

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO₂
EQUIVALENTE DE VEDAÇÃO DE *LIGHT WOOD FRAME* EM
BRASÍLIA**

JOÃO PAULO FALCETTI SOZIN
PEDRO CORRÊA DE MELO

ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO
COORIENTADORA: JÚLIA SANTIAGO LIRA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS**

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO₂
EQUIVALENTE DE VEDAÇÃO DE *LIGHT WOOD FRAME* EM
BRASÍLIA

JOÃO PAULO FALCETTI SOZIN
PEDRO CORRÊA DE MELO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

ROSA MARIA SPOSTO, Dra. (ENC – UnB)
(ORIENTADORA)

MICHELE TEREZA MARQUES CARVALHO, Dra. (ENC – UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)

NÚBIA BRAGA, Eng^a Civil, Mestranda
(EXAMINADORA EXTERNA)

BRASÍLIA/DF, 13 de NOVEMBRO de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

SOZIN, JOÃO PAULO FALCETTI; MELO, PEDRO CORRÊA DE
Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente de vedação de *Light Wood Frame* em Brasília [Distrito Federal] 2017.
xiii, 59 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. <i>Light Wood Frame</i>	2. Avaliação de Ciclo de Vida
3. Construção Civil	4. Emissões de gases do efeito estufa
I. ENC/FT/ UnB	II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOZIN, J.P.F.; MELO, P.C. (2017). Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente de vedação de *Light Wood Frame* em Brasília. Monografia de Projeto Final, Publicação G. PF-02/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 59 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: João Paulo Falcetti Sozin; Pedro Corrêa de Melo.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente de vedação de *Light Wood Frame* em Brasília

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos mesmos.

João Paulo Falcetti Sozin
Lt 02, Av. Flamboyant, Ed. Flamboyant,
Apto. 1203 – Águas Claras
71917-000 – Brasília/DF - Brasil

Pedro Corrêa de Melo
SMPW Quadra 15 Conjunto 9 Lote 4
Casa A - Park Way
71741-509 – Brasília/DF - Brasil

Aos nossos amigos e famílias, que tanto nos apoiam
e contribuem para que consigamos atingir
os nossos sonhos e objetivos.

AGRADECIMENTOS

Às nossas famílias, amigos e relacionamentos mais próximos, agradecemos por todo o apoio dado ao longo dessa trajetória de formação no curso de Engenharia Civil. Com toda certeza, o suporte e a ajuda em momentos difíceis foram essenciais para a superação de qualquer problema enfrentado nesses 5 anos de caminhada.

Agradecemos à Universidade de Brasília por todas oportunidades e experiências ao longo do período vivido desde setembro de 2012. Ao longo dos anos, as nossas formações acadêmica e pessoal foram alicerçadas na companhia de pessoas brilhantes, compostas principalmente por amigos e professores que estavam sempre presentes na nossa caminhada ao longo do curso de Engenharia Civil. Em especial, destacamos a nossa orientadora, Rosa, e a nossa coorientadora, Júlia, pela disposição e pelo engajamento durante a orientação do presente trabalho.

Eu, Pedro, gostaria de agradecer em especial aos meus pais, Siomara e Danilo, por todo o apoio incondicional não só no período de graduação, mas também por toda minha vida. Graças a vocês tive várias oportunidades que enriqueceram minha experiência de vida e, por isso, não tenho como agradecer o suficiente. Obrigado por me ensinarem o que é amor e respeito. Também agradeço ao meu irmão, Matheus, por todo suporte nos mais variados momentos. No fim das contas é você para quem eu vou recorrer e se eu não tivesse seu amparo eu não sei o que faria. Obrigado por me educar, por se preocupar comigo e por ser o melhor irmão mais velho que alguém poderia ter. Agradeço também à Manu, minha cunhada há mais de 10 anos, que mais parece minha irmã. Obrigado por ser um ombro amigo nos momentos necessários e por ser divertida no restante do tempo.

Não poderia também deixar de agradecer à minha pessoa, minha namorada, Stephanie. Nosso relacionamento é uma das coisas que eu mais tenho orgulho em minha vida e nosso amor mútuo tem provado que conseguimos enfrentar qualquer coisa juntos. Obrigado por ser a pessoa que mais acredita em mim, que confia no meu potencial mais do que eu mesmo, por me ensinar a ser mais sensato e por ter paciência comigo. Com você, temos várias aventuras ainda e terminar essa graduação só foi uma delas. Obrigado à sua família, Chica, Vini e Nenn, desde sempre tão acolhedora.

Além disso, quero agradecer à minha avó Zezé e ao meu falecido avô Zé Grande. Vocês são a base da nossa família e proporcionaram as melhores condições para os caminhos trilhados por nós. Também gostaria de agradecer à minha madrinha Soraia, pelo carinho e por ser mãe. Obrigado, Mariana, por ser minha outra segunda mãe e por todos esses anos ao meu lado.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que foram fundamentais nessa graduação, pois me proporcionaram as melhores risadas e os momentos necessários de escape dos estudos. Obrigado à Daiane, por ter surgido na minha vida na Hungria, à Isabela, pelos conselhos, ao Mateus, pelas conversas existenciais niilistas, ao Felipe, pelas piadas de tio, ao Gabriel, pelo companheirismo no curso e agora muito além disso, à Glória, por todas as tentativas bem sucedidas de encontro que compensam cada furo, ao Pp, por não ter desistido de mim e continuar me chamando pra sair, à Marina, por ter tentado me alertar várias vezes que talvez arquitetura fosse melhor pra mim (mas fiz a decisão correta no fim das contas), à Gu, pelas viagens, à Mari Verlangeiro, pelos festivais e jantares, ao casal Carol e Beto, pelas noites de quarta e pelos almoços dignos de chef, ao Zé e ao Bruno, por serem pessoas únicas e engraçadas, à Ju, por ter sido uma amiga muito antes do curso de engenharia, pelos vários momentos que compartilhamos e também ao Leandro e ao André, pelo ótimo ano compartilhado em Melbourne.

Obrigado também em especial aos amigos Matheus, Moro, Lorena, Varella, Leticia e Bruna, que tornaram os anos de curso de engenharia mais divertidos. Por fim, agradeço à minha dupla, João, por ter enfrentado esse desafio de monografia comigo. Agora nosso vínculo é muito maior do que Austrália e levo comigo uma amizade para vida toda.

Eu, João, agradeço generosamente à minha família que, com um alicerce muito humilde, religioso e batalhador, confia e deposita amor em todas as minhas escolhas, sendo o curso de Engenharia Civil uma delas. Meus pais, Milton e Lucimar, meu irmão, Pedro, e meu cachorro, Max, são o meu porto seguro, e estiveram presentes ao longo dessa jornada de 5 anos de maneira diária, ativa e afetiva. Por fim, agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam e que surgiram neste período de graduação, período que abracei várias oportunidades e que vivi muitas fases de aprendizado, relacionamentos e amadurecimento, depositando em Deus a confiança de que o correto e o melhor estava sempre por vir.

Por fim, agradecemos principalmente a Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades de superação e de crescimento vividas diariamente.

RESUMO

Diante da necessidade de minimizar impactos ambientais decorrentes da construção de habitações, sistemas construtivos industrializados têm sido empregados no mercado brasileiro, como o *Light Wood Frame*. Com o intuito de avaliar seus aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental, alguns indicadores podem ser utilizados, tais como emissões de gases do efeito estufa (GEE), compostos orgânicos voláteis e depleção abiótica, entre outros. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação do impacto ambiental de uma vedação de *Light Wood Frame* aplicada a uma habitação de interesse social localizada em Brasília - DF. Foi avaliado um sistema de vedação composto por placa de gesso, placa cimentícia, membrana hidrófuga, OSB, *softwood* e lâ de rocha. Para essa avaliação, foi considerado apenas o indicador de CO₂ equivalente (CO₂eq), avaliado por meio do método de Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente (ACVCO₂eq). Os parâmetros considerados para o sistema foram as entradas de energia e de matéria-prima, a saída de emissões de gases do efeito estufa, dadas em CO₂eq. A unidade funcional considerada é o metro quadrado de habitação. O escopo do trabalho é do berço ao túmulo, considerando as fases de pré-uso, uso e pós-uso. A metodologia do estudo constituiu em análise híbrida, em que alguns dados foram obtidos das literaturas nacional e internacional e outros junto aos fabricantes dos componentes do sistema. Foram obtidos dados consistentes de emissões de gases por meio de diferentes declarações ambientais, que indicaram a fase de pré-uso como a mais impactante de todo o ciclo de vida, sendo majoritariamente afetada pelo transporte dos componentes com origem no Sul e no Sudeste do Brasil. Por fim, observou-se que o *Light Wood Frame* possui um desempenho com o menor impacto ambiental quando comparado a outros sistemas de vedação, como o bloco cerâmico e o *Light Steel Frame*. O principal motivo para esse resultado é o pós-uso adotado para o OSB, o *frame* em madeira e as placas de gesso, em que foram considerados os potenciais de reuso e de reciclagem dos materiais, bem como o sequestro de carbono para os componentes que possuem madeira em sua composição. Esse trabalho possui uma contribuição significativa para o meio acadêmico, uma vez que foi pioneiro em abordar todo o ciclo de vida, incluindo o pós-uso, de uma vedação de *Light Wood Frame* em âmbito nacional.

Palavras-chave: *Light Wood Frame*; ACVCO₂eq; Habitação de interesse social; Ciclo de vida

ABSTRACT

Considering the necessity of minimizing environmental impacts due to housing construction, industrialized constructive systems have been used in the Brazilian market, such as Light Wood Frame. In order to evaluate its environmental sustainability aspects, some indicators may be used, such as greenhouse gases (GHG) emissions, volatile organic compounds and abiotic depletion. In this context, the present study aims to evaluate the environmental impact of a Light Wood Frame sealing applied to a social housing located in Brasília – DF. A sealing system composed of gypsum board, cement board, water repellent membrane, OSB, softwood and rock wool was evaluated. It was considered the CO₂ equivalent (CO₂eq) indicator, assessed by the method of Life Cycle Assessment of CO₂ equivalent Emission (LCACO₂eq). The parameters adopted for the study are energy and raw materials entries and greenhouse gases emissions outputs in CO₂eq. It was adopted the square meter of housing as the functional unit and the scope is from cradle to grave, considering pre-use, use and post-use phases. The methodology consisted in hybrid analysis, where some data were obtained from both national and international literatures, and also with the system's component suppliers. Using international environmental declarations, concise greenhouse gases emission data were obtained and indicated that the pre-use phase caused the most impacts, considering all the life cycle. This result is a consequence of the components' transport coming from the South and Southeast regions of Brazil. In addition, when compared to other sealing systems such as Light Steel Frame and ceramic blocks, Light Wood Frame presented the best performance with less environmental impacts. The main reason of this outcome is the post-use procedures adopted for the OSB, the wood frame and the gypsum boards, where it was considered the reuse and recycling potentials and the carbon sequestration of the components made of wood. This work has significantly contributed to the academic field, once it pioneered the approach of life cycle assessment, including the post-use phase, of a Light Wood Frame nationwide.

Keywords: Light Wood Frame; LCACO₂eq; Social housing; Life Cycle

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA LINHA DE PESQUISA	2
1.2	JUSTIFICATIVAS	4
1.3	OBJETIVOS	5
1.3.1	OBJETIVO GERAL	5
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	CENÁRIO AMBIENTAL GLOBAL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	6
2.2	IMPACTOS AMBIENTAIS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	7
2.3	MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	8
2.4	<i>LIGHT WOOD FRAME</i>	9
2.4.1	ASPECTOS HISTÓRICOS.....	9
2.4.2	ASPECTOS GERAIS.....	11
2.4.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	12
2.5	FONTES DE ENERGIA	15
2.6	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	16
2.6.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO ₂ EQUIVALENTE (ACVCO ₂ EQ).....	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	DEFINIÇÃO DO ESCOPO E FRONTEIRAS DA PESQUISA	22
3.1.1	HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL MODELO.....	22
3.1.2	UNIDADE FUNCIONAL	25
3.2	METODOLOGIA DE ACVCO ₂ EQ ADOTADA.....	25
3.2.1	FATORES DE EMISSÃO DE GEE	27
3.2.1.1	PLACA DE GESSO.....	27
3.2.1.2	PLACA CIMENTÍCIA	28
3.2.1.3	MEMBRANA HIDRÓFUGA	29
3.2.1.4	LÃ DE ROCHA	30

3.2.1.5 <i>ORIENTED STRAND BOARD (OSB)</i>	31
3.2.1.6 <i>SOFTWOOD</i>	33
3.2.1.7 <i>ÓLEO DIESEL</i>	35
3.2.2 <i>AValiação DO CICLO DE VIDA</i>	36
3.2.2.1 <i>FASE DE PRÉ-USO</i>	36
3.2.2.2 <i>FASE DE USO</i>	38
3.2.2.3 <i>FASE DE PÓS-USO</i>	39
3.3 <i>METODOLOGIA DA ANÁLISE COMPARATIVA</i>	41
4 <i>RESULTADOS</i>	42
4.1 <i>ANÁLISE COMPARATIVA</i>	46
5 <i>CONCLUSÃO</i>	48
<i>REFERÊNCIAS</i>	50
<i>APÊNDICES</i>	56
A1 – <i>PLANILHAS DE CÁLCULOS DE CONSUMO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VEDAÇÃO</i>	56
A2 – <i>PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE PRÉ-USO</i>	57
A3 – <i>PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE USO</i>	58
A4 – <i>PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE PÓS-USO</i>	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Etapas Construtivas com Light Wood Frame	13
Figura 2.2. Componentes de vedação de Light Wood Frame	14
Figura 2.3. Geração de Energia Elétrica Total	16
Figura 2.4. Estrutura da ACV	17
Figura 2.5. Avaliação do Ciclo de Vida	18
Figura 3.1. Planta Baixa da HIS	23
Figura 3.2. Localização da HIS	25
Figura 3.3. Escopo, fases da edificação e fronteiras consideradas na pesquisa.	26
Figura 3.4. Cadeia produtiva do OSB	32
Figura 3.5. Cadeia produtiva do Softwood	34
Figura 4.1. Participação dos materiais na fase de pré-uso	43
Figura 4.2. Participação dos materiais na fase de uso	43
Figura 4.3. Emissões de CO ₂ eq no ciclo de vida da habitação estudada	44
Figura 4.4. Emissões totais dos três sistemas de vedação	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Consumo de Light Wood Frame para uma habitação popular	24
Tabela 3.2. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) da placa de gesso	28
Tabela 3.3. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) da placa cimentícia	29
Tabela 3.4. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) da membrana hidrófuga.....	30
Tabela 3.5. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) da lã de rocha	31
Tabela 3.6. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) da placa de gesso	33
Tabela 3.7. Impacto ambiental da manufatura (CO ₂ eq) do Light Wood Frame	35
Tabela 3.8. Fatores de emissão de GEE de Óleo Diesel	36
Tabela 3.9. Fatores de emissão e distâncias durante a fase de pré-uso	37
Tabela 3.10. Vida útil para componentes do sistema	38
Tabela 4.1. Emissões durante a fase de pré-uso	42
Tabela 4.2. Emissões durante a fase de pós-uso	44
Tabela 4.3. Emissões totais por componente	45

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ACV: Avaliação do Ciclo de Vida

ACVCO₂eq: Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ equivalente

CO₂: Gás Carbônico

CH₄: Gás metano

EPD: *Environmental Product Declaration*

GEE: Gases do Efeito Estufa

N₂O: Óxido nitroso

OSB: *Oriented Strand Board*

PF: Projeto Final

1 INTRODUÇÃO

A degradação do meio ambiente decorrente de atividades humanas tem sido cada vez mais discutida pelo mundo, já que há uma consciência da necessidade de minimizar os seus impactos e de promover mudanças no cenário atual. Dentre essas atividades, tem-se o setor de construção civil com participação significativa neste processo, indicando a importância da busca de alternativas que possam resultar em menos impactos negativos.

O setor de construção civil é complexo e envolve vários segmentos, tais como o de materiais, constituído por indústrias de transformação, o de processos, constituído pela construção de edificações e de habitações, e o auxiliar, formado por empresas de projeto e de manutenção (ABRAMAT, 2007). É um setor que traz consequências significativas ao meio ambiente em todas as suas etapas, desde a extração de insumos até a demolição da edificação. Além disso, é o setor que mais consome energia e materiais no mundo, no qual as edificações são responsáveis pela maior parte desses consumos (PARK *et al.*, 2014).

Os impactos gerados podem ocorrer em termos de consumo de energia, consumo de recursos naturais e emissões de gases do efeito estufa (GEE), entre outros. Destes, tem-se os GEE como um dos mais preocupantes devido a sua relação direta com o aquecimento global. De acordo com dados do *The World Bank* (2013), a emissão mundial de dióxido de carbono causada pela queima de combustíveis fósseis e produção de cimento atingiu 29,4 bilhões de toneladas em 2009.

Considerando este cenário e a necessidade de buscar novas alternativas que minimizem os impactos ambientais decorrentes, alguns sistemas construtivos industrializados vêm sendo empregados no mercado brasileiro nos últimos anos, como por exemplo, o *Light Steel Frame* e o *Light Wood Frame*, que se apresentam como alternativas ao sistema convencional de alvenaria de blocos cerâmicos. Dentre tais sistemas, observa-se que o *Light Wood Frame* apresenta um bom potencial de uso, dado que o setor brasileiro de floresta plantada é um dos mais relevantes no cenário mundial (IBÁ, 2016).

Apesar do sistema de *Light Wood Frame* se apresentar como um sistema industrializado e racional, é necessário questionar sua sustentabilidade ambiental. Para isso, alguns indicadores de impactos ambientais podem ser utilizados, tais como emissões de CO₂, consumo de energia não renovável, compostos orgânicos voláteis e conteúdo abiótico.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método que pode ser utilizado para avaliar tais impactos, decorrentes de um produto ou um processo, e consiste na realização de um inventário de entradas e suas respectivas saídas, pertinentes ao objeto de estudo. Alguns recortes têm sido feitos na ACV, buscando aumentar a viabilidade de pesquisas de ciclo de vida, devido à dificuldade de existência de bancos de dados e à complexidade envolvida no levantamento de dados primários. Neste contexto pode ser citada a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente (ACVCO₂eq), que considera a emissão de gás carbônico e outros gases, dada em CO₂ equivalente de um determinado produto.

Além disso, o Brasil possui um déficit habitacional de 9% da população (CBIC, 2016) que atinge, principalmente, a parcela de baixa renda, indicando a necessidade de construir mais habitações de interesse social. Como o número de habitações a serem construídas é elevado, o impacto no meio ambiente devido ao consumo de energia, de matéria-prima e de emissões de CO₂ na atmosfera pode ser significativo.

Considerando os aspectos previamente mencionados, este estudo é focado na sustentabilidade ambiental da vedação de *Light Wood Frame* de uma habitação de interesse social localizada em Brasília.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA LINHA DE PESQUISA

Este estudo está inserido na linha de pesquisa de “Gestão e Sustentabilidade na Construção Civil” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Outros trabalhos já foram desenvolvidos no âmbito de Avaliação do Ciclo de Vida, considerando o método de Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ (ACVCO₂), aplicada a sistemas de vedação vertical e a coberturas. A seguir, são apresentados alguns destes trabalhos desenvolvidos.

Nabut Neto (2011) fez um estudo de energia incorporada e emissões de CO₂ referentes a uma vedação vertical de *Light Steel Frame* para uma habitação localizada em Brasília. Os resultados das avaliações foram comparados com uma vedação convencional de bloco cerâmico.

Gouveia (2012) avaliou o alumínio, porém em fachadas de ACM (*Aluminum composite material*). Foram levantados dados de energia incorporada e emissões de CO₂ para as situações de matéria-prima primária e secundária. Com isso, foi avaliada a contribuição da reciclagem na diminuição dos valores de energia incorporada.

Palácio (2013) fez um estudo de vedações de *Light Steel Frame*, com o levantamento de energia incorporada na fase de pré-uso para cinco diferentes composições de revestimento e dois tipos de isolantes térmicos. Além disso, foi considerado o desempenho térmico, incluindo a transmitância térmica e a capacidade térmica da vedação.

Pedroso (2015) apresentou um estudo comparativo das fases de pré-uso, uso e pós-uso de quatro tipos de vedação vertical: parede de concreto moldadas no local, alvenaria estrutural de blocos de concreto, *Light Steel Frame* e alvenaria convencional. Foi feita uma coleta de dados primários nesse estudo na fase de desconstrução, em que foram realizados ensaios com o objetivo de obter a energia incorporada nesta etapa para os quatro tipos de vedação estudados.

Caldas (2016) fez um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e ACVCO₂, do berço ao túmulo, de dois sistemas de vedação vertical, o *Light Steel Frame* e a alvenaria de blocos cerâmicos. Foi realizado um estudo comparativo com os dois casos, considerando duas edificações unifamiliares em Brasília.

Caldeira (2016) apresentou um trabalho em que foi calculada a energia incorporada total, considerando apenas as fases de pré-uso, uso e manutenção de quatro sistemas de vedação horizontal: telha termoacústica de Poliestireno Expandido com e sem laje de concreto e telha cerâmica Plan com e sem laje de concreto.

Lira (2017) avaliou os impactos de depleção abiótica e de potencial de aquecimento global de um telhado verde, considerando todas as fases do ciclo de vida de uma habitação em Brasília. Além disso, foi feita uma comparação com telhado convencional, constituído por laje de concreto armado e telhas cerâmicas.

Considerando os estudos apresentados anteriormente, nota-se que em sua maioria foram abordadas vedações verticais de alvenaria convencional de blocos cerâmicos e de *Light Steel Frame*. Sendo assim, foi escolhido abordar o *Light Wood Frame* no presente estudo, com o intuito de avaliar uma nova alternativa de vedação vertical.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A necessidade de reduzir impactos ambientais causados pelo setor de construção civil, alinhada a uma preocupação global com a escassez dos recursos naturais e com emissões de poluentes na atmosfera, impulsionou o aumento pela procura de novos materiais e alternativas de sistemas construtivos que apresentem bom desempenho em termos de uso energético e de recursos.

Novos materiais de construção civil já têm sido lançados no mercado periodicamente, no entanto, há pouca informação sobre a sustentabilidade desses produtos e seus respectivos impactos ambientais. Considerando o contexto nacional, a base de dados de inventário de ciclo de vida ainda está em uma fase inicial e não está consolidada (SILVA e SILVA, 2015), o que pode impedir a escolha de um produto que apresente melhor desempenho e, conseqüentemente, menor degradação no meio ambiente.

Além disso, a sustentabilidade ambiental é um tema cada vez mais discutido na academia, abordado por meio de diversos métodos, dentre elas a Avaliação do Ciclo de Vida, no contexto de ACVCO₂ aplicado a vedações horizontais e verticais. Nos estudos brasileiros de vedação vertical, podem ser citados vários estudos com foco no *Light Steel Frame* tais como o de Carminatti Jr. (2012), o de Pedroso (2015) e o de Caldas (2016).

A vedação de *Light Wood Frame*, entretanto, tem sido pouco estudada em âmbito nacional, podendo ser citados os estudos de Monich (2012), que dimensionou a energia e o carbono incorporados dos materiais componentes desse sistema construtivo para um estudo de caso em Curitiba – PR, e o estudo de Oliveira (2016), no qual também foram avaliados a energia incorporada e o CO₂, porém com aplicação em diferentes cenários de padrões construtivos.

O *Light Wood Frame* é um sistema construtivo que vêm sendo empregado no mercado brasileiro como uma nova alternativa de sistema industrializado. Além disto, sabe-se que a madeira proveniente de florestas plantadas pode ser mais sustentável que muitos materiais, já que é fonte renovável (SUTTON, 2013). Considerando estas características favoráveis e a lacuna nos estudos do tema, este sistema foi escolhido para o presente estudo, com o intuito de investigar o seu uso para o sistema de vedação vertical de habitações.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo do impacto ambiental de uma vedação de *Light Wood Frame*, delimitado do berço ao túmulo, por meio do método de Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ equivalente, com o intuito de verificar a viabilidade deste material como uma possível alternativa sustentável no cenário da construção civil em Brasília.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprir o objetivo geral, este trabalho, no contexto de um Projeto Final de Curso do curso de Engenharia Civil da UnB, busca determinar o impacto gerado pelas emissões de gases de efeito estufa decorrente da vedação de *Light Wood Frame* em uma habitação de interesse social em Brasília - DF. Assim, tem-se como objetivo:

- Quantificar as emissões de CO₂eq de cada material constituinte desse sistema construtivo;
- Identificar o componente mais impactante dentro do sistema;
- Comparação dos resultados com outros materiais de vedação: bloco cerâmico e *Light Steel Frame*.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente trabalho limita-se a um sistema de vedação de *Light Wood Frame* inserido num contexto de habitação de interesse social localizada em Brasília - DF. Para a vedação, foram considerados os fechamentos com membrana hidrófuga, placa cimentícia e placa OSB, mas não foi considerado nenhum revestimento. Além disso, foram desconsiderados os componentes do sistema que apresentaram menos que 5% da massa total do sistema, o mesmo critério utilizado por Silva e Silva (2015).

Dentro das fases do ciclo de vida de uma habitação, não foram consideradas as emissões provenientes da execução, por falta de dados, e da operação, referente ao uso de aparelhos domésticos e cocção de alimentos, por se tratar de um estudo de vedação. Foram considerados dados secundários da literatura nacional e, quando ausente, da literatura internacional para o estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, conceitos e informações necessários para o desenvolvimento do estudo foram abordados, a fim de se criar o embasamento teórico para o desenvolvimento do tema apresentado.

2.1 CENÁRIO AMBIENTAL GLOBAL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Independentemente da área abordada, a preocupação ambiental tem sido presente em todos os meios (indústrias, residências, agronegócio) e influencia importantes tomadas de decisões. A escassez de recursos, principalmente voltada a matérias primas e à energia, alerta sobre a limitação deste cenário esgotável de recursos. Assim, o desenvolvimento humano, em diferentes ramos, deve estar alinhado com essa preocupação mundial e deve ser discutido com um olhar mais crítico por órgãos governamentais, educacionais (academia) e que envolvam o setor produtivo, no qual o setor da construção civil possui grande participação.

A fim de se abordar e discutir os impactos ambientais das atividades humanas, iniciativas começaram a surgir a partir da década de 60 por meio de encontros institucionais e agências governamentais para avaliar e regulamentar os efeitos antrópicos frente ao meio ambiente (SEIFFERT, 2011). Essas discussões deram o embasamento para o conceito de desenvolvimento sustentável, criado na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento pelas Nações Unidas. Este conceito aborda uma harmonia entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, buscando suprir as necessidades atuais sem comprometer a capacidade de atender as necessidades futuras (WWF, 2017).

O assunto referente à relação do meio ambiente com o desenvolvimento tomou maiores proporções com a realização da “Cúpula da Terra” (RIO 92), Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992 ocorrida no Rio de Janeiro (ONU BRASIL, 2017). Nesta conferência, 103 chefes de Estados aprovaram acordos internacionais envolvendo questões ambientais, criando base para planos e políticas públicas referentes ao assunto. Dentre esses planos, a “Agenda 21” foi criada, se tornando um diagrama para a proteção do planeta em conjunto com o seu desenvolvimento sustentável (este trabalho havia se iniciado desde 1972 em Estocolmo) (ONU BRASIL, 2017).

No documento da “Agenda 21”, ficou explicitada a necessidade de um planejamento que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica, o qual foi dissociado em Planos Locais de Desenvolvimento Sustentável (MMA, 2017a). De maneira simplória, pode-se dizer que o documento estabelece metas e ações dos países signatários como formas de compromisso para buscar o desenvolvimento sustentável, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e uma maior movimentação dos padrões sustentáveis de distribuição de energia (ONU BRASIL, 2017).

Por fim, em decorrência dos documentos e encontros internacionais abordando o assunto, há dois aspectos com grande relevância na contemporaneidade: as grandes quantidades de emissões de CO₂ e o elevado consumo de energia. Esses dois pontos são visíveis nas discussões do cenário ambiental brasileiro, no qual a Construção Civil impacta diretamente com quantidades significativas (CARDOSO e PABLOS, 2014).

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da Construção Civil influencia significativamente o cenário ambiental do desenvolvimento. Esta atividade é responsável por mudanças nos corpos hídricos, na atmosfera e no uso do solo, impactando em larga escala de acordo com o avanço tecnológico e social de um respectivo lugar. Com base nesse cenário, há uma busca frequente por uma melhoria contínua na eficiência energética e na diminuição da geração de resíduos no setor das edificações, originando leis e regulamentos que correspondam com tal perspectiva.

Com base nessa linha, alguns autores buscaram abordar o assunto. Roméro *et al.* (2012), por exemplo, defendem que a crise energética ocorrida pela “Crise do Petróleo” em 1973 foi um agravante decisivo pela busca de regulamentos e normas que focassem na eficiência energética na construção civil. Assim, com o passar do tempo, a diminuição da geração de resíduos sólidos, a redução do consumo de água e a melhoria dos processos construtivos começaram a ser incorporados aos projetos de edificações, buscando certificações ambientais para edificações a fim de atingir uma qualidade sustentável (KEELER e BURKE, 2010).

O consumo de energia durante o processo construtivo das edificações, de maneira geral, compõe cerca de 30% do seu consumo total, sendo um dos setores que mais influenciam na matriz energética do mundo (ROMÉRO *et al.*, 2012). A cadeia produtiva na construção também gera considerável parcela de emissões de GEE, que ocorre ao longo de todo o ciclo de vida das edificações (TAVARES, 2006). Segundo Agopyan e John (2011), a produção de edificações

sustentáveis se torna cada vez mais obrigatória e recorrente, do ponto de vista científico e técnico. Além do processo construtivo, as fases de uso, manutenção e desconstrução ou disposição final influenciam fortemente nos impactos gerados.

Com a “Agenda 21”, diversos aspectos foram apontados para determinar metas de desenvolvimento ambiental voltadas para edificações, dentre elas: valorização dos recursos naturais a fim de se reciclar e reutilizar os materiais e alterações nas práticas de gestão do processo de projeto e construção (SALGADO *et al.*, 2012). Esta preocupação é urgente, uma vez que a indústria da construção consome elevadas quantidades de recursos materiais todas as vezes que uma nova edificação é construída (CARMINATTI JR., 2012), sendo um momento essencial para incentivar e apoiar conceitos de construção sustentável.

Contudo, para uma análise mais complexa, deve-se buscar entender toda a cadeia produtiva da construção civil, envolvendo diversos setores produtivos e participativos: extração de matérias minerais, conglomerados industriais de materiais construtivos, órgãos públicos/privados e grande parte da população a qual representa o papel de clientes dessa cadeia construtiva (AGOPYAN e JOHN, 2011). Os impactos ambientais dessa cadeia vão desde um impacto direto, com o consumo de recursos materiais e de energia, até atingir escalas maiores, como o aquecimento global.

Desta forma, deve-se estudar os materiais aplicados e a energia consumida destes durante todas as fases do ciclo de vida dos produtos de uma edificação, a fim de verificar o nível de sustentabilidade energético-ambiental de cada etapa deste ciclo. Diversos materiais ou processos para uma mesma função podem ser comparados, a fim de se escolher o que apresenta melhores características em termos sustentáveis.

2.3 MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Embora os critérios de impactos ambientais no setor construtivo sejam muito diversificados, a sua totalidade envolve questões relacionadas às emissões de GEE e à questão energética dos materiais (CARDOSO e PABLOS, 2014). Para avaliar essas questões, é necessário de um embasamento por meio de mais pesquisas, uma vez que há um déficit na área que comprove a eficiência energética de novos materiais e sistemas construtivos, dificultando a escolha mais adequada pelos profissionais (LAMBERTS *et al.*, 2012).

Assim, há a necessidade de se desenvolver estudos que permeiem e mensurem o consumo de energia e as emissões de GEE de materiais específicos ao longo do ciclo de vida das edificações. No caso de edificações habitacionais, as vedações verticais e horizontais (envoltória) representam um dos principais elementos pela proteção do ambiente interno com o ambiente externo. A envoltória representa uma parte primordial de uma edificação em relação ao conforto ambiental e ao consumo de energia (IWARO e MWASHA, 2013).

Portanto, a escolha do material utilizado para a vedação vertical de uma habitação contribui significativamente no impacto ambiental que aquela edificação causará (PEDROSO, 2015), sendo essencial o estudo e a análise dos tipos de materiais existentes no mercado a fim de se escolher o mais adequado para cada situação. Diversos são esses materiais que podem ser utilizados para tal função, tais como: blocos cerâmicos, painéis de concreto armado, *Light Steel Frame* e *Light Wood Frame*.

A maioria das obras de edificações habitacionais, no Brasil, são executadas com sistemas convencionais: estrutura de concreto armado e vedação de blocos cerâmicos (PEDROSO, 2015). Visando o estudo de um sistema mais eficiente e de menor consumo comparativamente ao sistema convencional, neste trabalho é proposto o sistema leve de construção denominado *Light Wood Frame*, que é uma alternativa em *frames* leves de madeira para a construção industrializada.

2.4 LIGHT WOOD FRAME

Os tópicos seguintes abordam temas relacionados com *Light Wood Frame*, servindo de embasamento para o seguimento deste estudo.

2.4.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Embora a madeira possua diversas características positivas para ser utilizada como material de construção, a sua aplicação como elemento construtivo no Brasil é muito limitada e não explorada de acordo com o seu potencial correspondente. Esse cenário foi formado por meio de diferentes contextos, principalmente culturais e históricos.

A madeira está entre os materiais de construção civil mais antigos e é encontrada nas mais diversas culturas espalhadas por todo o mundo, variando nas suas técnicas construtivas e aplicações em cada civilização. A dinastia Sung, datada no período de 960 a 1279 anos depois de Cristo, representou os primeiros relatos de técnicas de construção em madeira, tendo

diversos documentos de desenhos e de técnicas (envolvendo elementos de viga e de pilares) registrados por construtores chineses (MEIRELLES *et al.*, 2007).

As técnicas chinesas inspiraram diversas outras culturas, como a japonesa. Com o seu aperfeiçoamento e o seu olhar sustentável, as construções em madeira no Japão eram realizadas por carpinteiros experientes que aprimoraram a técnica. Já na Europa, os países nórdicos, como a Noruega e a Finlândia, foram os principais representantes no desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de construção de madeira, principalmente por apresentar um elevado fator de massividade para garantir o isolamento térmico desejado (MEIRELLES *et al.*, 2007).

Contudo, o cenário de técnicas tradicionais e culturais de construção em madeira tiveram mudanças drásticas após a revolução industrial. O surgimento de novos materiais na construção, como o concreto e o aço, acarretou a diversificação nos sistemas e nos métodos construtivos. Por outro lado, alguns países, como o Canadá e os Estados Unidos, investiram na construção de casas de madeira em escala industrial durante o século XIX, adotando a proposta construtiva nomeada como *Ballon Framing*. Esse sistema construtivo apresentava construções leves com a produção industrial de serrarias e pregos acionada por máquinas a vapor, otimizando o tempo na construção (SPRAGUE, 1981).

Os portugueses possuíam uma forte tradição de construção em alvenaria de tijolos de barro, que foi impulsionada a partir da revolução industrial. Essa tradição foi trazida por Portugal durante o processo de colonização para o Brasil, fortalecendo desde então o sistema construtivo de alvenaria nas construções do país. Entretanto, durante as décadas de 50 a 60, observou-se um elevado desenvolvimento da indústria de madeira principalmente no Sul do Brasil, levando o Paraná a ficar no posto como um dos maiores produtores de madeira do mundo. Porém, este panorama não foi generalizado para o país, muito menos mantido por muito tempo (MEIRELLES *et al.*, 2007).

A tradição colonial, associada com fortes influências das indústrias de concreto e de cimento no país, estabeleceu uma visão restrita e preconceituosa sobre o processo de construção em madeira no Brasil. Contudo, o atual cenário global caminha cada vez mais para a aplicação de materiais sustentáveis na construção civil, e a madeira pode contribuir positivamente. Essa tendência é ratificada por conferências e congressos, como a conferência mundial Rio-92, a qual definiu que a aplicação da madeira na construção é um fator primordial para o

desenvolvimento sustentável. Assim, diversas políticas de incentivo ao uso da madeira foram adotadas em diversos países europeus, a fim de buscar os benefícios da aplicação desse uso, como a diminuição direta da quantidade de CO₂ emitida, por meio do sequestro de carbono da vegetação (MULLER, 2005).

Por fim, o cenário da forte tradição em construção em alvenaria de tijolos e blocos cerâmicos deve ser substituído por visões que vão além e que explorem o potencial do país em aplicar sistemas construtivos com madeira. O Brasil, com tal extensão territorial, contém vastas áreas de reflorestamento e de florestas nativas da América Latina, correspondendo a um panorama ideal para a introdução do *Light Wood Frame* como alternativa viável de construção industrializada.

2.4.2 ASPECTOS GERAIS

O *Light Wood Frame* representa uma alternativa para a construção industrializada a partir de um processo construtivo rápido e com desperdício reduzido. Embora haja uma oposição à visualização da madeira como solução sustentável e eficiente de habitações no Brasil, principalmente por motivos históricos, a indústria de reflorestamento brasileira é muito competitiva e conta com áreas para reflorestamentos extensas no país (TÉCHNE, 2009).

Comparado com outros materiais, o preço da matéria prima do *wood frame* é muito mais estável do que de outros materiais, como o do aço; além disso, o desperdício neste processo construtivo é mais reduzido do que em sistemas de construção convencional, inferior a 10%, podendo ser reduzindo ainda mais com a obtenção de experiência na prática (TÉCHNE, 2009).

A utilização de determinados tipos de madeira não implica no desmatamento de áreas verdes, uma vez que ao utilizar o termo construção leve de madeira há a referência ao sistema construtivo que utiliza apenas o uso de madeiras de reflorestamento de modo racionalizado. Assim, pode-se observar que a madeira é o único material construtivo totalmente renovável e que demanda majoritariamente energia solar para a sua produção, enquanto que outros materiais (aço, cimento e blocos cerâmicos) se utilizam de fontes energéticas menos sustentáveis (TÉCHNE, 2009).

Além de compor uma fonte de matéria prima sustentável, as árvores reflorestadas sequestram carbono e acabam por reduzir, conseqüentemente, o efeito estufa: para construir 10,0 m² utilizando *Light Wood Frame*, utiliza-se 1,0 m³ de madeira reflorestada que captou 1,8

m³ de carbono na atmosfera durante o seu processo de produção (TÉCHNE, 2009). Assim, observa-se que a construção em madeira reduz a emissão de poluentes e se baseia em matérias primas regionais, enquanto que os outros materiais geram impactos ambientais mais intensos e limitam as regiões de matérias primas às regiões com jazidas minerais.

Por fim, diante da preocupação acerca dos impactos ambientais do setor da construção civil, com a necessidade de racionalização dos processos construtivos, espera-se que o sistema construtivo *Light Wood Frame* se torne mais disseminado e incentivado. A fim de atingir tal objetivo, construtores e fabricantes de materiais de construção leve de madeira devem realizar ações (cursos, financiamento do sistema, mais espaço na academia) para atingir e prosseguir no avanço da utilização deste material no Brasil.

2.4.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

As construções leves em madeira permitem a pré-fabricação dos componentes em ambiente industrial e com o devido dimensionamento, pode ter acoplados aos seus componentes isolantes acústicos e térmicos e revestimentos, internos ou externos, segundo o desempenho desejado.

Embora o processo construtivo do *Light Wood Frame* esteja atrelado a uma mão de obra especializada e de custo mais elevado do que a convencional, a construção de uma casa completa de 200 m² pode ser feita no prazo de 60 dias devido ao nível de industrialização do sistema (TÉCHNE, 2009). São diversos os fatores que influenciam nesta produtividade, tais como: otimização da gestão da produção, menor influência do clima no processo construtivo, facilidade no manuseio dos *frames* de madeira e dinamismo na limpeza da obra.

O sistema *Light Wood Frame* permite a sua aplicação com diversos outros materiais, permitindo dinamismo na montagem e um controle financeiro assertivo, uma vez que o sistema é industrializado (MOLINA e JUNIOR, 2010). Um processo completo de construção utilizando *Light Wood Frame* pode ser visto e detalhado na Figura 2.1.

Figura 2.1. Etapas Construtivas com *Light Wood Frame*

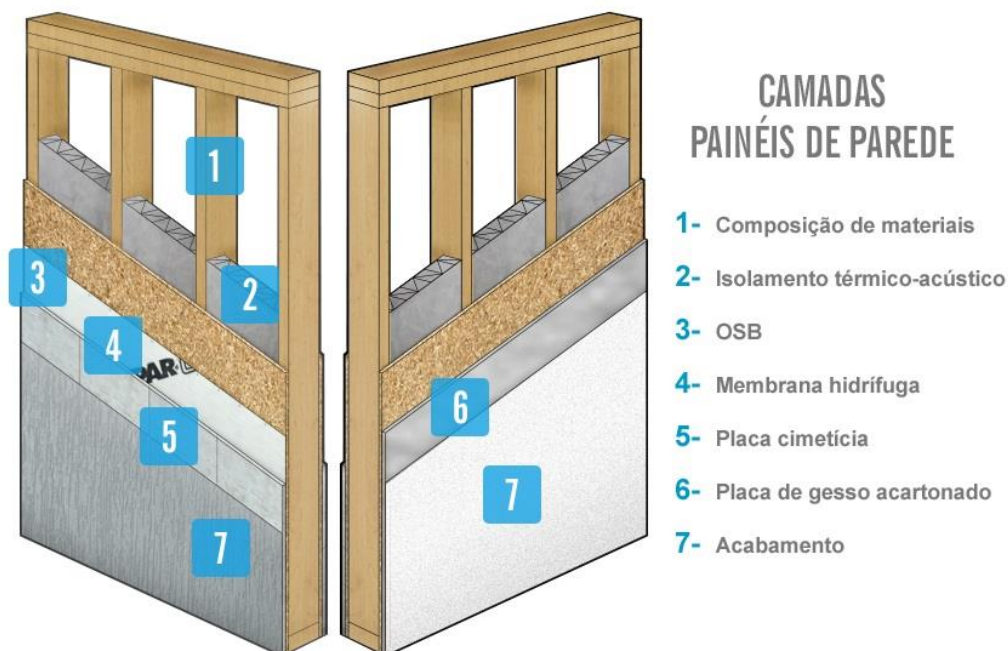


Fonte: (Adaptado de TÉCHNE, 2009).

Quando comparado com o modelo *Light Wood Frame* utilizados nos outros países, há diferenças com o seu uso no Brasil: a madeira tratada deve ser utilizada em toda a estrutura (decorrente do ataque de cupins), necessitando galvanizar a quente todos os elementos de conectores metálicos (pregos e parafusos) (TÉCHNE, 2009). Além disso, a baixa demanda deste sistema construtivo gera outras consequências no país: deve haver adequações industriais para suprir uma racionalização mais eficiente do processo.

Para o caso de vedação, o sistema *Light Wood Frame* é composto por perfis de madeira estruturados, formando assim placas vazadas que são envoltas por painéis de vedação, como o OSB (painel derivado da madeira composto por tiras de madeira em camadas). De forma complementar, as envoltórias podem ser preenchidas por isolamentos térmicos e acústicos a depender do desempenho desejado, e são revestidas por membrana hidrófuga (barreira contra vento e água), placa cimentícia para paredes externas e por placas de gesso acartonado para envoltórias internas. Por fim, aplica-se o acabamento desejado, resultando em uma vedação de *Light Wood Frame*, como mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2. Componentes de vedação de Light Wood Frame



Fonte: (TECVERDE, 2017).

Em síntese, o Brasil ainda apresenta a necessidade de diversas adequações para a inclusão total do sistema de construção leve de madeira, contudo já há a possibilidade de construção de habitações com o sistema. São alguns os empreendimentos já em uso que se utilizaram da técnica, como o condomínio Porto Primavera, em Curitiba, com 440 m² de área construída (TÉCHNE, 2009).

Embora já existam estudos relativos ao ciclo de vida energético de habitações populares brasileiras (TAVARES, 2006), a necessidade de se desenvolver ainda mais pesquisas na área,

principalmente referentes ao gasto energético e às emissões de gases do efeito estufa em todas as fases do ciclo de vida, é significativa, se considerarmos o déficit atual existente de habitações. O *Light Wood Frame* como sistema construtivo para vedação vertical representa uma possível alternativa a ser estudada.

2.5 FONTES DE ENERGIA

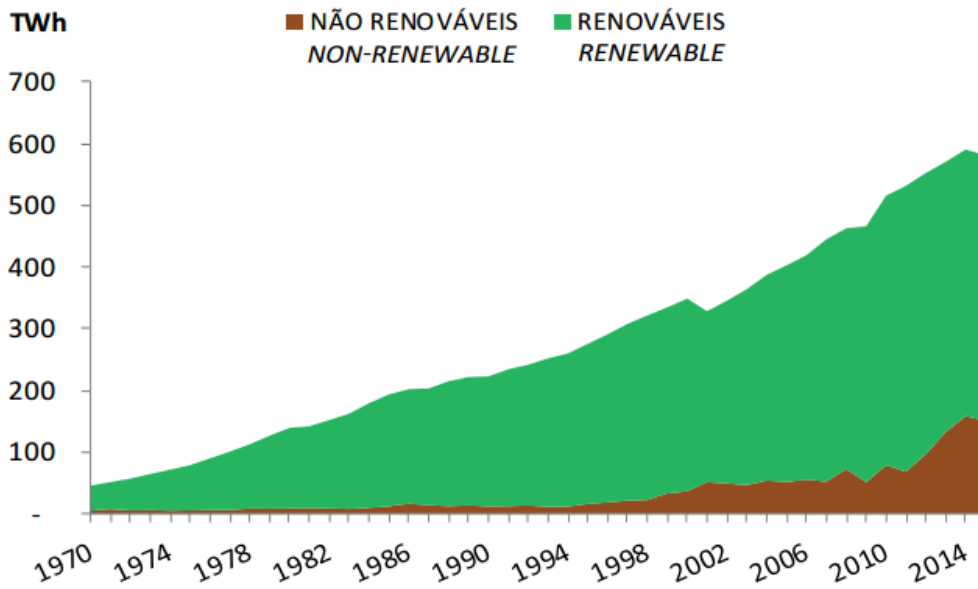
Para avaliar o impacto ambiental da vedação de *Light Wood Frame*, optou-se por trabalhar com a emissão de gases do efeito estufa (GEE). Esse parâmetro pode ser quantificado por meio de fatores de emissão de CO₂eq, que variam de maneira significativa de acordo com a fonte energética utilizada.

Considerando isso, balanços energéticos nacionais se apresentam como boas ferramentas para a análise desse impacto ambiental e para futuras tomadas de decisão, a respeito de geração de energia. No contexto brasileiro, tem-se o Balanço Energético Nacional (BEN), que é divulgado anualmente desde 1976 e contém informações relativas à oferta e ao consumo de energia no país. Além disso, também são consideradas a extração de recursos primários, a conversão em formas secundárias, exportação, importação e o uso final de energia (BEN, 2016).

Os dados referentes ao ano base 2015 do BEN (2016) indicam que houve uma redução de 1,8% no consumo final de eletricidade no Brasil. Tais mudanças no cenário energético brasileiro ocorrem devido a diversos fatores, entre eles o avanço tecnológico, o desenvolvimento econômico e mudanças demográficas. Esses três fatores estão relacionados entre si e são igualmente importantes para tomadas de decisão referentes ao desenvolvimento de novos sistemas energéticos (IPCC, 2000).

Em relação às fontes de energia elétrica, para o ano de 2015, o Brasil apresentou 75,5% de fontes renováveis. Tal valor está consideravelmente acima da média mundial, mas representa um declínio quando comparado com anos anteriores como o de 2011, em que houve 88,9% de participação de energia renovável na matriz elétrica (BEN, 2016). A evolução da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis no país pode ser vista na Figura 2.3.

Figura 2.3. Geração de Energia Elétrica Total



Fonte: (BEN, 2016).

Para o setor residencial, foco desse estudo, houve um aumento no consumo de energia. No cenário brasileiro, esse consumo é dividido em eletricidade, lenha, GLP, gás natural e outros tipos, em que a eletricidade representa 45,2% do valor total de 2015. Além disso, o setor residencial representou 9,6% de toda a energia utilizada no ano em questão (BEN, 2016).

2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida é um método de avaliação de produtos ou processos, que consiste na realização de um inventário de dados de entrada e de saída associados a um objeto de estudo.

No Brasil, esse método é regido pela norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), que apresenta os requisitos necessários para a condução de uma ACV. Esta avaliação é composta por quatro fases, que são a definição do objetivo e do escopo, a análise do inventário, a avaliação dos impactos e a interpretação, como pode ser visto na Figura 2.4.

Figura 2.4. Estrutura da ACV



Fonte: (Adaptado de ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Na primeira fase, são definidos o nível de detalhamento e as fronteiras do sistema em estudo, a depender do objetivo desejado. Com isso, tem-se que a complexidade da ACV pode variar significativamente. A segunda fase é a análise do inventário do ciclo de vida, que consiste na coleta de dados necessários para a avaliação do sistema. Já a terceira fase é a etapa em que ocorre a avaliação dos impactos gerados e permite o entendimento da significância ambiental do objeto estudado. Por fim, a última fase consiste na interpretação dos resultados da avaliação. A partir disso, são feitas conclusões, que podem vir a permitir futuras tomadas de decisão, a depender do objetivo e escopos iniciais (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Ainda seguindo as recomendações da norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), é necessário considerar as razões para a execução do estudo, o público-alvo dos resultados e a aplicação pretendida com a ACV para a definição de um objetivo claro. Além disso, espera-se que o escopo seja bem definido, assegurando compatibilidade com o objetivo proposto. Para isto, devem estar incluídos no escopo o tipo de sistema estudado e suas respectivas funções, as fronteiras do sistema, a unidade funcional (UF), os requisitos de dados, as limitações e as categorias de impacto escolhidas, assim como a metodologia para sua avaliação e o tipo de interpretação utilizado.

A unidade funcional é um elemento essencial para a elaboração do escopo, uma vez que define uma referência à qual os valores de entrada e saída estão relacionados. A partir da unidade funcional, é possível realizar a quantificação das características de desempenho do produto estudado (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

A definição da fronteira do sistema escolhido também é fundamental para a condução da ACV. O sistema deve ser limitado a elementos-chaves, garantindo que as entradas e as saídas sejam fluxos elementares. Estabelecer as fronteiras para o sistema é importante para o nível de confiança nos resultados do estudo e da viabilidade de atingir objetivo inicial. Usualmente são consideradas como processos elementares as etapas envolvidas na obtenção de matéria-prima, na manufatura do produto, no transporte, no uso, manutenção e na disposição final (ABNT NBR ISO 14040: 2014), de acordo com a Figura 2.5.

Figura 2.5. Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: (Elaborado pelos autores).

Seguindo as etapas de uma ACV, tem-se a análise do inventário, em que é realizada a quantificação das entradas e saídas do objeto de estudo, a partir de um banco de dados previamente coletado. Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), essa análise é um processo iterativo para que o objetivo inicial possa ser cumprido, pois novas fronteiras e limitações podem ser consideradas à medida que se conhece melhor o sistema.

Para a coleta de dados, devem ser considerados os dados relevantes ao sistema e ao objetivo adotados. Geralmente são coletados dados de entrada de energia e de matéria-prima e saídas de emissões atmosféricas e de descarga para água e solo, entre outros aspectos ambientais (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Ainda segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), o processo de coleta de dados pode demandar muitos recursos e restrições necessárias podem ser aplicadas, de acordo com o escopo determinado. Após essa etapa, é necessário validar os dados e estabelecer uma correlação destes com os processos elementares, com os fluxos de referência e com a unidade funcional. Desta maneira, obtêm-se os resultados do inventário.

Posteriormente, tem-se a avaliação dos impactos ambientais gerados pelo sistema em questão, de maneira que seja estudada sua significância considerando o contexto ambiental. Essa etapa geralmente associa os dados coletados a categorias de impactos específicas e a indicadores, visando à compreensão de tais impactos gerados. Também pode ser realizada uma iteração nesse processo, para que modificações sejam feitas com o intuito de se adequar ao objetivo inicial. Como a escolha, a modelagem e a avaliação das categorias de impacto podem indicar subjetividades no processo, é fundamental ter transparência durante toda a avaliação (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

Dentre os elementos obrigatórios, tem-se a classificação e a caracterização dos resultados, antecedidos pela seleção de categorias de impacto a serem analisadas. Os elementos opcionais consistem em agrupamento, ponderação ou normalização dos resultados (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Por fim, há a etapa de interpretação da avaliação. Espera-se que nessa fase os resultados encontrados estejam em consonância com o objetivo e o escopo iniciais e permitam conclusões relevantes, assim como recomendações. É válido ressaltar que nesse processo são apresentados resultados relativos, que indicam efeitos ambientais potenciais e não efeitos reais, uma vez que são estabelecidos pressupostos e limitações. Também pode ser utilizado um processo iterativo, para dar mais consistência aos resultados. Sendo assim, percebe-se que a ACV é uma metodologia complexa e, portanto, a interpretação do ciclo de vida também visa fornecer uma apresentação compreensível, completa e consistente dos resultados, de acordo com os parâmetros previamente estabelecidos (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Uma vez que a ACV possui um nível significativo de complexidade, versões simplificadas são comumente utilizadas em estudos e pesquisas, de maneira que a busca de dados e a interpretação dos resultados sejam facilitadas (CHAU *et al.*, 2015). Dentre esses possíveis recortes, tem-se a ACVCO₂eq.

2.6.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO₂ EQUIVALENTE (ACVCO₂eq)

A ACVCO₂eq é uma versão simplificada da ACV e considera as etapas relacionadas à extração de matéria-prima, à manufatura, ao uso e à destinação final do produto no seu fim de vida útil, a depender do escopo do estudo. Neste recorte, são quantificados e avaliados os impactos ambientais decorrentes das emissões de gases do efeito estufa, com os valores de saída dados em CO₂ equivalente.

Este parâmetro representa o gás carbônico e outros gases do efeito estufa, considerando o efeito que estes causam em termos de quantidade de CO₂ total. Trabalhar com outros gases além do CO₂ se deve ao fato de que há outras emissões que também impactam o meio ambiente significativamente, como a emissão do gás metano (CH₄), que tem aumentado consideravelmente desde a era pré-industrial (DENTENDER *et al.*, 2005).

Os principais gases abordados em estudos de ACVCO₂eq são o dióxido de carbono, o gás metano e o dióxido de nitrogênio (N₂O). Apesar de o CO₂ emitido pelo ser humano contribuir para a maior parte do aquecimento causado por gases do efeito estufa, os gases CH₄ e N₂O afetam o meio ambiente por décadas após a sua emissão e estão relacionados a atividades fundamentais da vida humana, como agricultura, exploração de combustíveis fósseis e tratamento de resíduos (MONTZKA *et al.*, 2011). Sendo assim, é fundamental considerar tais gases em estudos de emissões de GEE.

O método de ACVCO₂eq pode considerar as emissões que ocorrem em reações químicas, como a calcinação do carbonato de cálcio, a principal reação na construção civil (CALDAS, 2016). Além disso, esse método também considera grande parte das emissões que são provenientes de fontes energéticas (ATMACA e ATMACA, 2015).

Para as emissões relacionadas com o uso de energia, deve-se considerar fatores de emissões de acordo com a fonte energética utilizada. Esses fatores indicam a quantidade de gases emitidos pela unidade de energia gerada.

Para essa avaliação de emissões em CO₂ equivalente, podem ser considerados os cálculos de armazenamento de carbono no ciclo de vida para os materiais biogênicos, como a madeira, que é o foco deste estudo. Dependendo do ciclo de vida e do tipo de destinação final para o material, esses cálculos devem ser considerados e avaliados (PAWELZIK *et al.*, 2013).

Considerando o cenário internacional, alguns estudos de ACVCO₂eq têm sido feitos, como o de Xing *et al.* (2008) que avaliaram dois prédios empresariais, um feito de *Steel Frame* e outro de estrutura de concreto, em que foram quantificadas as emissões de GEE e também de gases poluentes, como O₃ e CO.

Outro estudo, de Turner e Collins (2013), também fez uma comparação entre dois materiais aglomerantes, cimento Portland e um geopolímero a base de cinza volante. Foram considerados os GEE e também gases sintéticos resultantes da produção dos materiais. Por fim, o estudo de Börjesson e Gustavsson (2000) apresentou um comparativo de madeira e concreto aplicados em um edifício de multipavimentos, em que foram considerados apenas os gases CO₂ e CH₄.

No âmbito nacional, há apenas alguns casos de estudos de ACVCO₂eq, podendo citar o de Lira e Sposto (2017), em que foi feita a avaliação de GEE para diferentes tipos de telhados verdes. No Brasil, a maior parte dos estudos considera apenas o CO₂ devido ao limitante de dados.

3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto, é necessário definir o escopo e as fronteiras da pesquisa, assim como apresentar a metodologia de ACVCO_{2eq} adotada.

3.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E FRONTEIRAS DA PESQUISA

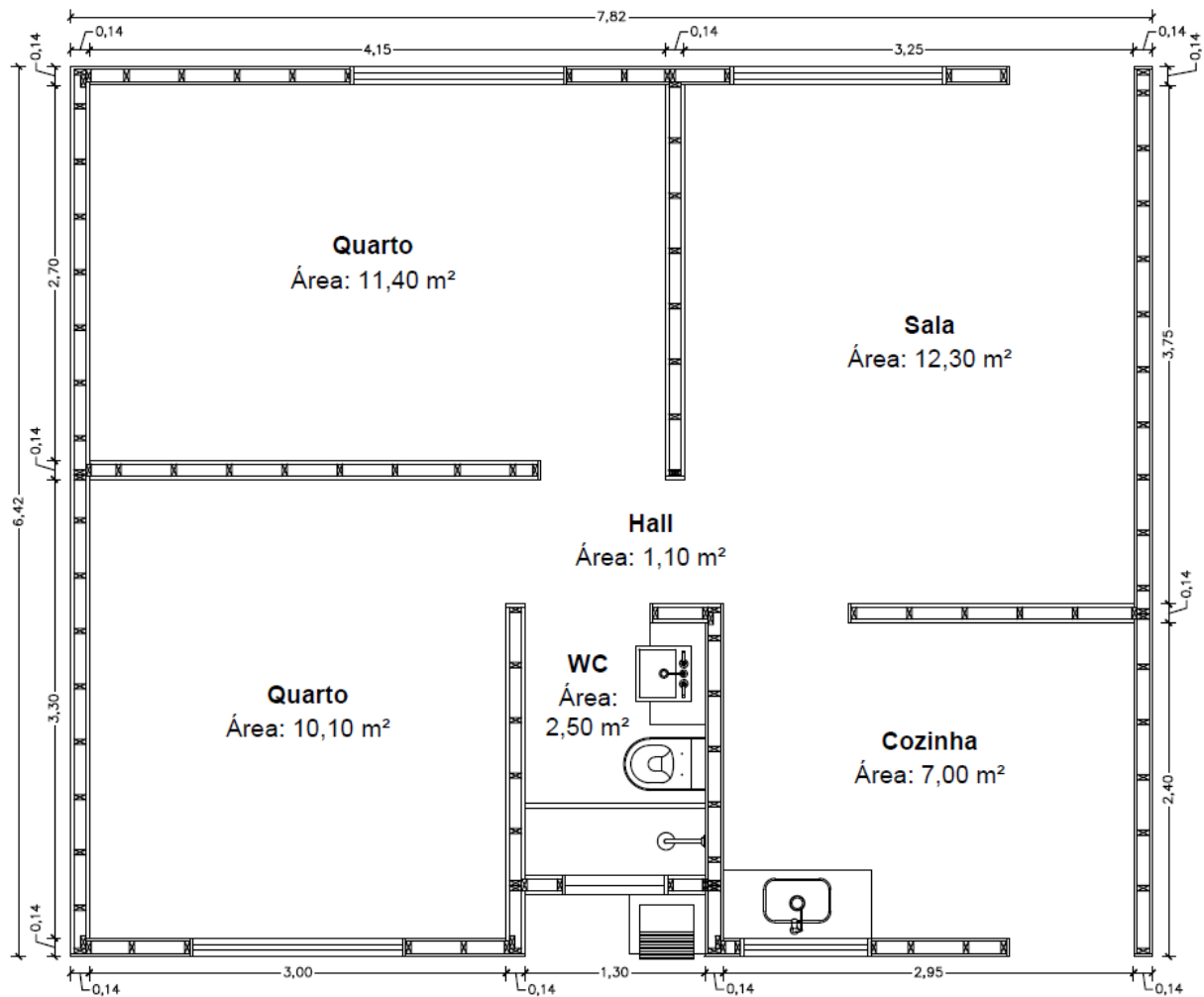
Em termos normativos, o seguinte trabalho está embasado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e na NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), sendo a primeira referente aos princípios e à estrutura de uma ACV e a segunda aos requisitos e às orientações da sua formulação. Para aplicar o método, foram definidos padrões de uma Habitação de Interesse Social (HIS), uma vez que os resultados são obtidos conforme esta definição prévia e com relação à unidade funcional utilizada como base.

3.1.1 HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL MODELO

Para este trabalho, adotou-se a vida útil da HIS de 50 anos, com base na definição de estudos anteriores que também aplicaram a ACV, como Paulsen e Sposto (2013) e Caldas (2016), e por ser a vida útil mínima para edificações habitacionais definida na NBR ISO 15575-1 (ABNT, 2013). Cabeza *et al* (2014) identificaram que 50% dos estudos nesta área aplicados a edificações utilizaram o tempo de vida útil de 50 anos, o que corroborou para esta determinação, uma vez que os resultados do presente trabalho serão analisados e comparados com os outros com uma maior proximidade em suas fronteiras de pesquisa.

Para quantificar as emissões, foi adotado como parâmetro um projeto padrão de habitação de interesse social localizada em Brasília - DF de 45 m² de área, 44,8 metros de perímetro e 2,7 de pé-direito. A HIS estudada é constituída pelas seguintes áreas de uso: dois dormitórios, uma sala, uma cozinha e um banheiro, sendo a vedação interna e a externa composta por *Light Wood Frame*. Na Figura 3.1, a planta baixa da HIS estudada no presente trabalho é apresentada.

Figura 3.1. Planta Baixa da HIS



Fonte: (Elaborado pelos autores).

Os componentes considerados para o *Light Wood Frame* estão descritos, com seus respectivos consumos (Apêndice 1), na Tabela 3.1, adotando os critérios estabelecidos pela ABDI (2015). Os valores de densidade foram retirados dos EPDs - *Environmental Product Declaration* (declarações ambientais de produtos internacionais referentes aos materiais envolvidos no processo de vedação de *Light Wood Frame*), referentes a cada material, com exceção do aço, que teve sua densidade retirada da norma ABNT NBR 6118 (2014).

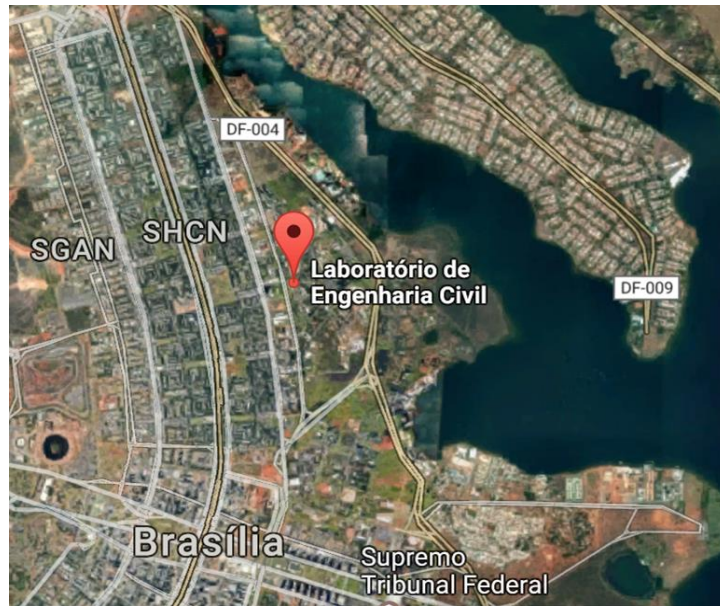
Tabela 3.1. Consumo de *Light Wood Frame* para uma habitação popular

Componentes	Consumo (UF)	Densidade (kg/UF)	Peso	Fonte
Membrana hidrófuga	112,07 m ²	0,06	6,72 kg	IBU (2016b)
Placa de gesso	137,97 m ²	12,50	1.724,62 kg	IBU (2016c)
Placa cimentícia	73,87 m ²	14,40	1.063,76 kg	IBU (2013)
Lã de rocha	5,42 m ³	70,00	380,08 kg	BAU (2015)
Chapa OSB	2,16 m ³	633,84	1.368,96 kg	UL ENVIRONMENT (2013)
Perfil – <i>Light Wood Frame</i> – 115 montantes de 38x89 mm; espaçamento de 40 cm e 2,70 m de altura	1,05 m ³	550,00	727,19 kg	THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME (2015)
Perfil – <i>Light Wood Frame</i> – soleira 38x89mm; 80,44 metros de extensão	0,27 m ³			
Parafusos - tipo rosca soberba – cabeça cônica estriada de 25 mm	982 un	7850,00	-	-
Parafusos - tipo rosca soberba - ponta agulha	1515 un	7850,00	-	-
Grampos galvanizados - tipo 14 – espaçamento de 150 mm	9340 un	7850,00	-	-
Grampos - tipo 80F – comprimento de 6 mm	602 un	7850,00	-	-

Materiais que possuem massa menor que 5% da massa total estimada do sistema não foram considerados (SILVA e SILVA, 2015), tais como as juntas das placas cimentícias e as juntas das placas OSB. Considerando os pesos específicos do aço de 7850,00 kg/m³ (ABNT NBR 6118, 2014) e do *Light Wood Frame* de 433,57 kg/m³ (Tabela 3.1), o volume dos parafusos utilizados tem uma média de 2x10⁻⁶ m³, enquanto que os grampos têm um volume menor ainda. Sendo assim, é possível observar que mesmo tendo uma densidade maior, a quantidade de massa dos parafusos e grampos é consideravelmente menor do que os outros componentes.

A localização da HIS foi adotada como o Laboratório de Engenharia Civil do Prédio SG 12 (Universidade de Brasília), de acordo com a Figura 3.2. Essa escolha foi pautada por ter sido adotada em pesquisas anteriores que serão utilizadas como base de comparação para as próximas etapas do presente trabalho, como a de Caldas (2016).

Figura 3.2. Localização da HIS



Fonte: (GOOGLE EARTH).

3.1.2 UNIDADE FUNCIONAL

Com base em padrões e em práticas observados nas literaturas nacional e internacional, adotou-se a unidade de área (m^2) de habitação como unidade funcional (UF). Assim, os valores de emissões de CO_2 equivalente foram divididos pela área da HIS, a fim de comparar os resultados finais deste trabalho com os de outros estudos.

3.2 METODOLOGIA DE ACV CO_2 EQ ADOTADA

Para atingir o objetivo explicitado no presente trabalho, foi utilizado o método de análise híbrida em conjunto com a ACV CO_2 eq. Este método consiste em estabelecer os insumos considerados para as avaliações, procedido pela utilização de um inventário de fatores de emissões de GEE, com base nas literaturas nacional e internacional. Não foram utilizados dados primários devido à limitação de cronograma e de recursos para realizar a coleta de dados desses fatores em indústrias.

A literatura internacional considerada para os inventários de emissões de CO_2 equivalente foram EPDs, que respeitam os princípios e procedimentos para declarações ambientais presentes na NBR ISO 14025 (ABNT, 2009). A literatura nacional considerada se refere a levantamento de dissertações, teses, artigos de congressos e periódicos de estudos acerca de ACV CO_2 eq. Os dados dos inventários foram subdivididos e organizados de acordo com as

etapas do ciclo de vida da HIS considerando do berço ao túmulo, o que inclui as fases de pré-uso, uso e pós-uso.

Dentro de cada fase, serão consideradas variáveis referentes às emissões de GEE, que se alteram de acordo com as respectivas fases do ciclo de vida da HIS. Para a fase de pré-uso, foram consideradas as emissões incorporadas e as emissões de transporte, para a fase de uso, as emissões de manutenção e, por fim, para o pós-uso, as emissões de desconstrução e de transporte.

A partir dos fatores de emissão de cada material e da respectiva quantidade necessária, são calculadas as emissões de CO₂ equivalente geradas durante todo o ciclo de vida da HIS. Os fatores são apresentados em emissões de CO₂ equivalente por unidade funcional e para cada componente utilizou-se um tipo de unidade, ora metro quadrado, ora metro cúbico. Por meio de dados de densidade e pela quantidade, é possível então obter as emissões de GEE estimadas para cada fase do ciclo de vida.

Em resumo, todas as fases do ciclo de vida da edificação e as fronteiras consideradas neste estudo podem ser identificadas na Figura 3.3.

Figura 3.3. Escopo, fases da edificação e fronteiras consideradas na pesquisa.



Fonte: (Adaptado de CALDAS, 2016).

3.2.1 FATORES DE EMISSÃO DE GEE

Para avaliar a sustentabilidade ambiental dos materiais do sistema de *Light Wood Frame*, adotou-se o parâmetro de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*), que considera todos os gases do efeito estufa reconhecidos pela IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2006).

Foram escolhidas declarações ambientais de fabricantes internacionais com métodos de fabricação similares aos brasileiros, que indicassem fatores de emissão de gases do efeito estufa em termos de CO₂ equivalente. Os EPDs adotados são de locais e composições distintas de acordo com cada componente do sistema de vedação, a fim de se obter o perfil mais fidedigno.

3.2.1.1 PLACA DE GESSO

A placa de gesso é um componente de vedação interna do sistema de *Light Wood Frame*, responsável por melhorar performances de isolamento acústico, proteção contra o fogo e aumentar a robustez de paredes. Tais características tornam esse elemento essencial para os sistemas leves de vedação.

Para o estudo em questão, foi escolhida um tipo de placa de gesso de alta performance de 12,5 mm de espessura e os fatores de emissão de CO₂ equivalente foram coletados de um EPD de uma empresa Knauf (IBU, 2016c).

Nessa declaração ambiental, foram considerados os processos de fornecimento de matéria-prima, o transporte dos materiais até a fábrica e a manufatura. Para a matéria-prima, foram considerados a gipsita, minerais para o reforço do núcleo da placa, e um revestimento de papelão. A gipsita foi considerada proveniente de uma mina aberta perto do processo de manufatura. O revestimento de papelão é feito de papel reciclado e aditivos são utilizados no processo, representando 5% da massa do produto final (IBU, 2016c).

Para o transporte, foi considerado o uso de caminhões. Já o processo de manufatura envolve a calcinação da gipsita, necessária para a posterior mistura com os outros componentes. Uma vez misturados, os materiais suspensos em água são espalhados em chapas já cortadas de

papelão e depois cobertos por outra chapa do mesmo componente. Por fim, as placas formadas passam por secadoras multi-nível para a finalização do produto.

Todos esses processos apresentados foram contabilizados e quantificados, apresentando um valor de 3,92 kg CO₂eq/m² de placa de gesso, relativo a fase de pré-uso (IBU, 2016c). Esse fator foi escolhido por ser proveniente de uma declaração ambiental de um produto com fabricante que também atua no Brasil, o Grupo Knauf.

Além disso, o EPD adotado também apresenta resultados referentes a reciclagem da placa de gesso. Por ser uma medida viável e cada vez mais adotada no Brasil (NASCIMENTO e PIMENTEL, 2010), foi adotado esse procedimento, que indica um valor de -0,64 CO₂eq/m² de placa de gesso (IBU, 2016c).

Tabela 3.2. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) da placa de gesso

Parâmetro	Produção Placa de Gesso	Reciclagem	Fonte
GWP (kg CO ₂ eq/m ²)	3,92	-0,64	IBU (2016c)

3.2.1.2 PLACA CIMENTÍCIA

O componente de vedação externa para o sistema de *Light Wood Frame* estudado é a placa cimentícia, composta por cimento, minerais e fibras de vidro. É um componente sem função estrutural, com a principal atribuição de proteger a residência das intempéries externas.

Foi escolhida uma placa de 12,5 mm de espessura da fabricante alemã Knauf, com os respectivos fatores de emissão de CO₂ equivalente provenientes de um EPD da empresa (IBU, 2013). O grupo Knauf comercializa os seus produtos no Brasil, o que justifica a sua utilização nesse estudo (KNAUF, 2017).

O EPD adotado considerou a produção e o transporte das matérias-primas, além dos procedimentos de manufatura do produto. Devido à pequena quantidade em massa dos materiais da embalagem (inferior à 5% do total), desconsiderou-se o efeito destes para o cálculo final (IBU, 2013).

Na declaração, foram apresentados resultados da Avaliação do Ciclo de Vida tanto para painéis internos quanto externos, e foi adotado o caso que apresentou o pior resultado, referente

ao meio externo (IBU, 2013). Uma vez que o trabalho em questão considera a placa cimentícia para a vedação externa, o uso dos fatores de emissão do EPD é coerente.

Por fim, o valor de emissão de CO₂eq de 4,48 kg CO₂eq/m² foi obtido durante a fase de fornecimento de matéria prima e 0,65 kg CO₂eq/m² ao decorrer da manufatura, totalizando um fator de 5,13 kg CO₂eq/m² de placa cimentícia (IBU, 2013). Devido ao processo de produção e às características dos materiais utilizados, temos que os produtos são praticamente não reutilizáveis, com limitações para a reciclagem e, portanto, não foi considerada essa etapa para esse produto nesse estudo (IBU, 2013). Assim, a declaração apresentou o impacto do componente, conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) da placa cimentícia

Parâmetro	Total	Matérias-primas	Produção Placa Cimentícia	Fonte
GWP (kg CO ₂ eq/m ²)	5,13	4,48	0,65	IBU (2013)

3.2.1.3 MEMBRANA HIDRÓFUGA

Assim como a placa de gesso, a membrana hidrófuga funciona como uma medida de proteção contra as intempéries externas, principalmente contra a água. Uma vez que o *Light Wood Frame* é um sistema de vedação em madeira, garantir uma barreira impermeável é essencial para que o tempo de vida útil da edificação não seja comprometido.

A barreira impermeável adotada é feita de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e possui estanqueidade. É uma das camadas do sistema de vedação e, apesar de ter a principal função de impermeabilidade, também protege contra entrada de vento, poeira e insetos nas instalações (IBU, 2016b). Para esse estudo, adotou-se uma membrana hidrófuga do fabricante *DuPont* de Luxemburgo e, a partir do EPD da empresa, foram obtidos os dados de emissão de GEE.

A declaração ambiental do material considerou todos os processos referentes à sua fabricação, com o escopo de berço ao portão, em que também foram contabilizados os materiais auxiliares, o transporte, o fornecimento de energia e o manuseio de resíduos (IBU, 2016b). Considerando essas etapas, tem-se um fator de emissão de 0,28 kgCO₂eq/m² de membrana hidrófuga.

Para a destinação final do produto não foram considerados os procedimentos de reuso ou reciclagem, uma vez que não se aplicam ao produto. Portanto, para esse estudo, foi apenas considerado o despejo final em aterro sanitário.

Tabela 3.4. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) da membrana hidrófuga

Parâmetro	Produção Membrana Hidrófuga	Fonte
GWP (kg CO ₂ eq/m ²)	0,28	IBU (2016b)

3.2.1.4 LÃ DE ROCHA

O sistema de isolamento de uma edificação é fundamental para os desempenhos acústico e térmico da mesma, além de atuar como um elemento de segurança contra incêndio. Dentre os possíveis materiais para esse propósito tem-se a lã de rocha, a lã de vidro, celulose e espumas de polietileno, que podem ser aplicados em vedações ou telhados.

Para a vedação de *Light Wood Frame* em estudo, foi adotada a lã de rocha para desempenhar tal função. Considerou-se um material de 50 mm de espessura, densidade média de 70 kg/m³ e composto por fibras minerais, vidro reciclado e resina. Assim como esses dados, os fatores de emissão de gases do efeito estufa foram retirados de um EPD de um fabricante turco, Izocam (BAU, 2015).

A declaração internacional adotada considera os procedimentos referentes à extração da matéria-prima, transporte e manufatura. Foram utilizados a areia, a dolomita e o calcário como os principais componentes da lã de rocha, além do vidro reciclado. Essas matérias-primas são transportadas para a fábrica e levadas a uma fornalha, abastecida por gás natural. Após o processo de derretimento e da posterior cura, as fibras são moldadas e por fim dão origem ao produto final (BAU, 2015).

Considerando todos esses processos, tem-se um fator de emissão de 62,90 kg CO₂eq/m³ de lã de rocha (BAU, 2015), conforme Tabela 3.5. Para esse estudo, foram consideradas apenas as etapas referentes a concepção do material e não foram consideradas as etapas referentes ao reuso, uma vez que esse procedimento não é aplicável. A lã de rocha mineral pode ser reciclada como aditivos para fabricação de tijolos, porém tal possibilidade não está no escopo do EPD adotado.

Tabela 3.5. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) da lã de rocha

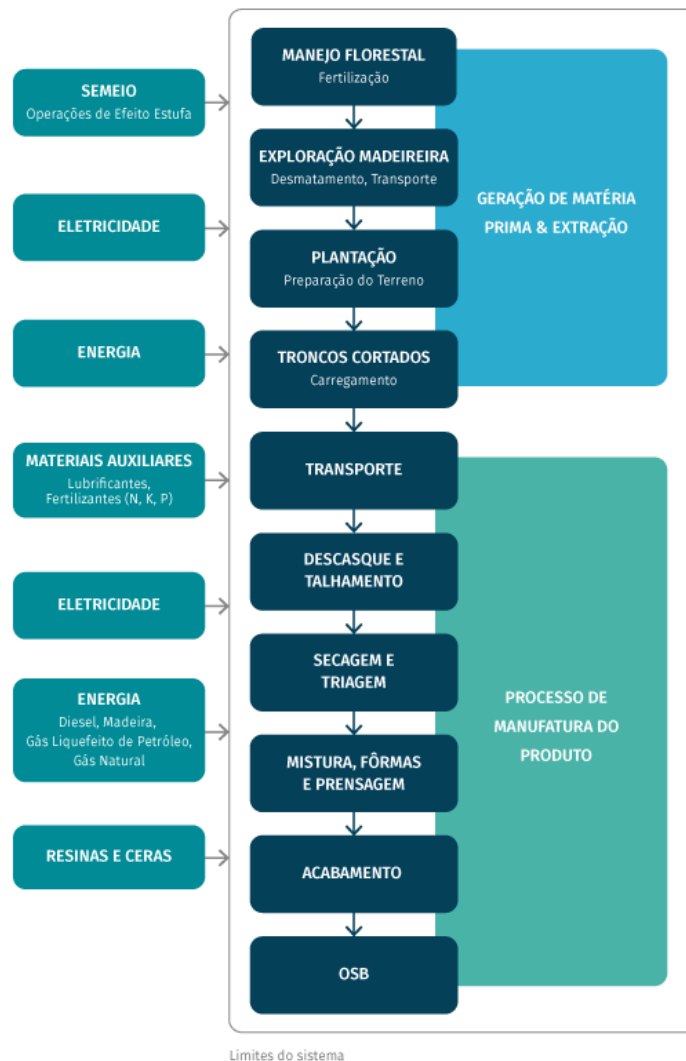
Parâmetro	Produção Lã de Rocha	Fonte
GWP (kg CO ₂ eq/m ³)	62,90	BAU (2015)

3.2.1.5 ORIENTED STRAND BOARD (OSB)

O *Oriented Strand Board* (OSB) é composto por lascas de madeira orientadas em camadas, sendo produzido a partir da prensa de pedaços de madeira com a aplicação de resinas. O OSB também é um componente sem função estrutural, com a principal aplicação de suporte para o painel de vedação, conferindo parte do desempenho térmico e acústico do sistema (UL ENVIRONMENT, 2013).

Adotou-se o EPD produzido pelo *UL Environment* em 2013, que considera um m³ de OSB com a massa de 33,48 kg e com as dimensões de 1,20 m por 2,40 m e 11 mm de espessura, assim como as chapas comercializadas no Brasil (LEROY MERLIN, 2017). As etapas de produção do OSB incluíram tanto as operações florestais (produção da madeira como matéria prima do produto), quanto a manufatura do produto (UL ENVIRONMENT, 2013). Cada etapa pode ser esquematizada de acordo com a Figura 3.4.

Figura 3.4. Cadeia produtiva do OSB



Fonte: (Adaptado de UL ENVIRONMENT, 2013).

O EPD considerou tanto o manejo das florestas (extração e reflorestamento) quanto o transporte das matérias primas e todo o processo de manufatura, resultando nas chapas de OSB próprias para uso na construção civil (UL ENVIRONMENT, 2013).

Para o caso do OSB, pode-se incluir o sequestro de carbono em sua análise, uma vez que compostos majoritariamente de madeira possuem esse benefício. Para o estudo em questão, chegou-se ao valor de -690,86 kg CO₂eq/m³ de efeito de sequestro de carbono após 100 anos¹, considerando o carbono biogênico do ciclo (UL ENVIRONMENT, 2013).

¹ É considerado um período de 100 anos referente ao equilíbrio do carbono biogênico nas operações florestais.

Além disso, pela composição do OSB ser majoritariamente de madeira, este material possui um potencial de reuso, recuperação energética ou reciclagem do material. Portanto, foi adotada a declaração proveniente da empresa portuguesa Sonae Industria, de 2016 (IBU, 2016a), por se tratar de painéis com características compatíveis aos utilizados na HIS em questão.

Assim, a declaração escolhida apresentou o potencial de reciclagem de -637,48 kg CO₂eq/m³ de OSB (IBU, 2016a), considerando todos os benefícios e perdas de reciclagem e de recuperação energética. Por fim, as declarações apresentaram o impacto do componente total, reportado tanto incluindo o carbono biogênico (GWPIB) quanto excluindo este tipo de carbono (GWPEB), conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) da placa de gesso

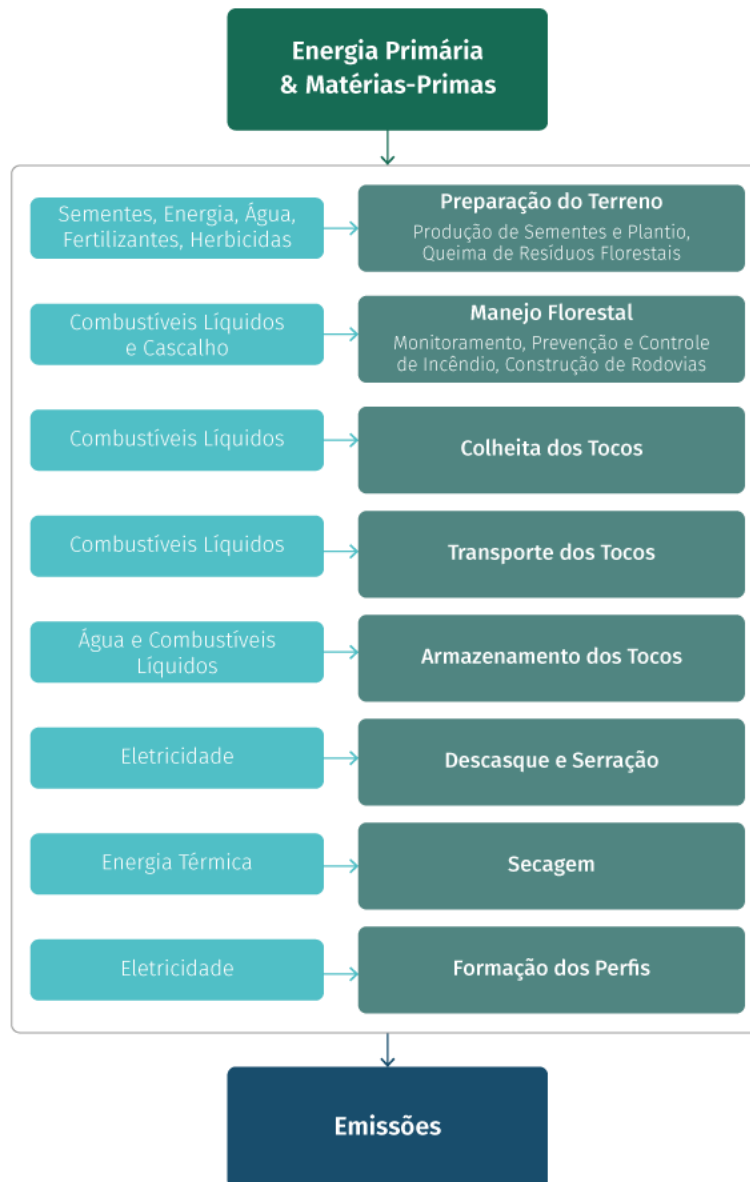
Parâmetro	Manejo Florestal	Produção OSB	Total	Fonte	Reuso, Recuperação, Reciclagem	Fonte
GWPIB (kg CO ₂ eq/m ³)	-673,46	230,90	-442,56	UL ENVIRONMENT (2013)	-637,48	IBU (2016a)
GWPEB (kg CO ₂ eq/m ³)	17,40	230,90	248,30			

3.2.1.6 SOFTWOOD

Para o caso do *Light Wood Frame*, o principal componente do sistema de vedação do estudo, adotou-se um EPD australiano de madeira macia proveniente da *THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME* (2015). As madeiras utilizadas no produto são tanto provenientes de espécies australianas quanto espécies não-nativas para o país, estas cultivadas em plantações. As espécies dominantes de madeira macia utilizadas foram: *Pinus radiata* (pinheiro radiata), *Araucaria cunninghami* (pinheiro) e pinheiros do Sul, como o *Pinus elliottii* (pinheiro cortado) e híbridos da mesma espécie (THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME, 2015).

A aplicabilidade da madeira utilizada para o *Light Wood Frame* do EPD é para usos estruturais, convergindo com o estudo em questão. As etapas de produção do frame incluíram: estágios de silvicultura, serraria e secagem do forno, como mostrado no fluxo da Figura 3.5.

Figura 3.5. Cadeia produtiva do *Softwood*



Fonte: (Adaptado de *THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME*, 2015).

Com o fim da vida útil do *Light Wood Frame*, tem-se as possíveis destinações finais: reutilização, reciclagem, depósito em aterro ou queima (geração de energia). Embora a disposição em um aterro seja o mais provável para os casos no Brasil (MMA, 2017b), os outros cenários também são possíveis e, neste estudo, adotou-se a reciclagem do material como matéria-prima para a fabricação de placas OSB (*THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME*, 2015).

Por fim, as embalagens dos produtos foram desconsideradas, de acordo com o critério de corte adotado nesse estudo, e todos os dados referentes ao processo de produção foram incorporados (THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME, 2015). Assim, as emissões de GEE foram calculadas de acordo com as respectivas contribuições de potencial de aquecimento global. O potencial foi reportado tanto incluindo o carbono biogênico (GWPIB) quanto excluindo este tipo de carbono (GWPEB), como identificado na Tabela 3.7. O carbono biogênico incorpora o efeito do sequestro de carbono do material em questão.

Tabela 3.7. Impacto ambiental da manufatura (CO₂eq) do *Light Wood Frame*

Parâmetro	Produção	Reciclagem	Fonte
GWPIB (kg CO ₂ eq/m ³)	-631,00	-103,00	THE AUSTRALASIAN EPD
GWPEB (kg CO ₂ eq/m ³)	269,00	-104,00	PROGRAMME (2015)

3.2.1.7 ÓLEO DIESEL

O modal mais utilizado para o transporte de cargas no Brasil é o rodoviário, com uma participação de 61,1% (CNT, 2016). Várias indústrias dependem desse meio de transporte, inclusive a de construção civil, e, portanto, considerou-se o uso de caminhões movidos a diesel para o transporte de todos os componentes do sistema de vedação em estudo.

O óleo diesel é uma fração do petróleo obtido a partir da destilação do combustível fóssil, e, devido à sua origem, sua combustão causa a emissão de gases do efeito estufa. Sendo assim, foram adotados fatores de emissão referentes ao consumo do material e não a sua extração e ao processo produtivo.

A partir de Relatórios Nacionais de emissão de GEE de órgãos ambientais de alguns países, foram obtidos fatores de emissão de CO₂ equivalente, como pode ser visto na Tabela 3.8. Uma vez que os valores encontrados são próximos, decidiu-se trabalhar com a média dos fatores de emissão, o que resultou em um valor de 2,67 kg CO₂eq/L de diesel. A partir desse valor médio, do consumo do veículo e da distância percorrida, é possível então quantificar as emissões envolvidas no transporte dos materiais.

Tabela 3.8. Fatores de emissão de GEE de Óleo Diesel

Fatores de emissão de CO ₂ equivalente (kgCO ₂ eq/L)	Fonte
2,68	NEW ZEALAND (2015)
2,71	AUSTRALIAN GOVERNMENT (2015)
2,67	UK GOVERNMENT (2017)
2,68	BRITISH COLUMBIA (2014)
2,63	MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2013)

3.2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Uma vez que os fatores de emissão para cada componente foram definidos quantitativamente, temos que a avaliação de todas as etapas do ciclo de vida pode ser desenvolvida, a fim de se calcular o impacto final do sistema.

3.2.2.1 FASE DE PRÉ-USO

Para a fase de pré-uso, considera-se as seguintes etapas: extração da matéria-prima, manufatura dos materiais e o transporte necessário envolvido nesses processos. Foram considerados fatores de emissão de CO₂ equivalente especificamente para a fase de pré-uso referente a cada componente do sistema de vedação, incluindo o potencial de sequestro de carbono quando aplicável. Para o cálculo da distância dos materiais, foram considerados fornecedores nacionais. Esses fatores, bem como as distâncias percorridas e as unidades funcionais adotadas por componente foram apresentados na Tabela 3.9.

A quantidade dos componentes constituintes da HIS foi levantada e convertida em massa, como pôde ser visto na Tabela 3.1. A partir do levantamento de insumos e dos fatores de emissão, é possível obter valores de CO₂eq referentes aos processos dessa fase, conforme a Equação 3.1 a seguir.

$$EPRE = FCO_2eq * C$$

EQUAÇÃO 3.1.

Em que EPRE representa as emissões de GEE na fase de pré-uso em CO₂ equivalente, FCO₂eq, os fatores de emissão de cada componente em kg CO₂eq/UF e C, os insumos levantados, ora em m², ora em m³, de acordo com a unidade funcional de cada componente. Os resultados dessa equação não incluem o impacto gerado pelo transporte da fábrica até a obra.

Tabela 3.9. Fatores de emissão e distâncias durante a fase de pré-uso

Material	Unidade funcional (UF)	Fator de emissão (kgCO ₂ eq/UF)	Fonte	Distância (km)
Membrana hidrófuga	m ²	0,28	IBU (2016b)	1292 km ⁽¹⁾
Placa de gesso	m ²	3,92	IBU (2016c)	722 km ⁽²⁾
Placa cimentícia	m ²	5,13	IBU (2013)	920 km ⁽³⁾
Lã de rocha	m ³	62,90	BAU (2015)	789 km ⁽⁴⁾
OSB	m ³	-442,56	UL ENVIRONMENT (2013)	1292 km ⁽⁵⁾
<i>Softwood</i>	m ³	-631,00	THE AUSTRALASIAN EPD PROGRAMME (2015)	1348 km ⁽⁶⁾

¹Membrana Hidrófuga – Ponta Grossa-PR (LP); ²Gesso – Vespasiano-MG (Placo); ³Placa cimentícia – Capivari-SP (Brasilit); ⁴Lã de Rocha – Descalvado-SP (Lã Rocha); ⁵OSB – Ponta Grossa-PR (LP); ⁶Soft wood – Curitiba PR (TECVERDE);

Para o transporte entre fábrica e obra, foram consideradas as massas dos materiais ao invés da sua quantidade em m² ou m³. As distâncias consideradas foram das fábricas de produção dos materiais até a localização da HIS, obtidas por meio do programa *Google Maps*. Além disso, por falta de dados, não foram consideradas as emissões de execução de montagem do sistema *Light Wood Frame*.

Em relação às emissões geradas pelo transporte, foi adotado um valor de 0,0136 L/(km.ton) para o consumo médio de diesel (NABUT NETO, 2011). Juntamente com a massa dos materiais e a distância percorrida, é possível obter o consumo de combustível. A partir do consumo e do fator de emissão do óleo diesel, obtém-se então as emissões de GEE.

Para os cálculos, o caminhão adotado foi da Mercedes Benz de especificação 1620, de 10 toneladas. Considerou-se a massa do caminhão e a massa dos materiais transportados para o trecho fábrica-obra e para o transporte de volta à origem considerou apenas o caminhão vazio.

O cálculo do impacto do transporte de ida e volta para cada componente pode ser simplificado pela Equação 3.2.

$$ETRANS = FCO_2eq * d * C * (2M_c + Q_m) \quad \text{EQUAÇÃO 3.2.}$$

Em que ETRANS representa as emissões de GEE relativas ao transporte em CO₂ equivalente; FCO₂eq, o fator de emissão do diesel em kg CO₂eq/L; *d*, a distância percorrida de um trecho em quilômetros; *C*, o consumo médio de diesel em L/(km.ton); *M_c*, a massa do caminhão em toneladas e *Q_m*, a quantidade de massa de cada componente do sistema de vedação, em toneladas.

3.2.2.2 FASE DE USO

Na fase de uso, em geral, são considerados os processos operacionais tais como o gasto energético com aparelhos domésticos, cocção de alimentos e a manutenção. Porém, uma vez que este estudo tem como foco o sistema de vedação de uma habitação, foram analisadas somente as emissões de manutenção do *Light Wood Frame*, considerando os componentes envolvidos nesse sistema.

Por ser um sistema industrializado, assumiu-se que os seus componentes têm um alto índice de reaproveitamento e não foram consideradas as perdas. Além disso, também foram consideradas as emissões do transporte necessário para a manutenção e não foram consideradas as emissões de execução de montagem do sistema para a reposição dos materiais.

Considerando os períodos de vida útil de cada componente do sistema de vedação de *Light Wood Frame*, de acordo com dados de fabricantes e conforme utilizado por Caldas (2016), determina-se a quantidade necessária de reposição dos seguintes elementos, conforme a Tabela 3.10.

Tabela 3.10. Vida útil para componentes do sistema

Componentes do sistema	Vida útil
Membrana hidrófuga	30
Placa de gesso	30
Placa cimentícia	40
Lã de rocha	30
Placa de OSB	30

De acordo com a vida útil dos materiais, tem-se que cada material será repostado apenas uma vez, considerando que a vida útil da habitação é de cinquenta anos. Para obter as emissões de GEE referentes a fase de manutenção, tem-se a Equação 3.3.

$$EMAN = (EPRE + ETRANS) * Q_r \quad \text{Equação 3.3.}$$

Em que EMAN representa as emissões de GEE na fase de manutenção em CO₂ equivalente; EPRE, as emissões de GEE na fase de pré-uso em CO₂ equivalente; ETRANS, as emissões de GEE relativas ao transporte em CO₂ equivalente e Q_r o número de reposições dos componentes do sistema.

Fixou-se um tempo de vida útil de 50 anos para a madeira, uma vez que o *Light Wood Frame* não estará exposto ao ar livre, mas sim protegido pelas placas cimentícias e de gesso. Esta suposição é ratificada a partir do dado de que a madeira *pinus* tratada possui uma vida útil superior a 30 anos quando exposta ao tempo (BARILLARI, 2002).

3.2.2.3 FASE DE PÓS-USO

A madeira é ambientalmente sustentável e considerada um material reciclável, renovável e biodegradável, além de envolver menos energia no seu processo de transformação quando comparada a outros materiais (MARQUES, 2008). Sendo assim, para a fase de pós-uso, optou-se por utilizar um tipo de disposição que envolvesse o potencial renovável e reciclável da madeira.

Para a retirada dos materiais após o fim da vida útil da habitação, adotou-se o processo de desconstrução, ao invés de demolição. Para esse procedimento, foram considerados os estudos de Pedroso (2015) e Caldas (2016), que quantificaram a energia e a emissão de CO₂ de uma vedação de *Light Steel Frame*. Esses estudos consideraram o uso de parafusadeiras e o de mão de obra.

Uma vez que a vedação de aço nesses estudos possui os mesmos componentes que o sistema de *Light Wood Frame* neste trabalho, é possível adotar os mesmos fatores utilizados sem comprometer o levantamento de dados. A única diferença entres os dois sistemas é o tipo de *frame*.

Caldas (2016) utilizou um fator de emissão de CO₂ de 0,000092 kgCO₂/kg de material para a desconstrução do *Light Steel Frame*. Considerando que as emissões de CO₂ representam 95% de emissões de GEE do setor energético (IPCC, 2006), pode-se utilizar um fator de conversão de 1,053 para chegar em um valor de CO₂ equivalente. Portanto, tem-se um fator de emissão de GEE de 0,000097 kgCO₂eq/kg de material.

Além disso, para a destinação final, buscou-se explorar a opção com menor impacto de emissão de CO₂eq para o *Light Wood Frame*, para o OSB e para as placas de gesso, em que foi

adotada uma disposição final com aproveitamento dos seus respectivos potenciais de reuso e de reciclagem obtidos nos EPDs. Para esses componentes, foi considerado o transporte até um centro de reciclagem de Brasília, cuja distância da HIS é de 27 km.

Para os demais componentes do sistema de vedação, sem potencial de reuso ou de reciclagem, foram consideradas as emissões de CO₂eq a partir do transporte dos materiais até o aterro sanitário de Brasília com a distância de 47 km da HIS.

Portanto, para obter as emissões de GEE referentes a fase de pós-uso, tem-se a seguinte Equação 3.4.

$$EPOS = FCO_{2eqd} * C + FCO_{2eqr} * C \quad \text{EQUAÇÃO 3.4.}$$

Em que EPOS representa as emissões de GEE na fase de pós-uso em CO₂ equivalente; FCO_{2eqd}, os fatores de emissão de desconstrução de cada componente em kg CO₂eq/kg de material; C, os insumos, em quilogramas e FCO_{2eqr}, os fatores de emissão de reciclagem ou reuso, quando aplicável.

Para o transporte dos materiais desmontados à suas respectivas destinações finais, foi considerado apenas um trajeto, da obra até o destino, e os dados do veículo utilizado são os mesmos da fase de pré-uso. Portanto, para obter as emissões de GEE referentes ao transporte fase de pós-uso, tem-se a Equação 3.5.

$$ETPOS = FCO_{2eq} * d * C * (M_c + Q_t) \quad \text{EQUAÇÃO 3.5.}$$

Em que ETPOS representa as emissões de GEE relativas ao transporte na fase de pós-uso em CO₂ equivalente; FCO_{2eq}, o fator de emissão do diesel em kg CO₂eq/L; *d*, a distância percorrida de um trecho em quilômetros; *C*, o consumo médio de diesel em L/(km.ton); *M_c*, a massa do caminhão em toneladas e *Q_t*, a quantidade de massa dos componentes do sistema de vedação, em toneladas.

Devido ao processo de manutenção, todos os componentes do sistema de vedação foram encaminhados duas vezes para a disposição final, com exceção dos *frames* em *softwood*, que só foram descartados no fim de vida útil da edificação.

3.3 METODOLOGIA DA ANÁLISE COMPARATIVA

Após encontrar o valor final de emissões de GEE para todo o ciclo de vida da vedação de *Light Wood Frame*, pode-se fazer uma análise comparativa com outros tipos de vedação, tais como a alvenaria convencional de bloco cerâmico, comumente utilizada por todo o Brasil, e o sistema de *Light Steel Frame*, outro sistema leve industrializado.

Para os dados de emissões de GEE de bloco cerâmico, foi escolhido o estudo de Caldas *et al.* (2015), em que foi realizado um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ (ACVCO₂) aplicado a uma habitação de interesse social. Já para os dados de *Light Steel Frame*, foram utilizados os dados de Caldas (2016), em que também foi feito um estudo de ACVCO₂ aplicado ao mesmo tipo de habitação. Esses estudos possuem condições e limitações similares ao estudo de *Light Wood Frame*, o que justifica suas escolhas para a análise comparativa.

Assim como neste trabalho, os estudos de bloco cerâmico e *Light Steel Frame* também não consideram as emissões provenientes da etapa de execução. Entretanto, ambos os trabalhos fornecem os dados de emissão apenas em CO₂ e a etapa operacional é contabilizada. Portanto, para compatibilizar os dados de emissões, foi utilizado o mesmo fator da etapa de desconstrução do *Light Wood Frame* de 1,053 para transformar as emissões de CO₂ em um valor correspondente de CO₂ equivalente (IPCC, 2006). Em relação a etapa operacional, esta foi desconsiderada e seu valor descontado.

Sendo assim, após a conversão dos dados de saída das vedações consideradas, é possível estabelecer um valor de emissões de GEE por metro quadrado de habitação com o intuito de comparar os impactos ambientais causados pelos três sistemas.

4 RESULTADOS

Aplicando a metodologia apresentada no presente trabalho, foi possível obter os resultados finais, em que foi quantificado o impacto ambiental causado pela vedação de *Light Wood Frame*, dado em emissões de CO₂ equivalente.

Para a fase de pré-uso, foram calculados os valores de emissão de GEE que se encontram na Tabela 4.1, de acordo com os fatores de emissão escolhidos (Apêndice 2). Com isso, obteve-se um total de emissão de 4,32 tCO₂eq para o pré-uso, em que a fase de extração e manufatura é responsável por -11,51 % desse valor e o transporte por 111,51%.

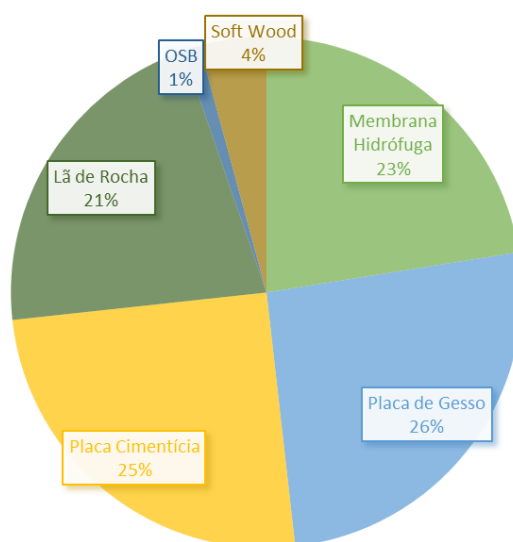
O valor negativo de porcentagem de participação ocorre devido ao sequestro de carbono considerado para os componentes de *Light Wood Frame* e OSB. Sendo assim, observa-se que esse efeito consegue minimizar às emissões totais de GEE, enquanto que as longas distâncias das fábricas dos componentes a Brasília representam a causa majoritária das emissões.

Tabela 4.1. Emissões durante a fase de pré-uso

Material	Emissões nas fases de extração e manufatura (kgCO₂eq)	Emissões no Transporte (Fábrica – Obra) (kgCO₂eq)	Emissões Totais (kgCO₂eq)
Membrana hidrófuga	31,38	938,62	970,00
Placa de gesso	540,84	569,56	1110,40
Placa cimentícia	378,95	703,68	1082,63
Lã de rocha	340,92	583,89	924,81
OSB	-955,93	1002,53	46,60
<i>Light Wood Frame</i>	-832,92	1014,57	181,65

Em relação aos componentes do sistema leve de vedação, tem-se na Figura 4.1 as respectivas proporções de emissões na fase de pré-uso.

Figura 4.1. Participação dos materiais na fase de pré-uso

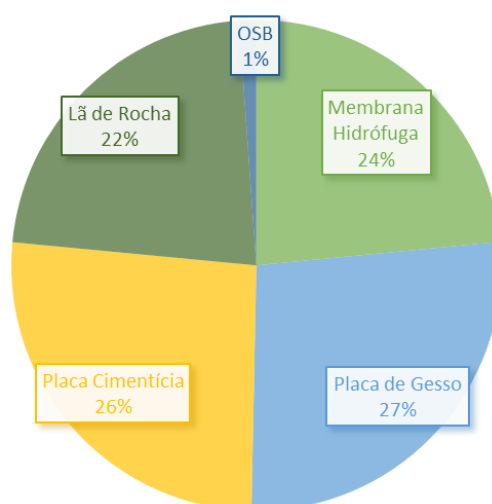


Fonte: (Elaborado pelos autores).

Para a fase de uso, encontrou-se o valor de emissão de 4,13 tCO₂eq (Apêndice 3). Uma vez que todos os componentes possuem a vida útil menor do que 50 anos, com a exceção do *frame* em madeira, foi necessária a reposição desses materiais. Sendo assim, as emissões para cada componente repostos são as mesmas correspondidas na Tabela 4.1.

Como o *Light Wood Frame* não foi repostos, a participação de cada componente no impacto gerado durante a fase de uso apresentará uma proporção diferente da fase de pré-uso, conforme observado na Figura 4.2.

Figura 4.2. Participação dos materiais na fase de uso



Fonte: (Elaborado pelos autores).

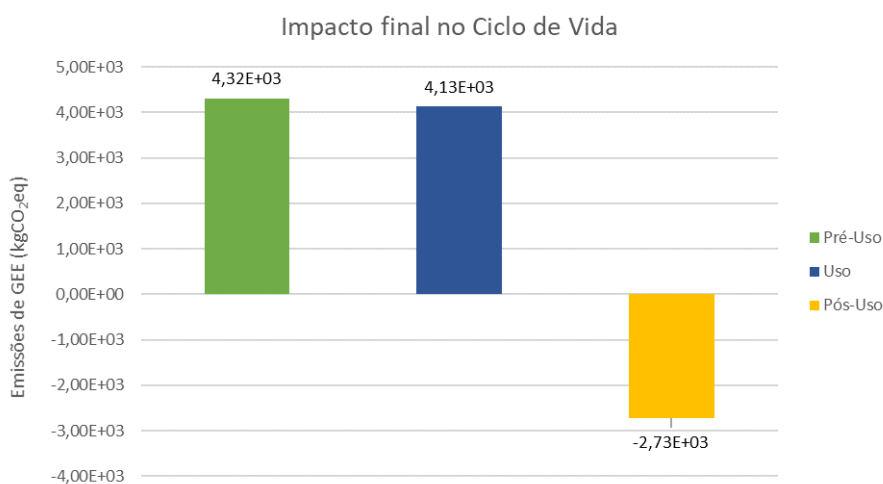
Por fim, na etapa de pós-uso, foi encontrado o valor de -2,73 tCO₂eq (Apêndice 4). O valor negativo encontrado se justifica pela reciclagem adotada para os materiais de placa de gesso, *Light Wood Frame* e OSB. Além disso, nesta fase o transporte não desempenhou um papel significativo, devido à proximidade da HIS com os locais de destinação final. As emissões de cada componente na fase de pós-uso estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Emissões durante a fase de pós-uso

Material	Impacto Desconstrução (kgCO ₂ -eq)	Reuso Recuperação Reciclagem (kgCO ₂ eq)	Emissão Transporte (kgCO ₂ eq)	Emissões Totais (kgCO ₂ eq)
<i>Light Wood Frame</i>	0,071	-135,96	23,35	-112,54
Placa de Gesso	0,167	-88,30	23,35	-129,56
OSB	0,133	-1376,96	23,35	-2706,94
Placa Cimentícia	0,103	-	36,61	73,42
Lã de Rocha	0,037	-	36,61	73,29
Membrana Hidrófuga	0,001	-	36,61	73,22

Considerando as emissões de todas as etapas, tem-se um valor de 5,72 tCO₂eq para o sistema de vedação de *Light Wood Frame*, valor que resulta em uma taxa de 0,127 tCO₂eq/m² de habitação. Na figura 4.3 é possível ver o impacto final de emissões de GEE geradas pelo sistema de vedação e a participação de cada fase do ciclo de vida.

Figura 4.3. Emissões de CO₂eq no ciclo de vida da habitação estudada



Fonte: (Elaborado pelos autores).

Percebe-se que a etapa de pré-uso foi a mais impactante em todo o ciclo de vida, com uma participação de 75,4%. Já a fase de uso indicou uma participação de 72,3% e a de pós-uso, de -47,7%. O valor negativo se justifica devido ao potencial de reciclagem e reuso observado nos materiais de placa de gesso, *Light Wood Frame* e OSB.

Por fim, a Tabela 4.3 traz o impacto final de todos os componentes durante todas as fases do ciclo de vida.

Tabela 4.3. Emissões totais por componente

Material	Emissões Totais Pré-Usado (kgCO₂eq)	Emissões Totais Uso (kgCO₂eq)	Emissões Totais Pós-Usado (kgCO₂eq)	Emissões Totais Finais (kgCO₂eq)	Porcentagem Final (%)
<i>Light Wood Frame</i>	181,65	0,00	-112,54	69,11	1,21%
Placa de Gesso	1110,40	1110,40	-129,56	2091,25	36,55%
OSB	46,60	46,60	-2706,94	-2613,74	-45,68%
Placa Cimentícia	1082,63	1082,63	73,42	2238,69	39,13%
Lã de Rocha	924,81	924,81	73,29	1922,91	33,61%
Membrana Hidrófuga	970,00	970,00	73,22	2013,21	35,19%
Total	4316,08	4134,44	-2729,10	5721,43	100,00%

Nota-se que o material com o maior impacto no ciclo de vida foi a placa cimentícia, com 39,13% de todo o impacto causado pela habitação em estudo. Além disso, observa-se que o efeito do potencial de reciclagem e de reuso do OSB apresentou um resultado significativo para o sistema de *Light Wood Frame*, sendo responsável por reduzir as emissões em até 45,68%.

Outros trabalhos que abordaram a vedação de *Light Wood Frame* foram realizados em âmbito nacional, como o de Monich (2012) e de Oliveira (2016). Entretanto, esses trabalhos consideram apenas as emissões incorporadas do sistema de vedação relativas a fase de pré-uso e os limites de fronteiras são diferentes dos aplicados no presente trabalho. Portanto, não foi encontrado nenhum trabalho desenvolvido com condições similares suficientes que justificassem a comparação de resultados.

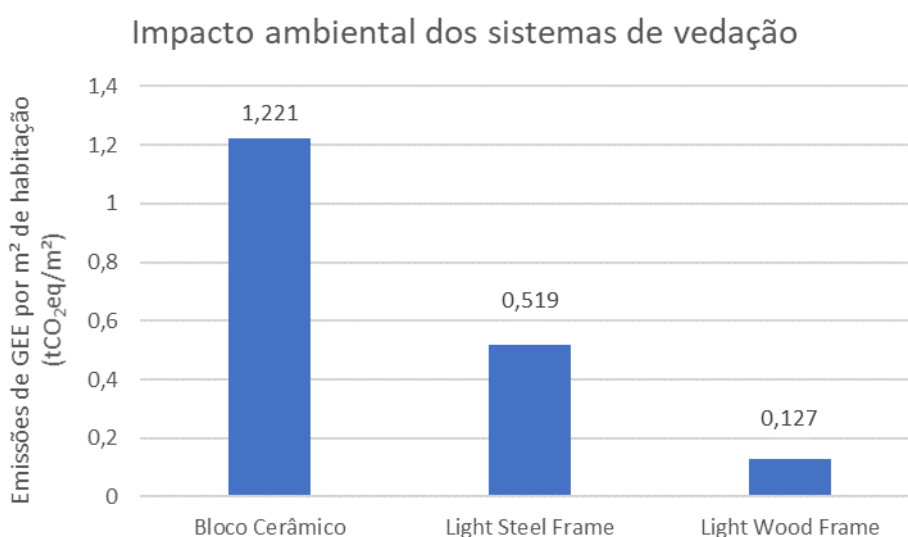
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA

Uma vez que foi encontrado um valor final de emissões de GEE para todo o ciclo de vida da vedação de *Light Wood Frame*, é possível fazer uma análise comparativa com outros tipos de vedação. Para esse estudo, optou-se comparar com duas alternativas de vedação: a alvenaria convencional de bloco cerâmico, comumente utilizada por todo o Brasil, e o sistema de *Light Steel Frame*, outro sistema leve industrializado.

Para a alvenaria convencional de bloco cerâmico tem-se um total de 55,64 tCO₂ (CALDAS *et al.*, 2015) emitidos durante ciclo de vida de uma habitação de 48 m², considerando a extração da matéria-prima, a manufatura, o transporte, a manutenção dos componentes e o pós-uso. Já para o *Light Steel Frame*, tem-se um valor de 22,50 tCO₂ (CALDAS, 2016) para uma habitação de 45,64 m², considerando as mesmas etapas do ciclo de vida da alvenaria convencional. Transformando esses valores em emissões de GEE dadas em CO₂ equivalente, tem-se 58,59 tCO₂eq para o bloco cerâmico, correspondendo a taxa de 1,221 tCO₂eq/m² de habitação, e 23,69 tCO₂eq para o *Light Steel Frame*, resultando no desempenho de 0,519 tCO₂eq/m² de habitação.

Os diferentes impactos ambientais causados pelos três sistemas de vedação podem ser vistos na Figura 4.4.

Figura 4.4. Emissões totais dos três sistemas de vedação



Fonte: (Elaborado pelos autores).

Observa-se que o *Light Wood Frame* possui um desempenho de 0,127 tCO₂eq/m² de habitação, significativamente menor quando comparado aos outros sistemas de vedação, em que a alvenaria de bloco cerâmico emite mais de nove vezes a quantidade de emissões de GEE do sistema em madeira, enquanto que o *Light Steel Frame* emite o quádruplo.

O principal fator para o resultado consideravelmente menor do *Light Wood Frame* é o pós-uso adotado para o OSB, o *Light Wood Frame* e as placas de gesso, em que foram considerados os potenciais de reuso e reciclagem dos materiais.

Ainda, é válido ressaltar que no estudo de Caldas (2016) também é aplicado o OSB ao sistema de vedação, porém o autor não considera o potencial de reciclagem do mesmo. Uma vez que esse potencial indicou uma redução de 2,7 tCO₂eq para o OSB, tem-se que mesmo com sua contabilização no estudo do sistema em aço, o sistema que apresentaria a menor quantidade de emissões de GEE ainda seria o *Light Wood Frame*. O *Light Steel Frame* apresentaria um valor de 0,460 tCO₂eq/m² de habitação, um valor ainda consideravelmente maior do que o do sistema em madeira.

Ainda, é válido ressaltar que no estudo de Caldas (2016) também é aplicado o OSB ao sistema de vedação, porém o autor não considera o potencial de reciclagem do mesmo. Uma vez que esse potencial indicou uma redução de 2,7 tCO₂eq para o OSB, tem-se que mesmo com sua contabilização no estudo do sistema em aço, o sistema que apresentaria a menor quantidade de emissões de GEE ainda seria o *Light Wood Frame*. O *Light Steel Frame* apresentaria um valor de 0,460 tCO₂eq/m² de habitação, um valor ainda consideravelmente maior do que o do sistema em madeira.

Sendo assim, nota-se que a fase de pós-uso desempenha um papel significativo no ciclo de vida, a depender do tipo de atividade considerada. Adotar processos de desconstrução, reciclagem, reuso e recuperação energética representam cenários reais e de menor impacto ambiental, como exemplificado por este estudo.

5 CONCLUSÃO

A partir da metodologia aplicada no presente trabalho, foi possível obter resultados acerca das emissões de GEE causadas por um sistema de vedação de *Light Wood Frame* em Brasília-DF. Os resultados indicaram um total de emissão de GEE de 5,72 tCO₂eq para todo o ciclo de vida da habitação de interesse social considerada.

De todas as fases do ciclo de vida, a que teve o maior impacto foi a fase de pré-uso, principalmente devido ao transporte dos materiais, de suas respectivas fábricas até a obra. Tal resultado se justifica pelo fato de todas as distâncias percorridas serem maiores do que 700 km, devido a realidade brasileira de significativa extensão territorial.

Desconsiderando os efeitos causados pelo transporte, o material que apresentou o maior impacto em todo o ciclo de vida foi a placa cimentícia. Tal resultado era esperado, uma vez que o cimento é um dos materiais da construção civil que mais impacta o meio ambiente (THE WORLD BANK, 2013).

Além disso, a placa de gesso apresentou o segundo maior impacto, mesmo com a adoção da reciclagem em seu pós-uso. Isso pode ser justificado pelo fato de haver a calcinação no processo de manufatura desse componente, que gera mais emissões de GEE além das emissões resultantes do uso energético.

Em contrapartida, o *Light Wood Frame* e o OSB se apresentaram como componentes vantajosos ao indicarem valores negativos de emissão de GEE, que ocorreram devido ao sequestro de carbono durante o tempo de vida da madeira. Esse resultado corrobora com a escolha inicial da madeira como objeto de estudo deste trabalho, como uma alternativa de sistema de vedação ambientalmente sustentável.

Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram atingidos, uma vez que é possível afirmar que o sistema de *Light Wood Frame* se apresenta como uma opção viável de vedação para Brasília. Além de ser um sistema industrializado, foi averiguada sua sustentabilidade ambiental em termos de emissões de GEE em que, por meio de uma análise comparativa com o bloco cerâmico e o sistema de *Light Steel Frame*, constatou-se ser a melhor opção.

Além disso, é notória a contribuição positiva da abordagem da fase de pós-uso nesse trabalho, pioneiro nesta consideração para o sistema de *Light Wood Frame*. A adoção dessa fase enaltece os resultados ao permitir uma análise completa do ciclo de vida do sistema,

considerando as alternativas viáveis de reuso para componentes que não necessitam ser descartados.

Ao averiguar a sustentabilidade da vedação de *Light Wood Frame*, este trabalho colabora com futuras tomadas de decisões na escolha de materiais e sistemas construtivos para habitações, visando a mitigação de impactos ambientais. Além disso, recomenda-se que o transporte seja um fator crucial na escolha dos materiais construtivos, uma vez que o seu impacto de emissões de GEE é significativo.

Por fim, espera-se que estudos futuros possam surgir de maneira que sejam desenvolvidos mais dados nacionais, com o intuito de obter resultados mais precisos. Também espera-se que todas as limitações encontradas neste trabalho possam ser solucionadas em pesquisas futuras. Como sugestão, podem ser realizados trabalhos que desenvolvam fatores de emissão primários dos componentes do sistema de *Light Wood Frame* e também estudos que comparem as possíveis destinações dos materiais na fase de pós-uso e os respectivos impactos ambientais causados.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JONH, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Série Sustentabilidade, Vol. 5. São Paulo: Ed. Blucher. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (ABRAMAT). **A cadeia produtiva da construção e o mercado de materiais**. 2007. Disponível em: <<http://www.abramat.org.br/datafiles/publicacoes/estudo-cadeiaprodutiva.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Manual da Construção Industrializada**. Volume 1: Estrutura e Vedação, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR ISO 14025: Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR ISO 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

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

AUSTRALIAN GOVERNMENT. **National Greenhouse Accounts Factors: Australian National Greenhouse Accounts**. Commonwealth of Australia, 2015.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Relatório Síntese ano base 2015**. Brasília, 2016.

BARILLARI, C. T. **Durabilidade da madeira do gênero pinus tratada com preservante: Avaliação em campo com apodrecimento**. Piracicaba, 79 p., 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

BAUSTOFFE MIT TRANSPARENZ (BAU). **Environmental Product Declaration: Mineral insulation materials made of Stonewool**. İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş., 2015.

BÖRJESSON, P; GUSTAVSSON, L. **Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives**. Energy Policy, v. 28. p. 575-588. 2000.

BRITISH COLUMBIA. **Best practices methodology for quantifying greenhouse gas emissions: Including guidance for public sector organizations, local governments and community emissions.** Ministry of Environment, Victoria, 2014.

CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. **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. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing.** 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R.; PAULSEN, J. S.; SANTOS FILHO, V. M. Emissões de CO₂ no ciclo de vida de habitações de interesse social: estudo de caso para o DF-Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 2015, São Carlos. **Anais do SIBRAGEC ELAGEC 2017.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2015.

CALDEIRA, D.M. **Avaliação do ciclo de vida energético na fase de pré-uso e uso de telhas termoacústicas com poliestireno expandido para edificação habitacional no DF.** 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Déficit Habitacional no Brasil.** 2016. Disponível em: < <http://www.cbicdados.com.br/menu/deficit-habitacional/deficit-habitacional-no-brasil>>. Acesso em: 5 março 2017.

CARDOSO, P.; PABLOS, J. M. Certificações Habitacionais e Avaliação do Ciclo de Vida. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2014, Maceió. **ANAIS do XV ENTAC.** Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2014.

CARMINATTI JR., R. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em *light steel framing*.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Carlos, São Paulo, 2012.

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.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2016: Relatório Gerencial.** 20ª Ed. Brasília, 2016.

DENTENER, F., STEVENSON, D., COFALA, J., MECHLER, R., AMANN, M., BERGAMASCHI, P., RAES, F., DERWENT, R. **The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone and radiative forcing: CTM calculations for the period 1990-2030,** Atmospheric Chemistry and Physics, v. 5. p. 1731-1755. 2005.

GOUVEIA, G. M. M. M. **Análise energético – ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM” em Brasília.** 2012. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2016.** IBÁ, 2016.

INSTITUT BAUEN UND UMWELT (IBU). **Environmental Product Declaration: AQUAPANEL® Cement Board Indoor / Outdoor**. Knauf USG Systems GmbH & Co. KG, 2013.

INSTITUT BAUEN UND UMWELT (IBU). **Environmental Product Declaration: AGEPAN® and Greenline® OSB (Oriented Strand Board)**. Sonae Indústria, S.G.P.S., S.A. / Glunz AG, 2016a.

INSTITUT BAUEN UND UMWELT (IBU). **Environmental Product Declaration: DuPont™ Tyvek® Monolayer 60 (1060B, 1560B, 2460B)**. DuPont de Nemours (Luxembourg) s.à r.l., 2016b.

INSTITUT BAUEN UND UMWELT (IBU). **Environmental Product Declaration: Plasterboard Knauf Diamant GKFI**. Knauf Gips KG, 2016c.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Emissions Scenarios**. Summary for Policymakers, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National greenhouse gas inventories**, v. 2: Energy, 2006.

IWARO, J.; MWASHA, A. **The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model**. International Journal of Sustainable Built Environment. v.2. p. 153-171. 2013.

KEELER, M; BURKE, B. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. 1ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

KNAUF. **Knauf - Inovação, respeito ao meio ambiente, eficiência energética e sustentabilidade**. Disponível em: <<http://www.knauf.com.br/>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª ed. São Paulo: Pro Livros, 2012.

LEROY MERLIN. **Leroy Merlin - Construção, Acabamento, Decoração e Jardinagem**. Disponível em: <http://www.leroymerlin.com.br/chapa-de-osb-home-plus-mdi-11,1mmx1,20x2,40m-lp-brasil_89138294>. Acesso em: 12 outubro 2017.

LIRA, J; SPOSTO, R. Avaliação do Ciclo de Vida de emissões de CO₂ de diferentes tipos de telhado verde. In: Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2017, São Leopoldo. **Anais do Euro-ELECS 2017**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2017.

LIRA, J. S. M. M. **Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. Porto, Portugal, 111 p., 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto.

MEIRELLES, M; REGINA, C; DINIS, H. L.S. **Considerações sobre o uso da Madeira no Brasil em Construções Habitacionais**. III Fórum De Pesquisa Fau. Mackenzie, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Agenda 21**. Mma.gov.br. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21>>. Acesso em: 18 maio 2017a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Política de Resíduos Sólidos apresenta resultados em 4 anos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/10272-pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%ADlidos-apresenta-resultados-em-4-anos>>. Acesso em: 12 outubro 2017b.

MISURELLI H.; MASSUDA C. **Como construir parede de concreto**. Revista Técnica, e. 147, p. 74-80, jun. 2009.

MOLINA, J.; JUNIOR, C. **Sistema construtivo em "wood frame" para casas de madeira**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, 31(2), p.143, 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 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MONTZKA, S. A; DLUGOKENCY, E. J; BUTLER, J. H. **Non-CO2 greenhouse gases and climate change**. Nature. v. 476, p. 43-50, 2011.

MULLER, D. G. **Arquitectura Ecológica: 29 ejemplos**. São Paulo, Paralaxe. 2005.

NABUT NETO, A. C. **Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas. Estudo de caso do steel frame para a utilização em Brasília**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília.

NASCIMENTO, F. J. F.; PIMENTEL, L. L. Reaproveitamento de resíduo de gesso. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. **Anais do ENTAC 2010**. Canela - RS, 2010.

NEW ZEALAND. **Summary of Emissions Factors for the Guidance for Voluntary Corporate Greenhouse Gas Reporting**. Ministry for the Environment, 2015.

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 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ONU BRASIL. **Meio ambiente**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 18 maio 2017.

PALÁCIO, C. D. U. **Análise térmica e energia incorporada de vedações para habitações de interesse social. Estudo de caso com utilização do steel frame no entorno do DF**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

- PARK, H. S.; LEE, H.; KIM, Y.; HONG, T.; CHOI, S, W. **Evaluation of the influence of design factors on the CO2 emissions and costs of reinforced concrete columns.** Energy and Buildings, v. 82, p. 378–384, 2014.
- PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. **A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case Study for the program “MY HOUSE MY LIFE”.** Energy and Buildings. v.57. p. 95-102. 2013.
- PAWELZIK, P.; CARUS, M. HOTCHKISS, J.; NARAYAN, R.; SELKE, S.; WELLISCH, M.; WEISS, M.; WICKE, B.; PATEL, M. K. **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.
- PEDROSO, G. M. P. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) de Sistemas de Vedação de Habitações.** 2015. 226 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ROMÉRO, M. A., REIS, L. B. PHILIPPI JR. A. **Eficiência energética em edifícios.** Editora Manole. 190 p. Barueri, São Paulo, 2012.
- SALGADO, M. S., CHATELET, A., FERNANDEZ, P. **Produção de edificações sustentáveis: desafios e alternativas.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 12, n. 4, p. 81-99, out/dez. 2012.
- SEIFFERT, M. E. B. **Gestão Ambiental – Instrumentos, esferas de ação e educação ambiental.** 2 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2011.
- SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.
- SPRAGUE, P. E. **The Origin of Balloon Framing.** Journal of the Society of Architectural Historians, v. 40, n. 4, p. 311-319, 1981.
- SUTTON, W. R. J. **Wood - the world’s most sustainable raw material.** UNFF Intersessional Expert Meeting on the Role of Planted Forests in Sustainable Forest Management. Wellington, Nova Zelândia. Março, 2003.
- TAVARES, S.F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras (Methodology for analysis of energy life cycle of residential buildings in Brazil).** 2006. 225f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TÉCHNE. **Madeira - Light wood frame.** 2009. Revista Técnica. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/148/artigo286608-1.aspx>>. Acesso em: 20 maio 2017.
- TECVERDE. **Sustentabilidade na Tecverde.** Disponível em: <<http://www.tecverde.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 26 agosto 2017.

THE AUSTRALASIAN EPD® PROGRAMME LTD. **Environmental Product Declaration: Softwood Timber.** Wood Solutions, 2015.

THE WORLD BANK. **CO2 emissions (metric tons per capita).** 2013. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>>. Acesso em: 25 maio 2017.

TURNER, L. K; COLLINS, F. G. **Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete.** Construction and Buildings Materials, v. 43. p. 125-130. 2013.

UL ENVIRONMENT. **Environmental Product Declaration: North American Oriented Strand Board.** American Wood Council and Canadian Wood Council, 2013.

UK GOVERNMENT. **Greenhouse gas reporting: conversion factors.** Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2017.

WWF, World Wildlife Fund. **O que é desenvolvimento sustentável?** Wwf.org.br. Disponível em: <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/>. Acesso em: 17 maio 2017.

XING, S; XU, Z; JUN, G. **Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings.** Energy and Buildings, v.40. p. 1188-1193. 2008.

APÊNDICES

A1 – PLANILHAS DE CÁLCULOS DE CONSUMO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VEDAÇÃO

Componente	Unidade Funcional (UF)	Perímetro (m)	Pé-direito (m)	Espessura (mm)	Consumo Final
Placa Cimentícia	m ²	27,36	2,7	-	73,87 m ²
Placa de Gesso	m ²	51,10	2,7	-	137,97 m ²
OSB	m ³	72,72	2,7	11,0	2,16 m ³
Lã de Rocha	m ³	40,22	2,7	50,0	5,42 m ³

Componente	Unidade Funcional (UF)	Perímetro (m)	Área perfil (m ²)	Consumo Final
<i>Light Wood Frame</i>	m ³	390,94	0,0034	1,32 m ³

Componente	Unidade Funcional (UF)	Comprimento (m)	Altura (m)	Consumo Final
Membrana Hidrófuga	m ²	41,50	2,70	112,07 m ²

A2 – PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE PRÉ-USO

Componente	Manufatura (Fábrica)				Transporte					Efeitos finais
	Unidade Funcional (UF)	Fator de emissão (kgCO ₂ eq/UF)	Consumo (UF)	Impacto (kgCO ₂ eq)	Fator de emissão Diesel (kgCO ₂ eq/L)	Consumo (L/(km.kg))	Massa do Componente (kg)	Distância Fábrica - HIS (km)	Impacto Transporte (kgCO ₂ eq)	Impacto Total (kgCO ₂ eq)
Membrana Hidrófuga	m ²	0,28	112,07	31,38	2,67	1,36E-05	6,72	1292	938,62	970,00
Placa de Gesso	m ²	3,92	137,97	540,84	2,67	1,36E-05	1724,62	722	569,56	1110,40
Placa Cimentícia	m ²	5,13	73,87	378,95	2,67	1,36E-05	1063,76	920	703,68	1082,63
Lã de Rocha	m ³	62,9	5,42	340,92	2,67	1,36E-05	380,08	789	583,89	924,81
OSB	m ³	-442,56	2,16	-955,93	2,67	1,36E-05	1368,96	1292	1002,53	46,60
Soft Wood	m ³	-631	1,32	-832,92	2,67	1,36E-05	727,19	1348	1014,57	181,65
			TOTAL	-496,76				TOTAL	4812,84	4316,08

A3 – PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE USO

Componente	Reposição de Manufatura (Fábrica e Transporte)			Efeitos finais	
	Unidade Funcional (UF)	Quantidade de Reposição em 50 anos	Impacto Manufatura (kgCO ₂ eq)	Impacto Transporte (kgCO ₂ eq)	Impacto Total (kgCO ₂ eq)
Membrana Hidrófuga	m ²	1,00	31,38	938,62	970,00
Placa de Gesso	m ²	1,00	540,84	569,56	1110,40
Placa Cimentícia	m ²	1,00	378,95	703,68	1082,63
Lã de Rocha	m ³	1,00	340,92	583,89	924,81
OSB	m ³	1,00	-955,93	1002,53	46,60
Soft Wood	m ³	0,00	0,00	0,00	0,00
		TOTAL	336,16	3798,28	4134,44

A4 – PLANILHA DE CÁLCULOS DA FASE DE PÓS-USO

Componente	Disposição Final								Efeitos finais	
	Unidade Funcional (UF)	Fator de Desconstrução (kgCO ₂ eq/kg de material)	Massa do Componente (kg)	Impacto Desconstrução (kgCO ₂ eq)	Fator de emissão de Reciclagem, Reuso (kgCO ₂ eq/UF)	Consumo (UF)	Reuso Recuperação Reciclagem (kgCO ₂ eq)	Distância HIS - Disposição Final (km)	Emissão Transporte (kgCO ₂ eq)	Impacto Total (kgCO ₂ eq)
Soft Wood	m ³	0,000097	727,19	0,071	-103,00	112,07	-135,96	27,00	23,35	-112,54
Placa de Gesso	m ²	0,000097	1724,62	0,167	-0,64	137,97	-88,30			-129,56
OSB	m ³	0,000097	1368,96	0,133	-637,48	73,87	-1376,96			-2706,94
Placa Cimentícia	m ²	0,000097	1063,76	0,103	-	-	-	47,00	36,61	73,42
Lã de Rocha	m ³	0,000097	380,08	0,037	-	-	-			73,29
Membrana Hidrófuga	m ²	0,000097	6,72	0,001	-	-	-			73,22
TOTAL										-2729,10