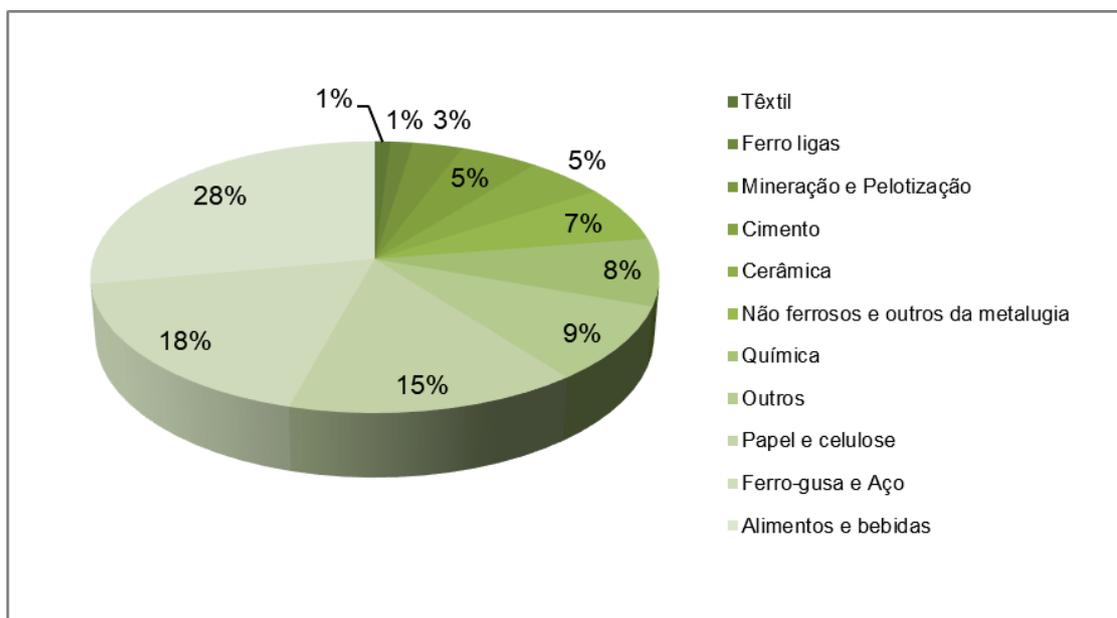
O reconhecimento do impacto do dióxido de carbono antropogênico sobre as mudanças climáticas nos últimos anos levou à necessidade de compromissos mundiais na redução de CO₂ e outros gases de efeito estufa. O ambiente construído é um dos principais responsáveis pelas emissões desses gases, como resultado dos processos de construção, manutenção e a energia associada ao uso nos edifícios. (IDDON; FIRTH, 2013). As emissões de CO₂ embutidas na fabricação dos materiais de construção estão relacionadas ao consumo energético, à origem e o tipo de energia utilizada nos processos industriais (OLIVEIRA, 2016).

É indiscutível que a energia é de grande importância para o avanço de um país, pois leva ao crescimento econômico, melhorando a qualidade de vida da população com a elevação da renda. Com isso a aplicação de tecnologias que buscam a eficiência energética e a sustentabilidade da produção possibilita o desenvolvimento com impactos ambientais reduzidos (INPE, 2017).

No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidráulica correspondendo a 68,1% do total nacional (EPE, 2017a). Visto a grande participação das hidrelétricas, o sistema brasileiro elétrico se torna singular com relação aos impactos ambientais gerados. Porém essa fonte energética está ligada a influência das questões climáticas. Com a falta de chuva e o aumento do consumo de energia amplia-se a utilização de termelétricas derivada de combustíveis fósseis, incluindo a nuclear, que em 2015 alcançou aproximadamente 26% (INPE, 2017).

Da oferta de energia interna bruta produzida o setor que mais consome é o industrial, cerca de 30%. Já na oferta de energia elétrica o mesmo setor consome 31,5%, seguido do setor residencial com 21,4% (EPE, 2017a). O gasto energético nos principais materiais produzidos pelo setor industrial está relacionado à construção civil como: cimento, cerâmica, ferro-gusa e aço, ferro ligas, mineração e pelotização, não ferrosos e outros da metalurgia, GRÁFICO 1. Esses setores juntos, segundo Tavares (2006), consomem 75% de fontes não renováveis.

GRÁFICO 1 - PERCENTUAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DO SETOR INDUSTRIAL



FONTE: Adaptado de EPE (2017a).

O estudo e conseqüentemente a redução dos impactos provocados pela construção, necessitam de avanços consideráveis na tecnologia, controle e monitoramento das atividades realizadas. Estes impactos gerados podem ser identificados, quantificados e avaliados pela ACV em cada fase do ciclo de vida da edificação (MACHADO; SIMÕES; MOREIRA, 2015).

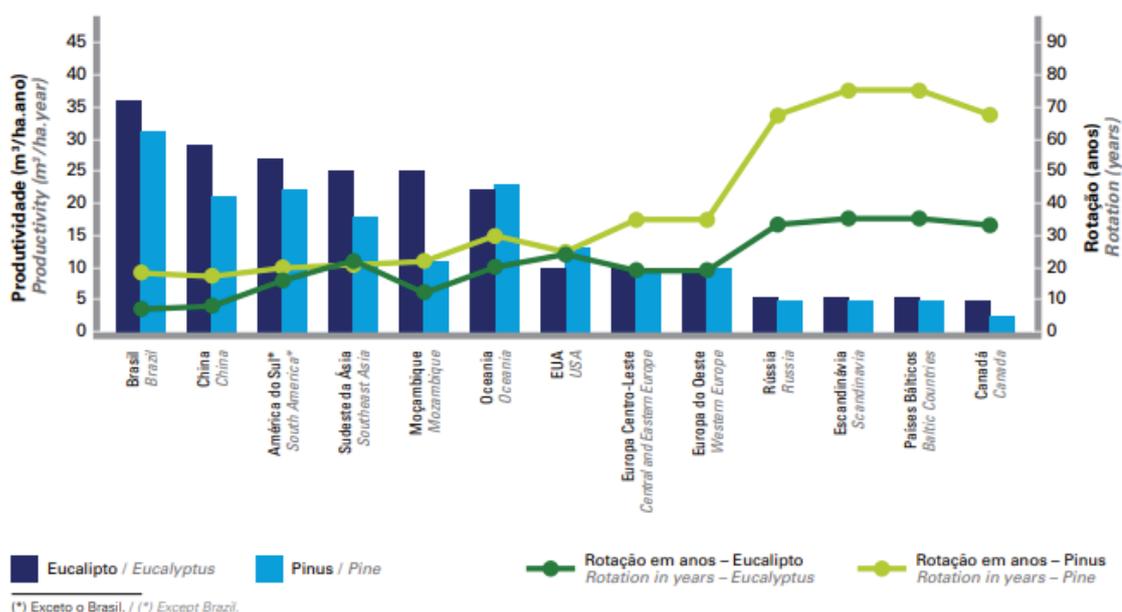
Outro artifício no qual nos últimos anos houve grande interesse, podendo beneficiar a construção civil em possíveis economias de recursos durante o projeto, planejamento, execução, uso e pós-uso de edificações novas e existentes é o BIM (BORGES *et al.*, 2018). A integração entre ACV e BIM, nas fases iniciais do projeto, é capaz de auxiliar na quantificação e na tomada de decisão na escolha por opções que causem menos impactos durante o ciclo de vida da edificação. Isso através de

informações integradas a objetos inteligentes e com o uso de análises energéticas por meio de simulação.

Nesta perspectiva, esta pesquisa avalia uma habitação que aplica o sistema construtivo em *wood frame*. Dentre as características deste sistema pode-se destacar a leveza dos componentes, execução simples com pouca mão de obra, e a limpeza do canteiro (ESPÍNDOLA, 2010). A madeira é um dos principais insumos deste sistema, considerado um recurso renovável que possui menores níveis de energia embutida e emissão de CO₂ se comparado a materiais como o concreto e aço. Além disso, absorve dióxido de carbono durante seu crescimento, através da fotossíntese que só são liberados no final do seu ciclo de vida mediante a queima. Porém esses benefícios só podem ser agregados se as madeiras e os seus componentes forem provenientes de florestas plantadas e certificadas. O armazenamento de carbono está relacionado ao planejamento de corte, reflorestamento e ao manejo florestal, fazendo com que os projetos de exploração sejam contínuos e equilibrados (OLIVEIRA, 2016).

Em 2016, o Brasil liderou o *ranking* global de produtividade de florestas plantadas, por possuir a menor rotação do mundo entre o plantio e a colheita, GRÁFICO 2.

GRÁFICO 2 - PRODUTIVIDADE E ROTAÇÃO MÉDIA DO BRASIL E DE OUTROS PARTICIPANTES MUNDIAIS



FONTE: IBÁ (2017).

Esses índices são resultados das condições do clima e do solo existentes no país e também devido aos investimentos das empresas nesse setor (IBÁ, 2017).

O estudo desenvolvido por Sanquetta *et al.* (2018) levantou dados sobre as extensões das florestas plantadas no Brasil por diferentes instituições no período de 1990 a 2016. A área de florestas plantadas aumentou para 10,212 milhões ha no ano de 2016 em relação a área de 4,934 milhões ha para o ano de 1990. O volume de madeira comercial cresceu de 774 milhões m³ em 1990 para 1,999 bilhão de m³ em 2016. Os estoques de carbono apontaram 210 milhões t em 1990 e 575 milhões t em 2016.

Grande parte da produção é destinada à indústria do papel e celulose. Os plantios com Pinus estão concentrados no sul do país, com participação de 88%, esses valores são resultados de investimentos realizados nas últimas décadas para atender indústrias diversificadas como papel e celulose, de painéis em madeira e indústria de madeira sólida (serrarias e laminadoras), tornando a plantação de Pinus de grande importância para abastecimento de indústria de base florestal (ACR, 2016). Estes dados mostram o potencial brasileiro para utilização da madeira na construção civil.

Neste contexto, o sistema *wood frame*, apesar de disseminado na Europa e América do Norte, ainda é recente no Brasil. Com isso, mais estudos devem ser realizados para entender o ciclo de vida dos materiais que envolvem esta tipologia construtiva para suprir as condições brasileira. A partir disso, será possível contribuir ambientalmente no crescimento de florestas plantadas e na produção de derivados da madeira, economicamente e socialmente para o país e tecnologicamente para a construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)

Todos os produtos, não só os da construção civil, causam impactos no meio ambiente. Esses impactos podem ocorrer durante a manufatura, uso ou fim da vida. A quantificação desses impactos, em todas as fases de um produto, é chamada de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (CPA, 2012).

A ACV determina os cursos dos materiais, energia e resíduos que um edifício pode gerar durante sua vida, fazendo com que esses impactos sejam estabelecidos de maneira antecipada. O ciclo de vida dos materiais engloba: a extração, manufatura, uso, reutilização, reciclagem e descarte (EDWARDS, 2011).

A NBR ISO 14040 (2009), que regulamenta a ACV, aponta como as principais contribuições: identificar melhorias no desempenho ambiental do produto nos seus ciclos de vida; melhorar os níveis de informação dos tomadores de decisão; contribuir para a seleção de indicadores ambientais e técnicas de medição; e o *marketing* relacionado aos rótulos e as declarações ambientais do produto ou *Environmental Product Declarations* (EPDs).

2.1.1 Histórico

O conceito do ciclo de vida ambiental surgiu nos Estados Unidos no final dos anos 1960 e início dos anos 1970. Ideias aproximadas também ocorreram na Europa neste mesmo período (HUNT; FRANKLIN, 1996).

Um dos primeiros estudos realizados foi em 1969 pelo *Midwest Research Institute* (MRI) para a empresa Coca Cola. Esta pesquisa quantificava os recursos, as emissões e os fluxos de resíduos em diferentes embalagens de bebidas (GUINÉE *et al.*, 2011). Na Europa, uma abordagem de inventário semelhante estava sendo desenvolvida que mais tarde ficou conhecida como *Ecobalance* (EEA, 1997).

Outros estudos foram desenvolvidos nesse período, marcando o início da ACV que se conhece hoje. O aumento de interesse por este assunto só ocorreu na década de 1980, anteriormente havia falta de envolvimento do público e a não publicação dos estudos desenvolvidos.

Entre 1990 a 2000, a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) começou a reunir profissionais, cientistas e usuários que podiam colaborar

com a metodologia da ACV, sendo o "Code of Practice" um dos principais resultados dessa coordenação. Desde 1994, ao lado da SETAC, a *International Organization for Standardization* (ISO) adotou a padronização dos métodos e procedimentos (GUINÉE *et al.*, 2011).

Existem dois padrões internacionais que foram normatizadas no Brasil pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) em 2009:

- NBR ISO 14040 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura.

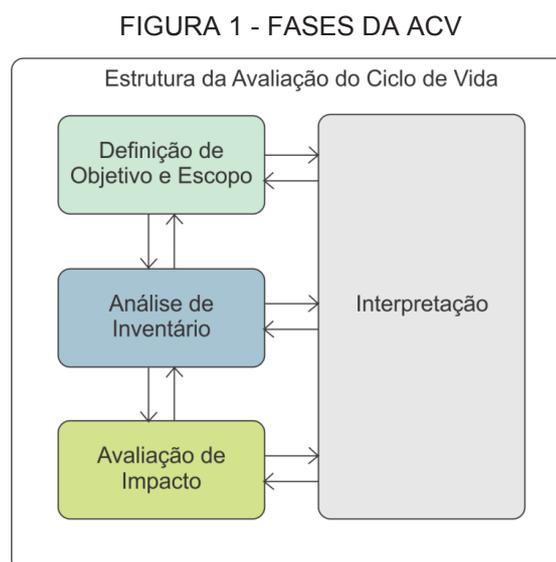
- NBR ISO 14044 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações.

A NBR ISO 14044 substituiu as NBRs ISO 14041, 14042 e 14043.

2.1.2 Fases da Avaliação do Ciclo de Vida

A ACV compreende a análise e interpretação dos dados obtidos, através de um inventário quantitativo e qualitativo de todos os materiais consumidos, dos seus resíduos e dos poluentes liberados no meio ambiente, desde a fabricação até o descarte, finalizando com a avaliação dos impactos gerados (SANTOS *et al.*, 2010).

Os estudos para o desenvolvimento da ACV possuem quatro fases: (i) Definição de objetivo e escopo; (ii) Análise do inventário; (iii) Avaliação do Impacto; (iv) Interpretação. A FIGURA 1 apresenta o relacionamento entre essas fases.



FONTE: A autora, adaptado de ABNT (2009).

2.1.2.1 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 (ABNT, 2009).

Pela infinidade de parâmetros que podem ser analisados em um sistema produtivo, esta é considerada a etapa mais importante, sendo necessário delimitar, de forma clara, quais dados e unidades devem ser considerados no estudo (SANTOS *et al*, 2010).

De acordo com a ABNT (2009) o objetivo de uma ACV deve conter as aplicações pretendidas, propósito do estudo, o público-alvo, para quem será direcionada a pesquisa, e se há alguma intenção de comparar e divulgar os resultados encontrados.

No escopo devem ser considerados: o sistema do produto, as funções do sistema, a unidade funcional, a fronteira do sistema, procedimentos de alocação, seleção das categorias de impacto e metodologia para avaliação do impacto, requisitos de dados, pressupostos, limitações, requisitos quanto à qualidade dos dados, tipo de análise crítica, tipo e formato de relatório requerido para estudo (ABNT, 2009).

O escopo do estudo descreve as escolhas, a ideia inicial e as limitações metodológicas mais importantes. Logo, se inicia com um conjunto de escolha e requisitos que podem ser modificados posteriormente quando mais informações estiverem disponíveis (GOEDKOOOP *et al.*, 2016).

Segundo a NBR ISO 14040 (2009) a unidade funcional define a quantificação das funções identificadas do produto. Seu objetivo é fornecer uma referência à qual entradas e saídas são relacionadas, sendo considerada base de uma ACV, pois ela define a escala para comparar dois ou mais produtos, incluindo sua melhoria. Todos os dados coletados na fase de inventário serão relacionados à unidade funcional (EEA, 1997).

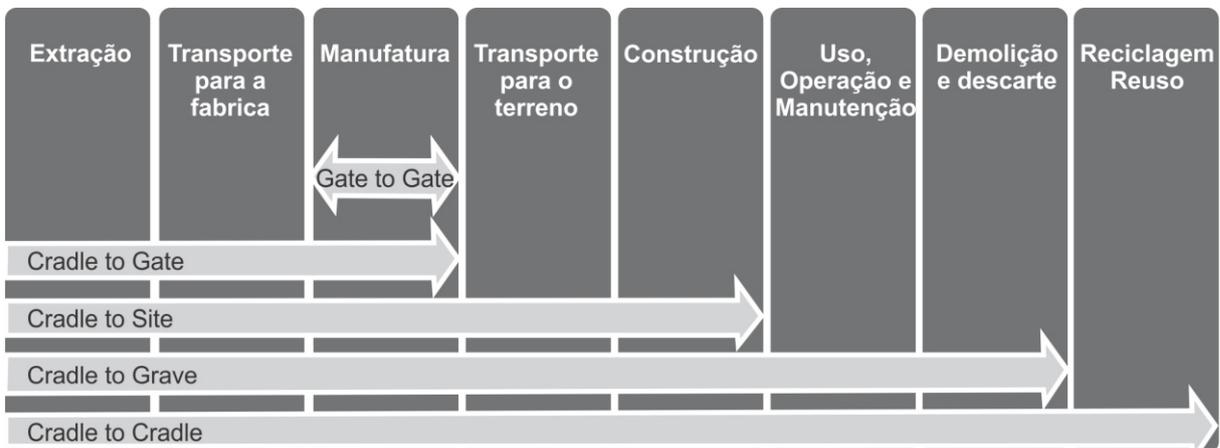
Na construção civil, a unidade funcional pode ser representada por todo edifício ou apenas uma parte analisada em determinado período (SOARES *et al.*, 2006). Por exemplo, o estudo pode ser feito em um edifício inteiro desde o projeto até demolição (com uma vida útil de 50 anos); ou pode ser limitada a um metro quadrado daquela edificação (AIA, 2010).

Os limites do sistema definem os processos ou operações como: fabricação, transporte, gerenciamento de resíduos e as entradas e saídas a serem consideradas (EEA, 1997).

Os critérios utilizados para estabelecer a fronteira do sistema são importantes, pois garante o grau de confiança nos resultados de um estudo possibilitando atingir seu objetivo. Ao estabelecer a fronteira do sistema, devem ser levados em consideração os diversos estágios do ciclo de vida, processos elementares e os fluxos. Os estágios do ciclo de vida podem ser definidos como (ABNT, 2009): extração da matéria prima; manufatura; distribuição/transporte; produção e uso dos combustíveis, eletricidade e outros; uso e manutenção dos produtos; disposição final dos resíduos; recuperação dos produtos (reciclagem, reuso e recuperação de energia); manufatura de materiais auxiliares.

Na construção civil os métodos da ACV são baseados em processos, e são divididos em *inputs* (materiais e recursos de energia) e *outputs* (emissões e resíduos para o meio ambiente) de cada etapa de uma ACV necessária para produzir um produto. Os diferentes tipos de processo de uma ACV estão descritos abaixo e apresentados na FIGURA 2 (AIA, 2010):

FIGURA 2 - CICLO DE VIDA E DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS



FONTE: A autora (2019).

- *Gate-to-Gate* (Do portão ao portão): avalia apenas o valor agregado no processo de manufatura.

- *Cradle-to-Gate* (Do berço ao portão): avaliação do ciclo de vida parcial a partir da fase de fabricação ao portão da fábrica. Esse tipo de avaliação muitas vezes é a base para as Declarações de Produto Ambiental ou *Environmental Product Declaration* (EPDs).

- *Cradle-to-Site* (Do berço ao terreno): avaliação do ciclo de vida a partir da fase de fabricação até a construção, no canteiro de obras.
- *Cradle-to-Grave* (Do berço ao túmulo): ciclo de vida completo a partir da fabricação até a fase de eliminação do produto.
- *Cradle-to-Cradle* (Do berço ao berço): seria a avaliação utilizada no *Cradle-to-Grave*, porém a eliminação do produto passaria por um processo de reciclagem ou reuso.

2.1.2.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A segunda fase na Avaliação do Ciclo de Vida é a análise de inventário. Ela envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT, 2009).

A descrição desse fluxo permite mostrar certos fatores de alterações ambientais (fatores de impacto) como: o consumo de recursos naturais (matérias-primas e energia), os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) e outras emissões. Essa etapa é indispensável para avaliação quantitativa de impactos ambientais (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Em cada uma das fases do ciclo de vida os parâmetros de entrada e saída devem ser quantificados (SANTOS *et al.*, 2010). A FIGURA 3 apresenta graficamente as fases do inventário.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ANÁLISE DE INVENTÁRIO



FONTE: Adaptado de AIA (2010).

A coleta de dados demanda inúmeros recursos considerada desta forma, a mais exigente. Nesta etapa alguma das informações necessárias podem ser

encontradas na literatura ou em banco de dados, como planilhas ou softwares. Dependendo do tempo e do orçamento é útil distinguir entre dois tipos de dados: (i) Dados de primeiro plano que são específicos e necessários para o seu sistema. (ii) Dados de fundo, que são dados para a produção de materiais genéricos, energia, transporte, resíduos, entre outros. Por exemplo, se for necessário para o estudo os dados de um caminhão que irá fazer o transporte de determinado produto, essas informações são genéricas e podem ser retiradas de um banco de dados. Mas se a ACV for de caminhões, entradas e saídas dos insumos do caminhão devem ser colocadas de maneira específica e são consideradas dados de primeiro plano (GOEDKOOOP *et al.*, 2016).

À medida que os dados forem coletados e o conhecimento sobre o sistema aumenta, outros requisitos e limitações podem ser identificados, fazendo com que mudanças no procedimento sejam requeridas (ABNT, 2009).

2.1.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Esta fase estuda os principais impactos ambientais utilizando os resultados do ICV. A NBR ISO 14040 especifica 3 elementos obrigatórios: (i) seleção de categoria de impacto; (ii) classificação; e (iii) caracterização. E elementos opcionais: (i) normalização; (ii) agrupamento; e (iii) ponderação. Assim a seleção da categoria de impacto, classificação e a caracterização devem ser incluídas nesta etapa.

A **categoria de impacto** tem como objetivo fornecer orientação para seleção das questões ambientais definidas no objetivo e escopo (SAADE *et al.*, 2014). Geralmente estão associadas a impactos locais (toxicidade e ecotoxicidade, etc.), regionais (chuvas ácidas, desertificação, etc.) e globais (efeito estufa, redução da camada de ozônio, etc.) (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). São consideradas categoria de impacto: recursos abióticos; recursos bióticos, uso da terra, aquecimento global, depleção de ozônio, impactos ecotoxicológicos, impactos toxicológicos humanos, formação oxidante fotoquímico, acidificação, eutrofização, ambiente de trabalho (EEA, 1997).

Na **classificação** os parâmetros calculados na Análise de Inventário são ligados as suas respectivas categorias de impactos, relacionando os poluentes com os impactos ambientais. A **caracterização** calcula o grau de impacto ambiental por categoria, obtendo o total do impacto utilizando fatores de equivalência. Por

exemplo, na categoria referente a mudança climática o fator de caracterização seria a medida CO₂ equivalente (SAADE *et al.*, 2014).

A **normalização** e a ponderação são utilizadas para simplificar a interpretação dos resultados. Conforme descrito anteriormente essas etapas são opcionais, uma vez que são consideradas subjetivas. Na normalização a medida de um resultado de indicador de categoria pode apresentar um valor alto ou baixo em comparação com uma referência, porém cada impacto possui uma unidade, o que torna difícil sua comparação. Já a **ponderação** é utilizada para auxiliar na tomada de decisão interna (GOEDKOOOP, 2016). Neste caso a importância de um impacto ambiental é ponderada em relação ao outro, isso o torna subjetivo devido a escolha da ordem de relevância dos impactos (SAADE *et al.*, 2014).

Por fim, o **agrupamento** tem como objetivo reunir as diferentes categorias de impacto em um ou mais grupos, apresentando uma pontuação única e simples de ser divulgada, porém subjetiva e incerta (SAADE *et al.*, 2014).

A AICV foca somente nas questões definidas no objetivo e escopo. Nem sempre irá apresentar diferenças significativas entre as categorias de impacto e os resultados dos indicadores. Não existe metodologia amplamente aceita para relacionar os dados do inventário com impactos potenciais. Os modelos para a categoria de impacto estão em fases diferentes de avanço (ABNT, 2009).

2.1.2.4 Interpretação

Nesta etapa as constatações da Análise de Inventário e Avaliação de Impacto são associadas, de forma que forneçam resultados coerentes com o objetivo e escopo. Essas constatações podem se tornar conclusivas e auxiliar os tomadores de decisão.

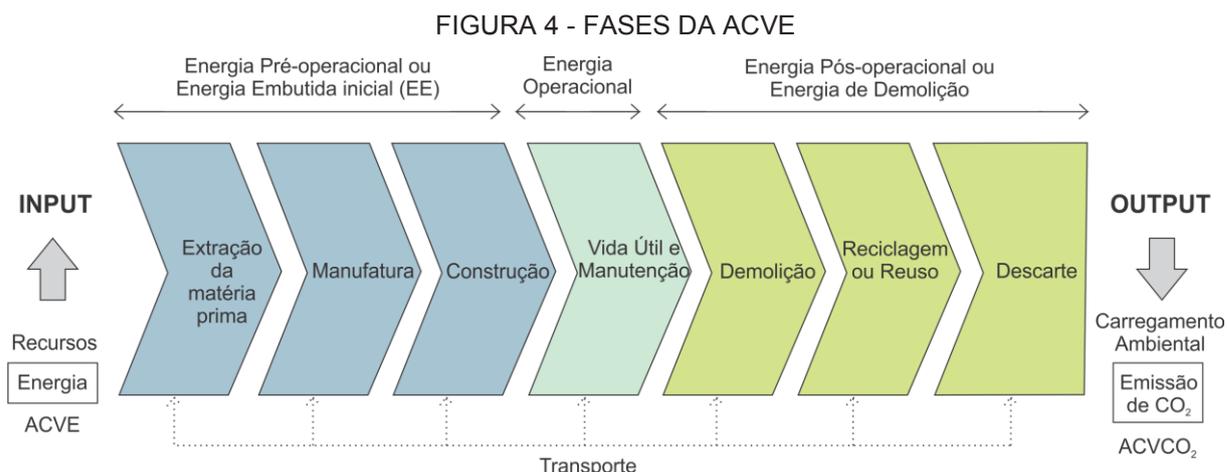
A fase de interpretação também tem como objetivo oferecer uma apresentação compreensível, completa e consistente dos resultados de uma ACV. Assim como as demais etapas ela pode envolver o processo interativo, de analisar e revisar o escopo da ACV, tal qual a qualidade dos dados coletados, de maneira que seja conforme o objetivo definido (ABNT, 2009).

2.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE)

O uso de um tipo de energia acontece em qualquer atividade de transformação ou transporte de uma matéria prima. Desta maneira, entender o fluxo energético de um material é importante para compreender o quanto é consumido dos recursos disponíveis (TAVARES, 2006).

A ACVE é uma forma simplificada de conduzir a ACV e importante para o setor da construção, devido ao aumento do uso de energia nas últimas décadas. É uma poderosa ferramenta para tomada de decisão na fase de desenvolvimento de projeto, resultando em reduções no uso de energia durante a vida da edificação (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000).

A Avaliação do Ciclo de Vida Energético inclui: (i) Energia Embutida Inicial ou Pré-operacional que contempla a energia utilizada para extração, manufatura, transporte e construção da edificação; (ii) Energia Operacional engloba todas as atividades relacionadas à etapa de operação do edifício ao longo da sua vida, incluindo o uso de equipamentos elétricos, iluminação, cocção, conforto térmico e manutenção da edificação; e (iii) Energia de Demolição ou Pós-operacional envolve a desconstrução ou demolição do edifício, o transporte do material para locais de descarte, reciclagem ou reuso (CABEZA *et al.*, 2014). A FIGURA 4 ilustra as fases da ACVE.



FONTE: A autora (2018), adaptado de Tavares (2006) e Chau *et al.* (2015).

A **Energia Embutida** engloba os insumos energéticos diretos e indiretos, utilizados na construção da edificação (TAVARES, 2006). É a energia comprada pelos construtores no local ou fora para realizar as atividades de construção, pré-

fabricação, transporte e administração, e compreende a energia embutida nos materiais de construção. A soma das quantidades de energia resulta na **Energia Embutida Inicial ou Pré-operacional** do edifício (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000). Um dos motivos para a realização da EE na construção é calcular a Energia Inicial e/ou de Manutenção nos materiais, e assim comparar a energia total em diferentes produtos da construção, componentes e concepções (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Durante o ciclo de vida do edifício a energia embutida é contabilizada através dos bens e serviços utilizados para manutenção e renovação (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000). Alguns desses materiais podem ter uma vida menor que o edifício resultando na substituição dos mesmos. A soma dessas energias é chamada de **Energia de Manutenção** ou Recorrente (RAMESH *et al.*, 2010).

A **Energia operacional** é aquela necessária para manter o conforto dos edifícios no dia-a-dia como: condicionamento de ar para aquecimento, ventilação ou arrefecimento, água quente, cocção, iluminação entre outros. Nesta etapa o uso de energia pode variar com relação ao nível de conforto requerido, condições climáticas e o horário de operação (RAMESH *et al.*, 2010). Uma das abordagens para se estimar o uso da energia operacional é através da simulação. Para aplicar este método algumas informações são necessárias como: condições climáticas, comportamento dos ocupantes, orientação do edifício, tipo de material utilizado na construção e sistema dos serviços prediais (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

No final da vida útil dos edifícios, é imprescindível energia para sua demolição e transporte dos resíduos gerados para os aterros ou instalações, onde será feita a reciclagem ou reuso. Essa energia é chamada **Energia de Demolição ou Pós-operacional** (RAMESH *et al.*, 2010).

O estudo realizado por Ramesh *et al.* (2010) mostrou, entre os casos selecionados, que os resultados da ACVE realizadas em edifícios cerca de 80-90% vem da Energia Operacional e de 10-20% da Energia Embutida, já a Energia de Desconstrução possui uma participação bem pequena. Com isso, até pouco tempo, somente a Energia Operacional era considerada na ACVE, uma vez que participação na energia total do ciclo de vida é maior. Com a melhoria na eficiência de alguns equipamentos e no avanço e eficácia de alguns materiais isolantes, o foco também foi direcionado para a Energia Embutida (DIXIT *et al.*, 2010). À medida que

o uso da energia operacional diminui, o uso da energia embutida se tornará maior durante o ciclo de vida (IDDON; FIRTH, 2013).

Na ACVE a energia é a unidade básica de medição, e sua análise pode ser realizada usando energia primária ou secundária (fornecida). A primária é a energia extraída da natureza, como o carvão, enquanto a secundária é a energia consumida, no caso a eletricidade (CHAU; LEUNG; NG, 2015). O consumidor utiliza a secundária, porém uma quantidade da primária é utilizada para produzir essa energia secundária como combustível, carvão, hidrelétrica, entre outros. Logo a energia primária está embutida na energia consumida. Os fatores da energia primária devem ser aplicados tanto na energia operacional como na energia embutida, para que comparações possam ser válidas (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000).

2.2.1 Energia Embutida nos materiais

Para estimar a energia necessária para fabricação dos materiais de construção, as quantidades desses produtos devem ser calculadas (ADALBERTH, 1997). Os valores utilizados nesta análise normalmente são em MJ/kg e MJ/m³ de material produzido; ou se forem comparados elementos construtivos, como alvenaria, pisos e cobertura, adota-se MJ/m² (TAVARES, 2006).

A dificuldade de obter resultados precisos na fase de Energia Embutida está relacionada aos fatores como: (i) os processos industriais e atividades econômicas diferem entre países, onde os subdesenvolvidos são menos eficientes; (ii) as fábricas modernas são geralmente mais econômicas no uso de energia do que as mais antigas; (iii) dados obtidos por análises de estatística derivam de vários processos; (iiii) diferenças de qualidade entre a matéria prima, mão de obra, tratamento de resíduos e reciclagem (TAVARES, 2006).

2.2.2 Energia Embutida na Obra

Durante a etapa de construção, a energia é utilizada para vários processos (ADALBERTH, 1997). São contabilizados nessa fase os insumos energéticos diretos como: eletricidade, óleo diesel, entre outras fontes; necessárias para o funcionamento dos equipamentos utilizados no canteiro (TAVARES; LAMBERTS, 2005).

No estudo realizado por Adalberth (1997) grande parte da energia utilizada foi para escavação, remoção do solo e aquecimento dos espaços. Já a pesquisa desenvolvida por Mah *et al.* (2010), mostrou que os principais impactos foram causados pelos resíduos na etapa de estruturação do *wood frame* no local da obra e aquecimento para a secagem do concreto durante a execução da fundação. O autor concluiu que a principal estratégia para mitigar esses impactos é com a utilização de materiais pré-fabricados. Tavares; Lamberts (2005) mostraram em seu estudo que a energia consumida pelos equipamentos corresponde a 0,27% da Energia Embutida enquanto o desperdício chega a 25%, causando impactos superiores.

Para determinar a parcela de energia consumida nesta etapa, devem ser feitas composições de serviços utilizados da obra, como a potência e o número de horas que serão utilizados os equipamentos e as máquinas (SILVA, 2012). Já para calcular o desperdício dos materiais, é preciso observar os índices apresentados na TCPO que estão baseadas em pesquisas realizadas no âmbito nacional (TAVARES, 2006).

2.2.3 Energia Embutida nos transportes

Segundo Silva (2012) o transporte é considerado uma atuação secundária em qualquer processo, pois ocorre da necessidade de levar um recurso até onde ele for preciso.

É considerado na fase pré-operacional o transporte: da matéria prima até os centros de transformação; dos materiais processados até os centros de distribuição; dos materiais do centro de distribuição para a obra; de equipamentos utilizados no canteiro de obras; dos funcionários até a obra; dos resíduos gerados no canteiro.

Além disso, durante a vida útil da edificação, também serão transportados materiais para a reforma e manutenção assim como os resíduos gerados. Na fase de desconstrução serão transportados os materiais provenientes da demolição (TAVARES, 2006).

A energia gasta no transporte de materiais, resíduos e mão de obra, depende da localização geográfica entre as origens e os destinos. Se a mão de obra ou os produtos utilizados se encontrarem próximos ao local da obra, a energia com transporte será irrelevante (SILVA, 2012).

2.2.4 Energia Embutida na Manutenção

Durante a vida útil de uma edificação serão necessárias manutenções e reposições dos componentes. Toda construção, ou parte dela, pode se tornar inadequada devido aos requisitos de seus ocupantes, alteração no número de moradores, estética, comprimento das normas, entre outros (TAVARES, 2006).

Esta etapa representa o consumo de energia utilizada no transporte, na produção e aplicação dos materiais durante a manutenção (CARMINATTI JUNIOR, 2012) e também os desperdícios gerados (TAVARES; LAMBERTS, 2005).

A durabilidade dos materiais, componentes e equipamentos empregados na edificação é importante, visto que a escolha de materiais de baixa durabilidade requer reparos e manutenções com maior frequência (CARMINATTI JUNIOR, 2012). Outra questão é a estimativa da vida útil da edificação, com influência determinante, pois quanto maior a vida útil mais ciclos de manutenção e com isso mais consumo de energia (SILVA, 2012).

2.2.5 Energia Operacional

Os principais equipamentos presentes nas residências consomem energia através da eletricidade, GLP, gás natural, lenha ou carvão vegetal (TAVARES, 2006).

Os valores para o consumo de energia sofrem interferência de diversos fatores como: área construída, número de moradores, renda familiar, localização da edificação, diferença entre os modelos de equipamento (CARMINATTI JUNIOR, 2012). Pode-se acrescentar o tipo de alvenaria, espessura do revestimento das paredes, existência de forro na cobertura e isolamento térmico, quantidades e características das janelas e orientação das fachadas (TAVARES, 2006).

Além da energia elétrica deve-se considerar a energia gasta para cocção e outras atividades, por meio do uso de fontes como: o GLP, lenha, carvão vegetal e gás natural (EPE, 2017a).

No Brasil 21,4% da energia elétrica ofertada é utilizada pelo setor residencial (EPE, 2017a). Apesar de a energia elétrica ser a mais consumida, é possível observar que o consumo de GLP e lenha possui grande peso dentre as fontes energéticas disponíveis.

Existem três possibilidades utilizadas para estimar a Energia Operacional nos edifícios: (i) através dos registros reais do consumo obtidos em faturas; (ii) tomando como referência banco de dados de uso de energia; (iii) métodos de simulação de energia (ATMACA; ATMACA, 2015).

A simulação termo energética geralmente exige informações relacionadas às condições climáticas, comportamento dos ocupantes, forma e orientação do prédio, tipo de materiais de construção e sistemas prediais. Os métodos utilizados na simulação podem estimar o consumo de energia de toda operação do edifício, incluindo iluminação e climatização (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

2.2.6 Energia de Demolição

Esta etapa é caracterizada não somente pela demolição, mas também pelo destino do material demolido no qual pode ser reutilizado, reciclado ou encaminhado para aterros. A energia contabilizada nesta etapa é proveniente do uso de máquinas e equipamentos para demolição da edificação, transporte do material e do potencial de reciclagem (TAVARES, 2006).

You *et al.* (2011) argumentam que durante o ciclo de vida de uma edificação típica, a energia de desconstrução é considerada pequena se comparada as demais etapas. Deve ser considerada como uma fase importante, por ter a capacidade de reduzir as emissões de CO₂ em certa medida.

Segundo Tavares (2006) a reciclagem é dividida em três formatos: (i) através do **reuso** onde o material é utilizado de forma original, conforme foi concebido, podendo implicar em preparações ou renovações; (ii) como **combustão** energética para novos materiais; (iii) ou **reciclagem de material**, podendo ser realizada em ciclos fechados ou abertos, onde o primeiro consiste na sua utilização como matéria prima para a fabricação de um material semelhante ao original. Já o aberto aproveita o material reciclado para um uso diferente do original. Independente da maneira que será utilizado, estes processos contribuem para a diminuição da energia embutida em novos produtos (SILVA, 2012).

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EMISSÕES DE CO₂ (ACVCO₂)

A ACVCO₂ considera as emissões de dióxido de carbono contidas em uma edificação ao longo do seu ciclo de vida (ATMACA; ATMACA, 2015). Essas

emissões são provenientes da extração, fabricação, montagem de produtos e transporte das matérias primas (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

A quantidade de emissões de carbono fóssil não é influenciada apenas pela quantidade de energia primária, mas também pela qualidade das fontes primárias. Existem dois métodos para estimar as emissões de carbono fóssil. O primeiro é através da soma das emissões de carbono calculadas pela multiplicação da energia utilizada para a fabricação do material, com os valores apropriados do fator de emissão do combustível. Este possui valores distintos entre a energia primária renovável (hidráulica, biomassa, eólica, solar e geotérmica) e, não renovável (fóssil e nuclear). O valor desse fator também depende de cada país e suas características, ou seja, se utiliza mix de energia, a tecnologia de fabricação, origem dos materiais, entre outros. O segundo, considerado mais direto, estima as emissões de carbono multiplicando a quantidade de material utilizado com os valores de emissão dos materiais. Esse fator de emissão pode ser retirado de um banco de dados (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Além das emissões de carbono fóssil, existem as emissões por processos industriais (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Por exemplo, para a produção do cimento e aço ocorre a decomposição do calcário ou dolomita, liberando CO₂ (YOU *et al.*, 2011).

No estudo realizado por You *et al.* (2011), durante o ciclo de vida de um edifício de 100m², para a fabricação de cimento e aço 2-4% das emissões de CO₂ são provenientes dos processos industriais; e cerca de 78-85% vem do consumo de energia. Estudos apontam a importância de reduzir o consumo de energia nesta etapa, através do uso de materiais que utilizem menos energia em sua manufatura ou que novas tecnologias sejam desenvolvidas.

Diferente de outros materiais de construção como aço e concreto, produzidos por meio de processos tecnológicos em fábricas, a madeira é concebida mediante processos biológicos naturais que ocorrem no crescimento das árvores.

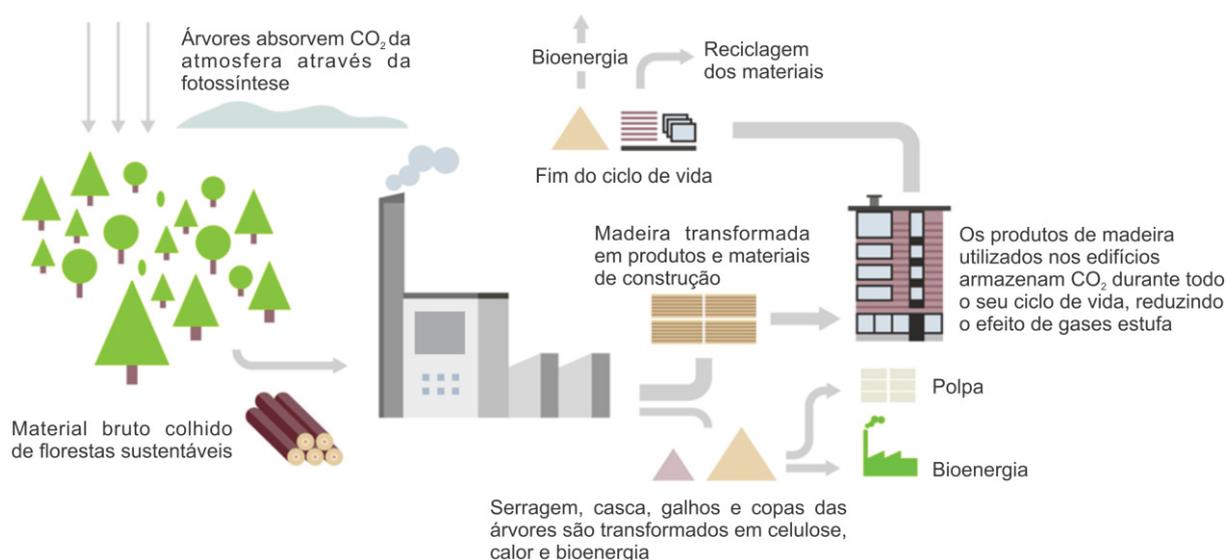
O processo de fotossíntese, energia solar captada por folhas de árvores, produz açúcares a partir do dióxido de carbono retirado do ar e da água. Esses açúcares são convertidos pelas árvores em moléculas orgânicas que se combinam em uma matriz composta para formar madeira. A madeira que é produzida organicamente por árvores vivas, pode então ser colhida e processada em diversos tipos de produtos de construção (SATHRE; GONZÁLEZ-GARCÍA, 2014). O ciclo de

vida de um produto de madeira se inicia com a germinação de uma semente de árvore e continua através do crescimento, colheita, fabricação e uso do produto.

Pawelzik *et al.* (2013) apontam duas abordagens que podem ser tomadas para contabilizar o carbono biogênico em materiais de base biológica: (i) o carbono é considerado neutro de CO₂ e excluído da análise de inventário; (ii) o carbono é 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.

O carbono presente em uma floresta manejada permanece estável ao longo do tempo, ou seja, neutro. Já o carbono que é liberado pela decomposição de árvores derrubadas ou mortas após a colheita e nas toras processadas pelas fábricas, é compensado pela absorção florestal de dióxido de carbono por meio de um novo crescimento ao longo do tempo. Ao contrário disso, o carbono armazenado nos produtos aumenta a cada colheita, se tornando um estoque crescente. Este estoque só é reduzido quando os produtos atingirem o fim de sua vida útil. Mesmo assim eles podem ser reciclados (prolongando sua vida útil), recuperados para energia (deslocando as emissões de energia fóssil) e decompostos rapidamente pela queima como lixo ou aterrados, resultando em um lento processo de decomposição (LIPPKE *et al.*, 2010), FIGURA 5.

FIGURA 5 – CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS DE MADEIRA



FONTE: A autora com base em Metsa Wood (2019)

O Brasil emitiu em 2016 no setor elétrico, em média, 101,3 kgCO₂ para produzir 1 MWh. Este índice é considerado inferior quando comparado aos países da União Europeia, China e EUA, pois dispõe de uma matriz elétrica renovável com destaque para a geração hidráulica que corresponde a 68,1% (BRASIL, 2017a). Entretanto, o setor da construção civil apresenta valores de emissões semelhantes ao de países desenvolvidos; isso devido às técnicas construtivas e aos materiais de construção utilizados que geram relevantes quantidades de resíduos (TAVARES; BRAGANÇA, 2016).

2.4 FERRAMENTAS PARA ACV

Existem grandes esforços para integrar a ACV com o projeto de edificações através do desenvolvimento de ferramentas, que possuem banco de dados, com informações ambientais dos materiais utilizados na construção civil (CALDAS *et al.*, 2015).

Trusty; Horst (2005) sugerem três níveis para classificar as ferramentas relacionadas à ACV:

Nível 1: foca em produtos individuais como revestimento de piso, janelas, entre outros; e são utilizados para fazer comparações entre critérios ambientais e econômicos, principalmente no estágio de especificação do projeto. Pode-se citar as ferramentas BEES e GaBi.

Nível 2: reúne todo o edifício, conjuntos ou elementos completos de construção, sendo que cada ferramenta oferece suporte a áreas específicas (energia operacional, iluminação e impactos ambientais do ciclo de vida). Essas ferramentas tendem ser objetivas e são utilizadas desde os estágios iniciais do projeto até os mais detalhados. Como exemplo, Athena e EnergyPlus.

Nível 3: avaliam o edifício inteiro e abrangem as preocupações ambientais, econômicas e sociais mais relevantes para a sustentabilidade. Todos utilizam os sistemas subjetivos de pontuação ou ponderação para fornecer medidas gerais e podem ser utilizados para orientar no processo de projeto. Exemplo, o LEED.

Dentre as ferramentas tipicamente utilizadas e focadas na indústria da construção podem ser citadas: *BEES* (América), *Athena* (Canadá), *CASBEE* (Japão) e *WRATE* (Reino Unido) (FU *et al.*, 2014).

O *software Athena Impact Estimator for Buildings* (IE4B) foi a primeira ferramenta norte americana a permitir que usuários avaliassem toda a edificação e os sistemas de montagem (AIA, 2010) que são divididas por fundação, piso, paredes, vigas e colunas, cobertura e material extra. O software estima as categorias de impacto durante todo ciclo de vida do edifício, permitindo a comparação entre edificações com diferentes materiais, além de calcular a energia na fase operacional.

O BEES (*Building for environmental and economic sustainability*) desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) mede o desempenho ambiental dos produtos da construção, utilizando as abordagens da ACV especificada na ISO 14040. Assim como o *software Athena*, avalia todas as etapas do ciclo de vida de um produto, além de medir o desempenho econômico do material.

O CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency*) é um método para avaliar e classificar o desempenho ambiental dos edifícios. Dispõe de várias ferramentas adaptadas a cada tipo de construção ou a finalidade de avaliação.

Já o *WRATE* é utilizado para avaliar os impactos ambientais de gerenciamento de resíduos durante todo o ciclo de vida. Permite que os usuários acompanhem os impactos ambientais da coleta de lixo e instalações de tratamento de resíduos.

Além das citadas anteriormente, ainda existem ferramentas com bancos de dados voltados para qualquer produto ou processo industrial como o *SimaPro*, desenvolvido pela *PRe Consultants* e o *GaBi*, produzida pela Universidade de Stuttgart. O *SimaPro* é considerada uma ferramenta profissional de ACV e uma das mais utilizadas. Permite comparar e analisar o ciclo de vida de produtos complexos, além da expansão e edição dos bancos de dados (AIA, 2010). O *GaBi* fornece um banco de dados com conteúdo acessível e constantemente atualizado que detalha os custos, a energia e o impacto ambiental da terceirização e do refinamento de cada matéria-prima. Ainda, analisa o impacto no meio ambiente, apresentando opções alternativas de fabricação, distribuição, reciclagem, poluição e sustentabilidade.

Segundo Kalahcioglu; Dang; Toklu (2012) um problema que limita a eficácia nas ferramentas de apoio à tomada de decisão relacionada à ACV de um edifício, é

a dificuldade de obter dados precisos, pois as edificações envolvem vários componentes com diferentes fontes produtoras.

2.5 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM)

O processo de implantação de uma edificação ainda ocorre de maneira fragmentada entre os envolvidos. O projeto acontece em etapas, requer a contratação de outros participantes, não introduzidos no início das decisões, e a comunicação é por meio de desenhos impressos. Os problemas ocasionados por esta fragmentação é o tempo e o custo exigido para gerar informações relativas ao orçamento, análises de energia, detalhamentos, entre outros. Estes geralmente são executados no final, quando o projeto está concluído, tornando inoportunas mudanças significativas (EASTMAN *et al.*, 2014).

Para solucionar esses problemas são indicadas alternativas nas estruturas organizacionais, uso de tecnologias para compartilhar plantas e documentos no momento da execução e implementação de ferramentas em CAD 3D (EASTMAN *et al.*, 2014). Com base nisso, BIM (*Building Information Modeling*) ou Modelagem da Informação da Construção pode contribuir para a integração das informações contidas nos demais projetos, em um único modelo, formando um banco de dados com todos os elementos construtivos e sua relação espacial (FLORIO, 2007).

A Modelagem da Informação na Construção pode ser definida como uma representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação, auxiliando como recurso de conhecimento compartilhado e formando uma base confiável para decisões durante seu ciclo de vida. A premissa básica do BIM é a colaboração entre as diversas partes envolvidas em diferentes fases do ciclo de vida de uma instalação (NIBS, 2007).

Quando completo, o modelo gerado irá conter a geometria e dados relevantes necessários para oferecer suporte à construção, fabricação e fornecimento de materiais durante a obra (EASTMAN *et al.*, 2014).

A metodologia BIM é centrada em modelos que fornecem conhecimentos sobre um projeto de edificação. Desde o seu planejamento, desenvolvimento, construção e operação, fornecendo aos projetistas, proprietários e contratados um processo que auxilia na tomada de decisões, qualidade e tempo (KIM; KIRBY; KRYGIEL, 2017).

As ferramentas BIM proporcionam benefícios como à integração entre projetos, resultando em melhor qualidade, custo e tempo (EASTMAN *et al.*, 2014). Apesar disso, existe um impedimento para a adoção completa do BIM pelos projetistas relacionados aos impactos sociais da tecnologia (comunicação, colaboração e cultura) na empresa sobre indivíduos, organizações e as profissões. A maior parte das mudanças tecnológicas leva gerações, desde a implantação até a aceitação (DEUTSCH, 2011). É importante que a postura dos profissionais de AEC seja colaborativa, para que a fragmentação do setor não ocorra (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

2.5.1 O Modelo BIM

Diferentes modelos BIM poderão ser desenvolvidos de acordo com o uso ou propósito, em fases específicas do ciclo de vida resultantes da evolução do projeto e da definição das soluções construtivas (CBIC, 2016).

Segundo Eastman *et al.* (2014) os modelos de construção são caracterizados por:

- **Componentes de construção** representados por objetos inteligentes que podem ser associados com atributos computáveis (dados e gráficos) e regras paramétricas.

- **Componentes que incluem dados que descrevem como eles se comportam** como quantificação, especificação e análise energética.

- **Dados consistentes** de modo que as modificações sejam ajustadas em todas as visualizações dos componentes;

- **Dados coordenados** de forma que as visualizações de um modelo sejam representadas de maneira coordenada.

O objeto BIM armazena vários dados, não só geométricos em 3D e 2D, mas também inclui informações técnicas sobre o produto e elementos paramétricos (CBIC, 2016).

Os objetos paramétricos são componentes BIM que podem ter suas características modificadas para atender as necessidades de determinado projeto, sem precisar redesenhar, permitindo que suas dimensões sejam automaticamente ajustadas em todas as representações, 2D e 3D. Os componentes BIM são os elementos que constituem o modelo e podem representar um material como argamassa ou um componente simples como corrimão ou esquadria, e ainda um

elemento complexo como uma fachada, compartimentos e seus equipamentos (ABDI, 2017).

Ferramentas BIM fornecem diferentes bibliotecas pré-definidas com objetos de geometria fixa e paramétrica. Esses objetos são baseados em padrões adotados na construção, apropriados para projetos preliminares. À medida que o projeto for desenvolvido, as definições dos objetos se tornam mais específicas e com informações referentes ao seu desempenho (custo, energia, som, entre outros).

2.5.2 O Ciclo de Vida do edifício com o uso de BIM

Outro aspecto da metodologia BIM é a sua aplicabilidade ao longo do ciclo de vida das edificações, desde a concepção até seu fim, podendo ser reutilizado ou demolido. A estrutura descritiva e de classificação aplicada ao longo do processo deve considerar todas as atividades, produtos e elementos que podem ser inclusos ao longo de todo o ciclo (ABDI, 2017).

A potencialidade da ferramenta BIM garante funcionalidades que vão além das permitidas pelo CAD 3D (MONTEIRO; MARTINS, 2011). Informações sobre cronogramas de construção podem ser implantadas nos modelos 3D para obter modelos 4D, dados de custo podem ser adicionados para obter modelos 5D, para projetos sustentáveis e ambientais modelos 6D e informações de As Built para alimentar o *Facility Management* modelos 7D (YUNG; WANG, 2014; HOLZER, 2011).

Durante cada interação do projeto, o modelo de construção 3D evolui e se torna mais preciso à medida que adquire maior número de informações (DUPUIS *et al.*, 2017).

No estudo inicial é possível utilizar BIM para produzir uma versão pouco detalhada do modelo, com a finalidade de realizar estudos de viabilidades. A fase de concepção corresponde à maior utilização da ferramenta, pois nesse momento o modelo será detalhado. Nesta etapa as funcionalidades do BIM suportam testes para novas soluções, coordenação de projeto, produção documental e *renderings*. Na fase de obra pode ser utilizado para detecção de erros, coordenação, planejamento, orçamento e gestão de obra. Por fim na operação toda a informação adquirida durante projeto e obra pode ser agrupada, facilitando a gestão e manutenção do edifício (MONTEIRO; MARTINS, 2011). A FIGURA 6 apresenta o ciclo de vida da edificação ao utilizar BIM.

FIGURA 6 - CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO COM O USO DA TECNOLOGIA BIM



FONTE: A autora (2018).

A efetivação da tecnologia BIM deve contar com o apoio total de todos os envolvidos no projeto e conhecimento do fluxo de trabalho durante o ciclo de vida (DAWOOD; IQBAL, 2010). Quanto mais cedo o modelo puder ser desenvolvido e compartilhado mais utilidade terá. Para isso, deve-se mudar a forma de contratação que ainda é fragmentada e desenvolvida em etapas, para que uma única entidade seja responsável pelo projeto e construção, e ambas participam da fase de projeto (EASTMAN *et al.*, 2014).

2.5.3 Nível de desenvolvimento (LOD)

Desenvolvido pelo AIA (*The American Institute of Architects*) em 2008, devido a rápida evolução da tecnologia BIM, o LOD (*Level of Development*) ou Nível de desenvolvimento é uma referência que permite aos profissionais AEC especificar, com alto grau de clareza, o conteúdo e a confiabilidade do modelo BIM em vários estágios do processo de projeto e construção (BIMForum, 2017).

O desenvolvimento do modelo é progressivo, conforme sua evolução, maior será o volume de informações (ABDI, 2017). O LOD foi dividido em seis níveis que

variam do 100 ao 500. Abaixo será descrito o que está contido em cada nível (BIMForum, 2017; ABDI, 2017; CBIC, 2016) e a FIGURA 7 apresenta o desenvolvimento de cada etapa.

- LOD 100: Não são representações geométricas, eles podem ser símbolos ou outras representações genéricas derivadas de diferentes elementos do modelo. Qualquer informação presente no LOD 100 deve ser considerada aproximada. Equivale ao projeto conceitual, o modelo consistirá das massas totais das edificações.

- LOD 200: Similar ao projeto esquemático, o modelo consistirá de sistemas genéricos de montagem com quantidades aproximadas, tamanhos, forma, orientação e localização. Qualquer informação derivada do LOD 200 deve ser considerada.

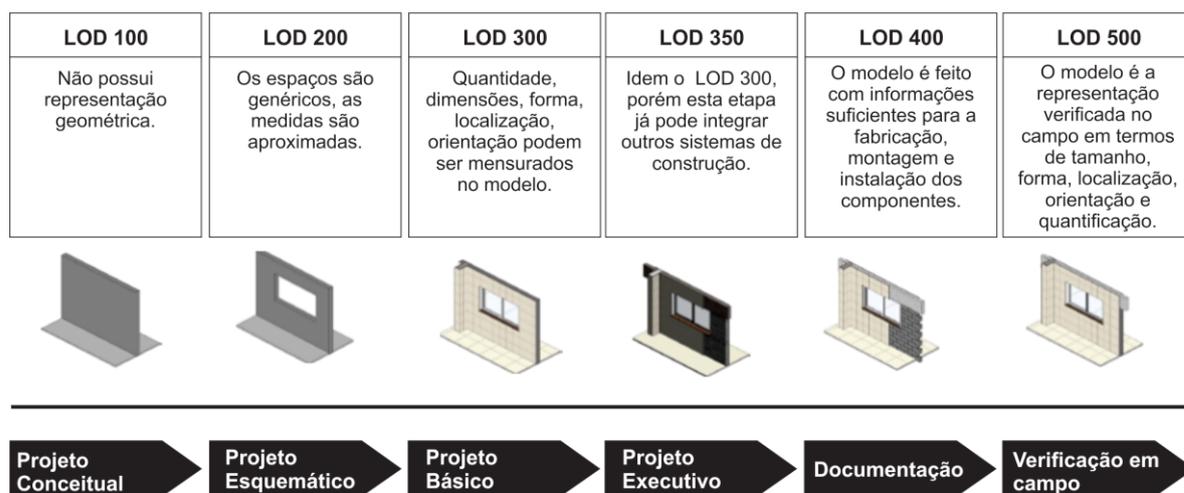
- LOD 300: são representados graficamente como sistemas, objetos ou conjuntos específicos a partir dos quais a quantidade, forma, tamanho, localização e orientação podem ser medidas diretamente. A origem do projeto é definida e o elemento é localizado com precisão em relação à origem do projeto.

- LOD 350: os elementos desse nível são aprimorados pela adição de informação de outros sistemas de construção. Por exemplo, um elemento de alvenaria no LOD 350 incluiria o batente, vigas, rejunte, juntas. Esta informação permite que o usuário do modelo coordene o elemento parede com outros sistemas na estrutura.

- LOD 400: neste nível os elementos do modelo serão detalhados com precisão, o suficiente para fornecer informações para a fabricação e montagem de cada componente.

- LOD 500: Este nível representa o projeto conforme ele foi construído. Este modelo servirá para a gestão da manutenção e operação da edificação ou instalação.

FIGURA 7 - NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO (LOD) DO PROJETO



FONTE: A autora (2018), adaptado de BIMForum (2017) e ABDI (2017).

Nos estudos de massa, normalmente se utiliza o ND 100. Na composição de modelos na etapa de estudo preliminar, é aplicado o ND 200 ou acima. Já nos projetos básicos e executivos é corrente a utilização de elementos ND 300 e ND 350. O ND 400 envolve o nível de detalhamento dos elementos construtivos como esquadria, escadas, divisórias, entre outros, para auxiliar na fabricação e montagem desses componentes. E por fim o ND 500 é uma verificação do que foi executado na obra, conhecido com *As Built* (ABDI, 2017).

2.5.4 Interoperabilidade

O BIM enquanto processo de trabalho, envolve a comunicação e a colaboração entre diferentes profissionais ligados a construção civil (ANDRADE; RUSCHEL, 2009). Porém, ainda possui limitações como a interoperabilidade entre os softwares e a capacidade de verificação de dados (LEE *et al.*, 2015).

Nenhum aplicativo pode suportar sozinho todas as tarefas associadas ao projeto e a execução de uma construção. A interoperabilidade representa a transferência de dados entre as ferramentas, permitindo que todos os usuários e as aplicações possam contribuir para o trabalho em questão (EASTMAN *et al.*, 2014). Com a interoperabilidade se elimina a necessidade de reprodução de dados que já foram criados, facilitando a automatização e os obstáculos entre o fluxo de trabalho e diferentes aplicativos (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Um dos principais formatos de arquivos para produtos da construção é o IFC (*Industry Foundation Classes*), para planejamento, projeto e construção (EASTMAN *et al.*, 2014). O IFC é um modelo de dados do edifício baseado em objeto que define a forma como a informação deve ser fornecida e armazenada para todas as fases de um ciclo de vida de projetos BIM. É neutro, aberto e independente de um fornecedor de aplicativos ou um conjunto de fornecedores, considerado a chave no processo entre a troca de dados entre diversos aplicativos BIM, de forma a aumentar a interoperabilidade na arquitetura, engenharia e indústria de construção (FERRAZ; MORAIS, 2012).

O *gbXML* foi desenvolvido para transferir informações para análise preliminar de energia de envelopes de construção, zonas e aparelhos de condicionadores de ar. Também é um formato de arquivo aberto criado para transportar com facilidade as informações relacionadas a análises energéticas, construindo um formato consistente para apoiar a interoperabilidade através de processos (BORGES *et al.*, 2018).

Quando se trata da exportação de arquivos entre diferentes programas, ainda hoje, ocorrem alguns problemas na transferência de propriedades dos arquivos que nem sempre preservam todas as características quando convertidos em IFC (MENEZES, 2011). Mesmo os softwares BIM que trabalham com este formato, por possuírem estrutura organizacional diferentes, apresentam problemas na tradução (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Outro problema é o fluxo de dados entre os modelos BIM e os softwares de análise de energia. Enquanto os dados de um projeto podem ser exportados para uma ferramenta de simulação através do formato IFC ou *gbXML*, esse processo ainda possui algumas dificuldades no sentido contrário, caso o modelo necessite de alguma modificação para obter melhor desempenho de construção.

2.6 INTEGRAÇÃO BIM E ACV

Visto que a ACV permite fazer uma avaliação completa dos impactos ambientais do edifício e o BIM possibilita incorporar informações ambientais nos produtos utilizados, a existência de ferramentas que integrem a ACV em um software BIM irá permitir que as vantagens entre as duas ferramentas aumentem,

oferecendo aos projetistas oportunidades para o desenvolvimento de projetos mais sustentáveis (SANTOS *et al.*, 2016).

As decisões tomadas nos estágios iniciais do projeto e construção proporcionam efeitos significativos no desempenho da edificação, resultando no consumo de energia em todo o ciclo de vida (BARROS; RUSCHEL; SILVA, 2015). A quantificação dos impactos ambientais e simulação energética dos componentes do edifício na fase inicial de projeto são úteis para os projetistas que precisam tomar decisões em busca de alternativas mais eficientes. BIM oferece aos profissionais da AEC a capacidade de avaliar diferentes escolhas na concepção do projeto, de modo que a avaliação de energia e ciclo de vida (ACV) seja alcançada (JALAEI; JRADE, 2014).

Mesmo que o trabalho seja realizado de maneira integrada para a execução do projeto, são necessárias diversas ferramentas utilizadas por diferentes profissionais para a realização dessas análises, dificultando um processo rápido de alternativas para os projetistas (BARROS; RUSCHEL; SILVA, 2015). Informações precisas podem ser fornecidas por tecnologias de informação conectadas a processos reais, complexos e demorados. Com o uso de um banco de dados inteligente, os impactos no processo de construção podem ser identificados e mitigados antes do início da construção (MAH *et al.*, 2010).

A integração do BIM e sustentabilidade dentro da indústria de AEC estão apenas começando para então alcançar seu potencial (BYNUM; ISSA; OLBINA, 2013). Alguns estudos foram desenvolvidos para integrar de maneira automática o BIM com ACV. Kalahcioglu; Dang; Toklu (2012) desenvolveram um protótipo para automatizar a ligação entre o modelo do edifício e ACV através do formato IFC com a finalidade de auxiliar nas decisões iniciais do projeto. Além disso, pode ser estendida a custos e conforto se tornando uma ferramenta completa. Iddon; Firth (2013) utilizou a ferramenta BIM em combinação com uma base de dados com informações técnicas para calcular e comparar simultaneamente a energia embutida e a energia operacional nas habitações no Reino Unido.

Jalaei; Jrade (2014) desenvolveram melhorias na funcionalidade entre *softwares* existentes para tornar mais rápido o processo de integração entre as ferramentas de análise energética, BIM, ACV, custos e certificação ambiental, onde os profissionais da construção civil possam analisar na fase de concepção do projeto questões relacionadas à sustentabilidade do edifício.

Antón; Díaz (2014) apresentaram duas abordagens para auxiliar na integração entre as ferramentas. A primeira, através de *softwares* que extraíssem os dados da ACV automaticamente dentro dos softwares BIM. A segunda abordagem, por meio da criação de objetos que obtivessem informações de ACV. Para os autores a segunda opção é menos precisa, mas pode ser vista como um ponto de partida para inclusão de informações ambientais ainda na fase de projeto. A ferramenta BIM também pode ser utilizada para inserir dados e produzir planilhas integradas com os quantitativos de emissões de CO₂ e o consumo energético. Nesses estudos os resultados podem ser interpretados por material ou pelo modelo, tornando viável a prática e aplicação de uma ACV mais simples de ser conduzida (MACHADO; MOREIRA, 2015). O estudo desenvolvido por Shin; Sho (2015) utilizou BIM para obter os quantitativos e o consumo de energia do projeto, e colocou essas informações em planilhas na ferramenta Excel. Os autores argumentam que no futuro é necessário criar uma biblioteca de objetos BIM com informações indispensáveis para que os profissionais do ramo possam conduzir uma ACV, ou outras análises.

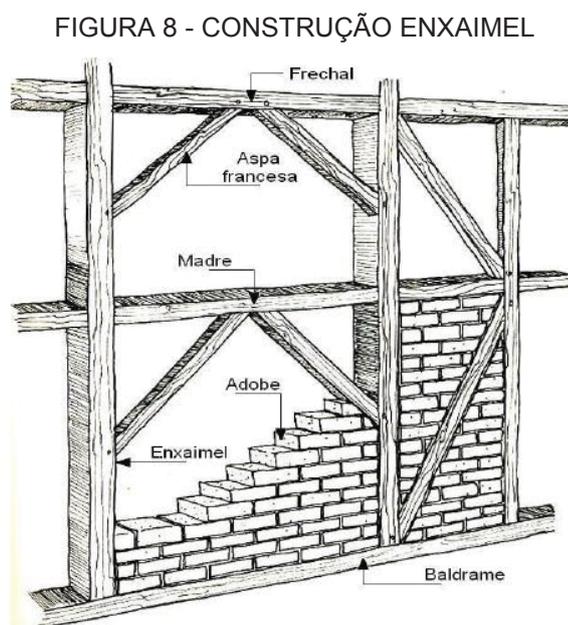
Uma das ferramentas que é integrada diretamente com o aplicativo *Revit* é o *Tally*, que funciona como um plug-in dentro da interface do *Revit* (BUENO; FABRICIO, 2016). Desenvolvido por *Kieran Timberlake*, fornece informações através de uma janela de dados, com descrição detalhadas do dimensionamento do projeto extraída do *Revit* além da lista de cada material utilizado com suas respectivas quantidades e seu impacto direto. Também pode-se calcular impactos da construção, como uso de energia, água e transporte. Porém, algumas etapas de fabricação são excluídas perante a limitação dos dados. O *Tally* utiliza a base de dados *GaBi*, armazenado em nuvens com constantes atualizações. Apesar das limitações, pela falta de algumas informações, a ferramenta oferece oportunidade para que os profissionais do ramo desenvolvam a ACV ainda na fase de projeto (SCHULTZ *et al.*, 2016).

BIM e ACV podem proporcionar ao setor da construção civil uma ferramenta confiável para medir desempenho, impactos ambientais e identificar áreas de melhoria. Essa integração irá aperfeiçoar a etapa de projeto, facilitando e antecipando a avaliação dos impactos. (BARROS; RUSCHEL; SILVA, 2015).

2.7 WOOD FRAME

O sistema de estrutura leve em madeira, conhecido como *wood frame*, é um método de construção industrializado estruturado em painéis de madeira onde a junção de outros materiais, proporciona uma edificação durável, confortável e protegida de intempéries e fogo (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

A percussora desta técnica foi o sistema enxaimel. Iniciada na idade média e de origem européia, utilizava toras de madeiras cortadas criando vigas robustas o qual eram encaixadas e formavam o esqueleto estrutural. Em seguida, era adicionada a cobertura e a parede de vedação, FIGURA 8. Essa técnica foi levada para a América do Norte, onde sofreu algumas adaptações, e também para algumas cidades no Brasil (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016).

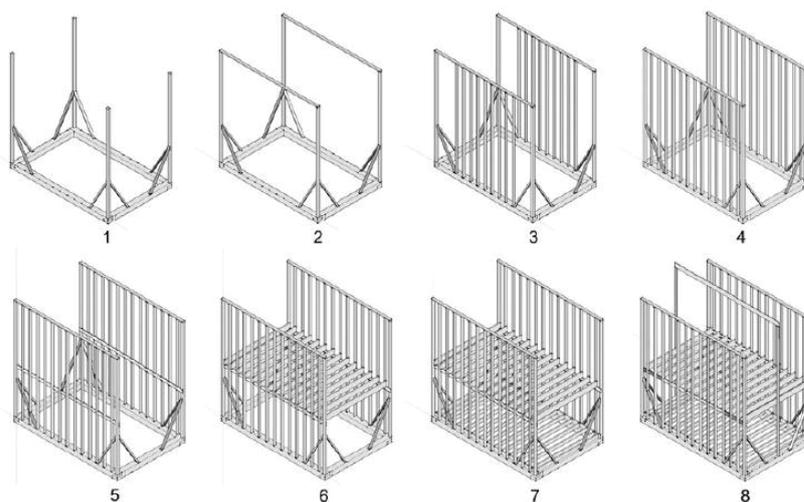


FONTE: Souto; Bueno; Silva apud. Bardou; Arzoumanian (1981).

O Enxaimel evoluiu para o *Ballon Frame*, método americano utilizado até o começo do século XX. A técnica trouxe em sua composição sessões transversais com peças menores de madeira e fechamento composto por placas de madeiras que proporcionavam rigidez estrutural para o sistema (VELLOSO, 2010; CMCH, 2014). Suas paredes possuem montantes contínuos, passando pelo piso até chegar à cobertura (CMHC, 2014). Devido a isto, têm como desvantagem dificuldades na execução por conta do tamanho das peças, fazendo com que cada parte da edificação seja erguida ao mesmo tempo (SOUTO *et al.*, 2016). Além disso, por ser

um sistema constituído por peças corridas e caso ocorra incêndio na edificação, parte da estrutura que for danificada pode comprometer toda a edificação. A FIGURA 9 apresenta o processo de construção do *Balloon Frame*.

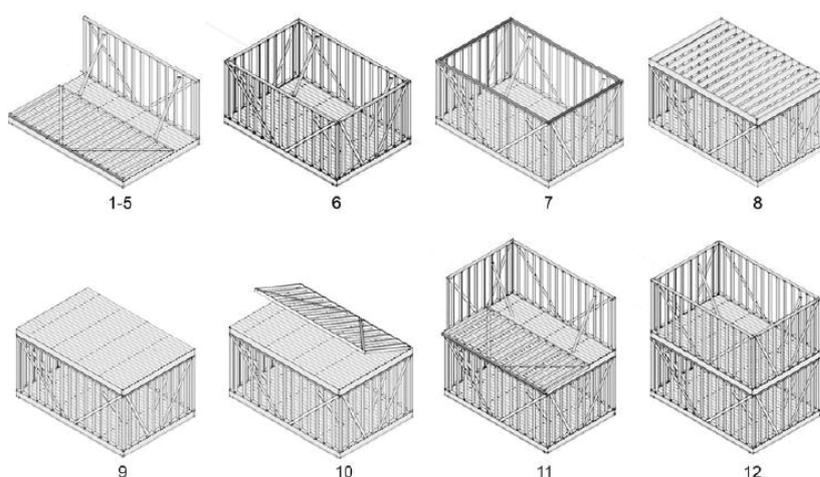
FIGURA 9 - PROCESSO DE CONSTRUÇÃO *BALLOON FRAME*



FONTE: O'Brien (2010).

Em seguida, este método evoluiu para o *Platform Frame* que possui um sistema semelhante ao do *Balloon Frame*, a diferença são os montantes verticais que dispõem a altura de um piso, permitindo que cada parede seja montada separadamente, FIGURA 10.

FIGURA 10 - PROCESSO DE CONSTRUÇÃO *PLATFORM FRAME*



FONTE: O'Brien (2010).

Este tipo de construção obteve melhor desempenho com relação a incêndio devido a separação entre as composições (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016).

Com a crescente necessidade de habitações durante o período entre a Primeira Guerra Mundial, Segunda Guerra Mundial e Guerra Fria, iniciaram-se a industrialização dos componentes construtivos para reduzir tempo e custo na montagem das casas (ESPINDOLA; INO, 2014).

A atual tecnologia do *wood frame* é resultado de muitos anos de pesquisa, e assim como qualquer outro sistema construtivo deve haver cuidados em sua construção. Se bem executado possui uma série de vantagens como (CMHC, 2014):

- construção rápida, fácil de ser executada e durável;
- utiliza recursos renováveis;
- adaptável a todos os climas;
- resistente, leve e flexível;
- melhor conforto térmico e acústico.

2.7.1 *Wood frame* no Brasil

Na América do Norte o sistema *wood frame* está presente em milhares de casas, segundo Molina; Calil Júnior (2010) nos Estados Unidos 95% das construções utilizam esta técnica.

No início de 2010 o *wood frame* começou a ser aplicado por construtores brasileiros. As vantagens que esse sistema possui fez com que pesquisadores adaptassem as técnicas para o âmbito nacional, utilizando espécies de madeiras provenientes de florestas plantadas (ESPÍNDOLA; INO, 2014).

Em 2011, com a iniciativa da comunidade técnica brasileira que avalia produtos inovadores relacionados à construção civil, o sistema *wood frame* passou por um processo de avaliação de normas técnicas. Foi criada a Diretriz para a avaliação técnica de sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamento em chapas (sistemas leves tipo "*light wood frame*") - SiNAT nº 005 (Sistema Nacional de Avaliação Técnica).

O SiNAT tem como papel avaliar produtos que ainda não possuem normas técnicas em vigência, buscando aumentar a competitividade do setor produtivo. Para obter aprovação do SiNAT a empresa precisa criar um Documento de Avaliação Técnica (DATec), apresentando o atendimento do sistema com relação a cumprimento das normas de desempenho nacional.

Em 2013 a Tecverde, empresa que utiliza o sistema construtivo *wood frame* em suas obras, obteve a DATec nº 020 - Sistemas de vedação vertical leve em

madeira Tecverde. Nesta época o documento destinava-se a construção de casas unifamiliares individuais ou germinadas. A DATec nº 020-C (PBQP-H, 2018a) acrescentou a construção de edifícios multifamiliares de até quatro pavimentos (térreo acrescidos de 3 pavimentos).

A apresentação da diretriz SiNAT nº 005 e DATec nº 020 é de grande importância para o produto, pois proporciona uma fundamentação básica para fornecedores, projetistas, construtoras e fabricantes. Além disso, incentiva a criação de pequenas empresas neste setor (ESPÍNDOLA; INO, 2014).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou a comissão para o desenvolvimento da norma para o *wood frame* que abrangerá os requisitos gerais, componentes, entre outros tópicos. Estima-se, segundo a ABNT (2019), que a norma siga para a consulta pública em 2019, para então ser aprovada.

2.7.2 Descrição do sistema construtivo

Nos Estados Unidos e Canadá, as edificações em *wood frame* são construídas utilizando o sistema Plataforma (*Platform Frame*). Estes são fabricados em diferentes níveis de industrialização (ABDI, 2015): (i) As casas em Kits são compostas por peças de madeira pré cortadas, onde toda a ossatura é montada no canteiro de obras; (ii) As casas panelizadas são constituídas por componentes industrializados e posteriormente montados no canteiro de obras, com o intuito de reduzir o tempo de obra e diminuir erros no dimensionamento das peças; (iii) As casas modulares apresentam maior grau de industrialização, onde os módulos constituídos pela ossatura, fechamento, esquadrias, e até mesmo as instalações são feitas na fábrica; (iiii) As casas industrializadas são transportadas inteiramente para o canteiro de obras, com as instalações elétricas e hidráulicas e acabamentos (VELLOSO, 2010).

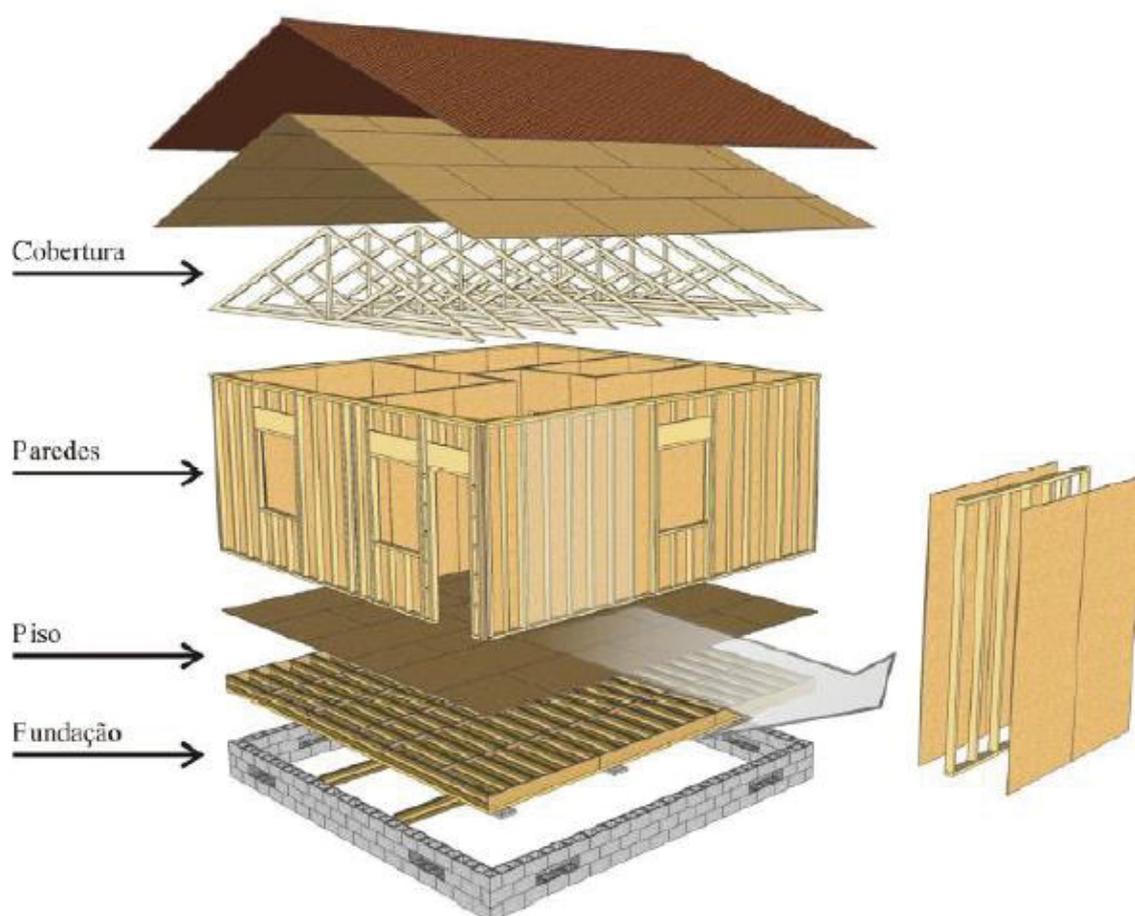
No Brasil são adotados três dos métodos citados: (i) produção e montagem dos painéis no canteiro; (ii) painéis abertos produzidos nas fábricas e finalizados no canteiro após a montagem; (iii) painéis fechados produzidos na fábrica. Esse método de construção na fábrica e no canteiro indica a capacidade das empresas brasileiras de aplicar o *wood frame* na produção de edificações (ESPÍNDOLA, 2017).

O sistema plataforma é composto por uma estrutura constituída de montantes e travessas em madeira maciça de pequenas dimensões. Esses montantes têm comprimento restrito à altura de cada pavimento e pouco espaçado entre si. A

ossatura é enrijecida por chapas estruturais em madeira que dão estabilidade ao sistema. A adoção desta técnica contribui para o desenvolvimento tecnológico da construção civil em madeira no Brasil, por utilizar técnicas inovadoras com componentes pré-fabricados, padronizados, de fácil execução e manutenção, adequadas a realidade brasileira (ESPÍNDOLA, 2010).

Esse sistema também é composto por outros subsistemas como: fundação, piso, parede e cobertura, conforme apresentado na FIGURA 11. Abaixo será descrito cada componente que constitui o sistema construtivo *wood frame*.

FIGURA 11 - SUBSISTEMAS DA TÉCNICA CONSTRUTIVA EM WOOD FRAME



FONTE: Espíndola (2010).

2.7.2.1 A Madeira empregada

A madeira é um material que vem sendo utilizado durante muito tempo, tanto em construções, como na fabricação de objetos, pois possui boas características físicas e mecânicas (PEREIRA, 2013). Considerada um material renovável,

consome pouca energia em sua produção e absorve o carbono da atmosfera durante seu crescimento. Além disso, é fácil de trabalhar, tem bom desempenho térmico e acústico, boa resistência e peso, material de fácil industrialização que facilita o transporte para obra (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

A madeira utilizada no sistema *wood frame* é destinada a estrutura, fechamento e acabamento. O pinus é um dos gêneros empregados na execução dessas peças no Brasil. Sua preferência ocorre por possuir elevada permeabilidade ao ser tratada em autoclave (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Outra opção, usualmente escolhida, é o Eucalipto (LEITE; LAHR, 2015).

Certas etapas devem ser feitas de maneira cuidadosa para não prejudicar o material. A secagem é um procedimento básico, quando não controlado pode prejudicar estruturalmente e visualmente a peça, ocasionando perdas se mal executado. Cada espécie se comporta de maneira diferente durante a secagem, umas recebem bem e outras necessitam de maior controle. Segundo Gustavsson; Sathre (2005) este procedimento pode ser alcançado através da secagem sob o ar seco pelo qual a madeira fica abrigada durante meses ou anos, ou com a utilização de estufas de secagem, sendo a última alternativa responsável por uma grande parcela do consumo de energia nesta etapa. O IPT (2003) aponta que o pinus possui secagem fácil ao contrário do Eucalipto onde se recomenda secagem ao ar livre antes da secagem em estufa.

Algumas espécies de madeira possuem durabilidade natural, mas o gênero pinus tem baixa resistência biológica. Neste caso, é necessário tratamento para resistir ao ataque de agentes deteriorantes, garantindo desempenho durante sua vida útil, principalmente em países como o Brasil de clima quente e úmido (VELLOSO, 2010). As substâncias preservativas são aplicadas em ambientes sob pressão totalmente fechados, utilizando autoclave e fazendo com que aumente sua resistência ao ataque desses organismos (PEREIRA, 2013). A NBR 16143 estabelece que as peças estruturais e painéis em madeira utilizem preservativos à base de CCA-C (arseniato de cobre cromatado do tipo C), CCB (borato de cobre cromatado) ou CA-B (cobre e azóis) (SINAT, 2017). Esses preservativos garantem a durabilidade da madeira em contato com o solo ou tempo. Para Veloso (2010) o assunto referente à madeira tratada, seus riscos e sua sustentabilidade é são complexas, pois pode ser tóxico para o ser humano durante o processo de tratamento, contato e no descarte final.

Devido à preocupação com a volatilização do arsênico presente no CCA, o CCB veio como alternativa, substituindo o arsênico pelo boro. Porém essa substituição mostrou uma pequena perda de resistência à lixiviação no tratamento de madeira instalada ao tempo (MORESCHI, 2013).

O risco de incêndio é outra preocupação com relação à madeira. Segundo Molina; Calil Junior (2010) esta possui um bom comportamento se comparado com o aço e o concreto. De acordo com Pereira (2013), a madeira transmite calor dez vezes mais devagar que o concreto e duzentos e cinquenta vezes menor com relação ao aço, fazendo com que ela tenha uma resistência maior que os demais materiais. A parte externa, devido a sua baixa condutividade, protege o interior minimizando o avanço do fogo.

Como já observado a madeira, quando comparada a outros materiais de construção, apresenta baixo consumo energético em seu ciclo de produção, e as florestas capturam o gás carbônico presente na atmosfera (VELOSO, 2010). Durante o crescimento das árvores, o CO₂ é absorvido e fixado na biomassa através da fotossíntese, mais tarde o carbono é liberado no meio ambiente através do processo de combustão ou decomposição da madeira (GUSTAVSSON; SATHRE, 2004).

Florestas e produtos a base de madeira podem desempenhar um papel importante para reduzir as emissões de CO₂ (GUSTAVSSON; PINGOUND; SATHRE, 2006). A maturidade da floresta também é um fator importante, pois a capacidade de reter o carbono diminui à medida que as árvores envelhecem. Isso mostra que o armazenamento de carbono está ligado ao planejamento de corte e reflorestamento e ao manejo florestal sustentável. Com isso, danos aos reservatórios de carbono são evitados, mantendo o processo de exploração contínuo e equilibrado (OLIVEIRA, 2016).

A estocagem de carbono pode variar por região, como apontou o estudo desenvolvido por Lippke *et al.* (2004) ao comparar o ciclo de vida de duas casas em cidades diferentes nos Estados Unidos. A casa localizada em Atlanta sequestrou menos carbono do que a casa localizada em Minneapolis, devido à rotação curta de suprimentos na região sudeste, ou seja, o tempo de renascimento de uma floresta ou vida útil do edifício pode influenciar nas conclusões (GUSTAVSSON; SATHRE, 2004).

Outro componente à base de madeira que integra o sistema *wood frame* é o painel de OSB que proporciona estabilidade e rigidez. O OSB, *oriented strand board*

ou painel de partículas orientadas, são painéis constituídos por camadas de partículas de madeira com resinas fenólicas, orientadas em um mesmo sentido e então prensadas. A resistência desse material é alta, possui a elasticidade do aglomerado e seu custo é baixo, visto que utilizam materiais que não são considerados nobres. Foram criadas com o intuito de suprir as resistências exigidas para fins estruturais que não era encontrado no aglomerado ou MDF (*Medium Density Fiberboard*) (IPT, 2003).

Ferro *et al.* (2018) apontam que existem diferenças nas placas OSB produzidas no Brasil em comparação com as produzidas no exterior, principalmente com relação ao uso de inseticidas e resina. No Brasil, são aplicados inseticidas piretróides nas placas OSB com o intuito de aumentar a resistência ao ataque de organismos, já em outros países não há evidências sobre a aplicação deste produto. Já com relação à resina, o único aglutinante utilizado é o MDI (metileno difenil diisocianato). Os autores apontam que melhorias ambientais poderiam ser alcançadas com a substituição do MDI por bio-resina, e dos piretróides por inseticidas a base de boro. No entanto mais estudos devem ser realizados com o intuito de verificar danos físicos e mecânicos ao produto, além de uma ACV que avaliasse os impactos na fase de uso e pós-uso.

O Brasil possui potencial na adoção da madeira na indústria da construção, por possuir ampla área de plantio, favorecendo o sequestro de carbono e contribuindo para a economia do país. As questões ambientais e florestais referentes ao manejo, reflorestamento e planejamento devem ser levadas em consideração para manter a exploração em equilíbrio, garantindo estoques para gerações futuras.

2.7.2.2 Fundação

A base da fundação deve ser feita antes da chegada dos componentes que irão compor a edificação (VELLOSO, 2010). É fundamental que seja escolhida de acordo com as cargas do projeto e do tipo de solo. Em países onde o inverno é rigoroso, a fundação é composta por um porão (*basement wall*) que ajuda a aumentar o aquecimento da casa, além de auxiliar na ventilação. A transmissão das cargas verticais não é concentrada, o que torna a fundação rápida e econômica. Pelo fato da estrutura sobre a fundação ser leve e com cargas distribuídas, uma boa

solução para a fundação é o *radier* ou sapata corrida (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

2.7.2.3 Piso

Nos pavimentos superiores, ou quando a edificação possui a fundação composta por um porão (*basement wall*), são utilizados *decks* constituídos por chapa OSB apoiados sobre viga de madeira com sessões retangulares ou I (formada por mesas de madeira maciça e alma de OSB). Este tipo de viga I proporciona pisos leves e eficientes (MOLINA; CALIL JÚNIOR, 2010).

A chapa OSB funciona como contrapiso, acima é aplicada uma camada regularizadora moldada no local ou o emprego de placas cimentícias, em seguida a aplicação do revestimento. No caso de entrepiso moldado no local, deve ser previsto a implantação de lona plástica sobre as chapas OSB. Em áreas molhadas é importante aplicar mantas de impermeabilização para proteger a base estrutural e as paredes (PBQP-H, 2017). O acabamento empregado pode ser revestimento cerâmico ou piso laminado. Já o forro em ambientes com gás encanado ou em áreas molhadas deve ser em gesso, e nos demais cômodos pode ser utilizado o forro PVC.

2.7.2.4 Parede e Revestimento

A estrutura do sistema *wood frame* é composta por montantes verticais ou ossaturas e travessas inferiores e superiores, utilizando madeira maciça e formando peças estruturais. A altura da ossatura depende do pé direito da edificação, que suporta e transfere a carga para a fundação. Os fechamentos dos montantes são feitos com chapas de madeira, geralmente OSB.

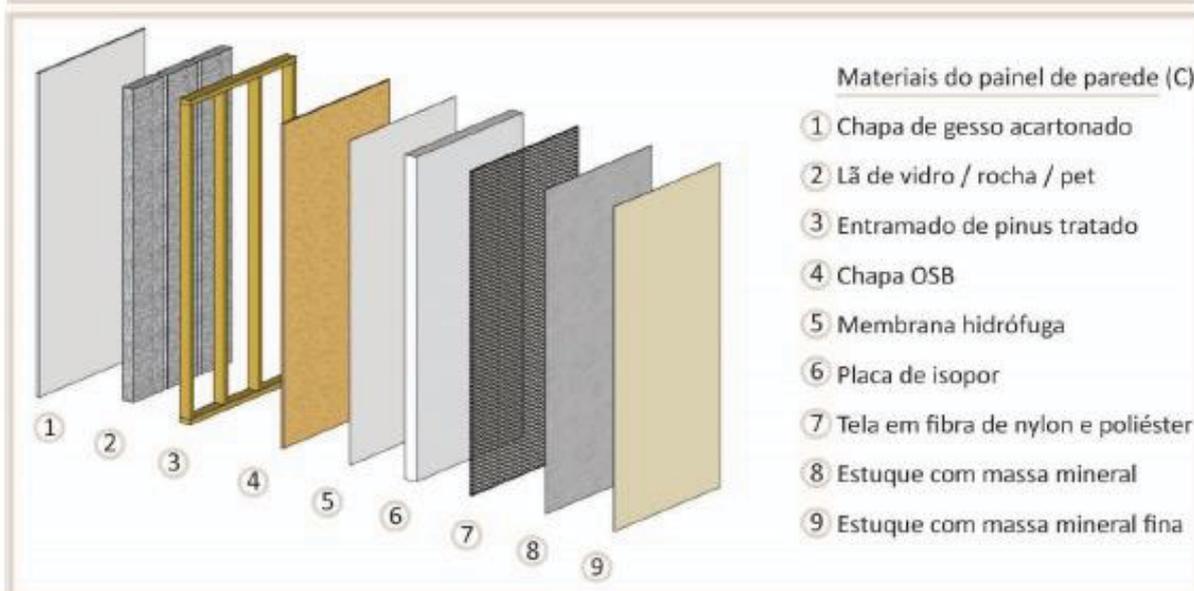
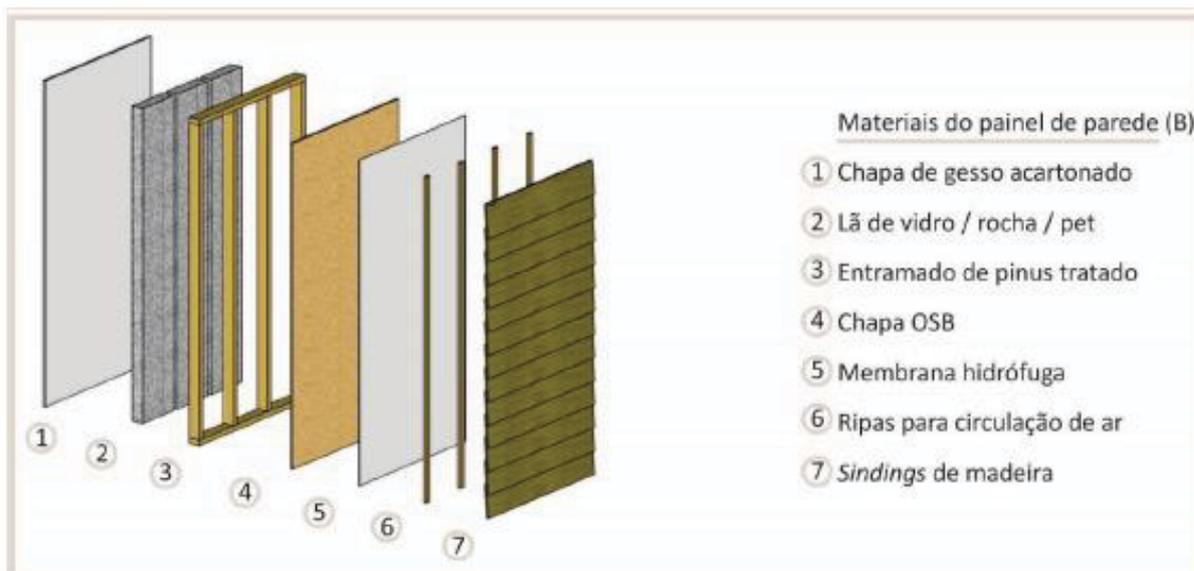
As edificações em *wood frame* utilizam outros materiais que proporcionam melhor acabamento e durabilidade ao sistema, como o gesso acartonado, placa cimentícias, *sidings* de aço, madeira ou PVC, pintura e revestimento cerâmico, entre outros. A membrana hidrófuga posicionada na face externa sobre o painel de OSB, tem a função de controlar a umidade e o vapor que atingem a habitação. Esta impede que o vapor e a umidade externa entrem nos painéis permitindo que o vapor e a umidade interna sejam liberados, possibilitando a respiração da habitação (ABDI, 2015). A utilização das placas de gesso na parte interna da edificação permite uma superfície como uma parede de alvenaria convencional e também proporciona

melhor resistência ao fogo, funcionando como uma barreira antichama (VELLOSO, 2010). Em áreas molhadas é indicado colocar placas de gesso acartonado com resistência a umidade (RU), e também uma camada impermeabilizante (PBQP-H, 2018a). Para melhorar o desempenho térmico e acústico do sistema são aplicadas mantas de lã de vidro no interior dos painéis (MOLINA; CALIL JUNIOR).

Espíndola (2017) observou em sua pesquisa que os componentes desse subsistema podem variar de acordo com as empresas, e que o modelo mais usual é composto por: (1) gesso acartonado, acabamentos interno como pintura e/ou azulejos cerâmicos, (2) isolante em lã de vidro ou rocha, (3) estrutura em madeira pinus tratado com CCA em autoclave, (4) chapa OSB, (5) membrana hidrófuga e (6) vedação externa e acabamento. Notou-se que a vedação externa é a que mais possui variação, obtendo três tipos diferentes de camada externa: (A) placa cimentícia, (B) *sidings* em madeira ou PVC, (C) placa de isopor, com tela reforço em fibra de *nylon* e poliéster e estuque com massa mineral. A FIGURA 12 ilustra as três tipologias.

FIGURA 12 - VARIAÇÕES DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA PAREDE





FONTE: Espíndola (2017)

Nas paredes internas que não possuem função estrutural, grande parte das empresas optam por colocar gesso acartonado com o intuito de vedar a estrutura de madeira. Quando são estruturais as empresas colocam chapas OSB em ambos os lados do painel.

2.7.2.5 Cobertura

Geralmente esse sistema é composto por treliças pré-fabricadas em madeira, estrutura metálica, ou ainda utilizar o telhado convencional composto por cumeeira, viga, terço, caibro, ripa e sarrafo. O uso de treliças industrializadas faz com que o peso da cobertura seja reduzido em 40% (MOLINA; CALIL JUNIOR).

O revestimento aplicado pode ser telha cerâmica, *shingle*, metálica, fibrocimento, entre outros. No uso da telha *shingle* deve ser inserida uma base composta por placas OSB em cima da treliça, um material isolante e impermeabilizante acima do OSB para posteriormente serem adicionadas as telhas. Este tipo de telhado também permite a aplicação de telhas cerâmicas, onde as ripas são posicionadas acima do material isolante e a seguir são aplicadas as telhas.

Para evitar o contato da madeira com a umidade proveniente da chuva, um detalhe importante deve ser adotado no projeto como a execução de um beiral em todo o perímetro da edificação de no mínimo 60 cm.

2.8 ESTADO DA ARTE

O estado da arte busca trazer o que se tem discutido e desenvolvido com relação ao tema ou problema apresentado neste trabalho. Abaixo se encontram os resumos das pesquisas selecionadas contendo os principais objetivos, métodos e conclusões. Como critério, as pesquisas selecionadas foram as mais atuais e também aquelas que possam contribuir com esta pesquisa, em sua estruturação, no desenvolvimento do método e escolha do software.

2.8.1 BIM e ACV

Alwan e Jones (2014) utilizaram a ferramenta BIM para extrair os quantitativos e modelar um edifício comercial localizado no Reino Unido, para determinar a energia embutida e operacional em diferentes tipologias construtiva, como concreto, aço, isolante, vidro e madeira, e também suas emissões de carbono. O processo metodológico se iniciou com a modelagem no BIM, posteriormente foram extraídos os volumes dos materiais e a obtenção da densidade, o inventário da energia embutida foi retirado do banco de dados do ICE (*Inventory of carbon and energy*), e para a energia operacional foi utilizado outro banco de dados europeu. Como resultado a energia operacional foi superior a energia embutida, porém se forem utilizadas energias renováveis esses valores cairiam e então a energia embutida teria seus valores aumentados, sendo relevante a escolha de materiais que causem menos impacto. Este método auxiliou na escolha de melhores materiais ainda na fase de projeto, ao ser aplicado o estudo de caso, que foi proposto inicialmente em ser todo em estrutura metálica, mas depois de algumas adaptações por painéis de

madeira foi possível reduzir em 20% as emissões. Outra questão abordada pelos autores é que a criação de uma biblioteca de objetos BIM com os dados da energia embutida aceleraria o processo.

Ajayi *et al.* (2015) utilizaram AVC e BIM para avaliar o desempenho ambiental dos materiais. O processo metodológico foi definir o objetivo, escopo e o inventário da ACV. O estudo de caso foi aplicado em uma escola no Canadá considerando o ciclo de vida do edifício de 30 anos e também quatro tipologias construtivas, uma utilizando bloco cerâmico, madeira, ICF, aço, e por último outro em bloco cerâmico utilizando na fase operacional energia renovável. O edifício foi modelado no *software Revit* e a partir dele pôde ser extraído os quantitativos do edifício, enviados para o Excel. O nível do desenvolvimento definido para o edifício foi o LOD 200. A ferramenta de simulação *Green Building Studio* foi aplicada para a quantificação da fase operacional. Os quantitativos obtidos foram inseridos na ferramenta ACV *Athena* que possui banco de dados para estimar os impactos associados aos materiais. Os impactos escolhidos para o estudo foram o Potencial de aquecimento global (GWP) e a toxicidade humana. Como resultados a construção em madeira foi a que obteve menor impacto embutido no material, porém na fase operacional obteve praticamente os mesmos resultados das demais tipologias. O edifício construído em bloco cerâmico obteve altos valores nos impactos embutidos nos materiais, mas a fase operacional foi baixa, pois adotou energia renovável, totalizando menos da metade dos impactos gerado pelas demais tipologias. O estudo mostrou a necessidade de várias ferramentas que beneficie a metodologia ACV na mitigação de impactos. Também mostrou que a fase operacional é a mais impactante e a utilização de energia renovável minimiza os impactos gerados. Porém, não adianta utilizar energia limpa nesta etapa sem considerar os impactos causados pelos materiais empregados no edifício.

O estudo desenvolvido por Lee *et al.* (2015) teve como objetivo criar um modelo verde, limitado a ferramenta *Revit*, capaz de avaliar os impactos ambientais. Foi selecionado um estudo de caso para comparar os resultados encontrados com a aplicação da biblioteca e a ACV calculada a partir de projetos 2D. Seu método descreve o processo de criação dessa biblioteca onde primeiramente foram selecionados os materiais mais utilizados na Coreia, dentre eles: concreto, aço, vidro, bloco de concreto, material isolante e gesso. Posteriormente foi definido o LOD 300 para o nível de desenvolvimento do modelo BIM, pois este nível define

bem os materiais empregados no edifício. Em seguida, foram descritos os principais fatores de impacto dos materiais de construção com base nos dados fornecidos pela Coreia, durante todo o ciclo de vida. Logo após, foi adicionada a densidade de cada material para permitir a avaliação do impacto. E por fim a criação de objetos paramétricos com a possibilidade de uso em outros projetos. Com todo esse desenvolvimento foi possível gerar resultados dos impactos totais dos materiais dentro do próprio *Revit*, sem a necessidade de utilizar um programa externo. Depois da aplicação do estudo de caso os autores obtiveram como resultado uma taxa de erro de 5% entre a aplicação do *template* e a ACV quantificada a partir de desenhos em 2D. Sua única limitação foi a ferramenta *Revit* não contabilizar as barras de aço no software, sendo eliminada da biblioteca.

Peng (2016) desenvolveu um método para calcular as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de um edifício de escritórios. O estudo foi produzido em três etapas: a fase pré-operacional, operacional e pós-operacional. Nesta pesquisa a manutenção foi excluída por apresentar percentual baixo de emissões, não chegando a 1%. Foram utilizadas as ferramentas *Revit*, e o *Ecotect* para simular o desempenho do edifício. A ferramenta BIM também auxiliou para a extração automática de quantitativos, reduzindo a operação manual e a eventuais erros. Através dessas informações foi possível reduzir as emissões na fase operacional dos edifícios, através de análises que poderiam ser tomadas para minimizar o impacto nessa fase, não ignorando a fase pré-operacional.

Won; Cheng (2016) utilizaram BIM para quantificar o carbono embutido em um edifício residencial, considerando a etapa pré-operacional e operacional. A energia embutida dos materiais foi baseada em estudo anteriores realizados em Hong Kong, por não existir um banco de dados próprio, e para estimar a energia operacional foi utilizado software de simulação vinculado ao modelo BIM. A estrutura proposta era baseada na utilização do software *Revit* 2014 integrado ao *Excel* para fornecer informações de materiais extraídas do modelo BIM, incluindo nome e volume, com os dados das emissões específicos de Hong Kong. Para o cálculo da energia operacional foram utilizados os softwares *eQUEST* e *Green Building Studio* (GBS), desenvolvido pela *Autodesk*. Como o *eQUEST* não pode importar as informações diretamente de uma ferramenta BIM, o GBS foi utilizado para converter o modelo em formato de arquivos legíveis para que o *eQUEST* possa ser utilizado. O

estudo também permitiu analisar o impacto causado por diferentes tipologias de edificação para auxiliar os profissionais na tomada de decisões.

Najjar *et al.* (2017) tiveram como objetivo, em sua pesquisa, integrar BIM e ACV na fase de projeto em um edifício de escritórios no Brasil, analisando todos os impactos e utilizando dois tipos de materiais: construção empregando paredes em alvenaria; e construção moderna com fachada em vidro. O trabalho forneceu uma aplicação prática desta integração, usando a estrutura metodológica da ACV baseada na ISO 14040. O estudo fez uso da ferramenta *Revit* para execução do modelo do edifício, na fase operacional foi utilizado o software *Green Building Studio*; já para os impactos dos materiais foi utilizado o plug-in *Tally* que faz ligação direta com o *Revit*. O resultado principal desta pesquisa demonstrou a integração entre as ferramentas, onde o procedimento foi considerado ideal para alcançar o desenvolvimento sustentável e auxiliar na tomada de decisão. Porém, ainda possui algumas dificuldades no banco de dados do BIM para melhor aplicação da ACV, mais informações sobre as propriedades dos materiais devem ser inseridas.

Yang *et al.* (2018) utilizaram banco de dados locais e ferramentas BIM-ACV para contabilizar o carbono embutido em um edifício residencial chinês. O objetivo principal é apresentar um método para contabilizar o CO₂ através de um estudo de caso em todo o ciclo do edifício. A pesquisa foi dividida em: produção do material utilizado na edificação, transporte do material, construção no terreno, operação, reforma, demolição e disposição do entulho. Para a modelagem da edificação foi utilizada a ferramenta *Revit* 2015 e o Nível de Desenvolvimento do modelo foi o *LOD* 300, para que informações relevantes possam ser extraídas. Uma ferramenta BIM5D, desenvolvida pela *Glondon*, também de origem chinesa, através de um plug-in, foi utilizada para calcular os equipamentos, gasto com combustível e materiais utilizados na obra. Para a fase operacional foi empregado o *DesignBuilder*, baseado no *EnergyPlus*, para cálculo do consumo de energia. E para cálculo da emissão de carbono dos materiais utilizou-se a base de dados chinesa *eBalance*. Como não foram encontrados todos os materiais, também adotaram o *Ecoinvent* e *ELCD*. Os autores concluíram que o desempenho ambiental pode ser mensurado em detalhes, mas a falta de alguns dados e a interoperabilidade entre as ferramentas ainda dificulta o processo e carece de mais atenção.

O QUADRO 1 apresenta o resumo das principais escolhas dos autores para a integração do BIM-ACV.

QUADRO 1 - RESUMO DO ESTADO DA ARTE

Autor	Estudo de Caso	Método ACV			BIM			BIM+ACV
		Objetivo e Escopo		Análise de Inventário	LOD	Modelagem	Análise de Energia	
		Ciclo de vida	Fases	Impactos				
Awan e Jones (2014)	Edifício Cultural	10 anos	Pré.O e O	CO ₂	-	Não específica	-	Somente para extração dos quantitativos
Ajayi et al. (2015)	Escola	30 anos	Pré.O, O, Pós.O (excluiu manutenção)	CO ₂ e Toxicidade Humana	200	Revit	Green Building Studio	Extração dos quantitativos de ambas as ferramentas e aplicação na ferramenta Athena
Lee et al. (2015)	Materiais	-	Pré.O	GWP, POF, PE, PDO, PA, PDA*	300	Revit	-	Criação de biblioteca com os valores dos impactos dos materiais
Peng (2016)	Edifício comercial	50 anos	Pré.O, O, Pós.O (excluiu manutenção)	CO ₂	-	Revit	Ecotect	Somente para extração dos quantitativos
Won e Cheng (2016)	Edifício residencial	50 anos	Pré.O e O	CO ₂	-	Revit	Green Building Studio e eQUEST	Extração dos quantitativos de ambas as ferramentas e cálculo no Excel
Najjar et al. (2017)	Edifício comercial	50 anos	Pré.O, O, Pós.O (excluiu construção)	PA, PE, GWP, PDO, PFS, DEP, ENR, ER*	-	Revit	Green Building Studio e eQUEST	Utilizou o plug-in Tally no Revit para cálculo da ACV
Yang et al. (2018)	Edifício residencial	50 anos	Pré.O, O, Pós.O	GWP*	300	Revit	DesignBuilder	Extrai os quantitativos do Revit, DesignBuilder uso do BIM 5D para a fase de construção. Cálculo no Excel

* Potencial de Depleção Abiótica (PDA), Potencial de ozônio fotoquímico (POF), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Eutrofização (PE), Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de depleção do ozônio (PDO), Potencial de formação de SMOG (PFS), Demanda de Energia Primária (DEP), Energia não renovável (ENR), e Energia renovável (ER).

Pré.O (Pré-operacional); O (Operacional); Pós.O (Pós-operacional)

Fonte: A autora (2019).

Pode-se observar, dentre os estudos selecionados, que o modelo BIM auxiliou no desenvolvimento da ACV através de informações inseridas dentro do próprio objeto e quantificação dos materiais. Foi observado que *plug-ins* e *software* que façam essa integração automática ainda estão em desenvolvimento ou são restritos a um banco de dados, como o *plug-in Tally*.

As principais limitações são referentes à interoperabilidade entre ferramentas, onde se faz necessário a utilização de mais de um *software* para conseguir essa

junção de informações. E também, a falta de dados para realização completa da ACV, mostrando que alguns dos pesquisadores tentam pegar algumas informações em banco de dados locais e complementam com banco de dados internacional.

Alguns dos autores fornecem o nível de desenvolvimento (LOD) escolhido para a modelagem do estudo de caso. Yang et al. (2018) apontam que a definição do LOD é importante para definir nível de precisão da ACV para que o modelo BIM possa fornecer informações necessárias e precisas.

2.8.2 ACV e Wood Frame

O estado da arte sobre ACV e os componentes de madeira teve como intuito levantar estudos realizados no Brasil no que se trata da ACV da madeira serrada (extração e beneficiamento) e, do OSB, componentes principais do sistema *wood frame*. Também teve como objetivo fornecer base para auxiliar na seleção de dados a serem empregados nesta pesquisa.

Souza (2010) apresenta um estudo de caso na fábrica REFLORESTE, localizada em Florianópolis-SC, demonstrando o ciclo de vida na fase de extração e beneficiamento da madeira pinus de floresta plantada e tratada em autoclave. O objetivo é entender como essa madeira vem sendo empregada e a relação entre o tratamento e o impacto ambiental. O sistema limitou-se a extração, beneficiamento e venda. O QUADRO 2 abaixo apresenta alguns dados coletados pela autora.

QUADRO 2 - EXTRAÇÃO E BENEFICIMENTO DA MADEIRA

Etapa	Atividade	Dados
Extração	Distância percorrida para corte	160km (ida e volta)
	Equipamentos para extração (7h/dia - 7 dias)	Trator Moto serra (gasolina)
Beneficiamento (corte das peças)	Desperdício (1m ³)	49,84% são sobras que viram fonte de energia para indústrias têxteis.
	Consumo energético (1m ³)	30,029kW/h
Beneficiamento (tratamento peças)	Distância (15m ³)	45,4km
	Uso de CCA (1m ³)	0,004m ³ CCA e 0,08m ³ de água
	Consumo energético (1m ³)	8,4kW/h

Fonte: Souza (2010)

Monich (2012) quantificou a energia embutida e o CO₂ nos materiais que compõe uma habitação em *wood frame*. O estudo de caso foi realizado a partir da coleta de dados, para um habitação de 42m², de uma empresa que produz casas pré-fabricada no sistema *wood frame* em Curitiba-PR. O sistema limita-se a fase pré-operacional, incluindo extração, transporte e manufatura dos materiais, e a

fabricação dos painéis na fábrica. Os dados, em sua grande maioria, foram retirados do estudo desenvolvido por Tavares (2006), e os materiais faltantes do banco de dados do ICE (*Inventory of Carbon and Energy*) e do Athena. Para o estoque de carbono foram utilizados os dados do MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) que considera o teor de carbono estocado em uma tonelada de madeira seca são 50%. Os resultados encontrados para a EE inicial foram 2374,61 MJ/m², para a EE na manufatura da habitação 2,96 MJ/m², CO₂ embutido total 159,27 kg/m², e considerando o estoque de carbono 90,57 kg/m².

Souza (2013) avaliou a sustentabilidade ambiental e econômica de uma habitação de interesse social no sistema plataforma em madeira. Para a avaliação ambiental foi empregado o método com estrutura simplificada, baseado em critérios e pontuação, identificando as cargas e o potencial de impacto, consumo de energia e emissão de CO₂ do sistema de montagem piso, parede e cobertura ao longo do ciclo de vida. Grande parte dos dados utilizados na pesquisa foi retirada da literatura técnica, porém as informações de consumo energético da madeira serrada foram obtidos por meio de entrevista com base nos consumos mensais nas faturas de energia de 6 madeireiras localizadas em Santa Catarina. Foram contempladas diferentes etapas do processo de manufatura como serraria, secagem, beneficiamento e tratamento, excluindo plantação, colheita e transporte. A TABELA 1 apresenta dos dados obtidos.

TABELA 1 - ENERGIA EMBUTIDA NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DE MADEIRA

Etapas	Consumo médio de energia entre as empresas (MJ/kg)
Desdobro	0,23
Secagem	0,32
Beneficiamento	0,14
Tratamento	0,41
Total	1,10

FONTE: Souza (2014).

Garcia (2014) teve como objetivo em sua pesquisa estimar a energia embutida e o CO₂ de uma tonelada de madeira serrada (bruta e aplainada) provenientes de floresta plantada (pinus e eucalipto), nativa (florestas tropicais) e outros produtos da construção civil. O limite do sistema adotado foi do berço à porta do consumidor. Os dados foram baseados na informação de 12 empresas que trabalham com floresta plantada. Neste estudo, o estoque de carbono se aplicou o conceito do carbono neutro, presumindo que o que for absorvido durante seu

crescimento será liberado no final da vida da madeira. A TABELA 2 e TABELA 3 apresentam os resultados encontrados referente a floresta plantada, já que este é o foco do presente estudo. A autora dividiu os resultados entre mínimo, máximo e mediana.

TABELA 2 - EMISSÕES DE CO₂

Madeira plantada	Fases de processo*				Total (kgCO ₂ /kg)
	PE + E	T1	PC1	T2	
Mínimo	0,0189	0,0039	0,0096	0,0087	0,041
Máximo	0,0820	0,0203	0,4574	0,1670	0,726
Mediana	0,0605	0,0121	0,0284	0,0529	0,155

*Fases do processo: PE+E (Pré-extração e extração); T1 (Transporte 1); PC1 (Processamento 1); T2 (Transporte para o consumidor)

TABELA 3 - ENERGIA EMBUTIDA

Madeira plantada	Fases de processo*				Total (MJ/kg)
	PE + E	T1	PC1	T2	
Mínimo	0,2485	0,0510	0,5320	0,1134	0,945
Máximo	1,6841	0,4017	12,8552	0,5099	15,450
Mediana	0,6887	0,2084	7,4399	0,7884	9,062

*Fases do processo: PE+E (Pré-extração e extração); T1 (Transporte 1); PC1 (Processamento 1); T2 (Transporte para o consumidor)

Fonte: Garcia (2014).

Ferro *et al.* (2015) realizaram a ACV (do berço ao portão da fábrica) do painel OSB com o objetivo de apresentar os principais impactos ambientais referentes a sua produção para 1m³ de painel. O trabalho avaliou as 12 categorias de impacto e mostrou que a etapa laboratorial utilizou mais recursos renováveis e energéticos.

O painel OSB foi produzido a partir do uso de madeira de reflorestamento da espécie pinus com densidade de 700 kg/m³. O estudo dividiu-se em três processos: produção florestal (solo, plantio de mudas, manutenção da floresta, colheita e transporte da madeira); serraria (processo de desdobro, secagem, geração de energia e aplainamento); produção laboratorial (beneficiamento da madeira, colagem, prensagem e finalização). Parte dos dados para a produção florestal foi retirada da literatura e outra parte coletadas junto à unidade florestal. Os dados da serraria foram retirados da literatura, e a etapa laboratorial simulada e coletada *in loco*. A QUADRO 1QUADRO 3 apresenta o consumo de recursos para a fabricação de 1m³ de OSB.

QUADRO 3 - RECURSOS PARA A FABRICAÇÃO DE 1m³ DE OSB

Produção Florestal	Serraria	Produção laboratorial
103,00 kg de pinus	544,35 kg (queima de madeira)	686,25 kg (madeira)
56,25 kg (diesel)	63,84 kg (diesel)	56,82 kg (diesel)
-	138,36 MJ (eletricidade)	3159,00 MJ (eletricidade)

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

Oliveira (2016) avaliou a energia embutida e o CO₂ nos materiais de construção em madeira que compõe o sistema construtivo *wood frame*. A TABELA 4 apresenta os resultados encontrados no processo de manufatura da madeira serrada.

TABELA 4 - RESULTADOS OBTIDOS POR OLIVEIRA (2016)

Material	EE (MJ/kg)	CO ₂ (kgCO ₂ /kg)		
		Embutido	Estocado	Total
Madeira serrada	6,39	0,538	1,83	-1,29

Fonte: Oliveira (2016).

O estudo desenvolvido por Ferro *et al.* (2018) teve como objetivo desenvolver a ACV da produção de OSB, do berço ao portão, considerando as práticas reais da empresa brasileira LP Brasil. O sistema de produção contou com duas etapas: Operação Florestal e Fabricação do painel. A unidade funcional utilizada foi 1m³ de OSB, considerando a densidade de 600kg/m³. Além de avaliadas 9 categorias de impacto. A TABELA 5 apresenta os dados de inventário para a fabricação de 1m³ nas duas etapas.

TABELA 5 - DADOS DE INVENTÁRIO PARA 1m³ DE OSB

Subsistema		Operação Florestal	Fabricação do painel
Combustíveis fósseis	Diesel	350 g	0,98 kg
	GLP	-	0,18 kg
Energia	Eletricidade	-	497 MJ
	Biomassa	-	6131 MJ
Transporte	Caminhão	420 t/km	38 t/km
	Navio	-	14 t/km

Fonte: Ferro *et al.* (2018).

A TABELA 6 exibe o resumo dos quantitativos adotados por alguns dos autores mencionados anteriormente para energia embutida e CO₂.

TABELA 6 - RESUMO ESTADO DA ARTE

Autor	Madeira		OSB	
	EE (MJ/kg)	CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	EE (MJ/kg)	CO ₂ (kgCO ₂ /kg)
Souza (2010)	-	-	-	-
Monich (2012)	3,50	0,071	4,81	0,28
Souza (2013)	1,10	-	7,50	-
Garcia (2014)	9,06*	0,155 *	12,71**	0,196**
Ferro (2015)	-	-	-	-
Oliveira (2016)	6,39	-1,29	27,42	0,40
Ferro (2018)	-	-	-	-

* Dados com base na mediana estipulada pela autora.

**Dados considerados para madeira acabada que inclui: peças para parede, piso e teto.

Fonte: A autora (2019).

Os resultados entre os autores apresentam diferenças para energia embutida, assim como para emissões de CO₂. Essa divergência de resultados deu-se devido à falta de algumas informações referente à etapa de extração da madeira. Além disso, Garcia (2014) aponta que as amostras utilizadas em seu estudo apresentaram diferenças nas condições de extração da madeira, no desenvolvimento tecnológico, na qualificação de recursos humanos e disposições normativas, assim como na variação do processo de produção e na mistura de produtos manufaturados, considerando que o retrato da indústria madeireira brasileira é heterogêneo.

2.8.2.1 Conclusão do Estado da Arte ACV e *Wood Frame*

A partir das informações coletadas no Estado da Arte, observou-se a falta de dados de Energia Embutida e CO₂ para o material OSB. O estudo desenvolvido por Ferro et al. (2018) apresentou dados de entrada como quantitativos de material, transporte e consumo energético durante a etapa de extração da madeira e manufatura de 1m³ de painel da empresa LP Brasil, principal fornecedor de OSB. Com base nesses quantitativos, foi possível mensurar a EE e CO₂ presentes neste material utilizando o método empregado no estudo desenvolvido por Tavares (2006), onde foram levantadas todas as fontes primárias utilizadas no processo. E a partir disso foi aplicado o fator de geração de CO₂ por uso de fontes combustíveis, com base no levantamento realizado por Tavares e Bragança (2016) e IPCC (2006).

Além das informações de entrada fornecidas pelos autores, também foram contabilizados dois subprodutos considerados impactantes para a produção do OSB, a resina MDI e a parafina. Esses valores tiveram como base dados internacionais. Para a resina MDI foi utilizada a EPD (*Environment Product Declaration*) da *Plastics*

Europe (2011) e a parafina do banco de dados USLCl (*United States Life Cycle Inventory*) (NREL, 2018).

Para os dados da madeira serrada aplainada pinus utilizou-se os dados de entrada para o transporte, processamento e consumo de energia para a produção fornecidos por Garcia (2014) para a empresa 4. Para os dados de extração da madeira adotou-se os valores utilizados no estudo de Ferro et al. (2018). Para a quantificação da EE e o CO₂ foi empregado o mesmo método para o OSB, através do levantamento das fontes de energia primária e o fator de geração de CO₂ por uso de fontes.

A pesquisa desenvolvida por Garcia (2014) não contabilizou a energia gasta para o tratamento da madeira serrada em autoclave, a partir disso, o gasto energético para esta etapa teve base no estudo desenvolvido por Souza (2013), obtendo uma média de 0,41 MJ/kg de madeira, através do levantamento feito nas empresas. Aplicando o fator de geração de CO₂ para a energia elétrica foi encontrado 0,02 kgCO₂/kg. A TABELA 7 apresenta os valores alcançados para a madeira serrada aplainada *pinus* e para o OSB.

TABELA 7 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A MADEIRA SERRADA E O OSB

Madeira serrada aplainada (pinus)¹	Energia Embutida (MJ/kg)	Não-renovável 2,22	Renovável 1,75	Total 3,97
	CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Não-renovável 0,11	Renovável 0,20 (carbono neutro)	Total 0,11
Painel OSB¹	Energia Embutida (MJ/kg)	Não-renovável 4,07	Renovável 10,25	Total 14,32
	CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Não-renovável 0,2	Renovável 1,1 (carbono neutro)	Total 0,20

¹A autora, com base em Ferro et al. (2018), Garcia (2014), Souza (2013), Plastics Europe (2011) e NREL (2018)

Observa-se que grande parte da energia utilizada para a produção do painel OSB e madeira serrada são provenientes de fontes renováveis com o uso da biomassa (restos de madeira).

Para o CO₂ aplicou-se o conceito do carbono neutro considerando que o mesmo foi absorvido durante seu crescimento, através da fotossíntese, e será mantido até o final da sua vida. Quando a madeira for queimada ou degradada ela irá liberar o mesmo carbono estocado. A partir disso, foi descontado o carbono emitido pela biomassa contabilizando somente o CO₂ emitido pelas energias não-renováveis.

O dado adquirido para o OSB foi similar ao obtido pelo banco de dados ICE (*Inventory of Carbon and Energy*) (HAMMOND; JONES, 2011), apresentando energia embutida em 15,00 MJ/kg; 0,42 kgCO₂ para combustíveis fósseis e 0,54 kgCO₂ nos combustíveis renováveis. Para madeira serrada o valor encontrado foi equivalente ao adotado por Monich (2012), 3,50 MJ/kg e 0,07 kgCO₂.

3 MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa é a realização de um estudo planejado, no qual o método de abordagem do problema caracteriza o aspecto científico. Existem diferentes tipos de pesquisa, além do núcleo comum de procedimento, cada uma possui sua própria peculiaridade (PRODANOV; FREITAS, 2013).

A partir disso, esta pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza aplicada, sua abordagem quantitativa, e quanto ao seu procedimento pode ser considerado uma pesquisa experimental.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos realizados para alcançar o objetivo proposto neste estudo: desenvolver a Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de CO₂, ainda na fase de projeto, durante as etapas pré-operacional, operacional e pós-operacional, com o auxílio da ferramenta BIM para quantificação, modelagem e simulação termo energética. Para a aplicação desse método foi selecionado um modelo de habitação que utiliza o sistema construtivo *wood frame*.

Neste estudo durante a etapa pré-operacional foram contabilizadas a Energia Embutida (EE) nos materiais de construção, transporte, desperdício ocasionados na obra e o transporte desses, além da energia gasta pelos equipamentos na obra e na fábrica. Na etapa operacional foi quantificada a energia gasta durante a operação do edifício, como o uso dos equipamentos, e a energia gasta para a produção de novos materiais para a manutenção da edificação. Já para a etapa pós-operacional a energia utilizada pelos equipamentos para desconstruir a habitação e o transporte desses materiais até o aterro ou centros de reciclagem. O CO₂ embutido é contabilizado através da discriminação das fontes energéticas primárias e seus respectivos fatores durante cada etapa do ciclo de vida.

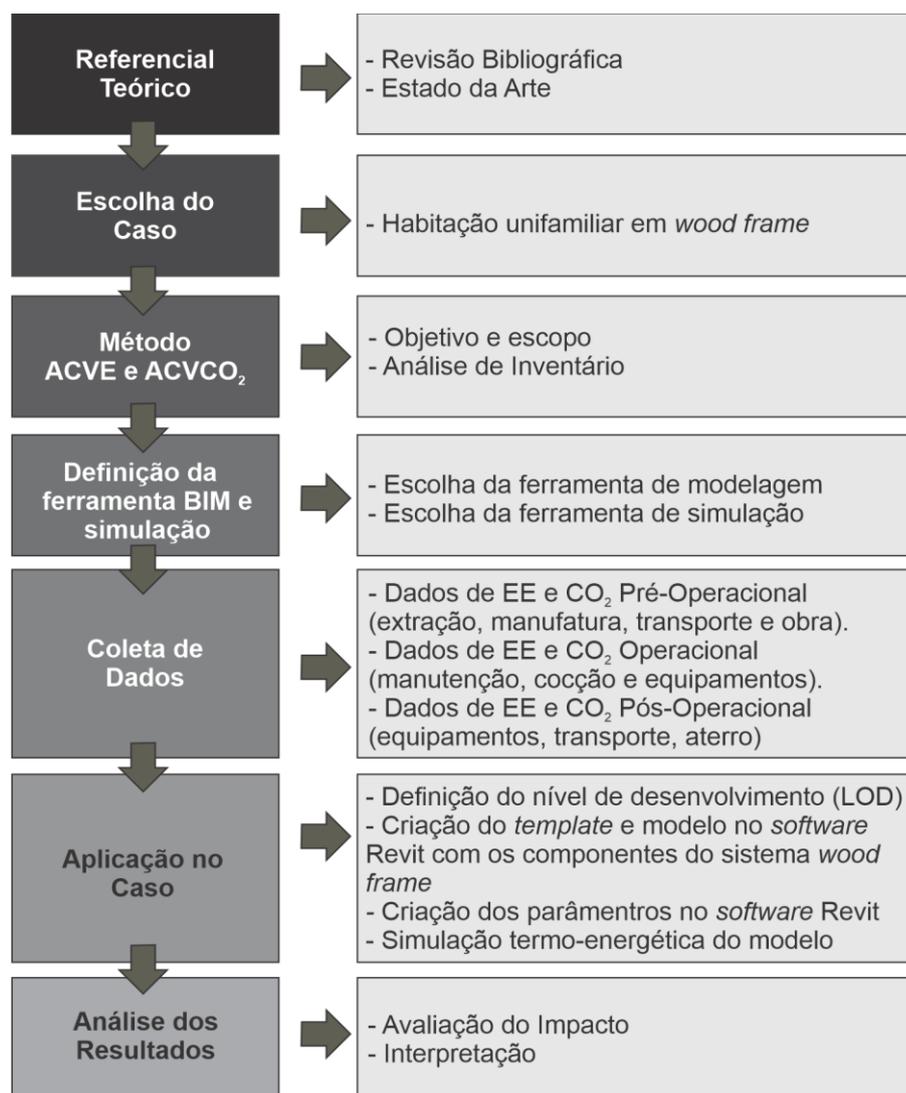
A ferramenta aplicada para a modelagem da habitação auxiliará na quantificação dos materiais e cálculo da etapa pré-operacional, manutenção e pós-operacional. Já a ferramenta de simulação, quantificará a energia gasta pelos equipamentos e avaliar o conforto térmico da edificação.

Foram considerados para o cálculo energético e de CO₂ apenas os materiais contidos na fundação, piso, parede e estrutura; desconsiderando louças, mobiliários, equipamentos, ferragens, instalações elétricas e hidrossanitárias. Na etapa operacional e nas demais etapas, para cálculo do transporte, é necessário

determinar a localização do projeto. Neste caso, este estudo selecionou a cidade de Curitiba-PR.

A partir disso, a estrutura proposta para este estudo foi dividida em 7 etapas, conforme apresentada na FIGURA 13.

FIGURA 13 - ESTRUTURA DA PESQUISA



FONTE: A autora (2019).

3.1 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão de literatura abrange as informações básicas sobre a pesquisa, seu contexto e perspectiva, por que está ocorrendo, as questões que estão sendo investigadas e as leituras relevantes sobre o problema (ROBSON, 2002). Na primeira etapa da pesquisa foi realizado o levantamento bibliográfico com o objetivo de contextualizar os tópicos deste trabalho, descrevendo as principais

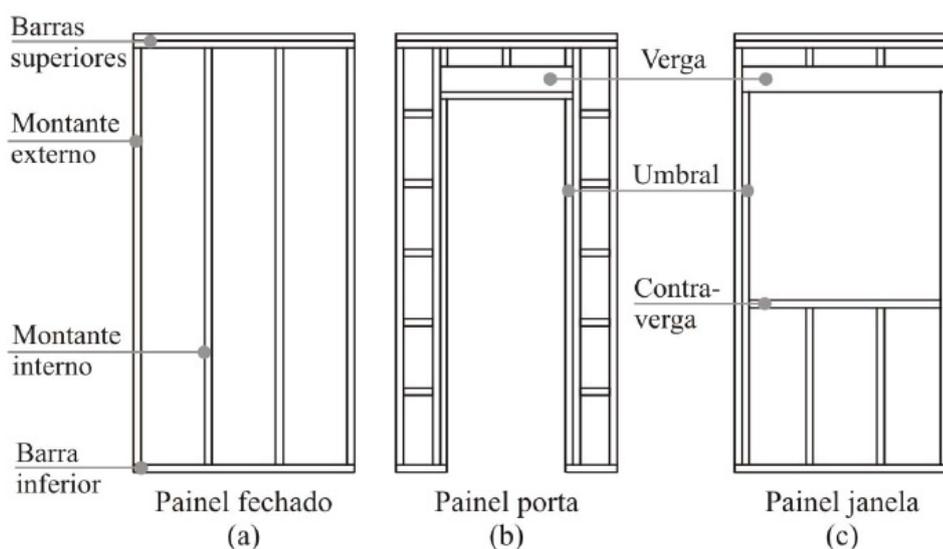
características, benefícios e limitações. Foram utilizados livros, manuais, guias, normas, artigos, dissertações e teses para o desenvolvimento desta fase inicial.

3.2 ESCOLHA DO CASO

O estudo de caso selecionado foi uma mescla da proposta desenvolvida por Espíndola (2010) com as técnicas descritas pela Datec nº020-C (PBQP-H, 2018a) em vigor.

A dissertação elaborada por Espíndola (2010) propôs três painéis verticais coordenados fechados, porta e janela com vãos modulares que variam de: 60x280 cm, 120x280 cm e 240x280 cm, demonstrando a possibilidade de flexibilidade espacial, FIGURA 14.

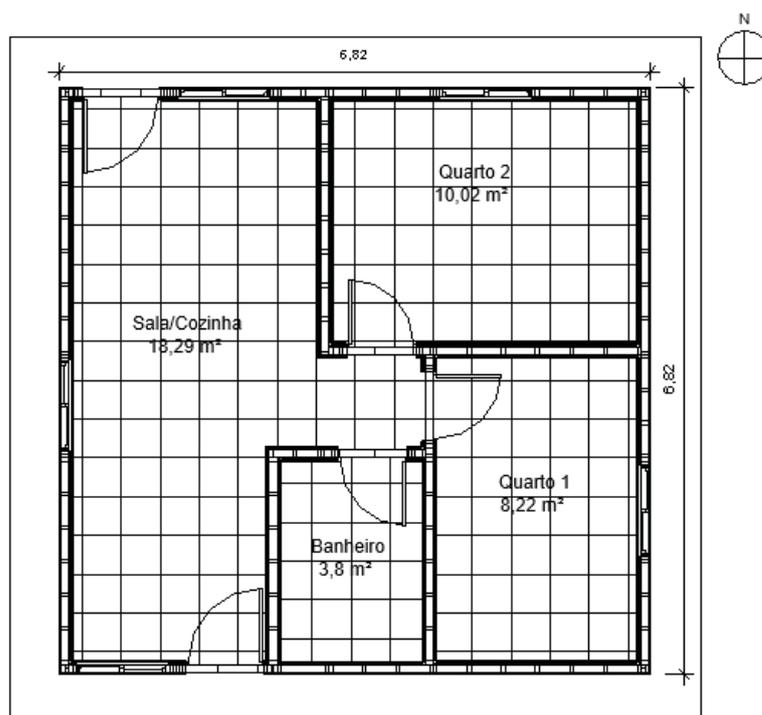
FIGURA 14 - TIPOS DE PAINÉIS BÁSICOS E SEUS COMPONENTES



FONTE: Espíndola (2010).

A habitação de interesse social (HIS) criada foi feita para uma família de 4 pessoas com renda máxima de 3 salários mínimos, composta por dois quartos, banheiro, sala e cozinha, totalizando 46,50m². A orientação da habitação foi posicionada conforme apresentada na FIGURA 15.

FIGURA 15 - HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL EM WOOD FRAME

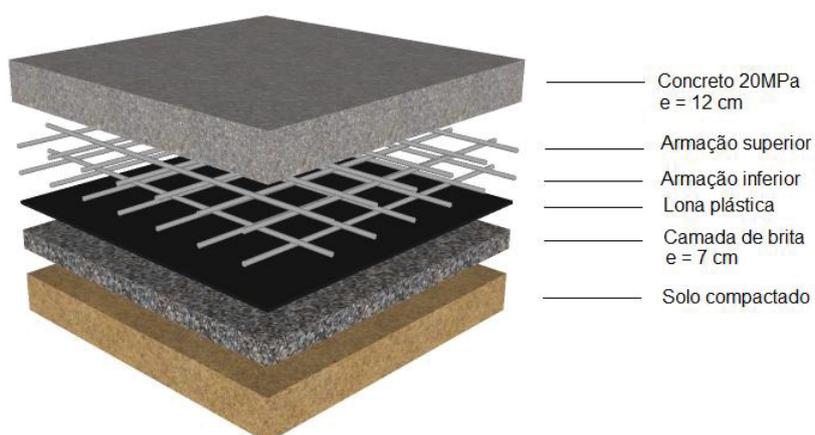


FONTE: A autora (2019), adaptado de Espíndola (2010).

Foi adotado o sistema *radier*, considerando que o terreno do local é plano e bom para a execução da fundação. Este se caracteriza por uma laje maciça com 12 cm de altura que também servirá como piso para o pavimento térreo da construção (TECVERDE, 2016).

Além disso, receberá uma camada de brita, logo acima lona plástica. Em seguida será colocada uma tela de armadura superior e inferior, finalizando com concreto, FIGURA 16.

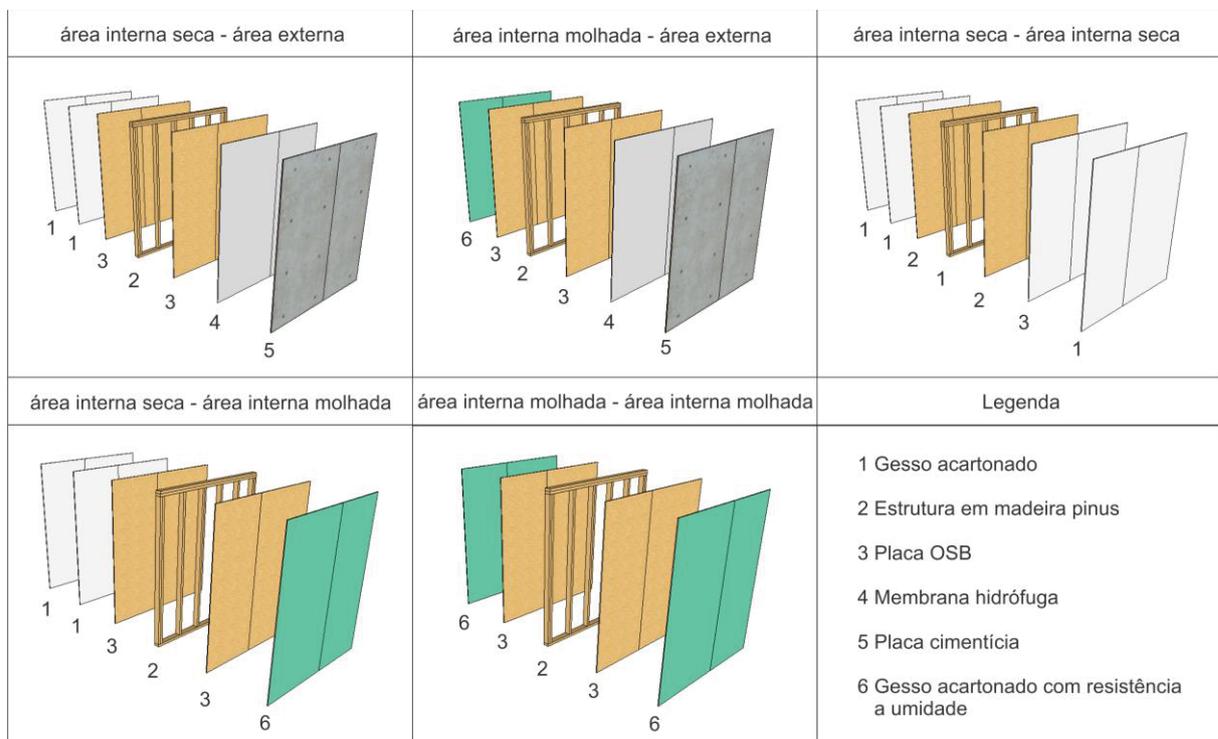
FIGURA 16 - COMPONENTES DA FUNDAÇÃO



FONTE: A autora (2019).

Para as paredes as ossaturas e travessas dos painéis foram constituídas por montantes com sessão 4x9 cm e espaçamento de 40 cm, conforme proposto por Espíndola (2010). O fechamento escolhido foi composto respectivamente por: (1) gesso acartonado com acabamento em pintura e/ou cerâmica, (2) estrutura em pinus tratamento com CCA, (3) OSB, (4) membrana hidrófuga e (5) placa cimentícia com acabamento. Em áreas molhadas foram consideradas (6) placas de gesso acartonado com resistência a umidade para maior durabilidade, conforme previsto na Datec 020-C (PBQP-H, 2018a). A FIGURA 17 apresenta os tipos de composições de parede de acordo com o ambiente.

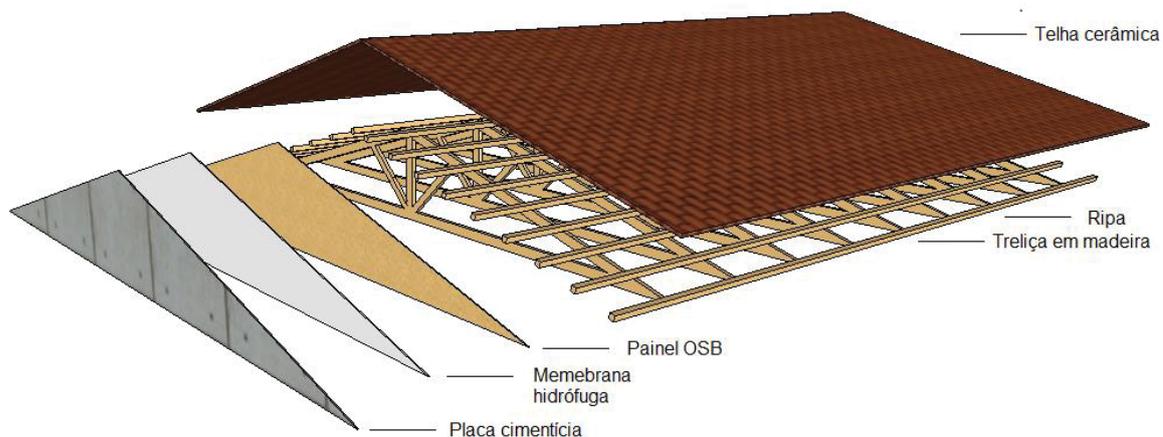
FIGURA 17 - COMPONENTES DA PAREDE



FONTE: A autora (2019), com base no PBQP-H (2018a).

A cobertura foi composta por treliças pré-fabricadas com 4x9 cm em madeira pinus, vedadas com telha cerâmica sobre ripas e com beiral de 60 cm. As treliças do oitão foram vedadas com placas OSB, membrana hidrófuga e placa cimentícia, FIGURA 18. Para dar acabamento foi previsto tabeira em madeira maciça contornando toda a cobertura e forro em PVC, conforme detalhado na Datec 020-C (PBQP-H, 2018a). Foram considerados sobre os cômodos forro em gesso e lã de vidro.

FIGURA 18 - COMPONENTES DA COBERTURA



F

FONTE: A autora (2019).

Para simular as distâncias de transporte dos materiais para a obra e posteriormente no fim da vida, em relação ao aterro, foi adotado como localização do edifício o centro politécnico da UFPR, no bairro Jardim das Américas, Curitiba-PR, nas coordenadas geográficas de latitude: $-25,45^\circ$ e de longitude: $-49,23^\circ$, FIGURA 19.

FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA HABITAÇÃO UNIFAMILAR



FONTE: Google Maps (2018).

3.3 MÉTODO ACV

Nesta etapa foi definido o objetivo, escopo, e a análise do inventário que conduzirá a Avaliação do Ciclo de Vida na pesquisa. Foi prevista a quantificação da EE e as emissões de CO_2 geradas pela habitação em *wood frame*. Estipulou-se vida útil de 50 anos para a edificação, tomando como exemplo os estudos desenvolvidos por Tavares (2006), Peng *et al.* (2016), Najjar *et al.* (2017) e Yang *et al.* (2018).

O escopo definido envolve a fase: pré-operacional, operacional e pós-operacional, com as etapas de cada fase descrita no QUADRO 4.

QUADRO 4 - DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

FASE	ETAPA	SIGLA (<i>Input</i>)	DESCRIÇÃO	SIGLA (<i>output</i>)
Pré-Operacional	1	EE _{mat.}	Extração, fabricação e transporte dos insumos	CO ₂ _{mat.}
			Fabricação dos materiais de construção	
	2	EE _{transp.}	Transporte dos materiais de construção para a fábrica e obra	CO ₂ _{transp.}
	3	EE _{obra}	Energia consumida pelos equipamentos na fábrica e na obra	CO ₂ _{obra}
	4	EE _{desp.}	Desperdício de materiais	CO ₂ _{desp.}
	5	EE _{transp.desp.}	Transporte do desperdício	CO ₂ _{transp.desp.}
Operacional	6	EE _{manut.}	Reposição de materiais	CO ₂ _{manut}
	7	EE _{equip.}	Energia consumida por equipamentos eletrodomésticos e iluminação	CO ₂ _{equip.}
	8	EE _{cocção}	Energia para cocção de alimentos	CO ₂ _{cocção}
Pós-Operacional	9	EE _{desconst.}	Energia gasta pelos equipamentos para desconstruir a habitação	CO ₂ _{descont.}
	10	EE _{transp.resid.}	Transporte dos resíduos	CO ₂ _{transp.resid.}
	11	EE _{depos.}	Deposição dos resíduos no aterro	CO ₂ _{depos.}

FONTE: A autora (2019).

A análise de inventário inclui o *input*, as fontes energéticas utilizadas para a produção de cada material, transporte, uso de maquinários, a energia consumida na operação e para desconstrução. E no *output* foram contabilizadas as emissões de CO₂ liberadas durante o processo a partir dos gastos energéticos do *input*.

A unidade adotada para energia foi em Mega Joule por kilo de material (MJ/kg), e para as emissões CO₂ foi em kilo de CO₂ por kilo de material (kgCO₂/kg).

3.4 ESCOLHA DO SOFTWARE BIM E SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA

Para este estudo foi selecionado o software *Revit* 2018 para a modelagem da habitação e desenvolvimento da ACVE e ACVCO₂ nas etapas Pré-operacional, Operacional (somente manutenção) e a Pós-Operacional. Desenvolvida pela *Autodesk*, com licença gratuita para fins educacionais, permite o desenvolvimento de projetos de arquitetura, estruturais e complementares, além de uma biblioteca existente com objetos paramétricos. Possui uma interface amigável que facilita no desenvolvimento da modelagem da edificação. Possibilita a exportação do modelo criado por meio do formato gbXML (*green building XML*), permitindo a troca de informações com os *softwares* de simulação energética.

Para análise termo energética durante a etapa operacional foi selecionada a ferramenta *OpenStudio* 2.7.0 por dispor de uma interface amigável e ser integrado ao *EnergyPlus*, simulador recomendado pelo PROCEL (Programa Brasileiro de Eficiência Energética das Edificações) e pela norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013).

O *OpenStudio* é um programa gratuito desenvolvido pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) em parceria com outras instituições. A ideia inicial era criar um software que pudesse estimular o desenvolvimento de aplicativos baseados na modelagem energética do edifício (*Building Energy Modeling*) e que suportasse diversos participantes do ambiente construído. A partir disso, o *OpenStudio* suporta os aplicativos *EnergyPlus* e o *Radiance*, além de permitir que empresas desenvolvam e vendam seus aplicativos através da linguagem de programação *Ruby*. Os scripts estruturados por esta linguagem e inseridos no *OpenStudio* são chamados de *Measures*. Estes são recursos exclusivos e fundamentais para a extensão da plataforma. São utilizadas com mais frequência para aplicar uma tecnologia de eficiência energética a um modelo de construção, assim como os dados associados (BRACKNEY et al., 2018).

Para visualizar o modelo exportado do *Revit*, foi utilizado o *plug-in* do *OpenStudio* dentro da ferramenta *Sketchup*. Este *plug-in* permite a importação de arquivos no formato *gbXML* diretamente, sem a necessidade de passar por outras ferramentas, possibilitando ajustes no modelo. Posteriormente, essas informações serão salvas no formato de entrada do *OpenStudio* (*.OSM*) para simulação. A FIGURA 20 apresenta o processo adotado para obter a interoperabilidade entre as ferramentas *Revit* e *OpenStudio*.

FIGURA 20 – PROCESSO ADOTADO PARA ALCANÇAR A INTEROPERABILIDADE ENTRE AS FERRAMENTAS *REVIT* E *OPENSTUDIO*



FONTE: A autora (2019).

3.5 COLETA DE DADOS

3.5.1 Fase pré-operacional

Será considerada a energia e o CO₂ embutido nos materiais, desperdícios, nos transportes dos materiais, transporte do desperdício, na construção da habitação.

3.5.1.1 Índices de Energia Embutida e CO₂ nos materiais

A TABELA 8 apresenta os materiais utilizados no estudo de caso, divididos por subsistema, com os índices de EE, CO₂, densidade e taxa de desperdício.

TABELA 8 - DADOS DA DENSIDADE, ENERGIA EMBUTIDA DOS MATERIAIS E DESPERDÍCIO

Subsistema	Material	EE (MJ/kg) ¹	CO ₂ (kgCO ₂ /kg) ¹	Densidade (kg/m ³) ²	Desperdício (%) ³
Fundação	Aço	35,00	2,73	7850	10
	Concreto	1,20	0,12	2300	10
	Lona plástica	80,00	5,02	910	-
	Brita	1,50	0,10	1650	40
Piso	Concreto	1,20	0,12	2300	10
	Impermeabilizante	90,00	5,50	1350	15
	Revestimento cerâmico 45x45	3,00	0,29	2000	19
	Argamassa	2,10	0,34	1860	30
Parede	Madeira maciça Pinus	3,97	0,11	550	10,6
	Gesso acartonado	6,75	0,38	800	10
	Placa de OSB	14,32	0,20	600	7
	Membrana hidrófuga	99,20	2,97	910	1
	Placa cimentícia	10,40	1,09	850	10
	Revestimento cerâmico 20x20 cm	3,00	0,29	2000	19
	Tinta PVA	65,00	3,57	1300	15
Tinta acrílica	61,00	3,57	1300	15	
Cobertura	Lã de vidro	28,00	1,35	20	0
	Forro em PVC (externo)	77,20	2,61	1300	10
	Treliça em madeira pinus	3,97	0,11	550	15
	Ripas e tabeira em madeira	2,00	0,11	830	15
	Forro em gesso (interno)	6,75	0,38	800	10
	Telhas cerâmicas	5,40	0,17	1900	10
Esquadrias	Porta em madeira cedro	2,00	0,11	440	15
	Batente em madeira	2,00	0,11	440	15
	Vidro	18,50	2,58	2500	5
	Janela em madeira cedro	2,00	0,11	440	15

¹ Dados de EE Tavares (2006); Tavares e Bragança (2016), Hammond e Jones (2011).

² Dados da densidade retirados de Tavares (2006), para o Pinus TECVERDE (2016), para as demais madeiras IPT (2018), para a membrana hidrófuga Plastics Europe Eco (2013), para a placa cimentícia Knauf (2015).

³ Estimativa de desperdício com base na TCPO 13 (2010), Tavares (2006), Souza (2013).

Os índices de energia e CO₂ dos principais produtos empregados nas habitações brasileiras como, argamassa, brita, concreto, impermeabilizantes, plásticos, revestimento cerâmico, telha cerâmica, tintas e vidro foram considerados a partir do estudo realizado por Tavares (2006) e Tavares e Bragança (2016).

Alguns dos materiais não foram encontrados em estudos brasileiros, neste caso o banco de dados ICE (HAMMOND; JONES, 2011) foi utilizado para estimar os quantitativos da placa cimentícia, lã de vidro, placa de gesso, forro PVC e a membrana hidrófuga. O ICE é um banco de dados de energia e carbono para materiais de construção, gratuito, e desenvolvido pela Universidade de Bath.

Uma limitação foi encontrar valores estimados para a membrana hidrófuga. A EPD disponibilizada por um fabricante internacional não constava o consumo energético discriminado por fontes primárias, impossibilitando o cálculo do CO₂. Por este motivo foram usados os dados do ICE, para o material polipropileno, já que a membrana é composta principalmente por fibras de polipropileno (LP Brasil, 2010).

Para os materiais de base em madeira como o OSB e madeira serrada aplainada de pinus, os valores obtidos foram com base nos estudos desenvolvidos por Ferro *et al.* (2018), Garcia (2014), *Plastics Europe* (2011), Souza (2013) e USLCI (NREL, 2018), conforme explicado na conclusão do estado da arte. Além disso, considerou-se o carbono neutro.

3.5.1.2 Índices de Energia Embutida e CO₂ no transporte

A construção da edificação em *wood frame* é realizada em etapas, sendo a primeira parte na fábrica destinada a montagem da estrutura e fechamento parcial das paredes. Depois de montados, são levados para o local da construção onde são executados os demais subsistemas como fundação, o restante do fechamento das paredes, colocação de esquadrias, revestimento e cobertura.

Nesta etapa foi contabilizado o transporte de alguns dos materiais utilizados na montagem dos painéis (madeira serrada aplainada, painel OSB e membrana hidrófuga) da indústria até a fábrica onde serão montados os painéis. Posteriormente foi contabilizado o transporte dos painéis e dos demais materiais para a obra.

Para simular as distâncias entre as fábricas até o canteiro de obra, adotou-se como critério de seleção as empresas que fazem parte do Programa Setorial de

Qualidade (PSQ) desenvolvido pelo PBQP-H (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat).

Por meio deste programa, os fabricantes de produtos para a construção civil ampliam práticas que visam o desenvolvimento tecnológico do setor aumentando os padrões de produtividade, níveis de conformidade do produto e redução de custos sem prejuízos na qualidade (PBQP-H, 2018b). Além disso, o uso do PSQ também auxiliou na limitação de quantidades de fábricas no país, tornando possível a escolha de fabricantes mais próximos do local da obra.

Porém, o PSQ só conta com alguns produtos da construção. Os fabricantes da madeira serrada, OSB e membrana hidrófuga foram com base nas empresas apontadas no estudo desenvolvido por Espíndola (2017). Para o vidro, esquadrias em madeira e madeiramento da cobertura, as fábricas escolhidas tiveram como critério a proximidade com o local da obra.

A TABELA 9 apresenta as distâncias em km da empresa que fabrica os materiais utilizados no frame estrutural, para o local onde serão montados os painéis do sistema.

TABELA 9 – DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FÁBRICA - FÁBRICA WOOD FRAME)

Materiais e Componente	Localização da Fábrica (latitude e longitude)	Localização da fábrica para montagens dos painéis (latitude e longitude)	Distância (km)
Madeira maciça Pinus	Ponta Grossa – PR (-25.170406, -50.100976)	Araucária – PR (-25.5664394, -49.4102812)	94,2
Placa de OSB	Ponta Grossa – PR (-25.1847885, -50.100765)		93,9
Membrana hidrófuga	Ponta Grossa – PR (-25.1847885, -50.100765)		93,9

Fonte: Google maps (2019).

A TABELA 10 apresenta as distâncias dos demais materiais da fábrica para o canteiro de obras, assim como a distância dos painéis prontos da fábrica *wood frame* para o canteiro.

TABELA 10 – DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FABRICA – CANTEIRO DE OBRAS)

Materiais e Componente	Localização da Fábrica (latitude e longitude)	Localização do canteiro de obras (latitude e longitude)	Distância (km)
Aço	Araçariguama – SP (-23.4374806, -47.0897694)	Centro Politécnico UFPR Curitiba – PR (-25.451311, -49.2343166)	424
Concreto	Rio Branco do Sul – PR (-25.1962421, -49.3202953) + Curitiba – PR (-25.4820226, -49.2617101)		67,3
Lona plástica	Curitiba – PR (-25.462769, -49.361175)		19,1
Brita	Rio Branco do Sul – PR (-25.1962421, -49.3202953)		32,5
Impermeabilizante	Cambé – PR (-23.2841752, -51.2415201)		397
Revestimento cerâmico	Campo Largo – PR (-25.4567887, -49.5158318)		28,8
Argamassa	Rio Branco do Sul – PR (-25.1962421, -49.3202953)		32,5
Frame estrutural + membrana	Araucária – PR (-25.5664394, -49.4102812)		31,3
Gesso acartonado	Queimados – RJ (-22.7328069, -43.6343854)		783
Placa cimentícia	Queimados – RJ (-22.7328069, -43.6343854)		783
Tintas	São José dos Pinhais – PR (-25.5224075, -49.159811)		14,5
Treliça em madeira pinus	Ponta Grossa – PR (-25.170406, -50.100976)		111
Ripas e tabeira em madeira Angelim	Alta Floresta – MT (-9.9148339, -56.0252546)		2490
Forro em gesso acartonado	Queimados – RJ (-22.7328069, -43.6343854)		783
Lã de vidro	São Paulo – SP (-23.6572824, -46.7029479)		397
Forro PVC	São José dos Pinhais (-25.4940788, -49.1610074)		10,6
Telhas cerâmicas	Sangão – SC (-28.662159, -49.113148)		443
Esquadrias em madeira	União da Vitória – PR (-26.1967924, -51.0944315)		233
Vidro	Barra Velha – SC (-26.6349894, -48.7041819)		171

Fonte: Google maps (2019).

¹ Distância da cimenteira até a fabricação do concreto usinado, e desta para o canteiro de obras

Para o consumo energético na etapa de transporte dos materiais até o canteiro de obras, foi considerado o levantamento desenvolvido por Tavares (2006), que obteve uma relação de 1,62 MJ/ton/km ou 0,00162 MJ/kg/km. Para o transporte do desperdício foi considerada a mesma relação, contabilizando a distância da fábrica até o canteiro de obras e, posteriormente, do canteiro de obra até o local de

deposição. As distâncias do local de deposição dos materiais estão definidas na etapa pós-operacional.

O combustível fóssil considerado para a etapa de transporte foi o óleo diesel. A partir disso, a estimativa de emissões de CO₂ para esta etapa deu-se através da tabela desenvolvida por Tavares e Bragança (2016) com base no IPCC (2006), o qual considerou que o óleo diesel gera 74,1 kg/GJ (quilogramas de CO₂ por Giga Joule de energia utilizada) ou 0.0741 kg/MJ.

3.5.1.3 Índices de Energia Embutida e CO₂ na fábrica e na obra

A etapa de construção do sistema *wood frame* depende do nível de industrialização da empresa. No Brasil, como já citado, o processo construtivo é produzido de três maneiras: produção e montagem no canteiro, painéis abertos produzido na fábrica, painéis fechados produzidos na fábrica.

Como não houve a possibilidade de mensurar uma situação de implantação real, com o tempo e energia gasta para a execução de cada processo, para obter uma estimativa nesta etapa, foram utilizados os quantitativos na pesquisa desenvolvida por Souza (2013).

Em seu estudo o levantamento fez-se através de entrevistas e acompanhamento do consumo de energia em empresas que utilizam o método artesanal, onde tudo é fabricado no canteiro, e semi-industrializado, painéis abertos produzidos na fábrica. Diante disso, foi contabilizada a energia gasta para a execução de cada subsistema, fundação, piso, paredes e cobertura, a partir da média entre as duas empresas. Os resultados obtidos com base na média foi de 196,12 MJ/m² e para CO₂ foi considerado o fator de energia elétrica fornecido por Tavares e Bragança (2016), 0,0422 kg/MJ, obtendo aproximadamente 8,28 kgCO₂/m². Considerando que a habitação utilizada no presente estudo é de 46,50 m², o gasto energético obtido foi de 9.119,58 MJ e 385,02 kgCO₂ para a fabricação dos painéis e obra.

3.5.2 Fase operacional

Nesta etapa contabilizou-se a energia e as emissões de CO₂ da habitação unifamiliar no período de 50 anos, referente ao consumo de energia para o funcionamento dos aparelhos eletrônicos, cocção de alimentos, e também a energia

gasta para a produção de novos materiais que serão utilizados para a manutenção da edificação.

3.5.2.1 Energia Operacional

Para quantificação desta etapa utilizou-se a simulação termo energética no software *OpenStudio*, conforme citado anteriormente. Abaixo estão descritos os dados de entrada necessários para realização da simulação.

3.5.2.1.1 Dados climáticos

Como mencionado anteriormente, a localização escolhida para a simulação do estudo teve como referência a cidade de Curitiba-PR. Os dados climáticos para esta região foram fornecidos pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (UFSC, 2018). O arquivo adotado, *TRY (Test Reference Year)*, representa um ano de dados médios para o local sem extremos de temperatura, além de abranger variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, nebulosidade pressão barométrica e radiação solar (SCHELLER et al., 2015).

3.5.2.1.2 Padrão de ocupação e iluminação em locais de permanência prolongada

Segundo a RTQ-R elaborada pelo PBE Edifica (2014), o padrão mínimo de ocupação dos dormitórios deve ser de duas pessoas por ambiente e a sala deve ser utilizada por todos os usuários dos dormitórios. Ainda, deve ser modelado um padrão de ocupação para os dias de semana e outro para os finais de semana. Essa ocupação é representada pela porcentagem das pessoas disponíveis no horário. A TABELA 11 descreve o padrão de ocupação e de iluminação.

TABELA 11 - PADRÃO DE OCUPAÇÃO E DE ILUMINAÇÃO

continuação

Hora	Padrão de Ocupação				Padrão de Iluminação			
	Dormitórios		Sala		Dormitórios		Sala	
	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1h	100	100	0	0	0	0	0	0
2h	100	100	0	0	0	0	0	0
3h	100	100	0	0	0	0	0	0
4h	100	100	0	0	0	0	0	0
5h	100	100	0	0	0	0	0	0
6h	100	100	0	0	0	0	0	0
7h	100	100	0	0	100	0	0	0

conclusão

Hora	Padrão de Ocupação				Padrão de Iluminação			
	Dormitórios		Sala		Dormitórios		Sala	
	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana	Dia de semana	Final de semana
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
8h	0	100	0	0	0	0	0	0
9h	0	100	0	0	0	100	0	0
10h	0	50	0	0	0	0	0	0
11h	0	0	0	25	0	0	0	100
12h	0	0	0	75	0	0	0	100
13h	0	0	0	0	0	0	0	0
14h	0	0	25	75	0	0	0	0
15h	0	0	25	50	0	0	0	0
16h	0	0	25	50	0	0	0	0
17h	0	0	25	50	0	0	100	100
18h	0	0	25	25	0	0	100	100
19h	0	0	100	25	0	0	100	100
20h	0	0	50	50	0	0	100	100
21h	50	50	50	50	100	100	100	100
22h	100	100	0	0	100	100	0	0
23h	100	100	0	0	0	0	0	0
24h	100	100	0	0	0	0	0	0

Fonte: PBE Edifica (2014).

As taxas metabólicas para cada atividade desempenhada no ambiente foram baseadas na ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2009), sendo considerada para a sala (sentado ou assistindo TV) 108W e nos dormitórios (dormindo ou descansando) 81W.

Para o padrão de uso da iluminação a modelagem deve ser realizada em ambientes de permanência prolongada, considerando um para os dias de semana e outro para os finais de semana. As densidades da potência instalada de iluminação para o dormitório será de 5,0 W/m² e para a sala 6,0 W/m².

3.5.2.1.3 Consumo dos equipamentos

A TABELA 12 apresenta os equipamentos selecionados neste estudo com a estimativa do consumo médio elétrico estabelecido pelo PROCEL.

TABELA 12 - DADOS DO CONSUMO MÉDIO DE CADA EQUIPAMENTO

Equipamento Eletrônico	Nº de equipamentos	Potência (W)	Dias estimados uso/mês	Média Utilização/dia (horas)
Chuveiro elétrico	1	4500	30	0,53
Computador	1	63	30	8
Geladeira	1	55	30	24
Lavadora de roupa	1	147	12	1
Telefone sem fio	1	3	30	24
Televisão	2	83	30	5
Fogão (cocção)	1	66,7*	30	1

Fonte: PROCEL (2018); *ARAÚJO (2018).

O critério para a escolha de grande parte dos equipamentos foi feito através da Pesquisa Nacional por amostra de domicílios (PNAD) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ano base de 2017, onde foram selecionados os equipamentos que apresentaram participação nas habitações do estado do Paraná superior a 50%, entre eles: telefone celular, geladeira, máquina de lavar roupa, televisão e computador. Considerando, entretanto, o consumo para cocção e chuveiro elétrico.

Para o dado de cocção, adotou-se o valor estipulado por Araújo (2018) através do cruzamento de dados fornecidos pelo estudo Demanda de Energia 2050 elaborada pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em 2016. A unidade do fogão a gás foi convertida para kWh, e posteriormente, adaptada para potência em *Watt*, pois o *Energyplus*, assim como o *OpenStudio* solicitam este formato de entrada para equipamentos a gás.

3.5.2.1.4 Dados dos materiais

Os dados dos materiais como densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico para os principais componentes do *wood frame*, tiveram base nos valores referenciados pela Datec nº020-C (PBQP-H, 2018a). Para os demais materiais como concreto e vidro, os valores foram retirados da NBR 15220 (ABNT, 2003), TABELA 13.

TABELA 13 - PROPRIEDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS

Material	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/(m.K))	Calor específico (kJ/(kg.K))	Resistência térmica (m ² .K/W)
Telha cerâmica ¹	2000	1,05	0,92	-
Placa cimentícia ¹	1700	0,35	1,00	-
Argamassa ²	1950	1,15	1,00	-
Concreto ²	2300	1,75	1,00	-
Placa de gesso ¹	750	0,35	0,84	-
Placa OSB ¹	681	0,17	2,30	-
Revestimento cerâmico ¹	1600	0,90	0,92	-
Vidro ²	2500	1,00	0,84	-
Lã de vidro ¹	10,35	0,045	0,70	-
Camada de ar (cobertura) ²	-	-	-	0,21
Camada de ar (paredes) ²	-	-	-	0,17

Fonte: PBQP-H (2018a)¹, ABNT (2003)².

No espaço preenchido pelo quadro estrutural em madeira, assim como entre a telha cerâmica e o forro, foi considerada camada de ar e previsto lã de vidro na cobertura conforme Datec 020-C (PBQP-H, 2018a).

3.5.2.1.5 Zona bioclimática

Segundo a NBR 15220-1 (2003) Curitiba está localizada na Zona Bioclimática 1, dentre as 8 existentes no Brasil. A norma aponta algumas estratégias de condicionamento térmico para a cidade como: vedação externa leve e cobertura leve isolada, paredes internas pesadas para manter o interior aquecido, permitir a entrada de sol durante os dias mais frios, aberturas para ventilação média para desumidificação dos ambientes. O uso de aquecimento artificial será necessário em eventuais dias, para amenizar o desconforto térmico causado pelo frio.

A habitação escolhida para análise possui abertura em todos os cômodos estando de acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), que estabelece a área mínima de ventilação em dormitórios, sala e cozinha, nas Zonas de 1 a 7, deve ser maior ou igual a 7% da área de piso. As paredes externas são dotadas de materiais leves, conforme apontado pela norma, porém nas internas são solicitados materiais mais pesados. Também estipula que a transmitância térmica para as paredes externas nas zonas 1 e 2 devem ser $\leq 2.5 \text{ W/m}^2.\text{K}$, e para a cobertura $\leq 2.3 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

Conforme estabelecido por Givoni, através da carta bioclimática para países em desenvolvimento, o organismo humano pode estar em conforto mesmo com a umidade relativa (entre 20% e 80%) e em temperaturas (entre 18°C e 29°C) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Porém algumas soluções passivas como aquecimento solar ou ventilação, podem minimizar o desconforto quando a temperatura e a umidade estiverem abaixo ou acima desses valores estabelecidos. Em regiões onde o clima ultrapasse os limites de temperatura e umidade relativa, recomendam-se condicionadores de ar para climatização.

Segundo o EPE (2018) o uso de aparelhos de ar condicionado ainda é baixo no setor residencial brasileiro representando 0,40 equipamentos por residência, e está associado ao potencial do crescimento da renda. Por esse motivo, este estudo não simulou o consumo do uso deste equipamento, mas sim o uso da ventilação natural, visto que a edificação se trata de uma habitação de interesse social (HIS).

3.5.2.2 Energia de Manutenção

Ao longo da vida útil da edificação os materiais de construção precisam ser substituídos devido às condições de uso, degradação natural, entre outros. Nesta etapa, a energia e o CO₂ embutidos na manutenção são o total da energia gasta para a produção de novos materiais e o transporte dos mesmos ao longo de 50 anos.

Estes valores foram estimados através do cálculo do Fator de Reposição (FR), método adotado por Tavares (2006). O FR foi calculado pela divisão da vida útil da edificação (50 anos), pelo tempo de Vida Útil de Projeto (VUP). Os valores da VUP são de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) que estabelece um tempo mínimo o qual os fabricantes devem atender para a manutenção dos componentes. A TABELA 14 apresenta os valores da VUP e do FR.

TABELA 14 – VIDA ÚTIL DE PROJETO (VUP) E FATOR DE REPOSIÇÃO (FR) DOS COMPONENTES DA HABITAÇÃO

Materiais ou componentes	VUP (anos)*	FR
Estrutura principal	75	1,00
Vedação externa	60	1,00
Vedação interna	30	1,67
Estrutura da cobertura	30	1,67
Telhamento	20	2,50
Revestimento (piso, parede e teto)	20	2,50
Pintura interna	4	12,50
Pintura externa	12	4,17
Impermeabilização	20	2,50
Esquadrias	30	1,67
Revestimento externo	30	1,67
Piso externo	20	2,50

Fonte: ABNT (2013).

3.5.3 Fase pós-operacional

Esta etapa inclui a EE e o CO₂ no uso dos equipamentos para a desconstrução da habitação, o transporte dos materiais até o local de reciclagem ou aterro, e o processamento dos resíduos que forem destinados ao aterro.

3.5.3.1 Índices de Energia Embutida e CO₂ para a desconstrução da habitação

Nesta etapa quantificou-se o consumo de energia e as emissões de CO₂ no processo de desconstrução e demolição da habitação, avaliando os equipamentos utilizados.

A desconstrução demanda mais tempo, devido a preocupação de separar os materiais possíveis de reciclagem, ao contrário da demolição. Por isso, este estudo desconstruiu as vedações verticais e cobertura da habitação; e demoliu piso e fundação.

Não houve a possibilidade de avaliar esta etapa através de uma situação de implantação real. Neste caso, foi adotado o fator de energia de desconstrução no estudo desenvolvido por Pedroso (2015) para 1m² de parede em *steel frame*. Encontrado os valores de 0,0111 MJ/kg para a desconstrução da vedação vertical do *wood frame*, utilizando como equipamento a parafusadeira elétrica. O fator de geração de CO₂ para a energia elétrica seguiu o cálculo elaborado por Tavares e Bragança (2016) de 0,0422 kg/MJ, totalizando em 0,00047 kgCO₂/kg.

Para a demolição dos outros sistemas da edificação adotou-se o fator de demolição 0,0354 MJ/kg utilizado por Tavares (2006) e adaptado por Caldas (2016) pelas composições da TCPO 2012. Para esta etapa os equipamentos utilizados para a demolição são os martelos rompedores e pás-carregadeira. O fator de geração de CO₂ adotado por Caldas (2016) foi de 0,00247 kgCO₂/kg, e empregado nesta pesquisa.

3.5.3.2 Destino final dos materiais e índices de EE e CO₂ para o transporte

Para classificar os resíduos da construção civil, quanto a sua destinação, foi utilizada a Resolução CONAMA N° 307/2002, QUADRO 5.

QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

CLASSE A Resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregado	- de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, edificação, como componentes cerâmicos, argamassa e concreto, e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem. - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto ou produzidas no canteiro de obras.
CLASSE B Resíduos recicláveis para outras destinações	- tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
CLASSE C	- são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
CLASSE D Resíduos perigosos oriundos do processo de construção	- tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

FONTE: CONAMA, 2002

Foram feitos levantamentos em Declarações Ambientais de Produtos (EPDs), ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição), ABD (Associação Brasileira de Drywall) com intuito de saber para qual setor esses materiais podem ser encaminhados. O QUADRO 6 apresenta a classificação de acordo com o CONAMA, o destino do material e a distância de transporte.

QUADRO 6 – CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS CONFORME O CONAMA, DESTINO DO MATERIAL E DISTÂNCIA DO TRANSPORTE

continua

Subsistema	Materiais	Separável	Classe	Destino	Dist. (km)
Fundação	Concreto	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Aço	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Brita	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Lona plástica	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
Piso	Contrapiso	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Argamassa	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Cerâmica	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Impermeabilizante	x	D	Aterro de resíduos perigosos	23,4
Paredes	Pinus	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Placa OSB	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Membrana hidrófuga	x	C	Não são reutilizados após o uso, devem ser encaminhados para o aterro (DUPONT, 2017)	23,4
	Placa cimentícia	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Gesso acartonado	x	B	Indústria do cimento, agricultura, transformação no próprio setor (ABD, 2012)	22,9
	Tintas	x	D	Aterro de resíduos perigosos	23,4
	Argamassa	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
	Revestimento cerâmico	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9
Cobertura	Treliça (pinus)	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Ripas e tabeira (Angelim)	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Lã de vidro	x	C	Aterro de resíduos perigosos	23,4
	Forro PVC	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Forro gesso	x	B	Indústria do cimento, agricultura, transformação no próprio setor (ABD, 2012)	22,9
Cobertura	Telha cerâmica	x	A	Usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD)	22,9

conclusão

Subsistema	Materiais	Separável	Classe	Destino	Dist. (km)
Esquadrias	Portas e batentes em madeira	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Janelas	x	B	Unidades de reciclagem	22,9
	Vidros	x	B	Unidades de reciclagem	22,9

Fonte: ABD (2012), ABRECON (2018), SMMA (2015), DUPONT (2017).

A energia e o CO₂ gastos para a reciclagem dos materiais classificados como classe A e B, serão contabilizados futuramente no novo produto que utilizarão esses componentes. Já a energia e o CO₂ para a manutenção do aterro dos materiais classificados como C e D foram calculados com base nos resultados obtidos por Araújo (2018) através do estudo desenvolvido por Mendes, Aramaki e Hanaki (2004), respectivamente 2,43 MJ/kg e 0,90 kg CO₂/kg.

3.5.4 Cálculo do consumo energético e emissões de CO₂ para ACVE e ACVCO₂

Os cálculos para quantificar as etapas da ACVE e ACVCO₂, conforme o QUADRO 4, estão descritos abaixo. Em seguida, esses cálculos serão criados na ferramenta Revit.

O QUADRO 7 apresenta as fórmulas utilizadas para o cálculo de cada etapa na fase pré-operacional.

QUADRO 7 – FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE PRÉ-OPERACIONAL

Etapas	Descrição	Fórmula
1	EE e CO ₂ nos materiais	$EE_{mat.}(MJ) = EE_{materiais}(MJ/kg) * Massa(kg)^1$
		$CO_{2mat.}(kg) = CO_{2materiais}(kg/kg) * Massa(kg)^1$
2	EE e CO ₂ nos transportes	$EE_{transp.}(MJ) = EE_{transporte}(MJ/kg.km) * Massa(kg)^1 * Dist.mat(km)$
		$CO_{2transp.}(kg) = CO_{2transporte}(kg/MJ) * EE_{transp.}(MJ)$
3	EE e CO ₂ na obra	Dados retirado de Souza (2013)
4	EE e CO ₂ gerados pelo desperdício na obra	$EE_{desp.}(MJ) = EE_{mat.}(MJ) * Desperdício(%) / 100$
		$EE_{desp.}(kg) = CO_{2mat.}(kg) * Desperdício(%) / 100$
5	EE e CO ₂ gerados pelo transporte do desperdício	$EE_{transp.desp.}(MJ) = EE_{transporte}(MJ/kg.km) * Massa(kg)^1 * (Dist.mat(km) + Dist.deposição(km)) * Desperdício(%) / 100$
		$CO_{2transp.desp.}(MJ) = CO_{2transporte}(kg/MJ) * EE_{transp.desp.}(MJ)$

¹ Massa = Densidade * volume

FONTE: A autora (2019).

O QUADRO 8 apresenta as fórmulas utilizadas para o cálculo de cada etapa na fase operacional.

QUADRO 8 - FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE OPERACIONAL

Etapas	Descrição	Fórmula
6	EE e CO ₂ nos materiais utilizados para a manutenção	$EE_{manut.}(MJ) = \text{Fator de Reposição}^{-1} * (EE_{mat.}(MJ) * EE_{transp.}(MJ))$
		$CO_{2manut.}(kg) = \text{Fator de Reposição}^{-1} * (CO_{2mat.}(kg) * CO_{2transp.}(kg))$
7	EE e CO ₂ nos equipamentos	Calculados pelo <i>software OpenStudio</i>
8	EE e CO ₂ para cocção	Calculados pelo <i>software OpenStudio</i>

FONTE: A autora (2019).

O QUADRO 9 apresenta as fórmulas utilizadas para o cálculo de cada etapa na fase pós-operacional.

QUADRO 9 – FÓRMULAS PARA CÁLCULO DAS ETAPAS DA FASE PÓS-OPERACIONAL

Etapas	Descrição	Fórmula
9	EE e CO ₂ gerados no uso dos equipamentos para a demolição da habitação	$EE_{desconst.}(MJ) = EE_{desconstrução/demolição}(MJ/kg) * Massa(kg)^1$
		$CO_{2desconst.}(kg) = CO_{2desconstrução/demolição}(kg) * Massa(kg)^1$
10	EE e CO ₂ nos transporte dos resíduos para o aterro ou reciclagem	$EE_{transp.resid.}(MJ) = EE_{transporteresid.}(MJ/kg.km) * Massa(kg)^1 * Dist.depos.(km) * \text{Fator Reposição}$
		$CO_{2transp.resid.}(kg) = EE_{transp.resid.}(MJ) * CO_{2transporte}(kg/MJ)$
11	EE e CO ₂ na manutenção do aterro	$EE_{depos.}(MJ) = EE_{aterro}(MJ/kg) * Massa(kg)^1 * \text{Fator Reposição}$
		$CO_{2depos.}(kg) = CO_{2aterro}(kg) * Massa(kg)^1 * \text{Fator Reposição}$

¹ Massa = Densidade * volume

FONTE: A autora (2019).

O QUADRO 10 apresenta as fórmulas utilizadas para o cálculo dos totais de cada fase.

QUADRO 10 – FÓRMULAS PARA CÁLCULOS DAS TOTAIS PARA CADA FASE

Fases	Fórmula
Pré-Operacional	$EE_{pré-operacional}(MJ) = EE_{mat.} + EE_{transp.} + EE_{obra} + EE_{desp.} + EE_{transp.desp.}$
	$CO_{2pré-operacional}(kg) = CO_{2mat.} + CO_{2transp.} + CO_{2obra} + CO_{2desp.} + CO_{2transp.desp.}$
Operacional	$EE_{operacional}(MJ) = EE_{manut.} + EE_{equip.} + EE_{cocção}$
	$CO_{2operacional}(kg) = CO_{2manut.} + CO_{2equip.} + CO_{2cocção}$
Pós-Operacional	$EE_{pós-operacional}(MJ) = EE_{desconst.} + EE_{transp.resid.} + EE_{depos.}$
	$CO_{2pós-operacional}(kg) = CO_{2desconst.} + CO_{2transp.resid.} + CO_{2depos.}$

FONTE: A autora (2019).

3.6 APLICAÇÃO NO CASO

3.6.1 Definição no Nível de Desenvolvimento (LOD) do modelo

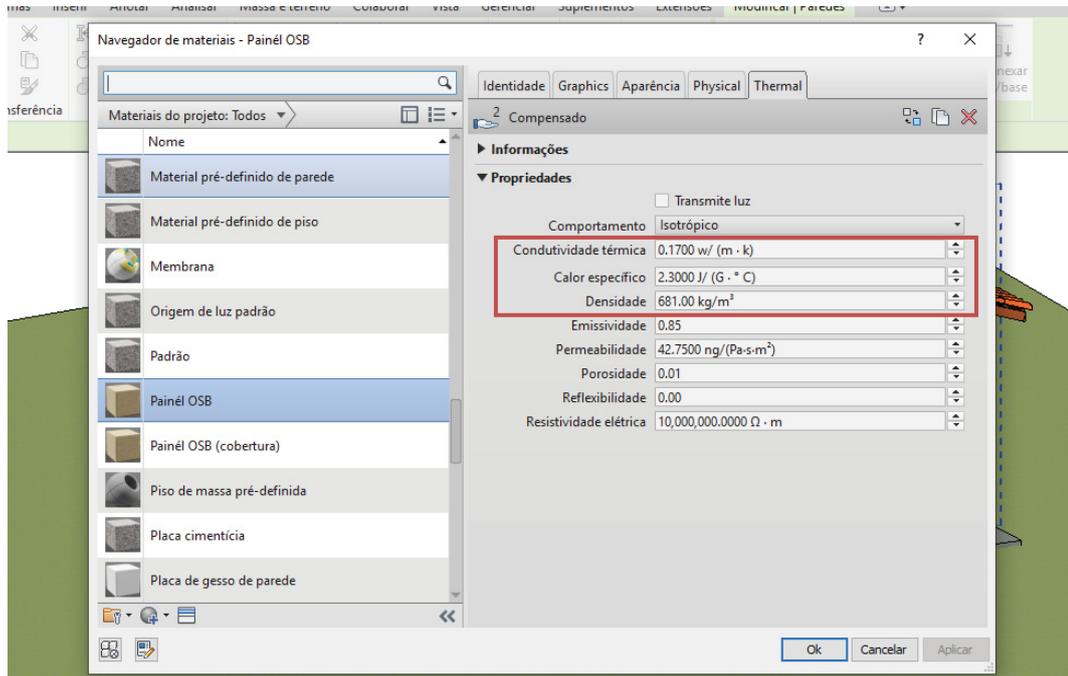
De acordo com a definição apresentada no referencial teórico, o LOD pode ser dividido em seis níveis, 100 aos 500, quanto maior as informações contidas no modelo mais avançado é o seu nível de desenvolvimento. Considerando que a modelagem executada para a habitação em *wood frame* possui quantitativos, forma, dimensões que podem ser mensuradas diretamente no modelo e adicionado apenas um dos outros sistemas da construção, como a estrutura, este estudo definiu o LOD300 como referência. Quanto mais informações forem inseridas no modelo, mais avançado será o LOD, fazendo com que os quantitativos da ACVE e ACVCO₂ se tornem mais precisas.

3.6.2 Desenvolvimento do *template* e modelagem da habitação na ferramenta *Revit*

O *Revit* possui diversos objetos que são definidos como elementos. Esses elementos pertencem a uma família que reúnem objetos do mesmo tipo com os mesmos comportamentos e parâmetros, como porta, parede, janela, mobiliário, entre outros. A partir disso, as famílias existentes no *Revit* podem ser duplicadas e personalizadas de acordo com a necessidade do usuário. Além disso, os materiais no *Revit* são organizados em grupos de propriedades, consistindo nos seguintes itens: Identidade, Gráficos, Aparência, Físico e Térmico.

O *template* pode conter as diversas famílias (parede, porta, janela) mais utilizadas no projeto, além de unidades e níveis já pré-estabelecidos, o que facilita na execução da modelagem. Para a criação do *template* para a habitação em *wood frame* os componentes existentes na biblioteca do *software* foram duplicados e ajustados conforme as características dos materiais adotados. Já as propriedades físicas: densidade; e térmica: densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico; foram modificadas de acordo com as informações estipuladas na coleta de dados, FIGURA 21.

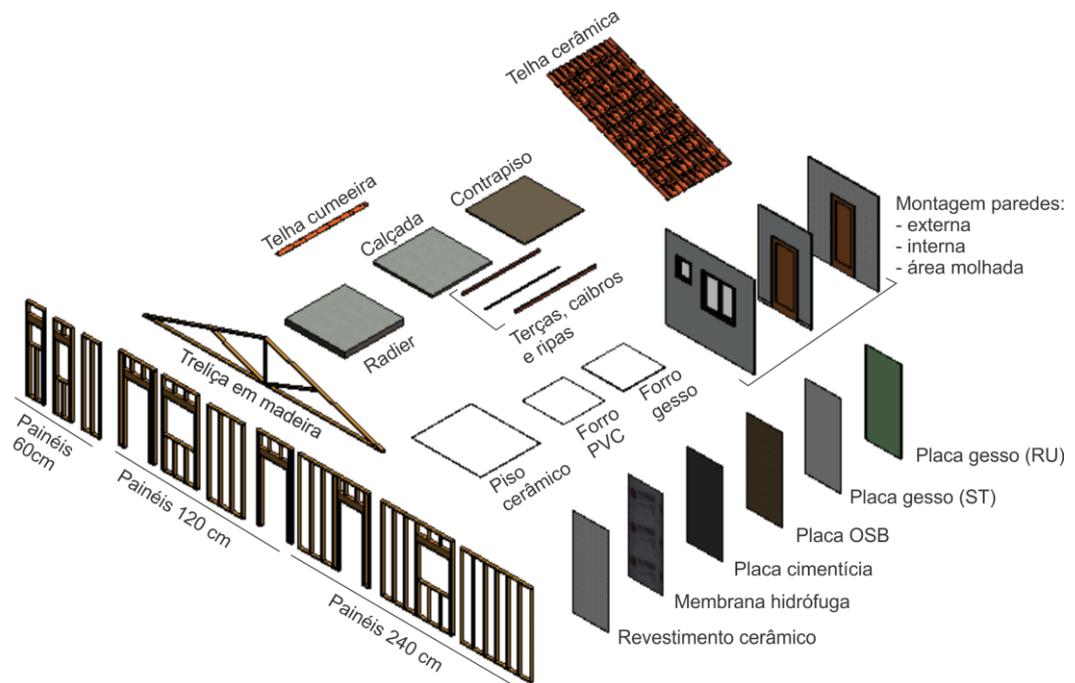
FIGURA 21 – ACESSO AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS



FONTE: A autora, via Revit (2019)

Após a criação de cada elemento foram feitas as montagens das paredes internas e externas, *frame* estrutural, piso, fundação e cobertura, FIGURA 22.

FIGURA 22 – TEMPLATE PARA A HABITAÇÃO EM WOOD FRAME



FONTE: A autora, via Revit (2019)

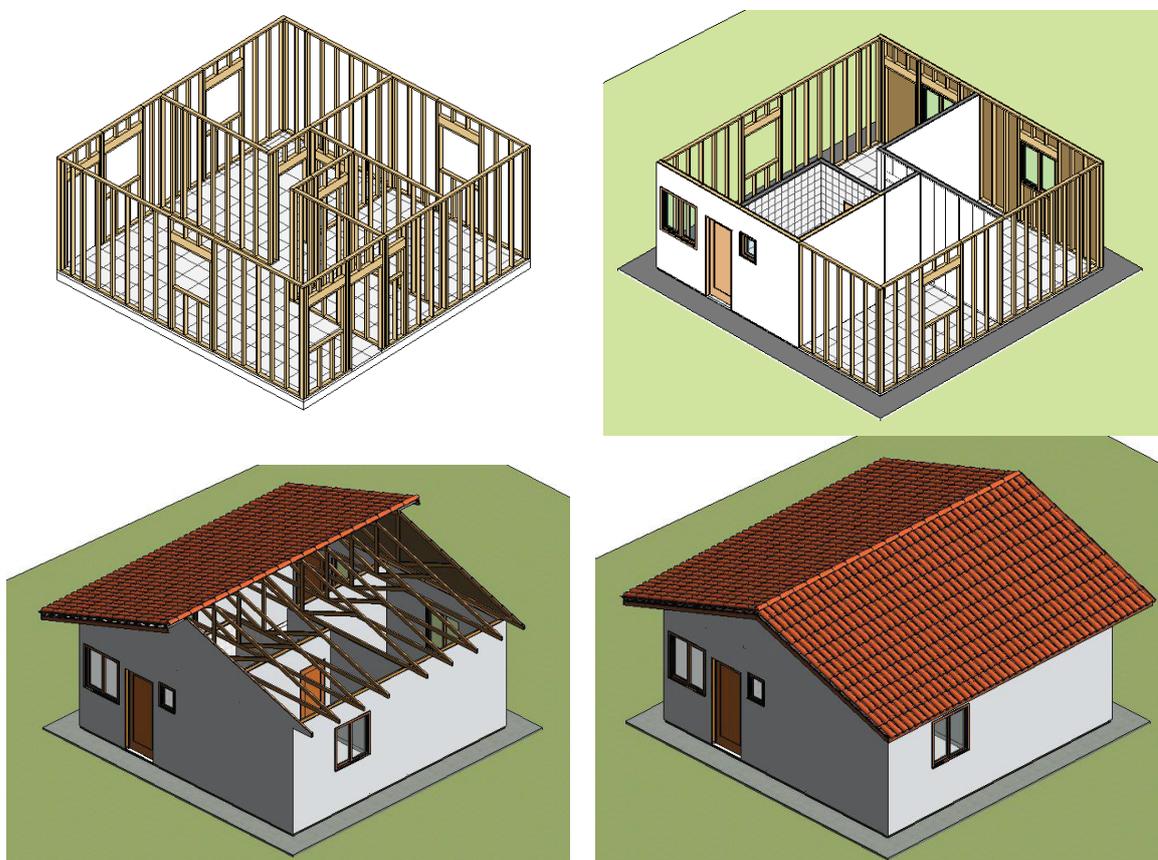
Após a criação do *template* e ajustes nas propriedades térmicas de cada material, se iniciou a modelagem da habitação escolhida, primeiramente a fundação, em seguida aplicados os módulos do *frame* estrutural.

Os painéis foram modelados manualmente, inserindo montante por montante. Havia a possibilidade de utilizar uma das extensões do *Revit* que permite modelar as molduras em madeira, mas nesse caso os detalhamentos do projeto ficariam limitados a essa extensão. Por esse motivo, optou-se pela concepção manual dos painéis, por serem modulares há a possibilidade de replicar no projeto atual, ou em outros projetos com disposições de plantas diferentes.

Em seguida o *frame* estrutural foi envolvido pelas montagens das paredes criadas, para então hospedar as esquadrias.

Para finalizar, modelou-se a estrutura e fechamento da cobertura, detalhada conforme especificação da Datec 020-C (PBQP-H, 2018a). Além disso, foi prevista uma calçada em concreto no entorno da edificação com 60 cm de largura. A FIGURA 23 apresenta a evolução do modelo da habitação em *wood frame*.

FIGURA 23 – EVOLUÇÃO DO MODELO



FONTE: A autora, via *Revit* (2019)

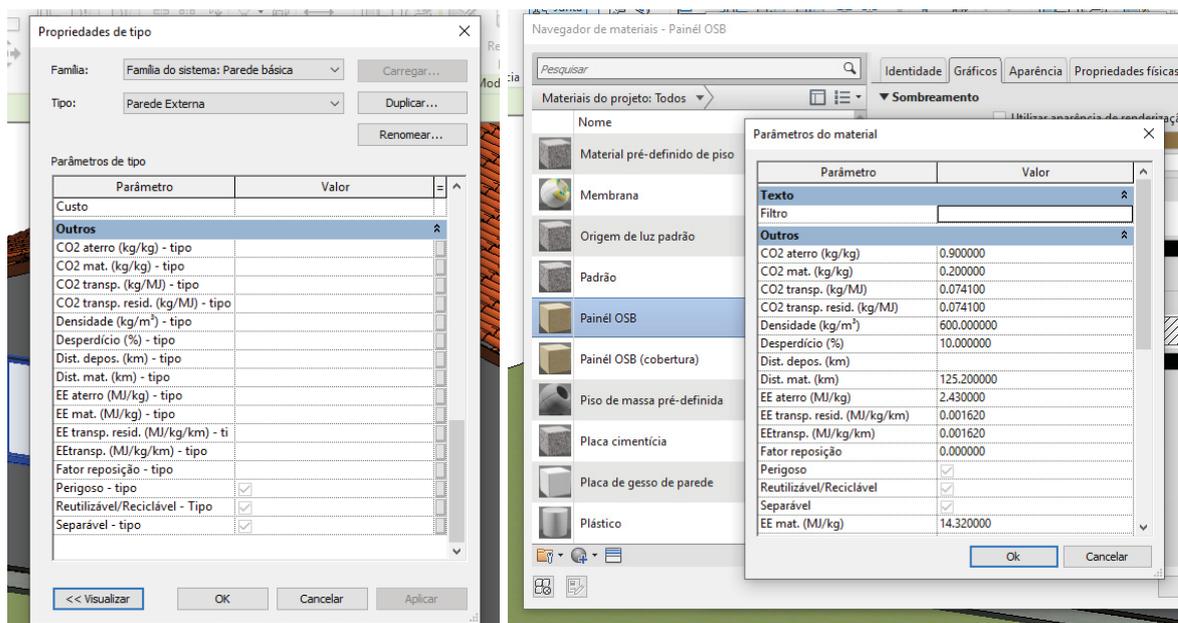
3.6.3 Criação dos parâmetros para cálculo da ACVE e ACVCO₂

Para realizar a ACVE e ACVCO₂ com auxílio do BIM é necessário criar no *Revit* parâmetros, com o intuito de armazenar informações de algumas etapas do ciclo de vida nos elementos do modelo.

Existem dois tipos de parâmetros, os que contêm as Propriedades de Tipo ou Parâmetros de Instância. Tipo é uma categoria de componente, com propriedades particulares. A instância é um exemplar de cada Tipo de componente inserido em um modelo BIM. Caso as características de um Tipo forem alteradas, todas as Instâncias serão modificadas, porém se os valores de Instância de um componente forem alterados, somente aquele componente será afetado.

No presente estudo foram criados os parâmetros de Tipo e de Instância, conforme apresentados na FIGURA 24.

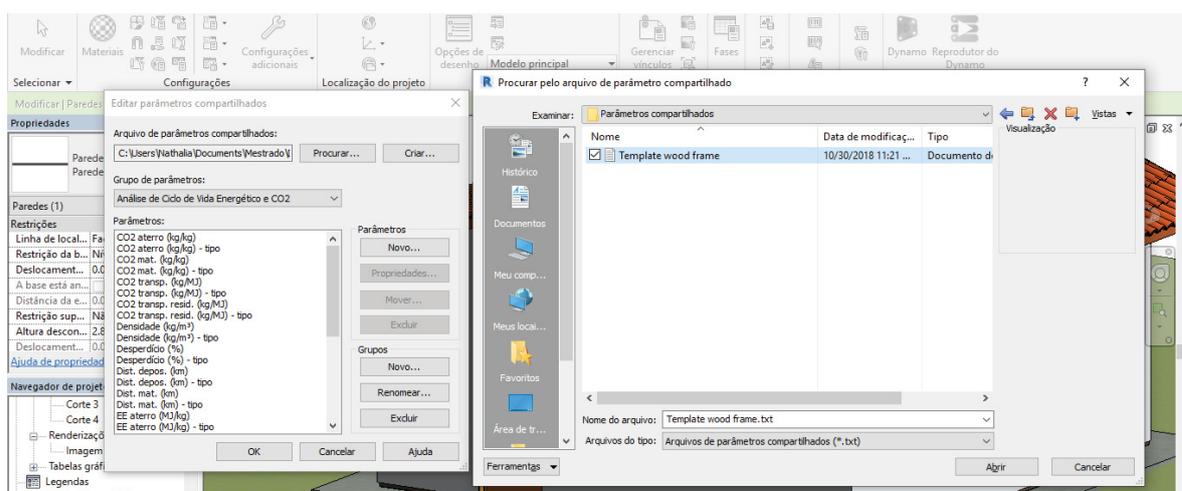
FIGURA 24 – PARÂMETROS DE TIPO E INSTÂNCIA



FONTE: A autora, via *Revit* (2019)

Os parâmetros ainda podem ser do Projeto ou Compartilhado. O parâmetro compartilhado permite criar um arquivo separado no qual as informações criadas possam ser inseridas em outros projetos ou famílias, diferente do parâmetro de projeto. Com base nisso os parâmetros compartilhados também foram criados, FIGURA 25.

FIGURA 25 – PARÂMETROS COMPARTILHADOS



FONTE: A autora, via Revit (2019)

Para a criação dos parâmetros e parâmetros calculados, o presente estudo tomou como base a pesquisa desenvolvida por Araújo (2018). A partir disso, foram criados dezoito parâmetros contendo dados da EE e CO₂ de algumas fases da etapa pré-operacional, manutenção e pós-operacional e outros dados necessários para o cálculo, QUADRO 11. Esses parâmetros estão atribuídos a cada material utilizado na habitação.

QUADRO 11 – PARÂMETROS CRIADOS NA FERRAMENTA REVIT

Pré-operacional		Operacional		Pós-operacional	
Parâmetro	Símbolo	Parâmetro	Símbolo	Parâmetro	Símbolo
EE material (MJ/kg)	<i>A</i>	Fator de Reposição	<i>h</i>	EE desconstrução (MJ/kg)	<i>c</i>
EE transporte (MJ/kg/km)	<i>B</i>	-	-	CO ₂ desconstrução (kg/kg)	<i>ç</i>
Distância material (km)	Ω	-	-	EE transporte resíduos (MJ/kg/km)	<i>i</i>
Desperdício (%)	<i>D</i>	-	-	Distância deposição (km)	<i>j</i>
Densidade (kg/m ³)	<i>E</i>	-	-	CO ₂ Transporte resíduos (kg/MJ)	<i>k</i>
CO ₂ material (kg/kg)	<i>F</i>	-	-	EE aterro (MJ/kg)	<i>l</i>
CO ₂ transporte (kg/kg)	<i>G</i>	-	-	CO ₂ aterro (kg/kg)	<i>m</i>
-	-	-	-	Separável (sim/não)	ω
-	-	-	-	Reutilizável (sim/não)	α
-	-	-	-	Perigoso (sim/não)	ϕ

FONTE: A autora (2019)

Posteriormente, foi necessário criar uma tabela com o levantamento dos quantitativos da habitação. Nessa tabela todos os parâmetros criados foram inseridos, além do nome do material, família, tipo e volume. Em seguida, na opção de editar tabela, a ferramenta *Revit* possibilita a criação dos parâmetros calculados, onde foram inseridas as equações descritas na subseção anterior, QUADRO 12 e QUADRO 13.

QUADRO 12 – PARÂMETROS CALCULADOS

Pré-operacional			Operacional			Pós-operacional		
Nome do Parâmetro	Sím b.	Cálc.	Nome do parâmetro	Sím b.	Cálc.	Nome do parâmetro	Sím b.	Cálc.
Massa (kg)	z	$V \cdot E$	EEmanut. (MJ)	q	$h-1 \cdot (y+x)$	EE transp.resíd. (MJ)	o	$i \cdot j \cdot x \cdot (h)$
EEmat. (MJ)	y	$a \cdot z$	CO ₂ manut. (kg)	p	$h-1 \cdot (u+t)$	CO ₂ transp. resid. (kg)	n	$k \cdot o$
Eetransp. (MJ)	x	$Z \cdot b \cdot \Omega$	-	-	-	EEdepos. (MJ)	τ	$If(and(\omega, \alpha), 0, l \cdot z \cdot (h))$
EEdesp. (MJ)	w	$y \cdot d / 100$	-	-	-	CO ₂ depos. (kg)	δ	$If(and(\omega, \alpha), 0, m \cdot z \cdot (h))$
Eetransp. desp. (MJ)	v	$(\Omega + j) \cdot z \cdot b \cdot d / 100$	-	-	-	EE desconst. (MJ)	β	$z \cdot c$
CO ₂ mat. (kg)	u	$z \cdot f$	-	-	-	CO ₂ desconst. (kg)	π	$z \cdot \zeta$
CO ₂ transp. (kg)	t	$g \cdot x$	-	-	-	-	-	-
CO ₂ desp. (kg)	s	$u \cdot d / 100$	-	-	-	-	-	-
CO ₂ transp. desp. (kg)	r	$g \cdot v$	-	-	-	-	-	-

FONTE: A autora (2019)

QUADRO 13 – PARÂMETROS CALCULADOS DOS VALORES FINAIS

Valores finais Pré-operacional			Valores finais Pós-operacional		
Nome do Parâmetro	Símb.	Cálc.	Nome do Parâmetro	Símb.	Cálc.
EEpré-operacional (MJ)	β	$y+x+w+v$	EEpós-operacional (MJ)	γ	$o + \tau + \beta$
CO ₂ pré-operacional (kg)	ϵ	$u+t+s+r$	CO ₂ pós-operacional (kg)	μ	$n + \delta + \pi$

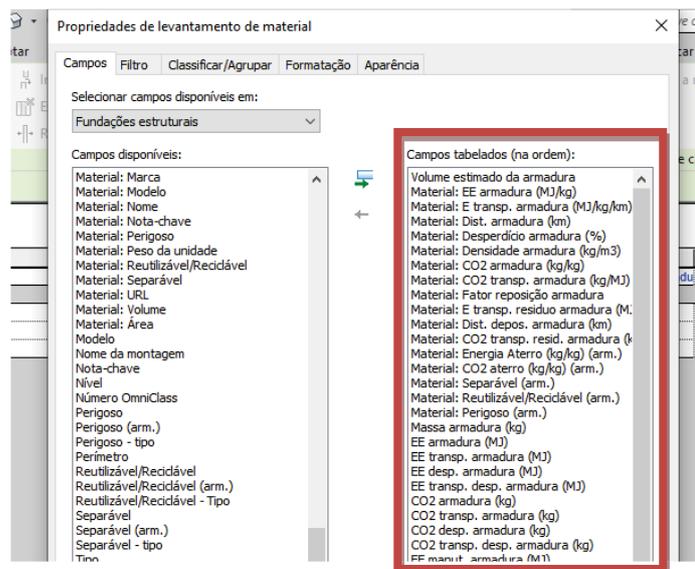
FONTE: A autora, a partir de Araújo (2019)

Os parâmetros iniciais mostrados no QUADRO 7, como já mencionado, podem ser salvos em um arquivo externo de texto, como um parâmetro compartilhado, e ser aplicado em outros projetos sem a necessidade de criar

novamente os mesmos. Diferentemente, isso não ocorre com os parâmetros calculados, pois eles são criados com base nos parâmetros iniciais. Se o arquivo de parâmetros compartilhados for adicionado em um arquivo novo, os parâmetros calculados terão que ser criados. Assim como, se o usuário estiver utilizando um *template* com os parâmetros iniciais e calculados já inseridos, mas tiver a necessidade de gerar uma nova tabela com outros materiais.

Na presente pesquisa, ao aplicar na fundação *radier* à família de armaduras o volume da armadura não apareceu na tabela de levantamento de material. Neste caso, houve a necessidade de gerar uma tabela específica para componentes estruturais. Porém, foi preciso criar novos parâmetros, já que os existentes estavam vinculados ao concreto, fazendo com que as informações deste material fossem aplicadas na armadura, FIGURA 26.

FIGURA 26 – PARÂMETROS CRIADOS PARA A FAMÍLIA DE ARMADURAS



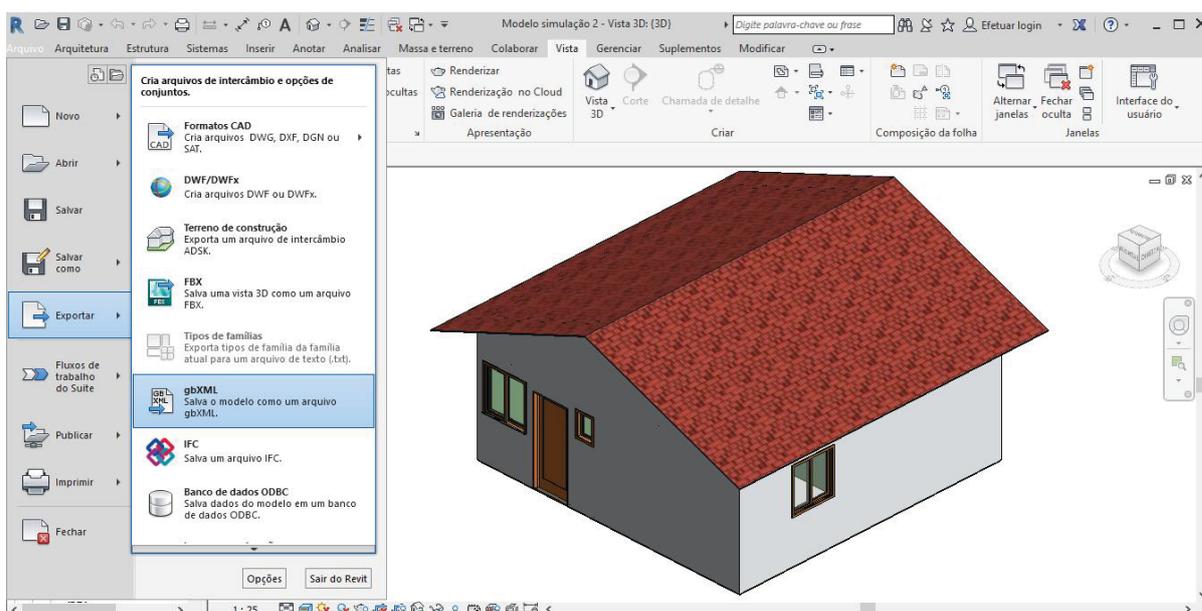
FONTE: A autora, via Revit (2019)

Após a criação dos parâmetros e parâmetros calculados, tornou-se possível inserir os valores levantados na coleta de dados na tabela criada no Revit, ou entrando nas propriedades de cada material. Foram criadas duas tabelas, uma com todos os materiais integrantes da habitação, e uma tabela com a armadura da fundação. A FIGURA 27 apresenta parte da tabela criada com os quantitativos, o Apêndice 4 apresenta a tabela completa com os totais para cada etapa da ACVE e ACVCO₂.

inseridos (AUTODESK, 2018). Neste estudo adotaram-se apenas informações sobre ambientes, pois não irá prever aparelhos de ar condicionado.

Foram criados quatro ambientes, quarto 1 e 2, sala e cozinha, pois estão em um mesmo ambiente, sem divisão de paredes, e o banheiro. Em seguida realizou-se a exportação do modelo, que precisa estar na opção vista 3D, para que então possa ser selecionado o formato de exportação em *gbXML*, FIGURA 28.

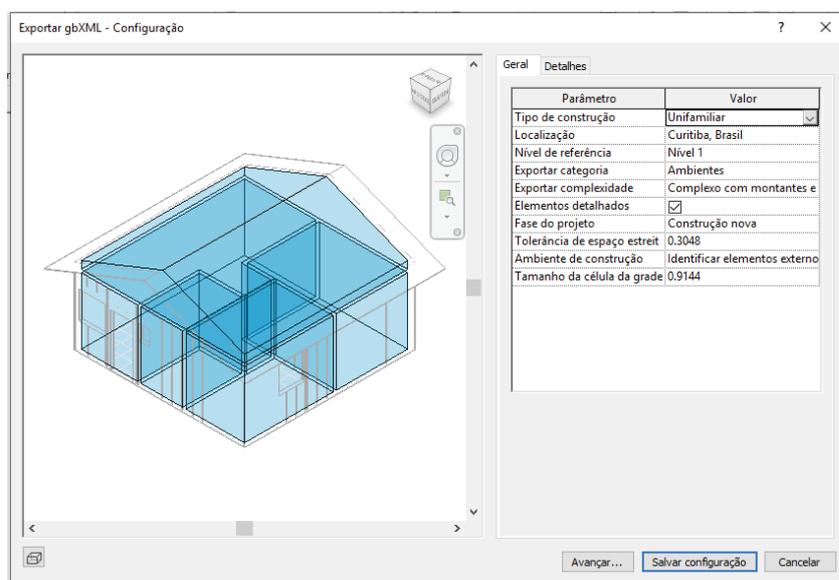
FIGURA 28 – ABA PARA EXPORTAÇÃO NO FORMATO GBXML



FONTE: A autora, via Revit (2019)

Na janela de exportação *gbXML* no *Revit*, em detalhes, ao entrar nas superfícies analíticas é possível verificar se componentes paredes, piso, forro, coberturas e aberturas estão apresentando erros, possibilitando o ajuste ainda antes da exportação. Além disso, ainda na janela de configuração, fez-se necessário testar as opções nos campos complexidade e ambiente de construção. Depois de completa as configurações, conforme apresentada na FIGURA 29, o modelo está pronto para ser exportado no formato *gbXML*.

FIGURA 29 – JANELA DE CONFIGURAÇÃO PARA EXPORTAÇÃO DO MODELO



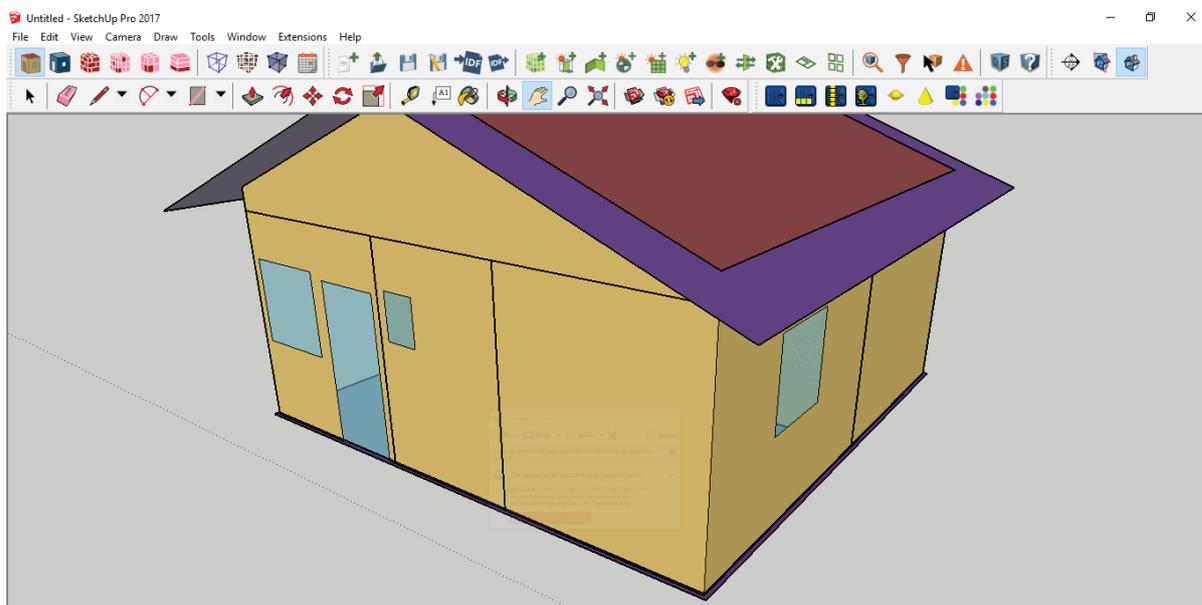
FONTE: A autora, via Revit (2019)

Posteriormente foi utilizado o software *Sketchup* 2017, com o *plug-in* do *OpenStudio*, para verificar a geometria do modelo. Este *plug-in* permite que os arquivos com extensão *gbXML* sejam importados diretamente. Um fator importante é que o *plug-in* do *OpenStudio* só funcionou na versão 2017 do *Sketchup*.

Testes foram realizados para verificar se os componentes de construção foram exportados. Nas primeiras tentativas os objetos porta e janela não foram exportados. Observou-se que ao entrar nas propriedades desses materiais dentro do *Revit* é necessário escolher, nas propriedades analíticas, um tipo de vidro e acabamento para porta. Outro fator importante é o nível de detalhamento do modelo, visto que a habitação havia sido modelada para gerar quantitativos precisos da etapa pré-operacional, manutenção e pós-operacional da ACVE e ACVCO₂. Porém, para a simulação, esse nível avançado de detalhamento gerou erros na cobertura e nas paredes durante a exportação.

A FIGURA 30 apresenta o modelo exportado dentro da ferramenta *Sketchup* com o *plug-in* do *OpenStudio* depois de ajustados alguns dos erros gerados.

FIGURA 30 – VIZUALIZAÇÃO DO MODELO EXPORTADO DENTRO DA FERRAMENTA SKETCHUP COM O PLUG-IN DO OPEN STUDIO



FONTE: A autora, via *Sketchup* (2019)

Mesmo com todos os ajustes feitos a fundação e o contrapiso não foram exportados corretamente, as portas que deveriam ser em madeira vieram como acabamento em vidro. Esses erros foram ajustados dentro do próprio *plug-in* sem a necessidade de ter que voltar ao *Revit*. As demais informações como as diferença entre superfícies, materiais e zonas térmicas foram importadas corretamente.

Após a verificação da exportação do modelo, criaram-se os Tipos de espaço (*Spaces Types*). Os *Spaces Types* permitem definir as cargas internas, os agendamentos e os conjuntos de construções dentro da ferramenta do *OpenStudio* (BRACKNEY et al., 2018). Posteriormente, o arquivo foi salvo no formato *.OSM* e importado no aplicativo do *OpenStudio*.

Dentro do aplicativo *OpenStudio* foram inseridos e verificados os dados de entrada informados na coleta de dados. O QUADRO 14 apresenta as configurações efetuadas para realizar a simulação termo energética da habitação.

QUADRO 14 – CONFIGURAÇÕES EFETUADAS NA FERRAMENTA OPENSTUDIO PARA REALIZAR A SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA DA HABITAÇÃO

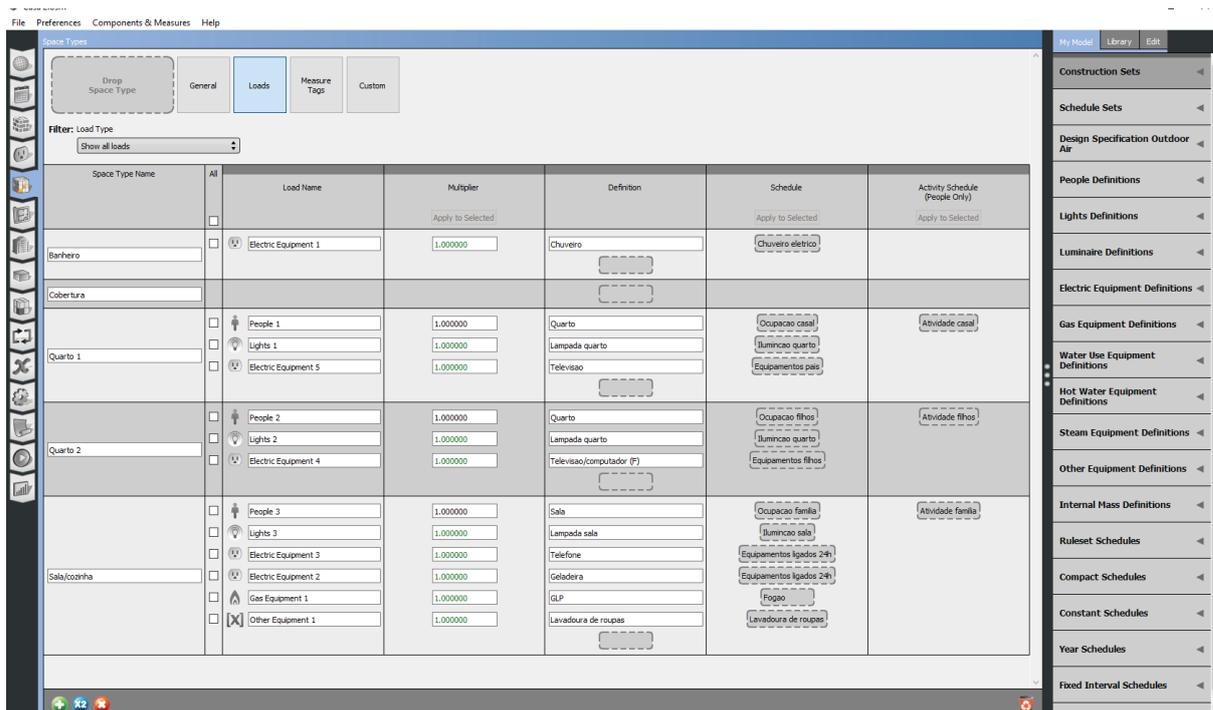
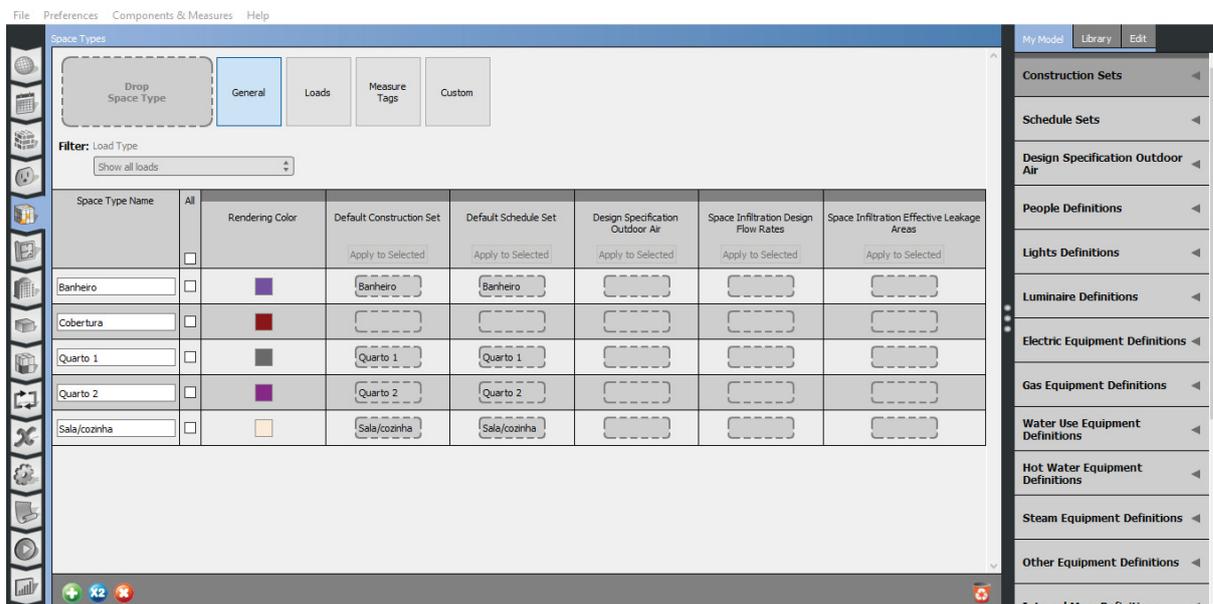
Etapa	Descrição
Arquivo climático (<i>Site</i>)	Inserção do arquivo TRY Curitiba – informando a latitude, longitude, elevação e fuso horário.
Cronogramas (<i>Schedules</i>)	Foram criados cronogramas com as atividades dos ocupantes da casa, o padrão de ocupação, iluminação, uso dos equipamentos e abertura das janelas. Posteriormente os cronogramas criados foram inseridos em cada ambiente da edificação.
Construções (<i>Constructions</i>)	Verificação se os materiais foram importados corretamente e se os dados de Condutividade térmica, densidade, calor específico e espessura estão conforme estipulados na ferramenta <i>Revit</i> . Posteriormente são inseridos os materiais das paredes, pisos, teto e esquadrias em cada ambiente.
Carregamentos (<i>Loads</i>)	Definição do número de pessoas, potência dos equipamentos elétricos, gás e iluminação
Tipos de Espaços (<i>Space Type</i>)	Nesta etapa são inseridas, em cada ambiente, as construções, os cronogramas e os carregamentos criados nas etapas anteriores
Espaços (<i>Spaces</i>)	Nesta opção podem ser verificadas se as camadas, subcamadas, carregamentos, construções e cronogramas estão contidos no modelo, conforme especificado anteriormente.
Medidas (<i>Measures</i>)	Inserção da medida <i>Add Wind and Stack Open Area</i> . Esta medida considerada um cálculo mais simples de ventilação natural que pode ser controlada através de um cronograma de abertura da janela definida pelo usuário e pela especificação das temperaturas máximas, mínimas, e diferença entre a temperatura externa e interna.

FONTE: A autora (2019)

Na aba construções fez-se necessário criar um material para a camada de ar, onde fica localizado o frame estrutural, pois no Revit não foi possível inserir os valores de resistência térmica para camadas de ar não ventiladas estipuladas pela NBR 15220 (ABNT, 2003). Esta mesma opção foi criada para a cobertura.

A FIGURA 31 apresenta as informações inseridas no modelo, como a de construção, cronograma e os carregamentos na aba *Space Types*.

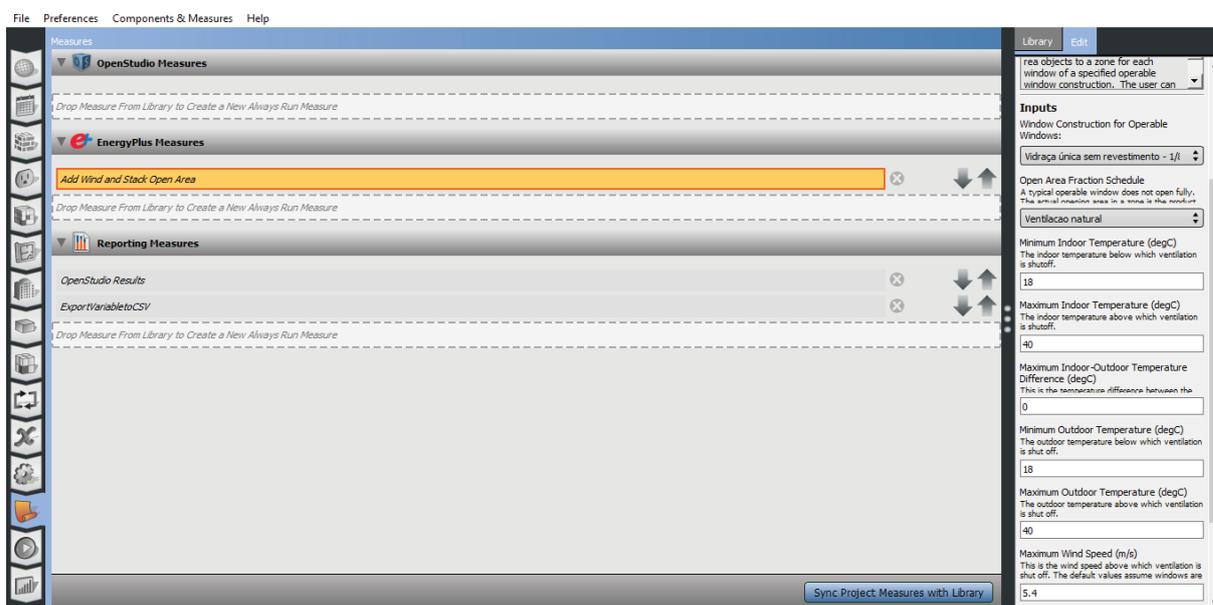
FIGURA 31 - INSERÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, CRONOGRAMAS E CARREGAMENTOS NOS TIPOS DE ESPAÇOS (SPACE TYPE) DA HABITAÇÃO



FONTE: A autora, via OpenStudio (2019)

Para cálculo da ventilação natural testou-se a *Measure Add Wind and Stack Open Area*, FIGURA 32.

FIGURA 32 – INSERÇÃO DAS MEDIDAS (MEASURES) A SEREM UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora, via *OpenStudio* (2019)

Na ferramenta de simulação *EnergyPlus*, uma das opções para calcular o fluxo de ar entre as zonas e o exterior, através de frestas e janelas, é com a opção *AirflowNetwork*. Nesta opção é determinado o fluxo de ar, as características do entorno da edificação, condições da abertura das janelas e portas, e as condições de ventilação, sendo considerado um método de simulação coerente (PEREIRA et al. 2013).

Mesmo o *OpenStudio* possuindo como mecanismo de simulação o *EnergyPlus*, esta opção ainda não está disponível. Porém, existem outras maneiras para programar a ventilação e/ou infiltração no edifício. A opção testada nesse estudo foi a *measure Wind and Stack with Open Area*, também um tipo de medida do *EnergyPlus*. Esta medida é um cálculo simplificado de ventilação, ao contrário do que é proposto pelo *Airflow Network*. O objeto adotado calcula a vazão de ventilação natural que é controlado por um cronograma, aplicado a abertura das janelas, e também pelas especificações das temperaturas mínimas, máximas e delta. A equação utilizada para o cálculo da taxa de ventilação conduzida pelo vento é com base na *ASHRAE Handbook of Fundamentals* (2009) (BIGLADDER SOFTWARE, 2018).

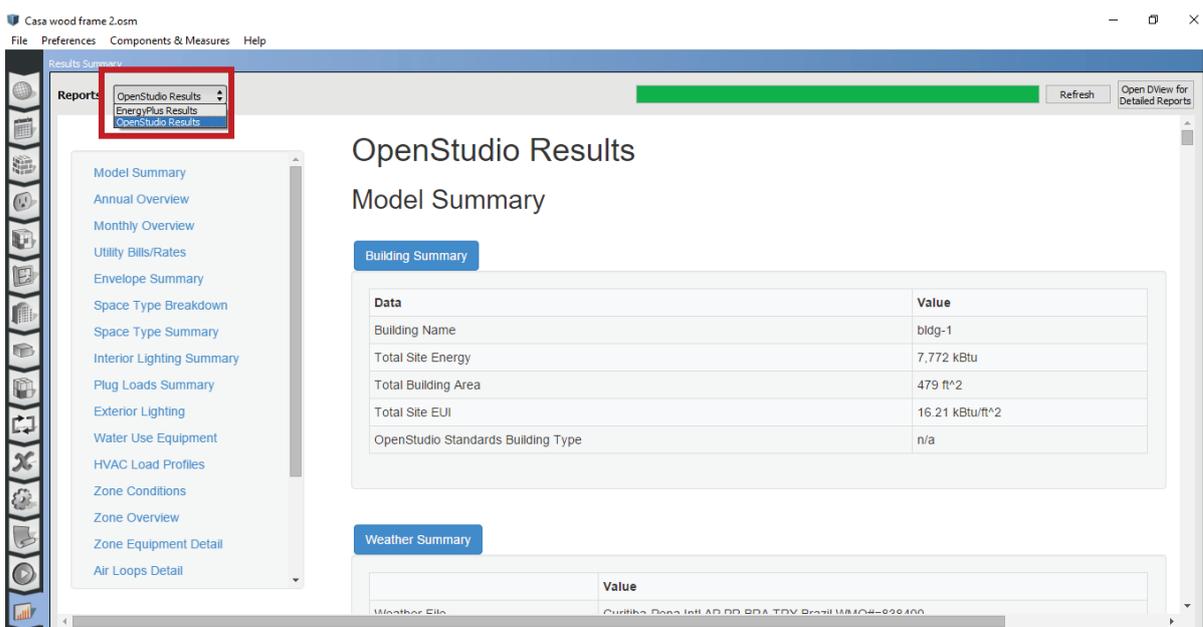
Neste caso criou-se um cronograma da abertura das janelas, fração de 0.5, considerando que as janelas são abertas durante o dia quanto um dos usuários estão em casa, e a noite durante o sono, as janelas estão fechadas. Foi determinada

a temperatura máxima e mínima, interna e externa para fechamento das janelas, mínima de 18°C e máxima de 40°C. A diferença de temperatura interna e externa e a velocidade do vento foram mantidas a padrão, 0°C e 5,4m/s respectivamente.

Outras medidas também puderam ser inseridas, como a opção de gerar resultados pelo *OpenStudio* e a exportação dos resultados de uma das variáveis (como temperatura média do ar externa, temperatura média do ar das zonas térmicas, entre outros), transformando os dados em arquivos de texto CSV (*Comma-separated value*), para que possam ser importados na ferramenta Excel e gerar gráficos.

O *software* apresenta relatórios gerados pelo *OpenStudio*, fornecendo gráficos e tabelas com os resultados de temperatura e consumo energético. Porém, ainda não existe a opção ou uma *Measure* que permita que os resultados sejam fornecidos no Sistema Internacional (SI). Esta medida facilitaria na obtenção de resultados mais intuitivos, e sem a necessidade de tradução, ou exportação dos dados para o *Excel*, para gerar os gráficos. O *software* também fornece relatórios gerados pelo *EnergyPlus*, este se encontra no SI. A FIGURA 33 apresenta a aba com os resultados obtidos na simulação e a possibilidade de escolhas de visualização dos resultados gerados pelo *EnergyPlus* ou pelo *OpenStudio*.

FIGURA 33 – POSSIBILIDADES DE RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora, via *Open Studio* (2019).

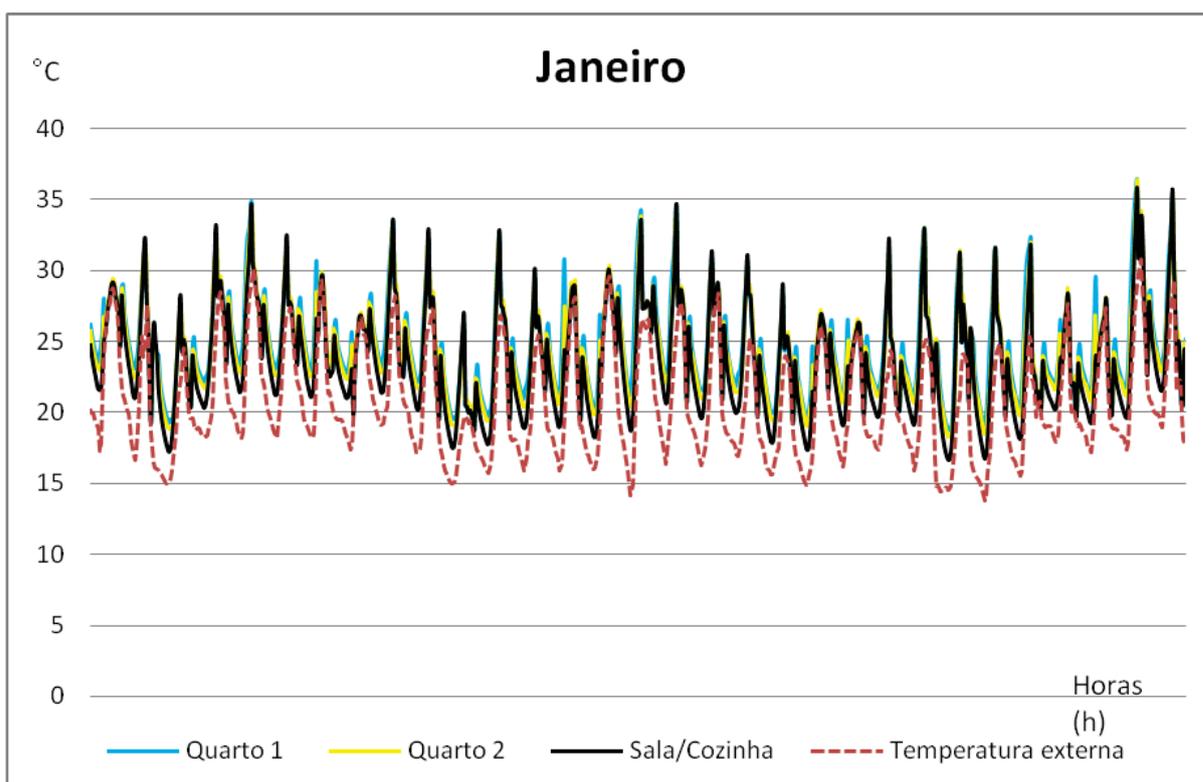
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS GERADOS PELO *OPENSTUDIO*

O *OpenStudio* forneceu resultados para o consumo de energia dos equipamentos elétricos, iluminação e cocção, dados importantes para o cálculo da etapa operacional da ACV. Também gerou resultados para as horas gastas em cada grau de temperatura, umidade em cada ambiente e temperatura interna e externa para as 8760 horas no ano.

O GRÁFICO 3 apresenta os resultados das temperaturas para os ambientes de permanência prolongada no mês de janeiro, o mês mais quente do ano.

GRÁFICO 3 – TEMPERATURA PARA O MÊS DE JANEIRO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA



FONTE: A autora (2019)

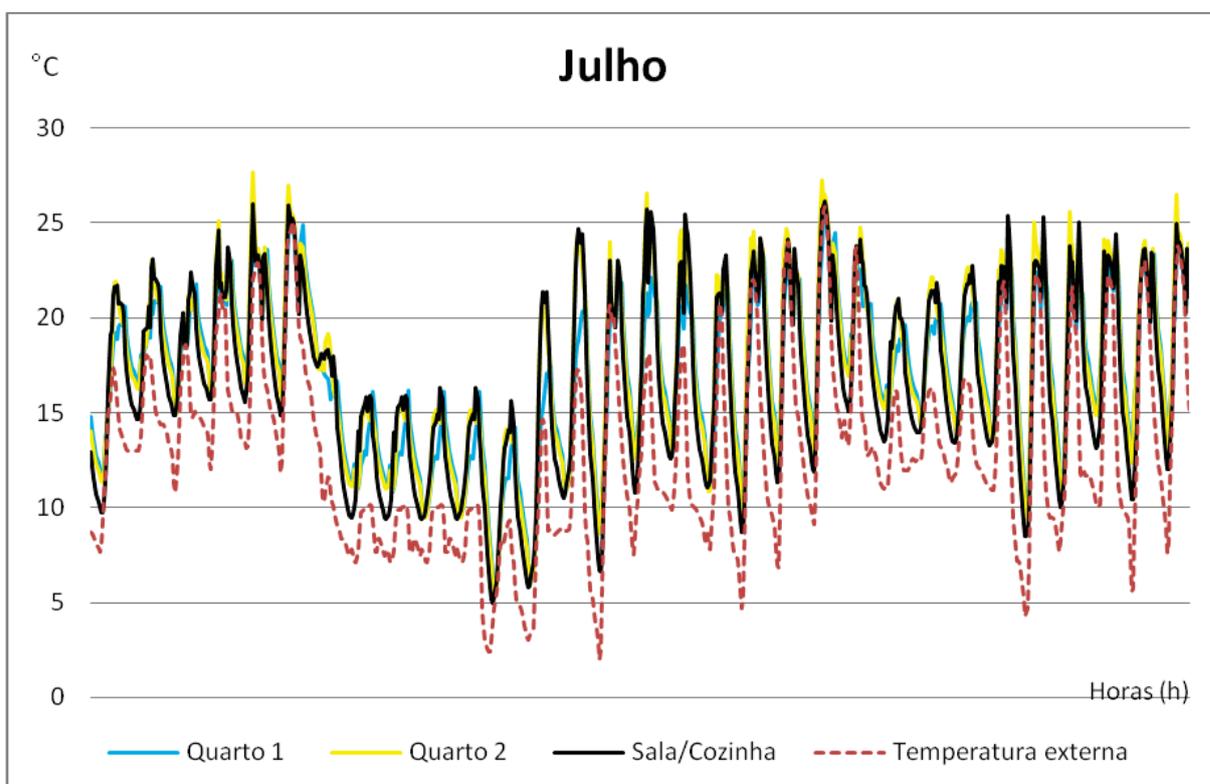
Analisando o gráfico foi possível notar que em determinados dias e horas do mês de janeiro a temperatura ultrapassou os 29°C nos três ambientes e obteve uma mínima em determinadas horas do mês, inferior a 18°C.

Apesar do quarto 1 possuir uma janela para o leste, e o quarto 2 uma janela para o norte, e a sala/cozinha janelas para o norte e oeste, as temperaturas nos três

ambientes ficaram próximas na maior parte do mês. Mesmo com pouca variação o quarto 1 apresentou maior grau de temperatura, seguido do quarto 2 e por fim sala/cozinha. No sentido inverso, quando a temperatura desce, a sala/quarto apresentou o menor grau de temperatura, seguido do quarto 2 e quarto 1.

No inverno, GRÁFICO 4, o mês de julho mostrou grande variação de temperatura, de aproximadamente 28°C a 5°C.

GRÁFICO 4 - TEMPERATURA PARA O MÊS DE JULHO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA



FONTE: A autora (2019)

A Sala/Cozinha e o quarto 2 possuem janelas para o norte, revelando que durante as horas com temperatura elevada no mês de julho determinados valores ficaram semelhantes, diferente do Quarto 1, onde a temperatura se encontra inferior na maioria das horas. Quando a temperatura desce a sala/cozinha se encontra com temperaturas inferiores, e o quarto 1 e 2 apresentam temperaturas um pouco mais elevadas que a sala/quarto.

Os gráficos para o mês de janeiro e julho mostram que existem variações de temperaturas em determinadas horas do mês entre os ambientes internos e externos. O Apêndice 4 apresenta todos os gráficos gerados por ambiente, durante todos os meses do ano.

O *Open Studio* também gerou como resultados as horas gastas em cada faixa de temperatura e umidade, TABELA 17 e 18, durante as 8760 horas do ano para os ambientes de permanência prolongada. As cores representam os limites de horas: (i) até 500 horas cor branca; (ii) de 500 a 1000 cor amarela; (iii) de 1000 a 2000 cor laranja; (iiii) acima de 2000 cor vermelha.

A TABELA 15 apresentou as horas gastas em cada faixa de temperatura. É notável que 58% a 66% das horas nos ambientes estão na faixa de temperatura entre 18° e 28°C. Entre 28% e 36% das horas a temperatura ficou abaixo dos 18°C, e aproximadamente 4% das horas a temperatura ficou acima de 28°C.

TABELA 15 - HORAS GASTAS EM CADA FAIXA DE TEMPERATURA

Zona	<13 (°C)	13- 16 (°C)	16- 18 (°C)	18- 20 (°C)	20- 21 (°C)	21- 22 (°C)	22- 23 (°C)	23- 24 (°C)	24- 25 (°C)	25- 28 (°C)	28- 31 (°C)	>31 (°C)	Temp. Média (°C)
1 QUARTO 1 THERMALZONE	430	711	1373	950	1079	1035	948	716	458	649	296	115	20.9 °C
3 SALA/COZINHA THERMALZONE	704	1006	1521	809	864	879	796	679	481	653	265	103	20.2 °C
4 QUARTO 2 THERMALZONE	470	747	1368	828	990	984	961	764	514	708	310	116	20.9 °C

FONTE: Adaptado do *Open Studio* (2019)

A TABELA 16 apresenta as horas gastas em cada faixa de umidade. Aproximadamente 50% das horas gastas estão na faixa de umidade ≥ 80 .

TABELA 16 - HORAS GASTAS EM CADA FAIXA DE UMIDADE

Zona	< 30 (%)	30-35 (%)	35-40 (%)	40-45 (%)	45-50 (%)	50-55 (%)	55-60 (%)	60-65 (%)	65-70 (%)	70-75 (%)	75-80 (%)	≥ 80 (%)	Umidade Relativa Média (%)
1 QUARTO 1 THERMALZONE	2	20	58	184	311	471	601	724	826	766	673	4124	77.5 (%)
3 SALA/COZINHA THERMALZONE	3	28	72	213	327	413	488	513	599	588	629	4887	80.7 (%)
4 QUARTO 2 THERMALZONE	14	58	120	269	393	525	657	689	759	732	691	3853	75.5 (%)

FONTE: Adaptado do *Open Studio* (2019)

Com relação à transmitância térmica os resultados obtidos no relatório fornecido pelo *EnergyPlus* apresentou 1.90 W/m².K para as paredes e para a

cobertura 0.43 W/m².K. Os valores encontrados ficaram de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013), ≤ 2.5 W/m².K para as paredes, e ≤ 2.3 W/m².K para a cobertura.

O consumo energético utilizado pelos equipamentos, iluminação e cocção durante as 8760 horas foram discriminadas na TABELA 17.

TABELA 17 – CONSUMO ENERGÉTICO DOS EQUIPAMENTOS, ILUMINAÇÃO E COCÇÃO

Fonte		kWh	MJ	CO ₂ (kgCO ₂)
GLP	Cocção	25,00	90,00	5,68
Elétrica	Equipamentos	1.077,78	3.880,80	163,84
	Iluminação	355,55	1.279,98	54,04
	Chuveiro	822,22	2.960,00	124,97
Total (8760h)		2.280,55	8.210,78	348,53
Total 50 anos		11.4024,50	410.539,00	17.426,50

FONTE: A autora a partir do *Open Studio* (2019)

Os equipamentos como: televisão, computador, geladeira, lavadora de roupa e telefone foram responsáveis por grande parte do consumo, seguido do chuveiro elétrico, iluminação, e cocção. Os resultados mostraram que o consumo médio equivaleria a 190 kWh/mês. Dentre as fontes utilizadas, energia elétrica e GLP, a energia elétrica representou 99% do consumo.

Para quantificar o CO₂ foram utilizados os dados de Tavares e Bragança (2016) para a energia elétrica, e o GLP com base no IPCC (2006), representando respectivamente, 0,04222 kg/MJ e 0,0631 kg/MJ.

4.2 RESULTADOS GERADOS PELO *REVIT*

Após a criação dos parâmetros e tabelas na ferramenta *Revit*, conforme abordado no capítulo anterior, foi possível quantificar os resultados totais da ACVE e ACVCO₂ para as etapas pré-operacionais (produção do material e desperdício, e transporte do material e desperdício), operacional (manutenção) e pós-operacional (desconstrução, transporte e destino final). O Apêndice 2 apresenta a tabela com os resultados gerados pelo *software*.

4.2.1 Pré-operacional

Para esta fase o *Revit* gerou resultados do consumo de energia e emissões de CO₂ para a extração, processamento e transporte dos materiais durante a etapa de fabricação, transporte dos materiais até o local da obra, desperdício e transporte

do desperdício dos componentes que compõe a habitação. Os resultados obtidos na etapa de obra, através do consumo de equipamentos para montagem da habitação, foram com base no estudo desenvolvido por Souza (2013). A TABELA 18 apresenta os resultados encontrados para a EE e o CO₂ a etapa pré-operacional.

TABELA 18 – EE E CO₂ EM CADA FASE NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL

Etapa	Descrição	EE (MJ)	CO ₂ (kg)
Produção material	Extração, transporte e manufatura	Material	159.040,54
		Desperdício	17.956,50
Etapa de Construção	Transporte	Material	12.288,17
		Desperdício	1.672,34
	Obra*	-	9.119,58

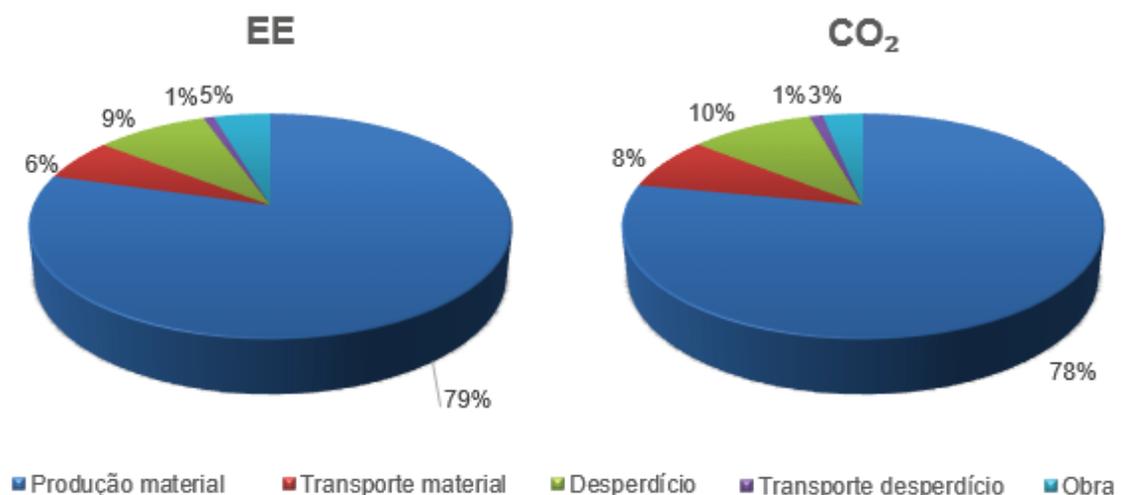
*Dados com base no estudo desenvolvido por Souza (2013)

Resultados parciais obtidos através dos parâmetros criados na ferramenta Revit

Observa-se que EE e as emissões de CO₂ foram superiores durante a fase de produção do material, em seguida produção do desperdício, transporte, transporte do desperdício e obra.

A EE total para esta etapa foi de 200.077,13 MJ, e o CO₂ de 11.839,43 kg. O GRÁFICO 5 apresenta o percentual de EE e CO₂ para cada fase. Nota-se pequena variação entre o percentual encontrado para a EE e o para o CO₂.

GRÁFICO 5 – PERCENTUAIS DA EE E CO₂ EM CADA FASE DA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL



FONTE: A autora (2019).

A TABELA 19 apresenta os resultados de EE e CO₂ por sistemas de montagens, permitindo avaliar qual etapa da construção obteve consumo energético ou impactos superiores.

TABELA 19 – EE E CO₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL

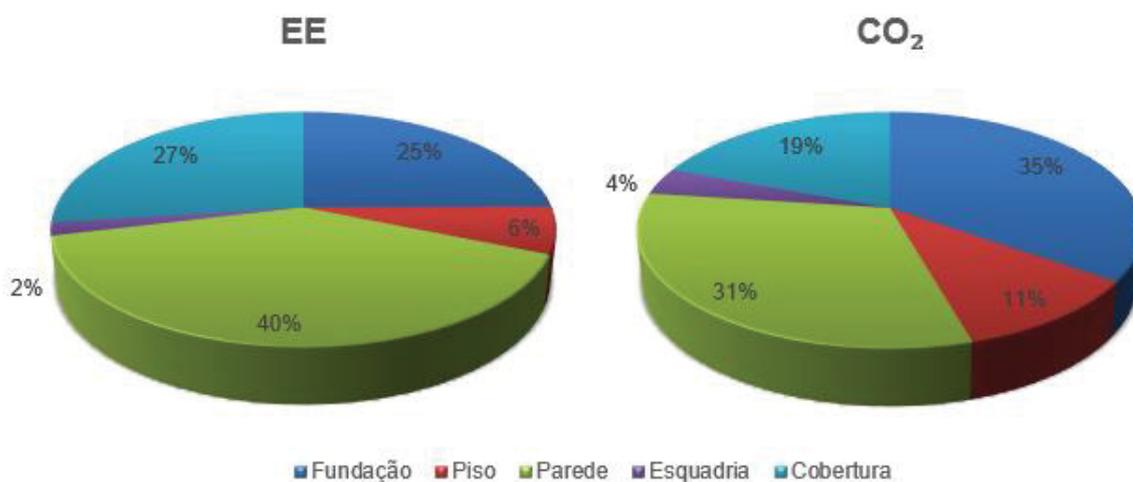
	Fase	Fundação	Piso	Paredes	Esquadria	Cobertura
EE (MJ)	Produção material	39.219,02	10.239,61	64.934,94	3.058,92	41.588,26
	Produção desperdício	2.164,53	527,53	4177,93	120,95	5296,98
	Transporte material	5.649,68	1473,82	6462,22	196,16	4173,95
	Transporte desperdício	477,79	91,57	442,28	15,65	645,68
	Total EE (MJ)	47.511,02	12.332,53	76.017,37	3.391,68	51.704,87
CO ₂ (kg)	Produção material	3.291,61	1.030,47	2.926,35	390,07	1.601,66
	Produção desperdício	160,40	39,08	309,50	8,98	392,38
	Transporte material	504,26	155,58	336,21	21,86	161,36
	Transporte desperdício	35,40	6,79	32,60	1,15	48,13
	Total CO₂ (kg)	3.991,67	1.231,92	3.604,66	422,06	2.203,53

FONTE: A autora (2019)

Observa-se que a EE para as montagens das paredes foram superiores ao da cobertura, em seguida fundação, piso e esquadrias. Para as emissões de CO₂ a fundação obteve respostas superiores, em seguida as paredes, cobertura, piso e esquadria.

Comparando o gasto energético das paredes com a fundação, o GRÁFICO 6 apresenta que os valores totais para a parede foram 15% superior à fundação. Porém, ao analisar o CO₂ emitido, a fundação obteve resultados de 4% superiores as paredes. As demais etapas também apresentação variações ao analisar a EE e o CO₂, o piso e a esquadria possuem percentuais superiores no gráfico do CO₂; já a cobertura, reduz.

GRÁFICO 6 - PERCENTUAIS DA EE E CO₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL



FONTE: A autora (2019).

Neste caso, os recursos energéticos utilizados para a produção dos materiais que compõem as paredes foram superiores, porém os materiais da fundação emitiram maiores quantidades de CO₂.

A TABELA 20 apresenta os valores e percentuais da EE e do CO₂ referente à contribuição de cada material empregado na habitação, juntamente com o desperdício.

TABELA 20 – EE E CO₂ DA CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA HABITAÇÃO

Materiais	EE (MJ)	%	Materiais	CO₂ (kg)	%
Gesso	24.646,64	13,92	Concreto	1.943,69	18,40
Tintas	19.967,35	11,28	Gesso	1.387,47	13,13
Concreto	19.436,90	10,98	Tintas	950,42	9,00
Placa de OSB	18.321,36	10,35	Brita	866,10	8,20
Telha cerâmica	15.966,60	9,02	Armadura	765,57	7,25
Forro PVC	14.184,03	8,01	Contrapiso	642,20	6,08
Brita	12.991,46	7,34	Placa cimentícia	639,63	6,05
Armadura	8.926,15	5,04	Telha cerâmica	502,75	4,76
Madeira pinus	6.422,47	3,63	Revestimento cerâmico	498,32	4,72
Contrapiso	6.421,99	3,63	Forro PVC	479,56	4,54
Outros (10)	29.711,63	16,79	Outros (10)	1.743,72	16,74

FONTE: A autora (2019)

Observa-se que dez dos materiais, dos vinte especificados, representam aproximadamente 83% da EE e do CO₂. Dentre eles o gesso, a tinta e o concreto se concentram nas três primeiras posições tanto para EE como CO₂, entretanto com trocas de posicionamento, acumulando aproximadamente 35% da EE e 40% do CO₂. O painel de OSB obteve percentuais próximos ao concreto se observados os resultados da EE, entretanto, ao avaliar as emissões de CO₂ representou aproximadamente 2% dos impactos, enquanto o concreto representou 18%.

4.2.2 Operacional

Nesta etapa foi contabilizada a EE e o CO₂ para a produção de novos materiais para a manutenção e conservação do edifício ao longo do ciclo de vida de 50 anos. A TABELA 21 apresenta os valores de EE e CO₂ para a etapa de manutenção geradas pelo Revit, juntamente com os quantitativos da etapa de operação obtidos pelo software *OpenStudio*, descrito na subseção anterior.

TABELA 21 - EE E CO₂ NA ETAPA OPERACIONAL

Etapa	Descrição	EE (MJ)	CO ₂ (kg)
Manutenção	Manufatura de novos materiais	224.637,43	11.593,45
Operação*	Energia Equipamento	406.039,00	17.142,50
	Cocção	4.500,00	284,00

*Dados com base nos resultados obtidos pelo *OpenStudio*
Resultados parciais obtidos através dos parâmetros criados na ferramenta Revit

Observa-se que a EE para a operação do edifício alcançou quantitativos superiores em comparação a EE para a produção de novos materiais, ao longo do ciclo de vida. O mesmo foi encontrado para o CO₂. A fase de manutenção representou 35% da EE e 40% do CO₂, enquanto a fase de operação 65% da EE e 60% CO₂. O total de EE e CO₂ para a etapa operacional foi de 635.176,43 MJ e 29.019,95 kg, respectivamente.

A TABELA 22 apresenta os resultados de EE e CO₂ por sistemas de montagens na fase de manutenção.

TABELA 22 – EE E CO₂ POR SISTEMAS DE MONTAGENS NA FASE DE MANUTENÇÃO

	Fundação	Pisos	Paredes	Esquadrias	Cobertura
EE (MJ)	3.998,42	5.340,72	127.488,80	2.130,52	85.678,94
CO ₂ (kg)	391,22	594,10	6.429,94	267,33	3.911,27

FONTE: A autora (2019)

A EE e CO₂ para o sistema de montagem das paredes foram superiores ao da cobertura, em seguida o piso, fundação e esquadrias.

A TABELA 23 apresenta os valores e percentuais da EE e CO₂ para a contribuição de cada material. Neste caso somente dez, dos vinte materiais, foram empregados na etapa de manutenção.

TABELA 23 – EE E CO₂ DA CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA HABITAÇÃO NA ETAPA DE MANUTENÇÃO

Materiais	EE (MJ)	%	Materiais	CO ₂ (kg)	%
Tintas	147.706,44	65,76	Tintas	7.032,03	60,65
Telha cerâmica	24.666,23	10,98	Gesso	1.434,98	12,38
Gesso	24.275,50	10,81	Telha cerâmica	900,19	7,76
Forro PVC	8.634,22	3,84	Revestimento cerâmico	635,64	5,48
Revestimento cerâmico	6.599,09	2,94	Concreto	391,32	3,38
Madeira nativa	4.538,01	2,02	Argamassa	332,60	2,87
Concreto	3.999,49	1,78	Madeira nativa	307,65	2,65
Argamassa	2.081,91	0,93	Forro PVC	292,22	2,52
Vidro	1.785,99	0,80	Vidro	247,34	2,13
Esquadrias madeira	344,53	0,15	Esquadrias madeira	19,99	0,17

FONTE: A autora (2019)

Observa-se que dentre os materiais empregados na etapa de manutenção, grande parte está associada às paredes devido ao uso de tintas. A tinta representou 65% da EE, em seguida a telha cerâmica, gesso, forro PVC, entre outros. Analisando o CO₂, a tinta continua possuindo impactos superiores, representando aproximadamente 60%, em seguida o gesso, telha cerâmica, entre outros.

4.2.3 Pós-operacional

Nesta etapa foi contabilizada a EE e o CO₂ para a desconstrução da habitação, através do uso de equipamentos, transporte de todo o material até o local de deposição, aterro ou centros de reciclagem e reaproveitamento, e a manutenção do aterro, para os materiais que não forem reciclados ou reutilizados. A TABELA 24 apresenta os resultados encontrados para cada fase.

TABELA 24 – EE E CO₂ NA ETAPA PÓS-OPERACIONAL

Etapa	Descrição	EE (MJ)	CO₂ (kg)
Desconstrução	Demolição e desconstrução	1.095,21	72,95
Transporte	Transporte até o local de deposição	2.044,96	151,53
Deposição	Manutenção do aterro	5.659,99	2.096,29

FONTE: A autora (2019).

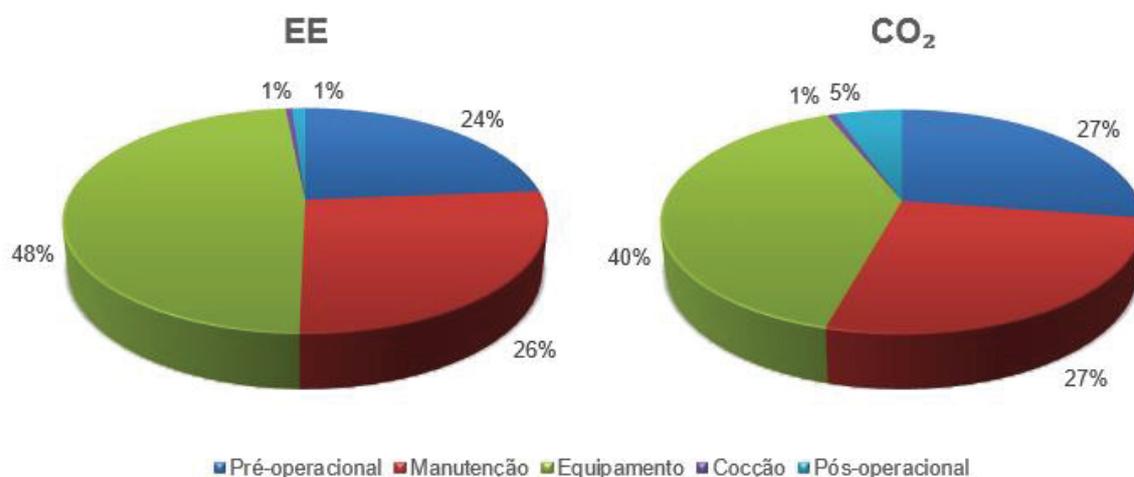
Observa-se que os totais da EE e CO₂ na deposição dos materiais encaminhados para o aterro foram superiores ao transporte, e desconstrução da habitação. Representando respectivamente o percentual de 64%, 23% e 13% para a EE, e 98%, 1% e 1% para o CO₂. O total de EE e CO₂ para esta etapa foi de 8.800,16 MJ e 2.320,77 (kg), nessa ordem.

4.3 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS ETAPAS DO CICLO DE VIDA

O GRÁFICO 7 apresenta os percentuais com a contribuição de cada fase do ciclo de vida, incluindo o percentual operacional dos equipamentos e cocção.

Observa-se que fase operacional obteve totais superiores, seguido das fases pré-operacional e pós-operacional.

GRÁFICO 7 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA EE E CO₂ NAS ETAPAS PRÉ-OPERACIONAL, OPERACIONAL (MANUTENÇÃO, EQUIPAMENTOS E COCÇÃO) E PÓS-OPERACIONAL



FONTE: A autora

Analisando o gráfico, o percentual encontrado para EE é superior para a etapa operacional por equipamentos, em seguida a energia de manutenção, a etapa pré-operacional, pós-operacional e por fim a etapa operacional por cocção. Para o CO₂ o percentual diminuiu na etapa operacional por equipamentos, se manteve na operacional por cocção e aumentou na etapa pré-operacional, manutenção e pós-operacional. A etapa operacional juntando as fases de manutenção, uso de equipamentos elétricos e cocção corresponderam aproximadamente 75% da EE ao longo do ciclo de vida de 50 anos, a EE pré-operacional representou 24% e a EE pós-operacional 1%. Já para o CO₂ a etapa operacional correspondeu 68%, a pré-operacional representou 27% e por fim a pós-operacional 5%.

5 DISCUSSÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As discussões com base nos resultados obtidos no capítulo anterior e as limitações encontradas no decorrer da pesquisa são apresentadas neste capítulo.

5.1 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO

De acordo com resultados apresentados no capítulo anterior, das três etapas avaliadas, a operacional obteve respostas para a EE e o CO₂ mais significativas. Dentro da etapa operacional a fase de operação do edifício contribuiu consideravelmente nos valores encontrados, sendo responsável por 49% da EE e 41% do CO₂. Assim como a etapa de manutenção do edifício que destacou o uso de materiais como a tinta, gesso e a telha cerâmica. A tinta é um dos materiais que possui alto índice de EE e CO₂, e durante a fase de manutenção foi o material mais repostado justificando sua alta contribuição que representou 65% da EE e 60% do CO₂.

Os estudos desenvolvidos por Caldas (2016), Tavares (2006) e Araújo (2018) também tiveram resultados significativos nesta etapa, mostrando conformidade com os dados encontrados.

Em seguida a etapa pré-operacional foi a que mais contribuiu para a EE e o CO₂, destacando a fase de produção dos materiais que representou com 80% da EE e 79% do CO₂. A placa de gesso e a tinta também foram responsáveis nesta etapa por percentuais significativos. Além desses materiais, o concreto empregado na fundação radier e nas calçadas se tornou o material evidente, principalmente nas emissões de CO₂. Foi observado que o painel de OSB também obteve consumos energéticos relevantes, similares ao concreto, porém ao analisar as emissões de CO₂, os resultados foram inferiores aos apresentados pelo concreto. Isso evidencia que a fonte energética utilizada na fabricação do material será responsável pelos níveis de emissões de CO₂. Neste caso, a principal fonte energética para a produção do OSB é a biomassa (restos de madeira), considerada uma fonte renovável. Ao contrário disso, o concreto, segundo o levantamento realizado por Tavares e Bragança (2016), utiliza em grande parte fontes fósseis.

A etapa pós-operacional apresentou resultado inferior se observadas às demais etapas, pois, neste caso, grande parte dos materiais foi encaminhada para

centros de reciclagem e reutilização. O sistema *wood frame* por ser uma construção industrializada, seca e flexível, possibilita a desmontagem da habitação e separação dos componentes empregados. Em bom estado, os materiais podem ser reaproveitados ou reciclados, contribuindo para o conceito baseado na economia circular. Os impactos e a energia utilizada para processar esses materiais para a produção de outros, só serão contabilizados em uma futura ACV.

A partir da análise dos resultados apresentados no capítulo anterior, a TABELA 25 mostra o total encontrado para a EE e CO₂ na habitação.

TABELA 25 – EE E CO₂ TOTAIS E POR METRO QUADRADO PARA A HABITAÇÃO EM WOOD FRAME

Quantitativos finais	Valores	Quantitativos finais	Valores
EE (MJ)	844.053,72	CO ₂ (kg)	43180,15
EE (MJ/m ²)	18.151,59	CO ₂ (kg/m ²)	928,60
EE (GJ/m ²)	18,15	CO ₂ (t/m ²)	0,93

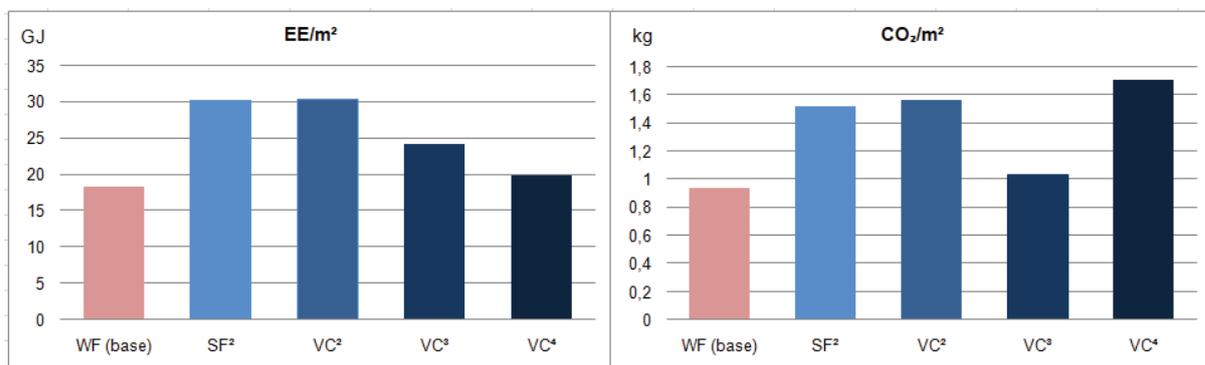
FONTE: A autora (2019).

Como o Brasil não possui estudos que avaliam o ciclo de vida completo do sistema construtivo *wood frame*, e este estudo não avaliou outros sistemas construtivos, foram selecionadas pesquisas nacionais que analisaram o ciclo de vida completo em sistemas construtivos como o *steel frame* e alvenaria convencional.

O estudo desenvolvido por Caldas (2016) apresentou valores médios de 30,26 GJ/m² para o *steel frame* e 30,36 GJ/m² para a alvenaria convencional. Já os valores do CO₂ foram, respectivamente, 1,52 tCO₂/m² e 1,56 tCO₂/m². Tavares (2006) quantificou a ACVE e ACVCO₂ de 5 modelos de edificações com sistema construtivo em alvenaria com vedação em blocos cerâmicos, o modelo 1 obteve o total de 24,17 GJ/m² para a EE e 1,036 tCO₂/m². Araújo (2018) quantificou a EE e o CO₂ de uma habitação em alvenaria convencional com vedação em blocos cerâmicos, utilizado o BIM e simulação termo energética para auxiliar na quantificação das etapas da ACV. Teve como resultado 19,89 GJ/m² e 1,71 tCO₂/m².

O intuito deste levantamento foi ter como base valores de referência, visto que não seria possível uma comparação, onde cada autor adotou diferentes considerações em seus estudos. Porém, ao analisar o GRÁFICO 8, observa-se que os resultados encontrados na presente pesquisa apresentaram valores coerentes com as demais, obtendo valores aproximados por m² com os estudo desenvolvido por Araújo (2018) para a EE, e para o CO₂ com o estudo desenvolvido por Tavares (2006).

GRÁFICO 8 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA A EE E CO₂ POR M² PARA TODO O CICLO DE VIDA EM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS

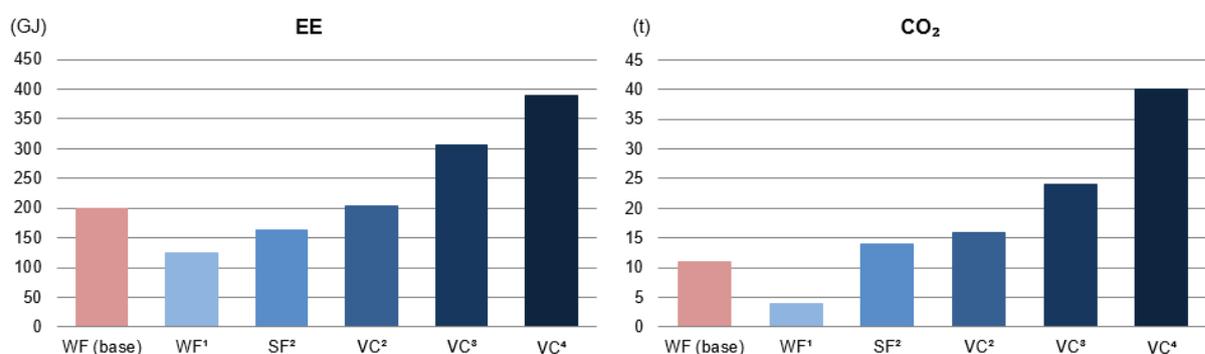


Wood frame (WF); Steel Frame (SF); Vedação Convencional (VC)

FONTE: A autora (2019); ²Caldas (2016); ³Tavares (2006); ⁴Araújo (2018)

Também foram tomados como exemplo os resultados para a etapa pré-operacional. O GRÁFICO 9 apresenta os resultados de EE e CO₂ obtidos neste estudo, e o valores de referências encontrados nos estudos anteriormente citados. Neste gráfico foi incluído outra pesquisa que utilizou o sistema construtivo *wood frame*.

GRÁFICO 9 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA A EE E CO₂ PARA A ETAPA PRÉ-OPERACIONAL



Wood frame (WF); Steel Frame (SF); Vedação Convencional (VC)

Fonte: A autora (2019); ¹Monich (2012); ²Caldas (2016); ³Tavares (2006); ⁴Araújo (2018)

Observam-se discrepâncias nos resultados entre os estudos relacionados ao *wood frame*. Além disso, os resultados encontrados nesta pesquisa para a EE foram superiores aos obtidos por Caldas (2016) para o *steel frame* e semelhante para a vedação convencional. Para entender as diferenças dos valores seriam necessárias avaliações detalhadas sobre cada pesquisa. Contudo, devem ser levados em consideração os valores de EE e CO₂ empregados nos materiais, se foi contabilizado o transporte, desperdício e obra, e vale ressaltar que este trabalho

tomou como base as especificações estipuladas na DaTec 020-C (PBQP-H, 2018), que define placa OSB como fechamento interno e externo da estrutura e especifica duas camadas de placa de gesso no interior da edificação. Como visto anteriormente na análise dos resultados, a placa de gesso foi um dos materiais que obteve percentual significativo para os índices de EE e CO₂ na etapa pré-operacional, possibilitando valores superiores nos resultados finais. Além disso, o estudo desenvolvido por Monich (2012) considerou o carbono estocado nos componentes de madeira presente na edificação, reduzindo aproximadamente 43% do resultado total para o CO₂.

Se considerado o carbono estocado nos produtos duráveis de madeira, 50% destes produtos são carbono, utilizando a relação 3,667 kg de CO₂/kg de carbono é possível estimar o CO₂ fixado (AWC, 2013; CWC, 2013; Oliver *et al*, 2014), TABELA 26.

TABELA 26 – CO₂ FIXADO NOS COMPONENTES DE MADEIRA PRESENTES NA HABITAÇÃO

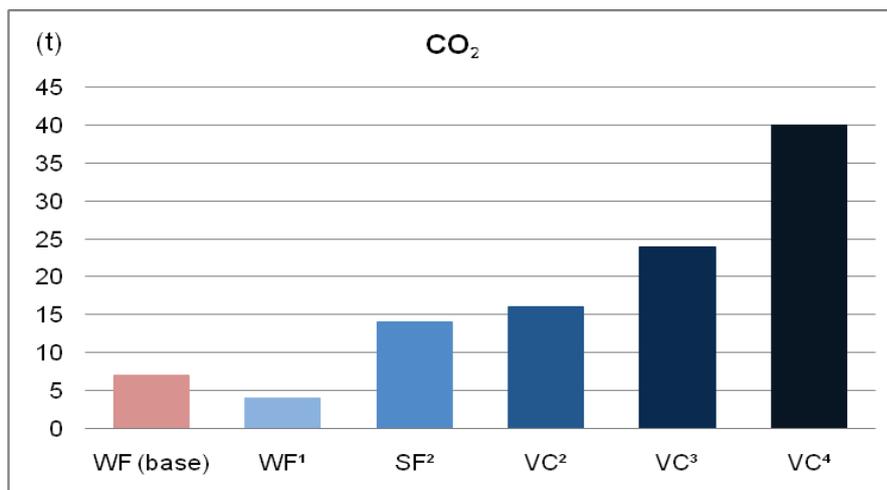
Material	Peso (kg)	CO ₂ fixado (kgCO ₂)
Pinus	1.462,87	2.682,17
OSB	1.195,68	2.192,28
Total	2.658,55	4.874,45

FONTE: A autora (2019)

Neste caso o peso total dos produtos de madeira foi de 2.658,55 kg, no qual 50% destes materiais possuem carbono e foram multiplicados pela relação 3,667 kg de CO₂/kg de carbono, totalizando a fixação de 4.874,45 kgCO₂. Logo, dos 11.839,43 kgCO₂ obtidos na etapa pré-operacional, descontando os 4.874,45 kgCO₂, resultaria em 6.964,98 kgCO₂ ou 6,96 tCO₂, reduzindo aproximadamente 41% kg de CO₂ do resultado total para esta etapa.

Ao analisar os resultados encontrados para o CO₂ no GRÁFICO 8, nota-se que as habitações em *wood frame* obtiveram resultados inferiores aos demais sistemas construtivos na etapa pré-operacional, reduzindo consideravelmente os resultados se adotado o cálculo do carbono estocado, GRÁFICO 10.

GRÁFICO 10 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA CO₂ NA ETAPA PRÉ-OPERACIONAL CONSIDERANDO O CARBONO ESTOCADO



Wood frame (WF); Steel Frame (SF); Vedação Convencional (VC)

FONTE: A autora (2019); ¹Monich (2012); ²Caldas (2016); ³Tavares (2006); ⁴Araújo (2018)

Observa-se neste gráfico que os resultados obtidos no presente estudo foram inferiores aos demais sistemas construtivos. Considerando os resultados totais para a habitação em *wood frame*, os quantitativos encontrados podem variar de acordo com os materiais utilizados para a vedação do quadro estrutural, fundação e cobertura, índices adotados para a EE e CO₂, metragem quadrada, fronteira da ACV, entre outros, impossibilitando uma comparação precisa entre os estudos.

5.2 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS DURANTE A COLETA DE DADOS

O Brasil não possui um banco de dados com informações ambientais sobre os produtos e dispõe de algumas Declarações Ambientais de Produtos (DAP). Para conseguir esses dados são necessários tempo, recursos e acessos às informações das indústrias. Diante disso, a principal limitação na etapa de coleta de dados foi à falta de informações dos impactos ambientais para a realidade brasileira de alguns dos materiais empregados na habitação como: a placa de gesso, placa cimentícia e, principalmente, a membrana hidrófuga. O valor adotado para a membrana hidrófuga não foi do próprio material, e sim do componente principal, o polipropileno. As informações desses materiais tiveram que ser tiradas do banco de dados internacional ICE (HAMMOND; JONES, 2011).

Entretanto, não foi possível o contato com empresas para realizar uma implantação real do gasto energético durante a montagem dos painéis e obra, adotando dados aproximados da literatura.

Para coleta de dados da etapa pós-operacional, as informações do gasto energético para a desconstrução e demolição da habitação também foram aproximadas e retiradas da literatura. Além disso, os quantitativos utilizados para a manutenção do aterro, para os produtos que não possuem potencial de reciclagem e reaproveitamento, foram retirados da literatura, e esses valores são voltados para resíduos sólidos urbanos. Apesar de existir a resolução CONAMA 307, que estabelece diretrizes sobre o destino dos resíduos da construção civil e manuais de gestão de resíduos municipais, esses documentos carecem de informações detalhadas sobre determinados produtos e o melhor destino, principalmente com relação à madeira tratada, onde a resolução CONAMA não diferencia a madeira tratada da não tratada.

A falta de informações dificulta na realização da ACV completa e com dados precisos. O fornecimento de dados dos produtos pelas empresas, como as Declarações Ambientais de Produto, auxiliaria nessas questões. As DAPs têm um papel importante para o desenvolvimento da ACV, pois elas apresentam os impactos ambientais relacionados a um produto em cada etapa do seu ciclo de vida. O Brasil possui norma reguladora para a criação de DAPs, a NBR ISO 14025 (ABNT, 2015), porém, como já mencionado, atualmente existem doze declarações disponíveis.

A certificação ambiental LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), tem como objetivo incentivar, por meio de pontuação, projetos, obras e as operações dos edifícios que atendam às questões sustentáveis. Na sua quarta versão foram incluídos créditos para edifícios que foquem no ciclo de vida dos materiais e utilizem produtos que possuam DAPs (USGBC, 2014). Esta prática, assim como incentivos do governo, seriam premissas para que os fabricantes criem declarações de seus produtos. Assim, os profissionais do ramo poderiam comparar produtos com melhores desempenhos ambientais, além de facilitar a aplicação da ACV na fase de projeto.

Ademais, a criação das declarações de produto auxiliaria os projetistas que adotarem a metodologia BIM junto com a ACV a obterem um LOD mais avançando e com valores precisos para a ACV, pois estariam utilizando dados ambientais específicos para os produtos aplicados na edificação.

5.3 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS NAS FERRAMENTAS ADOTADAS

BIM permite criar e trabalhar com objetos que representarão o edifício, carregando dados com características próprias que correspondem ao material que será empregado no edifício. A partir disso, na ferramenta *Revit* 2018, foi possível criar um modelo padrão com os materiais utilizados na habitação simulada, com informações necessárias para que pudesse ser testada a interoperabilidade entre a ferramenta BIM e de análise energética, auxiliando na ACVE e ACVCO₂.

O desenvolvimento do modelo evoluiu de acordo com os dados inseridos, agregando informações e conseqüentemente gerando resultados mais precisos na ACV. Porém, algumas limitações foram encontradas, principalmente com relação aos detalhamentos construtivos. Dentre elas, inserir nas composições o rejunte nas cerâmicas, indicar as impermeabilizações nas paredes com determinada altura e não foi possível acrescentar nas esquadrias em madeira a aplicação de verniz. Na parede essas informações foram possíveis, porque na montagem das mesmas, foi especificada uma camada de pintura de 0,8 mm, mínimo permitido pela ferramenta. Essa limitação de espessura também ocorreu com a membrana hidrófuga e lona plástica, esses materiais possuem espessuras inferiores a 0,8 mm, logo os quantitativos de materiais gerados pelo *Revit* para esses materiais foram aproximados.

Os parâmetros criados foram importantes para a inserção de informações adicionais ao projeto referente ao ciclo de vida da edificação. Esses parâmetros podem ser criados e compartilhados com outros arquivos, ou mesmo iniciar um projeto utilizando um modelo padrão com todos os parâmetros iniciais e calculados. Uma das vantagens é que se ocorrer modificações no projeto, os volumes dos materiais serão ajustados automaticamente, alterando os resultados finais. Além disso, se um novo material for criado ele será inserido automaticamente na tabela, sendo necessário inserir os dados de entrada deste produto para que o total seja calculado. Caso seja necessário mudar os dados de algum material, basta ir à tabela ou nas propriedades dos materiais e modificar os valores. A tabela criada no *Revit* permitiu analisar os resultados por fase do ciclo de vida e ainda gerar resultados totais para cada etapa. Como possui limitações, a tabela criada foi exportada em formato de texto (.txt) e importada no Excel para criação de gráficos comparativos.

Durante a modelagem da habitação foram concebidos alguns elementos construtivos como a tabeira, acabamento do beiral da cobertura, e rodapé. Porém esses materiais não apareceram na tabela de quantitativos, mesmo criando uma tabela separada, como ocorreu com a armadura da fundação.

A exportação do modelo para o formato *gbXML* foi realizado depois que o projeto estava em um nível avançado de detalhes, fator interessante para o cálculo das demais etapas da ACV no Revit, exceto para a etapa operacional do edifício avaliada por outro *software*, o *OpenStudio*. Durante as primeiras tentativas de exportação ocorreram problemas com a cobertura, paredes e pisos, com presença de camadas de ar, e não reconhecimento dos materiais. O modelo do edifício precisou ser ajustado, com a definição de duas montagens de parede, uma representando a composição das paredes externas e outra para as internas, sem definições de acabamentos como pintura e cerâmica. A cobertura foi modelada de maneira simples, sem a representação detalhada da telha cerâmica e estrutura, assim como o piso. Além da percepção desses detalhes, outros fatores foram importantes, como a definição das propriedades analíticas para portas e janelas, relevante para análises nos softwares de simulação termo energética; ajustes gerais na caixa de exportação, principalmente os de complexidade e ambiente de construção; e a definição dos espaços/ambientes no modelo.

Contudo, ocorreram erros no piso, a fundação apareceu na ferramenta como um elemento de sombreamento e as portas vieram como porta de vidro. Esses pequenos erros foram ajustados no próprio *plug-in* do *Open Studio* no *Sketchup*.

Já no aplicativo do *OpenStudio*, ao exportar o modelo, os materiais vieram com as informações de condutividade térmica, densidade de massa aparente, calor específico e espessura conforme estipulados no *Revit*. Ajustes foram feitos com relação à camada de ar nas paredes e cobertura, já que o Revit não possibilita a inserção dos valores das resistências térmicas das camadas de ar. Além do mais, o *software* só permite colocar dois equipamentos elétricos por ambientes. Neste caso, se inseridos diversos equipamentos, eles precisam se espalhados nos demais ambientes. Tentou-se encontrar uma maneira de salvar os cronogramas dos ocupantes e equipamentos, para que estes pudessem ser inseridos toda vez que fosse realizado um novo teste.

Como mencionado o EnergyPlus funciona como mecanismo de simulação para a ferramenta *OpenStudio*, porém, nem tudo o que o *EnergyPlus* agrega, está

habilitado no *OpenStudio*. Como mencionado anteriormente, o *OpenStudio* é um software aberto e precisa que usuários criem as medidas (*Measure*) para aprimorar a ferramenta. Neste caso, ao utilizar a *measure* para cálculo da ventilação natural, a disponível no software era o método mais simplificado existente no *EnergyPlus*.

Diante dessas discussões, observa-se que as ferramentas possuem limitações para a execução de certos detalhes construtivos, quantificação dos materiais, recursos e interoperabilidade. Mais estudos são necessários para buscar alternativas a essas limitações. Apesar disso, a EE e o CO₂ presentes na habitação foram mensurados e as ferramentas auxiliaram na execução de todo o processo. Sem o uso dessas ferramentas o processo seria feito por etapas, a extração dos quantitativos e cálculo das fases da ACV só seriam possíveis com o projeto finalizado e a cada mudança o cálculo precisaria ser revisto, demandando mais cuidados do projetista. Os dados da ACV inseridos nos objetos BIM permitem que os impactos sejam contabilizados desde o início do projeto.

5.4 FIM DA VIDA DA MADEIRA TRATADA

Esta sessão discute as possibilidades que podem ser adotadas para o destino final da madeira tratada empregada na habitação. Segundo a IBÁ (2018) 6% da área plantada são destinadas ao segmento de painéis e laminados e 4% em produtos sólidos de madeira, partes destinadas à construção civil. Esse percentual ainda é baixo observado o percentual reservado para o papel e a celulose.

O emprego da madeira na fabricação de casas ainda é baixo, se comparado aos demais sistemas construtivos. Segundo o IBGE (2017) apenas 4,6% das habitações no Brasil são em madeira. A expansão do *wood frame* depende de incentivos do governo, da integração entre os agentes da construção civil e o setor madeireiro, propagação de informações aos usuários finais para minimizar o preconceito e profissionais capacitados (SOTSEK; SANTOS, 2018).

A madeira na construção civil é uma alternativa para minimizar impactos ambientais, por se tratar de um material renovável, reciclável, além de possibilitar obras limpas, construções leves e flexíveis. No Brasil, madeiras utilizadas como peças estruturais, necessitam de tratamentos preservativos (ZENID, 2009), fazendo com que aumente sua durabilidade e diminua a pressão sobre as florestas (HOERLLE; BREHM; MACIEL, 2015). Na DATec 020-C (PBQP-H, 2018) as peças

estruturais de madeira serrada e o painel OSB são tratados com preservativos a base de CCA-C, CCB ou CA-B. O emprego desses produtos traz riscos à sociedade, pois estes preservantes carregam metais, sendo necessário um destino adequado no fim da vida da edificação.

Porém, ainda faltam informações de como tratar os resíduos de madeira preservada, pintada ou colada. A resolução do CONAMA 307 não distingue resíduos de madeira comum dos resíduos da madeira contaminada, sendo necessária a classificação desse resíduo devido o perigo que representa ao meio ambiente (HOERLLE; BREHM; MACIEL, 2015).

Lepage (2010) aponta algumas alternativas com potenciais de reusos, reciclagens e fim da vida para a madeira tratada:

- (i) Pirólise da madeira tratada através do processo *Chartherm*. Criado na França, e disponível em escala industrial, esse método converte os resíduos de madeira em pó de carbono, onde os minerais são separados do carbono, podendo ser aplicado na indústria na forma de carvão ativo ou negro de fumo (pneus e elastômeros de forma em geral);
- (ii) estender ao máximo o ciclo de vida de alguns bens que utilizam madeira tratada;
- (iii) reutilização da madeira descartada na fabricação de outros bens, tais como: mobiliário de uso externo, caixas de lixo, de plantas, “decks”, cavaletes, parapeitos, paletes, etc;
- (iv) incorporação da madeira descartada ou suas sobras em materiais compósitos do tipo fibra de madeira + plástico ou fibra de madeira + cimento.

Segundo o gerenciamento de resíduos de madeira industrializada na construção civil (IBÁ, 2018), outra opção para os resíduos de madeira pintada, preservadas e coladas seria a recuperação de energia como substituição de combustível em fornos e caldeiras. Essas fornalhas devem operar com excesso de ar suficiente para combustão de resíduos a temperatura mínima de 750°C e que possuam equipamentos de controle de poluição de ar, além disso, estar em dia com as licenças emitidas pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo).

Na União Europeia esta mesma alternativa é empregada em produtos de madeira que contêm preservantes, tintas e colas. Segundo Kwittinen; Ludvig; Weiss (2013) futuramente a recuperação energética não será considerada reciclagem, pois o princípio básico da gestão de resíduos na Europa é a restauração do material para

uso secundário, caso não seja possível ser utilizado como energia. Aterro para produtos de madeira não é permitido.

Conforme for disseminado o emprego da madeira industrializada nas edificações, será necessário que o governo, agentes da construção civil e o setor madeireiro criem outras possibilidades para a reciclagem deste material, para que esses resíduos possam ser destinados de maneira correta sem que ocorra risco para a população.

O reuso e reciclagem da madeira tratada proporcionará: (i) oportunidades de para o negócio da reciclagem; (ii) diminuição dos aterros industriais; (iii) pressão sobre as florestas (Lepage, 2010). A gestão dos recursos renováveis possibilita o setor madeireiro garantir disponibilidade de longo prazo de produtos sólidos de madeira a preços razoáveis (KWITTINEN; LUDVIG; WEISS, 2013).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou quantificar a EE e o CO₂ presentes em uma habitação de interesse social que utiliza o sistema construtivo *wood frame* ao longo do ciclo de vida de 50 anos, com o emprego do BIM, através do *Revit*, e simulação termo energética, com o *OpenStudio*.

Os resultados para a etapa operacional apontou que a habitação obteve mais desconforto por frio do que por calor, entre 28% e 36% do ano para o frio e 4% para o calor. A transmitância térmica encontrada ficou de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 15575-4 para a cidade de Curitiba. Com os equipamentos estipulados uma residência consumiria cerca de 190 kWh/mês.

A habitação de 46,50m² utilizou 844,05 GJ de energia e emitiu 43,18 tCO₂ para todas as etapas, ao longo do ciclo de vida de 50 anos, correspondendo a 18,15 GJ/m² e 0,93 tCO₂/m². Desse total a etapa operacional representou 75% da EE e 68% do CO₂, a fase pré-operacional 24% da EE e 27% do CO₂ e a etapa pós-operacional 1% da EE e 5% do CO₂. Observa-se que a etapa operacional foi a que mais contribui para os impactos. Neste caso, mesmo que o Brasil utilize hidrelétrica como principal fonte energética, com o aumento do consumo, cresce o uso de termoelétricas, gerando impactos superiores nesta etapa. O emprego de energias renováveis, como solar ou eólica, devem ser considerados para minimizar os efeitos na fase de operação.

Dos materiais empregados os que mais contribuíram para as emissões de CO₂ e EE foram o gesso, tinta e concreto para a fase pré-operacional; e gesso, tintas e telha cerâmica para a manutenção. Embora a habitação contenha em grande parte materiais a base de madeira, foram os materiais secundários que contribuíram com maiores impactos.

A placa de OSB obteve valores semelhantes ao concreto para a EE, porém ao analisar as emissões de CO₂ os impactos gerados pelo concreto foram superiores ao OSB. Neste caso, é relevante apontar o quão importante são as fontes energéticas para a produção do material, o OSB utiliza em sua grande maioria a biomassa proveniente de resíduos de madeira sendo considerada uma fonte renovável.

O Brasil não possui um banco de dados próprio com valores referente à energia embutida e CO₂. Para conseguir esses valores é necessário tempo, recursos

e acesso a informações das indústrias. Por essa razão, os dados dos inventários utilizados foram retirados, em grande parte, da literatura em estudos realizados para a realidade brasileira. Para os dados não encontrados, foi adotado o banco de dados internacional do ICE. Entretanto, a criação de Declarações Ambientais de Produto pelas empresas brasileiras para os produtos utilizados na construção civil facilitaria na execução da ACV, com dados consistentes e informações sobre o fim da vida desses materiais.

Mediante os valores de referência obtidos em outros estudos para alvenaria convencional e *steel frame*, houve a possibilidade de verificar para etapa pré-operacional que a habitação obteve EE superior ao observar uma das pesquisas. Porém, com relação ao CO₂ os resultados foram inferiores, principalmente se considerada a fixação de CO₂ nos materiais a base de madeira. Do total encontrado para as emissões de CO₂ durante todo o ciclo de vida, 4,87 tCO₂ foram descontados devido ao CO₂ armazenado, totalizando 38,31 tCO₂, reduzindo cerca de 11% dos impactos. Neste caso, produtos provenientes de madeira de floresta plantada podem contribuir para ambientes construídos mais sustentáveis e minimizar os impactos gerados pelos processos construtivos atuais.

Por outro lado, a madeira empregada na construção civil no Brasil utiliza tratamento à base de CCA e CCB que podem trazer riscos à saúde humana se não encaminhados no final da vida útil para locais adequados. As diretrizes e gestão de resíduos da construção civil não determinam os tipos de resíduos de madeira diferenciando da natural, tratada, com tintas ou colas e ainda existem poucos estudos que informem as possibilidades de reaproveitamento desses resíduos.

O Brasil possui potencial para a aplicação desse sistema construtivo, dispondo de clima e solo favoráveis para a produtividade de florestas plantadas. Ainda são necessários incentivos do governo, setor madeireiro, agentes da construção civil e informações aos usuários para que se elimine o preconceito e que possa ser evidenciado o potencial desse sistema.

A Modelagem da Informação da Construção apresentou potencial para quantificar as etapas do ciclo de vida. A criação de parâmetros iniciais e de cálculo na ferramenta *Revit* possibilitou que os dados levantados de EE e CO₂ fossem inseridos dentro dos materiais que compõe o sistema, facilitando o cálculo total das etapas pré-operacional (exceto obra), manutenção e pós-operacional. Além disso, com a inserção das propriedades térmicas nos materiais no *Revit* e o uso do formato

gbXML, foi viável a troca de dados entre as ferramentas *Revit* e *OpenStudio* para quantificação da etapa operacional e avaliação do conforto térmico da habitação, sem a necessidade de ter que modelar o edifício, inserir os materiais e propriedades térmicas novamente no *software* de simulação.

Algumas limitações foram apontadas durante a modelagem da edificação, como a falta de alguns recursos para agregar ao modelo detalhes que tornassem os quantitativos da ACV mais precisos, assim como no decorrer da exportação no formato *gbXML* onde vários testes precisaram ser realizados para que a interoperabilidade fosse possível e não ocorresse erros. No *software* de simulação observou-se algumas dificuldades encontradas no *OpenStudio*, como falta de alguns mecanismos ainda não disponíveis no aplicativo. Apesar desses impasses e ajustes realizados o objetivo deste estudo foi concluído, possibilitando quantificar e avaliar a energia consumida e o CO₂ emitido pela habitação em *wood frame*.

Com relação ao nível de desenvolvimento, o modelo alcançou o LOD 300, pois não especificou fabricantes ou linha do produto, visto que os dados empregados para cálculo da ACV foram genéricos. As Declarações Ambientais de Produtos permitiriam que o modelo chegasse ao LOD 350, já que os dados contidos nesses documentos seriam de um produto específico. Neste caso, os objetos criados no *Revit* seriam representados e incluiriam informações de acordo com o que foi estipulado pelo fabricante, trazendo dados mais consistentes para a ACV e um modelo mais desenvolvido.

Este trabalho teve como contribuição a análise do ciclo de vida do berço ao túmulo de uma habitação em *wood frame*, visto que outros trabalhos produzidos empregaram uma das etapas da ACVE e ACVCO₂ ou parte dos componentes da habitação. O uso do BIM favoreceu para a criação de um modelo com os dados da ACV e propriedades térmicas para os materiais utilizados neste estudo, possibilitando a aplicação e aprimoramento em outras pesquisas ou pelos profissionais da construção.

Conclui-se, através dessa pesquisa, que a habitação em *wood frame* gerou menores emissões de CO₂ se comparadas a outros sistemas como concreto e aço. A tecnologia BIM juntamente com a simulação termo energética pôde facilitar no cálculo da ACV. Com a criação do *template* e as informações já contidas nos materiais, os impactos podem ser quantificados enquanto o modelo é criado, diferente do método tradicional da ACV que só é feito quando o projeto é concluído.

Isto possibilita que os profissionais do ramo adotem, ainda na fase de projeto, medidas para quantificar os impactos gerados pelos materiais empregados ao longo do ciclo de vida e durante a operação da habitação.

Com as atualizações dos softwares, aumento do interesse nas questões relacionadas à ACV e BIM, aprimoramento e melhor entendimento dos formatos abertos IFC e gbXML, o processo pode se tornar mais automatizado. Uma vez que ainda há necessidade de softwares intermediários para a visualização da geometria para realizar a simulação termo energética. As ferramentas ainda possuem limitações durante a troca de informações entre diferentes formatos, gerando alguns erros. Apesar das limitações encontradas, o BIM juntamente com a ACV pode facilitar no fluxo de trabalho para as avaliações ambientais e contribuir para que os profissionais da AEC, ainda na fase de projeto, possam adotar soluções que causem menor impacto.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações encontradas neste estudo seguem abaixo algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Esta pesquisa proporcionou a criação de um *template* para edificações em *wood frame*, com todos os parâmetros iniciais e de cálculo, com os dados de EE e CO₂ dos materiais empregados e as propriedades térmicas. Limitada a ferramenta Revit, mas com possibilidades de aplicações no desenvolvimento de outras pesquisas. Link:

https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1I_HcO3aIDKIZE2I5DAvtFYxw8nsA1Ka6

- Aplicação do método proposto comparando os aspectos ambientais encontrados com outros tipos de sistemas construtivos, ou aplicação de outros materiais para fechamento do *frame* estrutural, utilizando o mesmo modelo BIM;

- Aplicação do método proposto em outras ferramentas BIM e de simulação termo energética;

- Avaliação ambiental de outros aspectos do sistema estudado como consumo da água, avaliação dos demais impactos, entre outros;

- Aplicação do método proposto em outros modelos de habitação, visto que a Datec 020-C também possibilita a construção de edifícios em *wood frame* com até 4 pavimentos.

REFERÊNCIAS

- ABD, Associação Brasileira de Drywall. **Resíduos de gesso na construção civil: Coleta, armazenagem e reciclagem.** 2012. Disponível em: <https://drywall.org.br/>. Acesso em: novembro de 2018.
- ABDI, Agência Brasileira de Desenvolvimento da Indústria. **Manual da construção industrializada: Conceitos e etapas - Volume 1: Estrutura e vedação.** Brasília: ABDI, 2015.
- ABDI, Agência Brasileira de Desenvolvimento da Indústria. **Guia 1 - Processo de Projeto BIM.** Brasília: ABDI, 2017.
- ABRECON, Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Tabela ABRECON.** Disponível em: <https://abrecon.org.br/>. Acesso em: novembro de 2018.
- ACR, Associação Catarinense de Empresas Florestais. **Anuário estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina 2016 - ano base 2015.** Lages: ACR, 2016.
- ADALBERTH, K. Energy use during Life Cycle of Single-Unit Dwellings: Examples. **Buildings and Environmental**, v. 32, n. 4, p. 321-329, 1997.
- AIA, The American Institute of Architects. **A Guide to Life Cycle Assessment of Buildings.** Washington: AIA, 2010.
- 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.
- ALWAN, Z.; JONES, P. The importance of embodied energy in carbon footprint assessment. **Structural Survey**, v. 32, n. 1, p. 49-60, 2014.
- AWC, American Wood Council; CWC, Canadian Wood Council. **Environmental Product Declaration: North American Oriented Strand Board.** UL Environment, 2013.
- ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 2, 76-111, 2009.
- ANTÓN, L. A.; DÍAZ, J. Integration of life cycle assessment in a BIM environment. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 26-32, 2014.
- ARAÚJO, A. M. F. **Avaliação de ciclo de vida em edificações a partir de modelagem BIM e simulação termo energética: aplicação utilizando Revit e Energyplus.** 2018. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações parte 1 - Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040** - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1** - Edificações habitacionais - Desempenho parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4** - Edificações habitacionais - Desempenho parte 4: Sistema de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14025** - Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ATMACA, A; ATMACA, N. Life cycle energy (LCA) and carbon dioxide emissions (LCCO₂A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 417-431, 2015.

AUTODESK. **Sobre espaços**. Disponível em: <http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/PTB/?guid=GUID-B876A6F6-4091-40CA-ADCD-AA5D0EFC5EE3>. Acesso em: outubro de 2018.

BARROS, N. N.; RUSCHEL, R. C.; SILVA, V. G. Impacto da adoção de BIM na avaliação de energia incorporada do ciclo de vida de edificações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2015, Viçosa-MG. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC.

BIGLADDER SOFTWARE. **Infiltration/Ventilation**. Disponível em: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-048.html#ventilation-by-wind-and-stack-with-open-area>. Acesso em: setembro de 2018.

BIMForum. **Level of development specification guide** - Version: 2017. BIMForum, 2017.

BORGES, J. G. *et al.* . Uso do BIM no processo de quantificação de emissões de CO₂ no projeto de edificações: estudo de caso para o software *DesignBuilder*. **REEC**, v. 14, n. 1, p. 142-156, 2018.

BRACKNEY, L. *et al.* **Building Energy Modeling with Open Studio: A Practical Guide for Students and Professionals**. Suíça: Springer, 2018.

BUENO, C.; FABRICIO, M. M. Aplicação da Modelagem de Informação da Construção (BIM) para a realização de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida de edifícios. **Pós**, v. 23, n. 40, p. 96-121, 2016.

BYNUM, P.; ISSA, R. R. A.; OLBINA, S. Building Information Modeling in Support of Sustainable Design and Construction. **Journal of Construction, Engineering and Management**, v. 139, p. 24-34, 2013.

CABEZA, L. F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394-416, 2014.

CALDAS, L. R. *et al.* **Diagnostico da produção científica relacionada a aplicação do BIM a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. CILAMCE 2015, Rio de Janeiro, 2015.

CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e Emissões de CO₂ de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing**. 2016. 174 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

CARMINATTI JUNIOR, R. **Análise do Ciclo de Vida Energético de projeto de habitação de interesse social concebido em Light Steel Framing**. 2012. 164 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Fundamentos BIM - Parte 1: Implementação do BIM para construtora e incorporadoras**. Brasília: CBIC, 2016.

CHAU, C. K. LEUNG, T. M; NG, W. Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p. 395-413, 2015.

CMHC, Canadian Mortgage and Housing Corporation. **Canadian wood-frame house construction**. 2014.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307** - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente, 2002.

CPA, Construction Products Association. **A Guide to understanding the embodied impacts of construction products**. 2012.

DAWOOD, N. N; IQBAL, N. Building information modelling (BIM): A visual & whole life cycle approach. In: 10th international conference on construction applications of virtual reality - CONVR2010. **Proceedings...** Sendai, Japan: 2010. p. 7-14.

DEUTSCH, R. **BIM and Integrated Design: strategies for architecture practice**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2011.

DIXIT, M. K. *et al.* Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1238-1247, 2010.

DUPONT. **Environmental Product Declaration: TYVEK® mechanically fastened air and water barrier system Dupont**. 2017. Disponível em: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/construction->

materials/building-envelope-systems/documents/102-1_DuPont_EPD_Tyvek_Mechanically-Fastened.pdf. Acesso em: outubro de 2018.

DUPUIS, M. *et al.* Method to enable LCA analysis through each level of development of a BIM model. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 857-863, 2017.

EDWARDS, B. **Guía básica de la sostenibilidad**: segunda edición revisada y ampliada. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2011.

EEA, European Environment Agency. **Life Cycle Assessment**: A guide to approaches, experiences and information sources. United Kingdom, 1997.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017a.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017b.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

ESPÍNDOLA, L. R. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade**. 2010. 173 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ESPÍNDOLA, L. R.; INO, A. Diretrizes para a produção de componentes do sistema construtivo *wood frame* no Brasil visando a sustentabilidade. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. **Anais...**Portugal: 2014.

ESPÍNDOLA, L. R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. 2017. 331 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

EASTMAN, C. *et al.* **Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Tradução: Ayres Filho *et al.*, Revisão técnica: Santos, E. T., Porto Alegre, Brasil, 2014.

FAY, R.; TREOLAR, G; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis: a case study. **Building Research & Information**, v. 28 (1), p. 31-41, 2000.

FERRAZ, M.; MORAIS, R. O conceito BIM e a especificação IFC na indústria da construção e em particular na indústria de pré-fabricação em betão. In: Encontro Nacional Betão Estrutural - BE 2012. **Anais...**Portugal: 2012.

FERRO, F. S. *et al.* **Avaliação do Ciclo de Vida de Painéis Compósitos à Base de Madeira**: Estudo de Caso em Painéis OSB. 5th International Workshop - Advances in Cleaner Production— Academic Work. São Paulo, 2015.

FERRO, F. S. *et al.* Environmental aspects of oriented strand boards production: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710-719, 2018.

FLORIO, W. Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura. In: III Encontro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção Civil – TIC 2007. **Anais...**Porto Alegre: 2007

FU, F. *et al.* Development of carbon emissions calculations system for optimizing building plan based on the LCA framework. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p. 1-13, 2014.

GARCIA, K. R. P. **Potencial de reducción de las emisiones de CO y la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera.** 2014. 422 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Engenharia) - Universidade Politécnica da Cataluña e Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014.

GOEDKOOP, M. *et al.* **Introduction to LCA with SimaPro.** Netherlands: PRé, 2016.

GUINÉE, J. B. *et al.* Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 90-96, 2011.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. **Embodied energy and CO₂ emission of wood- and concrete-framed buildings in Sweden.** 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Italy, 2004.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. **Building and Environment**, v. 41, p. 940-951, 2005.

GUSTAVSSON, L.; PINGOUD, K.; SATHRE, R. Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 667-691, 2006.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy: Embodied energy and carbon - The ICE database – version 2.0.** Universidade de Bath, 2011. Disponível em: www.carbonsolutions.com/resources/ice%20v2.0%20-%20jan%202011.xls. Acesso em: agosto de 2018.

HOERLLE, C. R.; BREHM, F. A; MACIEL, E. F. **Reciclagem da madeira tratada com arseniato de cobre cromatado – CCA.** 4º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFsul. Sapucaia do Sul-RS, 2015.

HOLLBERG, A; RUTH, J. LCA in architectural design: a parametric approach. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 31, n. 7, p. 943-960, 2016.

HOLZER, D. BIM's Seven Deadly Sins. **International journal of architectural computing**, v.9, n.4, p. 463-480, 2011.

HUNT, R. G; FRANKLIN, W. E. LCA: How it came about - personal reflections on the Origin and Development of LCA in the USA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n.1, p. 4-7, 1996.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2017**. São Paulo: IBÁ, 2017.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Gerenciamento de resíduos da madeira industrializada na construção civil**. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes>. Acesso em: fevereiro de 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Características gerais dos domicílios dos moradores**. Programa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/trabalho/17270-pnad-continua.html?edicao=20915&t=resultados>. Acesso em: fevereiro de 2019.

IDDON, C. R.; FIRTH, S. K. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 479-488, 2013.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª edição**. São José dos Campos: INPE, 2017.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva, Switzerland, 2006.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. São Paulo: IPT: SVMA: SindusCon - SP, 2003.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acesso em: setembro de 2018.

JALAEI, F.; JRADE, A. An Automated BIM Model to Conceptually Design, Analyze, Simulate, and Assess Sustainable Building Projects. **Journal of Construction Engineering**, p. 1-24, 2014.

KALAHCIOGLU, T.; DANG, J.; TOKLU, C. A 3D analyzer for BIM-enabled Life Cycle Assessment of the whole process of construction. **HVAC&R Research**, v. 18, p. 283-293, 2012.

KIM, M.; KIRBY, L.; KRYGIEL, E. **Mastering Autodesk Revit 2017 for Architecture**. Indianapolis: John Wiley and Sons Inc, 2017.

KWITTINEN, M.; LUDVIG, A.; WEISS, G. **Wood in carbon efficient construction: Tools, methods and applications**. ECO2, 2013.

LAMBERTS, R; DUTRA, L.; PEREIRA, F. R. O. **Eficiência energética na arquitetura**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2014.

LEE, S. *et al.* Green Template for Life Cycle Assessment of Buildings Based on Building Information Modeling: Focus on Embodied Environmental Impact. **Sustainability**, v. 7, p. 16498-16512, 2015.

LEITE, J. C. P. S.; LAHR, F. A. R. Diretrizes básicas para projeto em *Wood Frame*. **Construindo**, v. 7, n. 2, 2015.

LEPAGE, E. **Destinação da madeira tratada com CCA**: Informativo técnico. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.montana.com.br/download/984/file/Destina%25C3%25A7%25C3%25A3o+Final+de+Madeira+Tratada+com+CCA.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2019.

LIPPKE, B. et al. Characterizing the importance of carbon stored in wood products. **Wood and Fiber Science**, v. 46, p. 5-14, 2010.

LP Brasil. **Informações técnica**: Membrana barreira de água. 2010. Disponível em: http://www.aecweb.com.br/prod/e/lp-membrana-barreira-de-agua_16148_23626. Acesso em: outubro de 2018.

MACHADO, F. A.; MOREIRA, L. C. S. O uso de ferramentas BIM na otimização do método de avaliação do ciclo de vida da edificação. In: VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção. **Anais...Recife**: 2015.

MACHADO, F. A.; SIMÕES, C. C.; MOREIRA, L. C. S. Potencialidade da integração do BIM ao método de Avaliação do Ciclo de Vida das edificações. In: SIBRAGEC ELAGEC. **Anais...São Carlos**: 2015. p. 527-535.

MAH, D. *et al.* House construction CO₂ footprint quantification: a BIM approach. **Construction Innovation**, v. 11, n. 2, p. 161-178, 2010.

MENDES, M. R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 1, p. 47-63, 2004.

MENEZES, G. L. B. B. Breve histórico de implantação da plataforma BIM. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 18, n. 22, p. 153-171, 2011.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em *wood frame* para casa de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológica**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, 2010.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema *wood frame* no estado do Paraná**. 2012. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MONTEIRO, A.; MARTINS, J. P. Building Information Modeling (BIM): teoria e aplicação. In: International Conference on Engineering UBI2011. **Anais...Portugal**: 2011.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira** – 4^a edição. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2013.

MOTAWA, I.; CARTER, K. Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 74, p. 419-428, 2013.

NAJJAR, M. *et al.* Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. **Journal of Building Engineering**, v. 14, p. 115-126, 2017.

NIBS, National Institute of Building Sciences. **National Building Information Modeling Standard (NBIMS) Version 1.0** – Part 1: Overview, Principles, and Methodology. Washington, DC: NIBS, 2007.

NREL, National Renewable Energy Laboratory. **U. S. Life Cycle Inventory Database**: Slack wax, at plant, US SE. Disponível em: <http://www.nrel.gov/lci/>. Acesso em: novembro de 2018.

O'BRIEN, M. J. Hybrids on the Way to the Western Platform Frame: Two Structures in Western Virginia. **Preservation Education and Research**, v.3, p. 37-52, 2010.

OLIVEIRA, E. **Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e o CO₂ embutidos no sistema construtivo wood frame**. 2016. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVER, C. D. et al. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 33, n. 3, p. 248-275, 2014.

PAWELZIK, P. *et al.* Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials: Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 211-228, 2013.

PBE Edifica. **Manual para aplicação do RTQ-R** – Residencial. 2012.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **Diretriz SINAT nº 005** – Revisão 2 – Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”. Brasília: Ministério das Cidades, 2017.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **DATec nº 020-C** – Sistema Construtivo em peças leves de madeira serrada – TECVERDE: Tipo light wood frame. Brasília: Ministério das Cidades, 2018a.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **Programa Setoriais da Qualidade**: Sistema de Qualificação de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC). Brasília: Ministério das Cidades. Disponível em: [TTP://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psqqs.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psqqs.php). Acesso em: dezembro de 2018b.

PEDROSO, G. M. **Avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. 2015. 228 p. Tese (Doutor em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

PENG, C. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 453-465, 2016.

PEREIRA, A. F. **Madeiras Brasileiras**: Guia de combinação e substituição. São Paulo: Blucher, 2013.

PEREIRA, H. A. C. *et al.* **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus**: Versão 8.0. Florianópolis: LABeee, 2013.

PLASTICS EUROPE. **Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers**: Toluene Diisocyanate (TDI) and Methylenediphenyl Diisocyanate (MDI). ISOPA, 2011. Disponível em: <http://www.isopa.org/media/2609/eco-profile-mdi-tdi.pdf>. Acesso em: novembro de 2018.

PLASTICS EUROPE. **Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers**: Polypropylene (PP) Plastic Europe, 2013. Disponível em: [TTP ://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles](http://www.plasticseurope.org/it/resources/eco-profiles). Acesso em: novembro de 2018.

PROCEL; ELETROBRÁS. **Tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético**. 2015. Disponível em: < [TTP://www.industriahoje.com.br/wp-content/uploads/downloads/2015/01/Tabela-Consumo-Equipamentos-Procet-Eletobras.pdf](http://www.industriahoje.com.br/wp-content/uploads/downloads/2015/01/Tabela-Consumo-Equipamentos-Procet-Eletobras.pdf)> Acesso em: junho de 2018.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico – 2**. T. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAMESH, T. *et al.* Life cycle energy analysis of buildings: A overview. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1592-1600, 2010.

ROBSON, C. **Real Word Research: A resource for social scientists and practitioner-researchers – 2**. Ed. Blackwell Publishing, 2002.

SAADE M. R. M. *et al.* . **A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e a etapa de avaliação de impactos ambientais**: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. *Natureza on line* 12 (3), p. 109-116, 2014.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbono nas florestas plantadas brasileiras: 1990-2016. **Biofix Scientific Journal**, v.3, n.1, p.152-160, 2018.

SANTOS, M. F. N. *et al.* Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **GEPROS**, v. 6, n. 2, p. 57-73, 2010.

SANTOS, R. *et al.* Integração de BIM com Avaliação do Ciclo de Vida: análise do estado da arte e das ferramentas disponíveis. In: Congresso de Inovação na Construção Sustentável. **Anais...Lisboa**: 2016.

SATHRE, R.; GONZÁLES-GARCÍA, S. Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. **Eco-efficient construction and building materials**, p. 311-337, 2014.

SCHELLER, C. et al. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: LabEEE (UFSC), 2015.

SCHULTZ, J. et al. A benchmark study of BIM-based whole-building life-cycle assessment tools and processes. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 7, p. 219-229, 2016.

SHIN, Y.; CHO, K. BIM Application to Select Appropriate Design Alternative with Consideration of LCA and LCCA. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-14, 2015.

SMMA, Secretaria Municipal do Meio Ambiente. **Manual de gerenciamento de resíduos na construção civil**. Curitiba, 2015.

SILVA, L. P. **Análise do Ciclo de Vida Energético de habitações de interesse social**. 2012. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOARES, S. B.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **Avaliação do Ciclo de Vida no contexto da construção civil**: Capítulo 4. Porto Alegre: Coletânea Habitare, v. 7, p. 96-127, 2006.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.8, n. 3, p. 309-326, jul./set. 2018.

SOUTO, L. G.; BUENO, L. S.; SILVA, P. D. Técnicas construtivas utilizando madeira e sua evolução histórica. **Ignis**, v.5, n.2, p. 62-76, 2016.

SOUZA, A. F. P. **A sustentabilidade no uso da madeira de floresta plantada na construção civil**. 2010. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SOUZA, R. V. **Aspectos ambientais e de custo de produção do sistema plataforma em madeira para habitação de interesse social**: estudo de caso em Florianópolis 2013. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. **Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil**. ENCAC – ENLAC Maceió, p. 2037-2045, 2005

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise de Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. **Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras**. SBE16 Brazil e Portugal, p. 927-936, 2016.

TCPO, Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos. – 13ª . T. – São Paulo: Pini, 2010.

TECVERDE. **Panorama do sistema construtivo Tecverde**. Curitiba, 2016. Disponível em: <http://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Panorama-do-Sistema-Construtivo-Tecverde.pdf>. Acesso em: março de 2019.

TREOLAR, G. J. Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables: Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method. **Economic Systems Research**, v. 9, n. 4, p. 375-391, 1997.

TRUSTY, W. HORST, S. LCA tools around the word. **Building Design and Construction**, v. 5, p. 12-16, 2005.

UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**: Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em: agosto de 2018.

USGBC, U. S. Green Building Council. **LEED v4 para projeto e construção de edifícios (building design and construction)**. 2014. Disponível em: <http://www.gbcbrazil.org.br/sobre-certificado.php>. Acesso em: fevereiro de 2019.

VELLOSO, J. G. **Diretrizes para construções em madeira no sistema plataforma**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

WON; J.; CHENG, J. C. P. 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.

YANG, X. *et al.* Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 719-743, 2018.

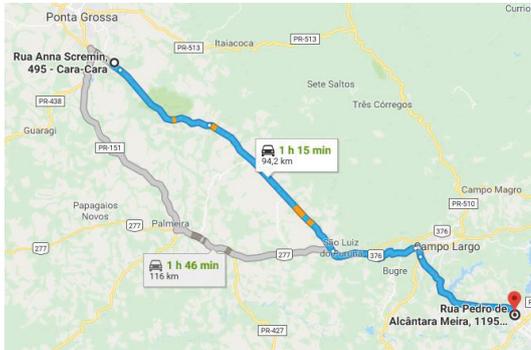
YOU, F. *et al.* Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China: A case study of residential buildings. **Ecological Complexity**, v. 8, p. 201-212, 2011.

YUNG, P.; WANG, X. A 6D CAD Model for the Automatic Assessment of Building Sustainability. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 2014.

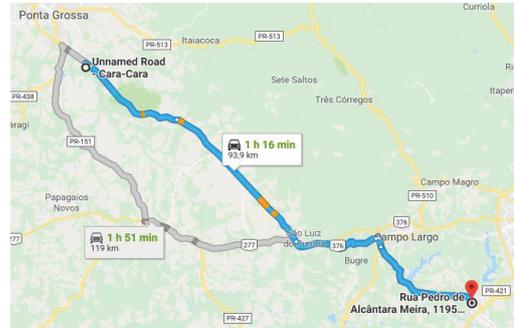
ZENID, J. G. **Madeira**: Uso sustentável na construção civil – 2^a ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009.

APÊNDICE 1 – DISTÂNCIA TRANSPORTE (FÁBRICA – FÁBRICA WOOD FRAME / FÁBRICA - CANTEIRO DE OBRAS)

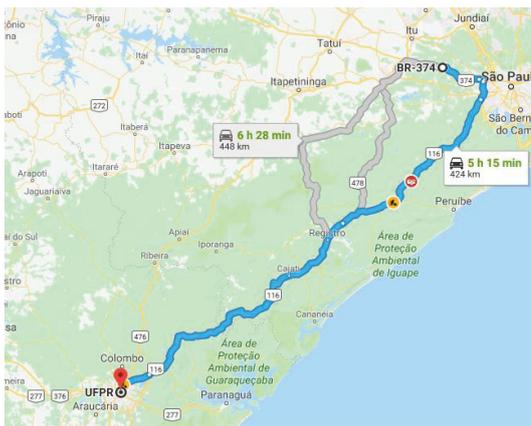
Madeira maciça (Pinus)



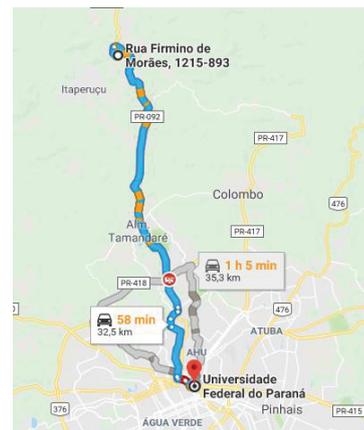
OSB e Membrana hidrófuga



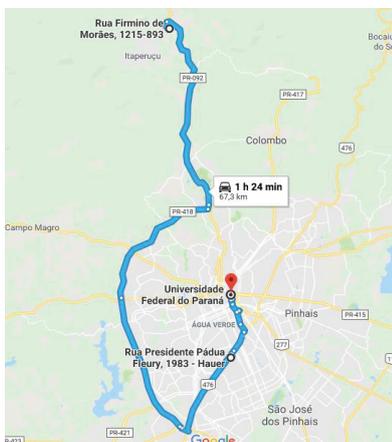
Aço



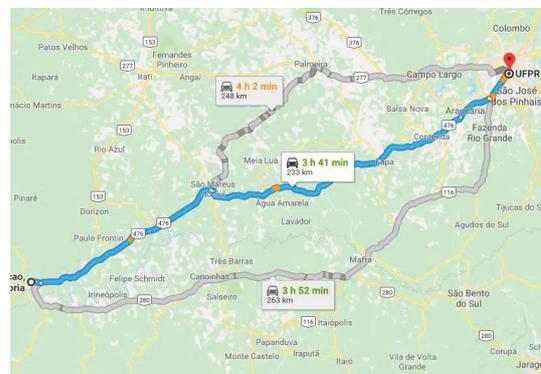
Argamassa e Brita



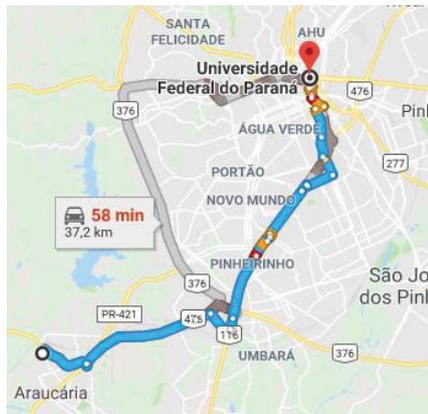
Concreto



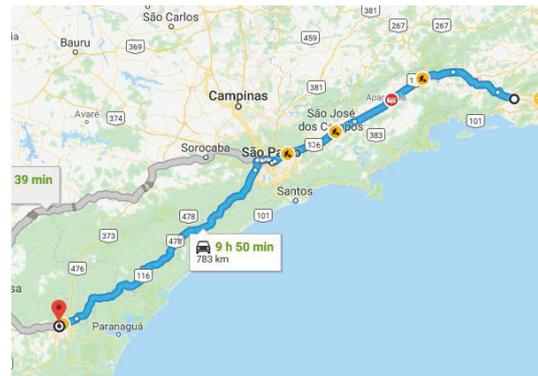
Esquadrias



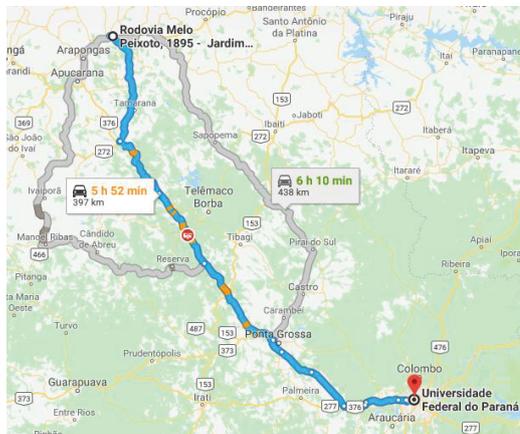
Frame estrutural (Pinus+OSB+Membrana)



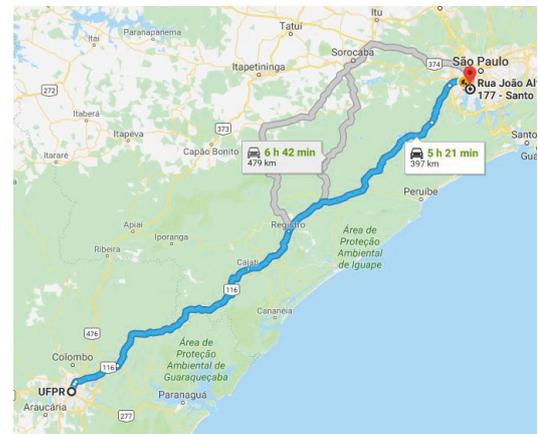
Gesso e placa cimentícia



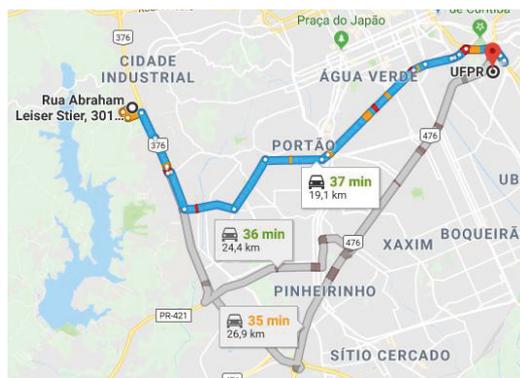
Impermeabilizante



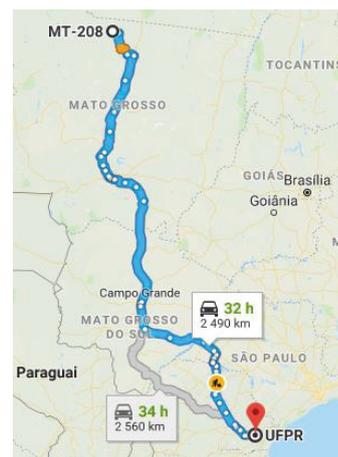
Lã de Vidro



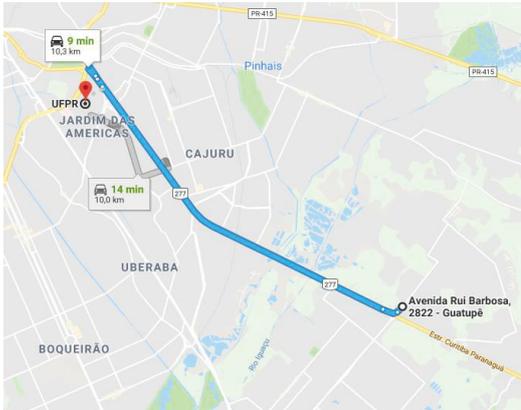
Lona plástica



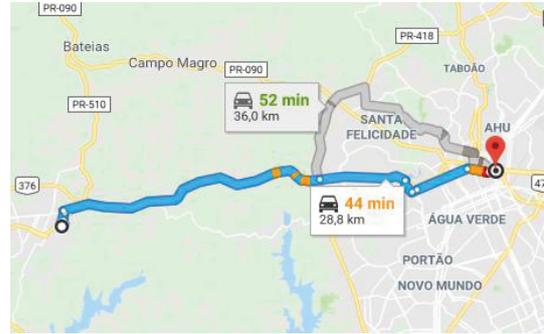
Madeira nativa



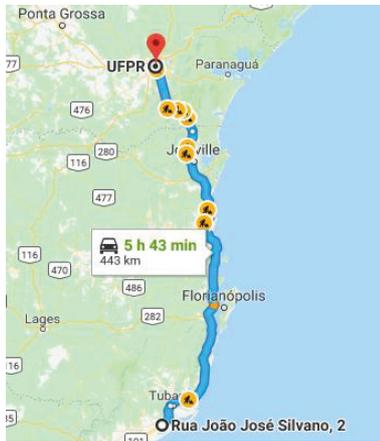
PVC (forro externo)



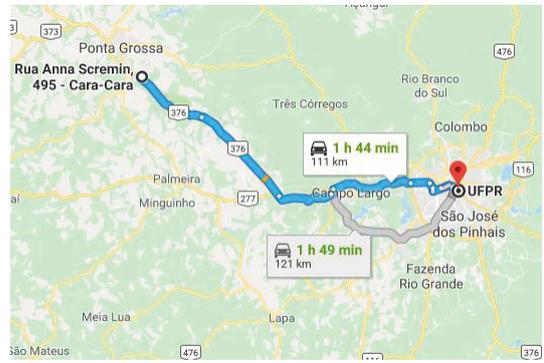
Revestimento cerâmico



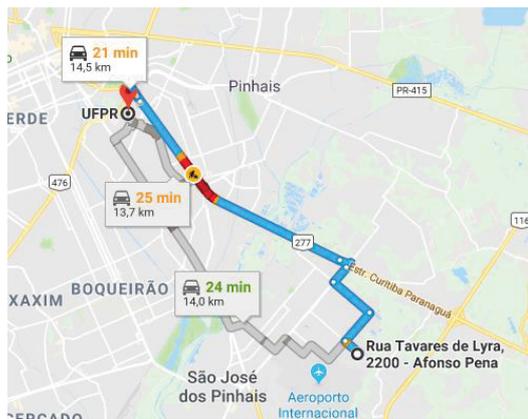
Telha cerâmica



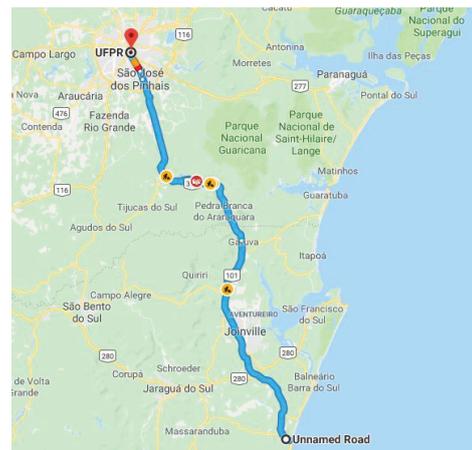
Treliça cobertura (Pinus)



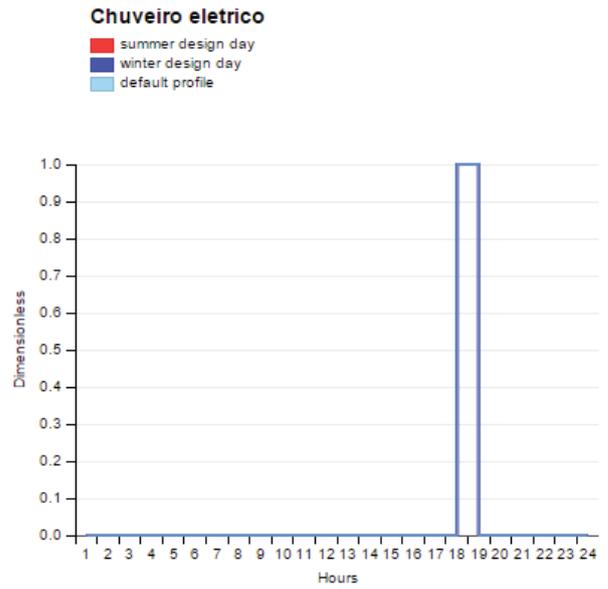
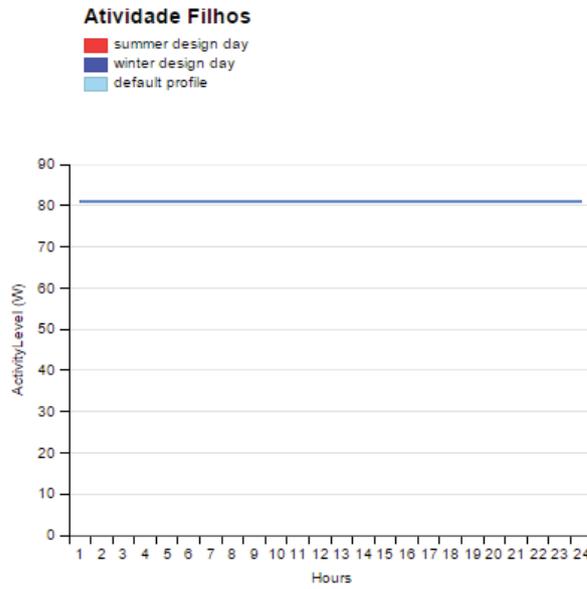
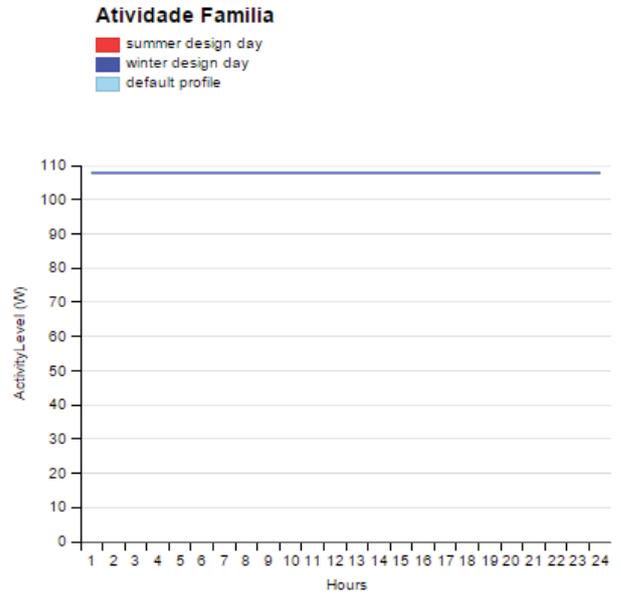
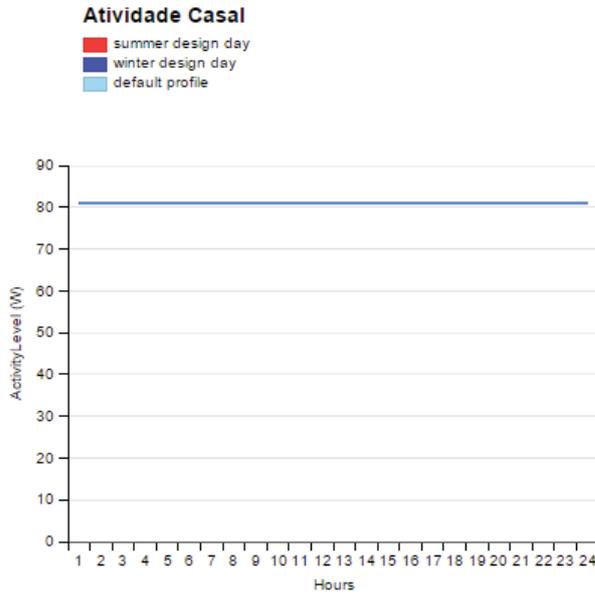
Tintas



Vidro

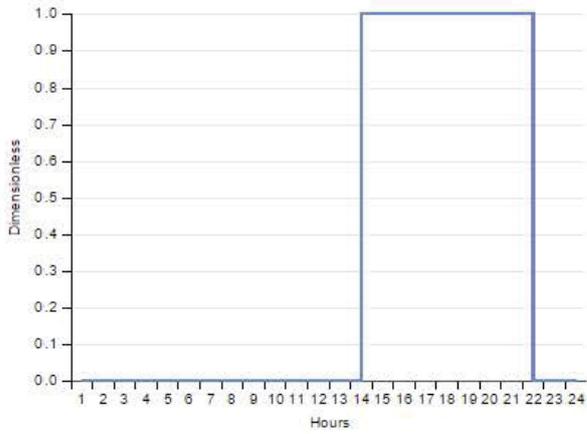


APÊNDICE 3 – CRONOGRAMAS CRIADOS PARA SIMULAÇÃO NO OPENSTUDIO



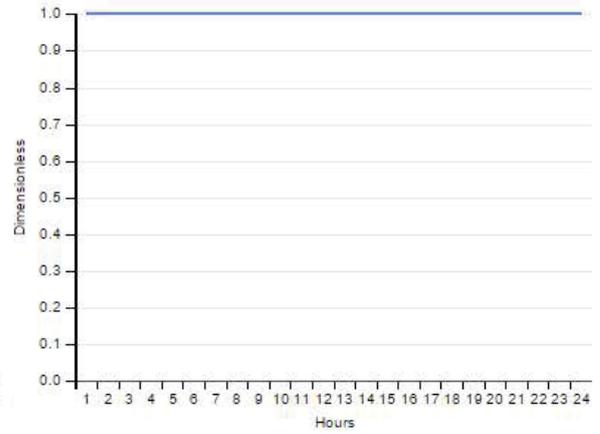
Equipamentos filhos

- summer design day
- winter design day
- default profile



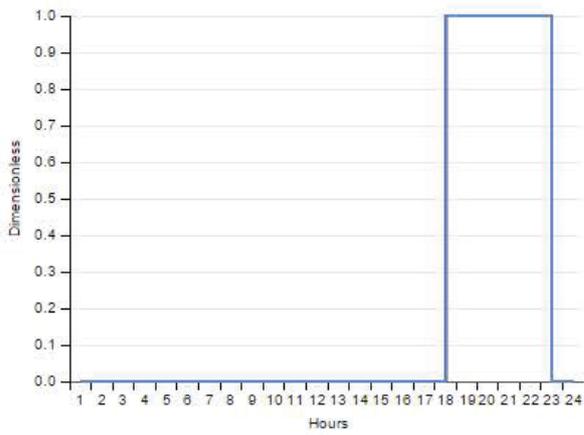
Equipamentos ligados 24h

- summer design day
- winter design day
- default profile



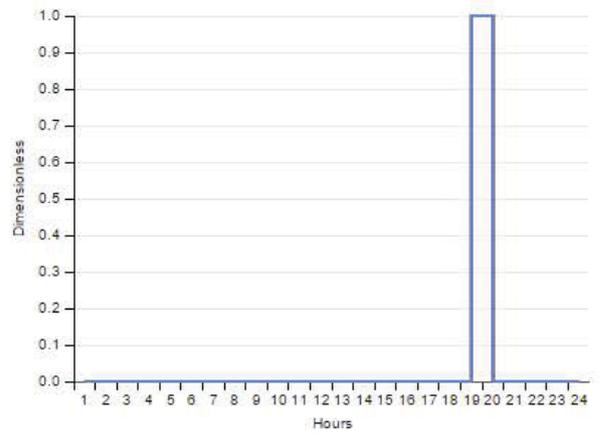
Equipamentos pais

- summer design day
- winter design day
- default profile



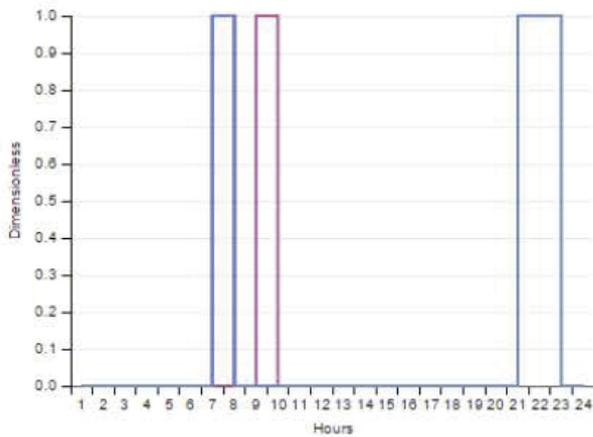
Fogao

- summer design day
- winter design day
- default profile



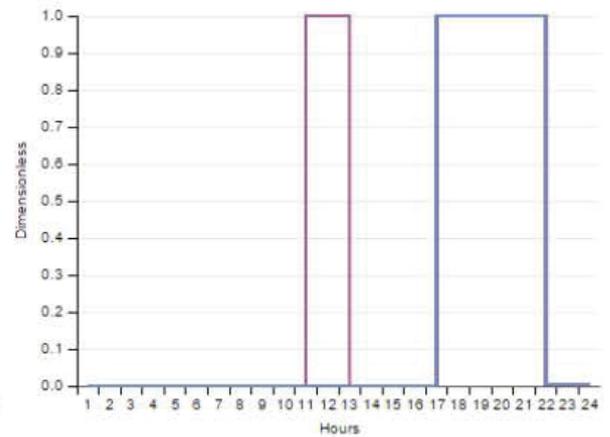
Iluminacao quarto

- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - (SunSat) 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile



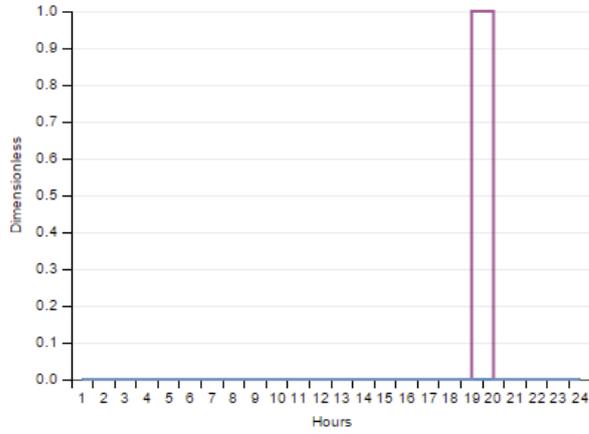
Iluminacao sala

- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - (SunSat) 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile



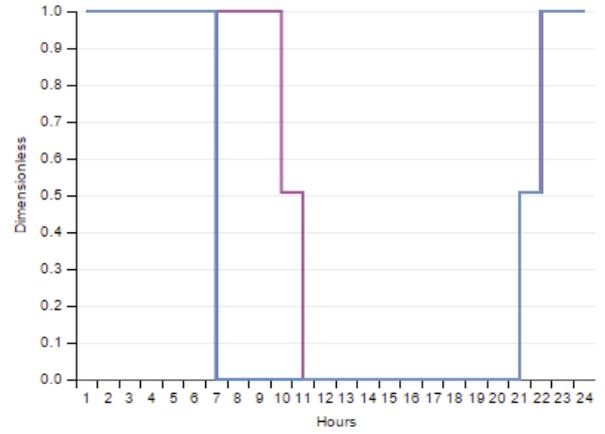
Lavadora de roupas

- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - () 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile



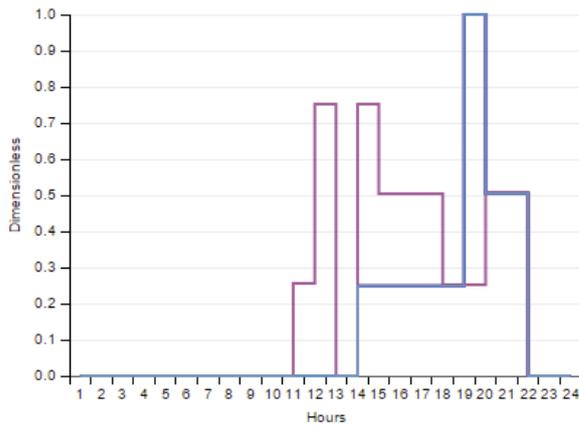
Ocupacao casal

- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - (SunSat) 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile



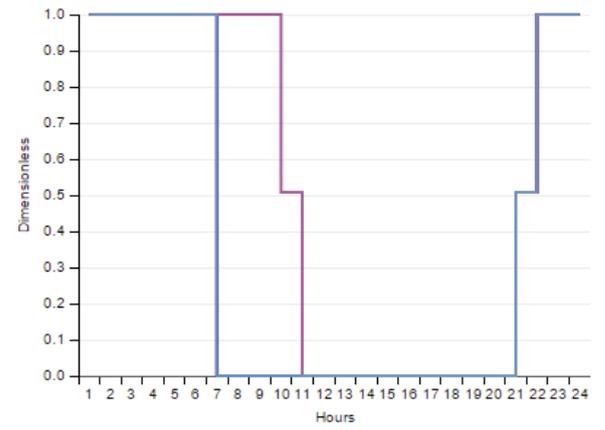
Ocupacao familia

- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - (SunSat) 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile

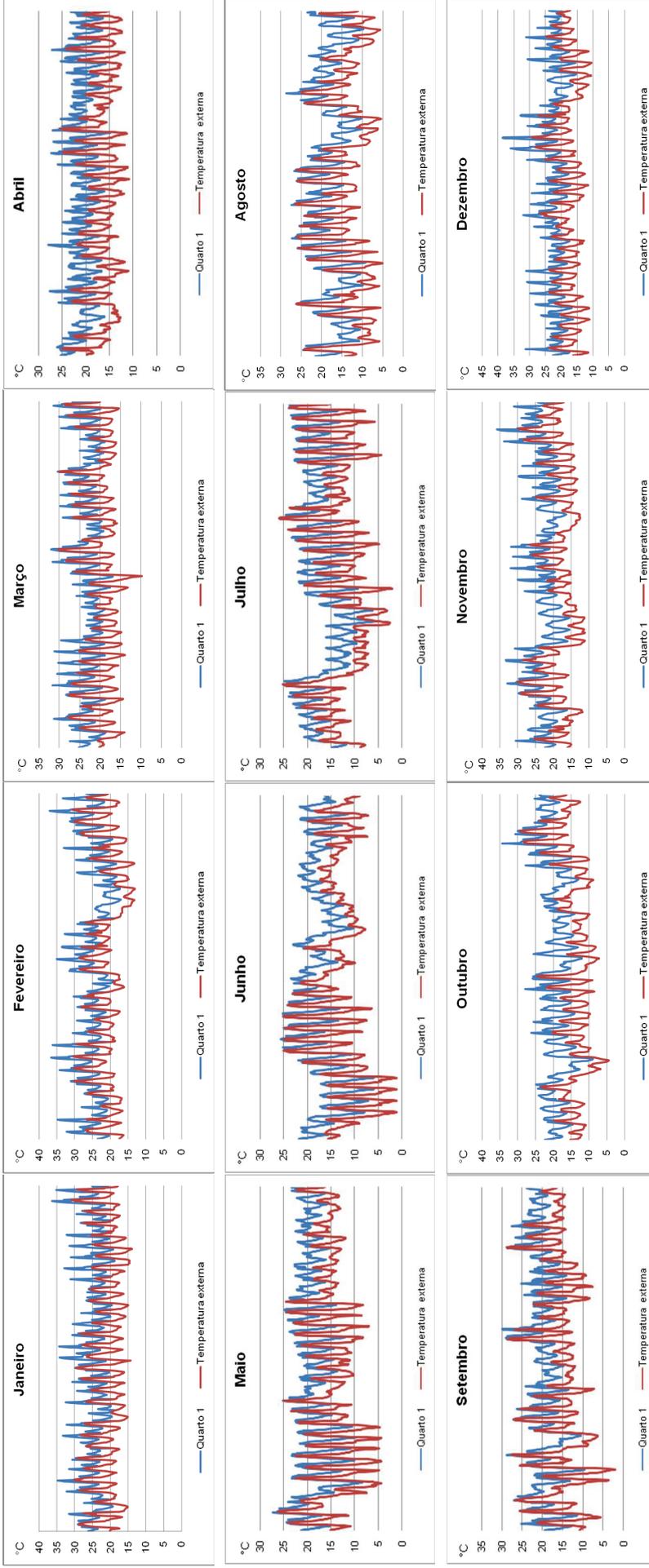


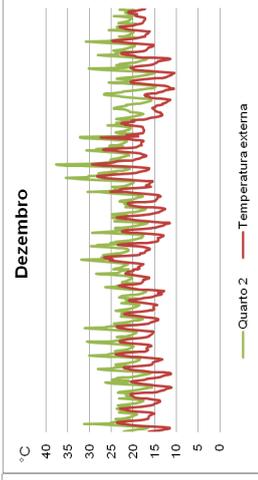
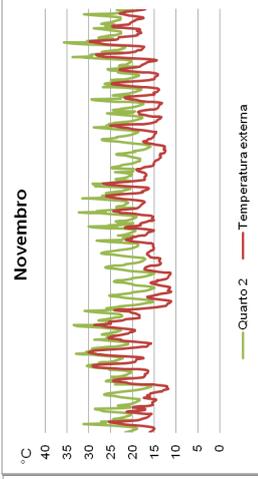
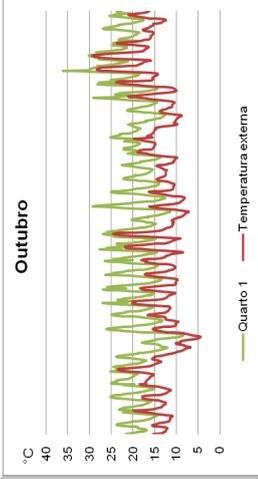
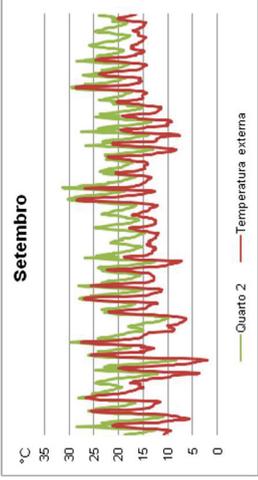
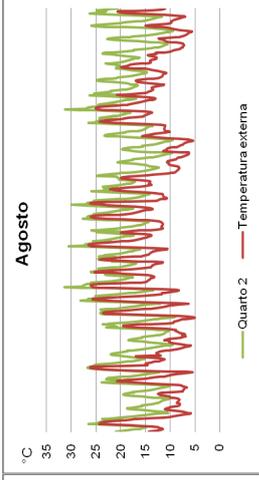
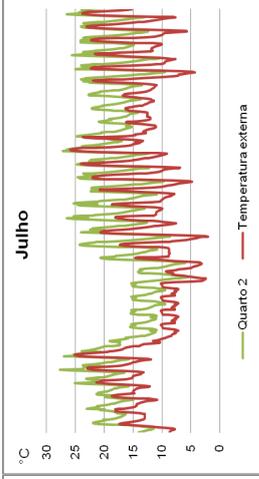
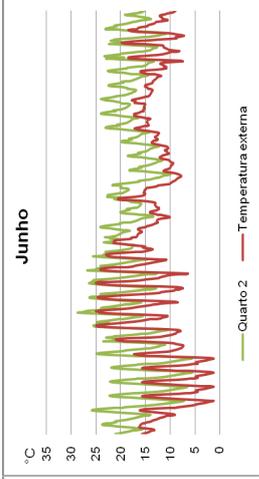
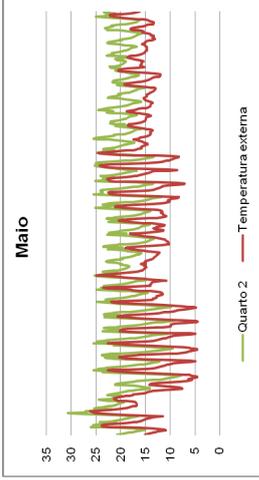
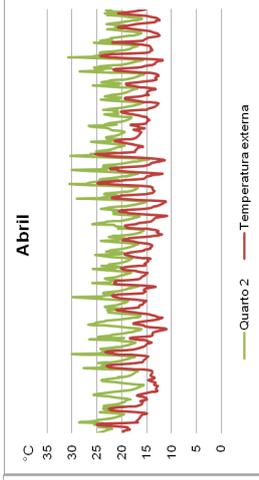
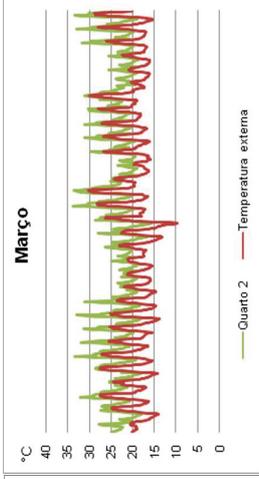
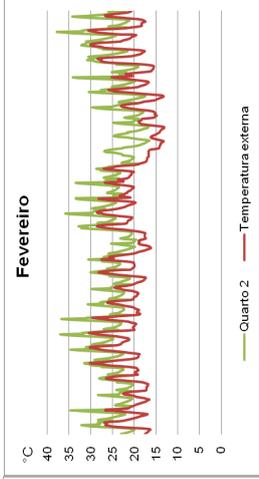
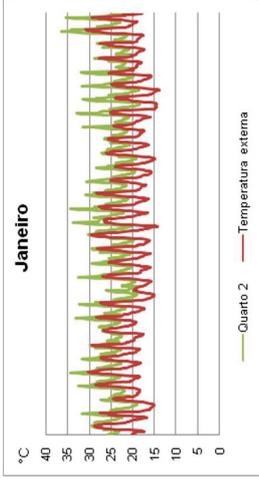
Ocupacao filhos

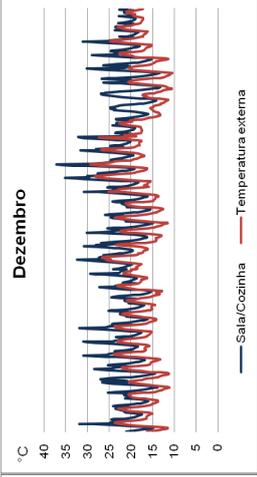
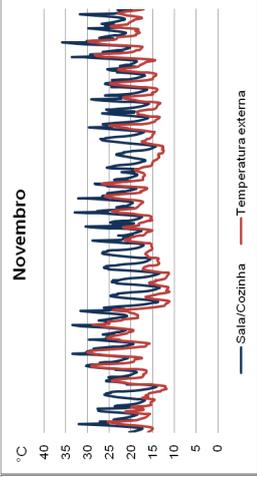
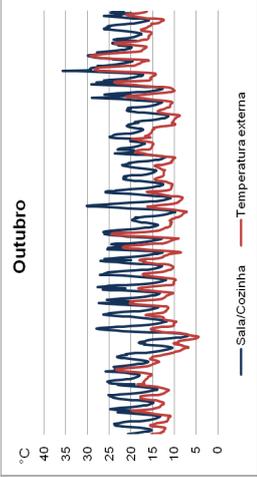
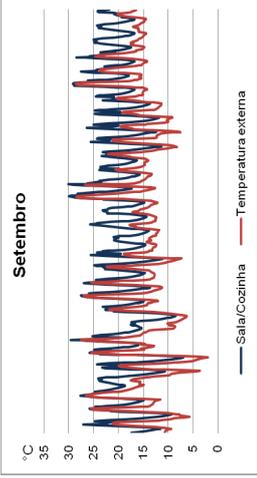
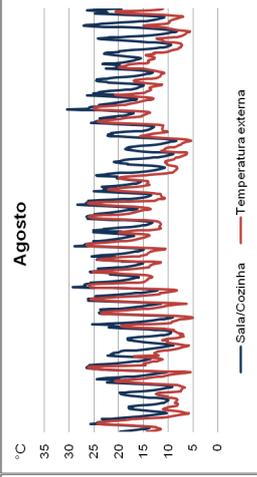
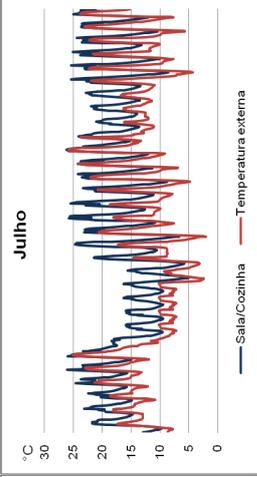
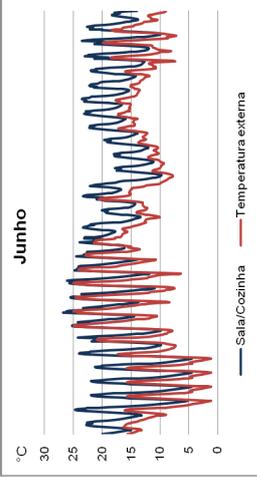
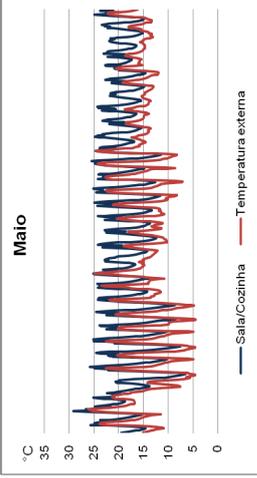
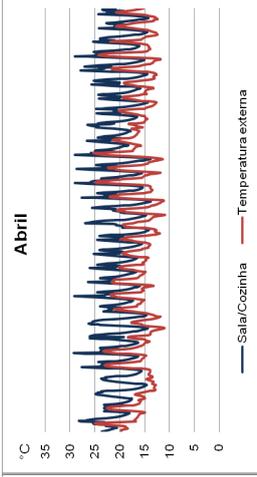
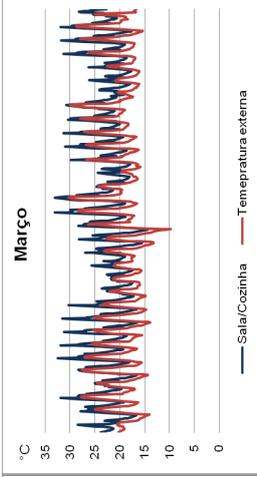
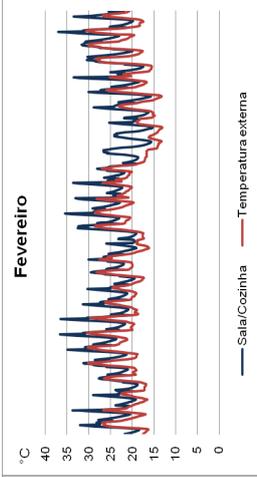
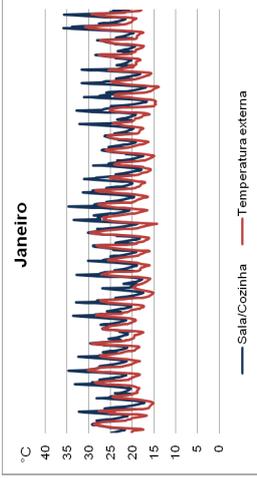
- summer design day
- winter design day
- Priority 1 - (SunSat) 2006-Jan-01-2006-Dec-31
- default profile



APÊNDICE 4 - RESULTADOS DAS TEMPERATURAS MENSAIS SIMULADAS PARA CADA AMBIENTE DE PERMANÊNCIA PROLONGADA







ANEXO 1 - GERAÇÃO DE CO₂ POR USO DE FONTES COMBUSTÍVEIS

Fonte	CO₂ (kg/MJ)
Eletricidade¹	0,0422
Petróleo	0,0733
Óleo combustível	0,0741
Gasolina	0,0693
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,0631
Gás natural	0,0561
Biomassa²	0,112

Tavares; Bragança (2016), a partir de dados do IPCC

Tavares; Bragança (2016)¹

IPCC (2006)²