

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES
DE CO₂ DE UMA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR
DE LIGHT STEEL FRAMING**

LUCAS ROSSE CALDAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES
DE CO₂ DE UMA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR
DE LIGHT STEEL FRAMING**

LUCAS ROSSE CALDAS

ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO

COORIENTADOR: ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E. DM-09A/16

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2016

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

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES
DE CO₂ DE UMA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR
DE LIGHT STEEL FRAMING**

LUCAS ROSSE CALDAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof^a. Rosa Maria Sposto, Dra. (UnB)
(Orientadora)

Prof^a. Michele Tereza Marques Carvalho, Dra. (UnB)
(Examinadora Interna)

Prof^a. Vanessa Gomes da Silva, Dra. (Unicamp)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 04 DE MAIO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

CALDAS, LUCAS ROSSE

Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing. [Distrito Federal, 2016].

xxv, 174p. 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.ACVE

2.ACVC_{CO₂}

3.Edificações Habitacionais

4. Light Steel Framing

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CALDAS, L. R. (2016). Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-09A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lucas Rosse Caldas

TÍTULO: Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing

GRAU: Mestre ANO: 2016

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

Lucas Rosse Caldas
SQN 404, Bloco C, Apto 108 – Asa Norte
70845030 Brasília - DF- Brasil
e-mail: lrc.ambiental@gmail.com

Dedicatória.

Dedico este trabalho aos meus pais, meu irmão e
minhas avós, pelo apoio em todos os momentos e o amor
incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter sempre me acompanhado nos momentos de alegria e de tristeza me dando forças para que eu pudesse continuar seguindo em frente para alcançar os meus objetivos com muita paciência e humildade.

A meu pai, minha mãe, irmão, outros familiares e amigos pelo apoio incondicional durante toda minha trajetória acadêmica.

Aos meus orientadores Rosa Maria Sposto e Amando Caldeira Pires pela disponibilidade, dedicação, comprometimento e incentivo na orientação deste trabalho.

Aos professores do PECC, em especial, Michele, Eugênia e Bauer pelos conhecimentos compartilhados.

Aos professores da UFG, Márcia, Eduardo, Simone e Karla, pelo incentivo para a realização do mestrado.

À professora Vanessa Gomes da Silva por ter aceitado participar da banca e contribuir com este estudo.

À CAPES pelo suporte financeiro.

À Eva e ao Ricardo por desempenharem muito bem suas atividades como secretários do PECC contribuindo para o bom andamento das atividades diárias dos alunos e professores do programa.

Aos colegas da UnB e amigos Matheus, Divino, Débora, Nailde, Vamberto, Maria Luiza, Wallison, Dyorgge, Gilson, Júlia e Ana pelo companheirismo e auxílio durante o mestrado e na estadia em Brasília.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para que o sonho do mestrado um dia pudesse se tornar uma realidade.

“Disse a flor ao pequeno príncipe: é preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas”.

Antoine de Saint-Exupéry (O Pequeno Príncipe)

RESUMO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES DE CO₂ DE UMA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR DE LIGHT STEEL FRAMING

Autor: Lucas Rosse Caldas

Orientador: Dra. Rosa Maria Sposto

Coorientador: Dr. Armando de Azevedo Caldeira-Pires

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2016

Com a crise energética que o Brasil vem enfrentando e a pressão internacional para a diminuição das emissões de CO₂, nota-se o aumento, nos últimos anos, de pesquisas relacionadas à produção de edificações considerando estes dois aspectos ambientais. Na produção das vedações verticais de edificações habitacionais, algumas tecnologias têm sido utilizadas, entre elas o *light steel framing* (LSF), as quais precisam atender requisitos e critérios de desempenho do usuário, relacionadas à segurança, habitabilidade e sustentabilidade ambiental. Uma forma de medir o desempenho ambiental de um produto ou processo é a avaliação do ciclo de vida (ACV), que está sendo aplicada nas edificações. Muitos trabalhos de ACV tem tido como foco questões relacionadas ao consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do seu ciclo de vida, o que resultou no surgimento dos termos Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂). Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo a realização da ACVE e ACVCO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar (EHU) localizada em Brasília – DF. Foram comparados dois diferentes sistemas de vedação vertical (externa e interna): *light steel framing* (LSF) e blocos cerâmicos de vedação convencional (VC), considerando o ciclo de vida completo da EHU, também chamado de berço ao túmulo, a partir das etapas de pré-uso, uso e pós-uso da edificação. A metodologia utilizada se baseou em estudos nacionais e internacionais, realizados por meio da pesquisa bibliográfica e da aplicação a um estudo de caso. Foram utilizados diferentes dados de inventário, obtidos da literatura, para valores mínimos, médios e máximos. As equações utilizadas foram aplicadas em planilhas eletrônicas e foi utilizado o software de simulação termoenergética, DesignBuilder, para obtenção do consumo de energia e emissões de CO₂ na etapa operacional da edificação em estudo, avaliando a relação do desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical. O sistema de VC apresentou melhor desempenho térmico quando comparado ao sistema de LSF, no entanto, esta diferença não resultou significativa no consumo de energia e emissões de CO₂. A EHU de VC apresentou maior consumo de energia total quando comparada a EHU de LSF, para as situações de valores mínimos e médios. Em relação às emissões totais de CO₂, a habitação de VC apresentou maior valor para as três situações de dados. A etapa de uso se mostrou a mais impactante ao longo do ciclo de vida das habitações. Com participação da fase operacional variando de 65 a 75% para energia e 58 a 70% para emissões de CO₂, e de manutenção com 15 a 20% para energia e 11 a 18% para emissões, seguida da etapa de pré-uso, variando de 8 a 17% para energia e de 14 a 28% para as emissões. A etapa de pós-uso apresentou participação inferior a 1% tanto para energia como também para as emissões de carbono. Desta forma, foi possível concluir que além do aspecto do consumo de energia é interessante avaliar questões das emissões de CO₂. Por fim, destaca-se que para a realidade de Brasília a partir dos dados adotados neste trabalho o LSF foi o sistema de vedação vertical mais vantajoso do ponto de vista energético e de emissões de carbono.

Palavras – chave: ACVE, ACVCO₂, edificações habitacionais, *light steel framing*.

ABSTRACT

LIFE CYCLE ENERGY ASSESSMENT (LCEA) AND LIFE CYCLE CO₂ EMISSIONS (LCCO₂A) OF LIGHT STEEL FRAMING HOUSE

Author: Lucas Rosse Caldas

Supervisor: Dra. Rosa Maria Sposto

Cosupervisor: Dr. Armando de Azevedo Caldeira - Pires

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, April of 2016

With the energy crisis that Brazil is facing and international pressure to reduce CO₂ emissions, there is an increase in recent years in research related to the production of buildings considering these two environmental aspects. In the production of wall system of residential buildings, some technologies have been used, like the light steel framing (LSF), which must meet user requirements and performance criteria related to safety, livability and environmental sustainability. One way to measure the environmental performance of a product or process is the life cycle assessment (LCA), which is being applied in buildings. Many LCA studies have been focused on issues related to energy consumption and CO₂ emissions throughout its life cycle, resulting in the emergence of terms Life Cycle Energy Assessment (LCEA) and Life Cycle CO₂ Emissions Assessment (LCCO₂A). In this context, this study aimed to study the application of LCEA and LCCO₂A of two single-family residential buildings located in Brasília - DF. It was compared different wall systems (external and internal): light steel framing (LSF) and brick masonry (BM), considering the full life cycle of the residential buildings, also called cradle to grave, including pre-use, use and post-use phases of the buildings. The methodology used was based on national and international studies, conducted through literature review and application to a case study. Different inventory data were used, obtained from the literature, for minimum, medium and maximum values. The equations used were applied in spreadsheets and was used a thermo-energetic simulation software, DesignBuilder to study the relation between the thermal performance of the wall systems and the energy and CO₂ emissions due to the air conditioning. The BM system showed better thermal performance compared to the LSF system, however, this difference did not result in significant energy consumption and CO₂ emissions in operational phase. The BM building had higher total energy consumption when compared to LSF building to situations of minimum and medium values. Related to the total CO₂ emissions, BM building showed a higher value for the three situations. The use phase showed the most impressive throughout the life cycle of buildings, with contribution from operational stage ranging from 65 to 75% for energy, 58 to 70% for CO₂ emissions, maintained between 15 and 20% for energy and 11 to 18% for carbon emissions, followed by the pre-use phase varying 8-17% for energy and 14-28% of CO₂ emissions. The post-use stage had participation below 1% for energy and CO₂ emissions. Thus, it was concluded that in addition to the aspect of energy consumption is interesting to evaluate issues of CO₂ emissions. Finally, to the reality of Brasília, from the data adopted in this study, the LSF was the more advantageous vertical system from the energetic and carbon point of view

Keywords: LCEA, LCCO₂A, residential buildings, light steel framing.

SUMÁRIO

1	ELEMENTOS PARA COMPREENSÃO DO TRABALHO	17
1.1	INTRODUÇÃO	17
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.....	18
1.3	JUSTIFICATIVAS	20
1.4	OBJETIVOS.....	21
1.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	22
1.6	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	28
2.2.1	<i>Definições, estrutura e aplicações da ACV.....</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Objetivo e Escopo de uma ACV.....</i>	<i>31</i>
2.2.3	<i>Análise do Inventário de uma ACV.....</i>	<i>32</i>
2.2.4	<i>Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....</i>	<i>33</i>
2.2.5	<i>Interpretação do Ciclo de Vida.....</i>	<i>33</i>
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE).....	34
2.3.1	<i>Conceitos e Definições</i>	<i>34</i>
2.3.2	<i>Fontes Energéticas e Panorama Energético Brasileiro</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>Consumo de Energia nas Edificações.....</i>	<i>38</i>
2.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO ₂ (ACVCO ₂)	40
2.4.1	<i>Conceitos e Definições</i>	<i>40</i>
2.5	ESTADO DA ARTE RELACIONADA À ACV, ACVE E ACVCO ₂	44
2.6	DESEMPENHO TÉRMICO E CONSUMO DE ENERGIA RELACIONADOS ÀS VEDAÇÕES VERTICAIS.....	54
2.6.1	<i>Importância da Vedação Vertical nas Edificações Habitacionais</i>	<i>54</i>
2.6.2	<i>Desempenho Térmico nas Edificações Habitacionais Segundo a ABNT NBR 15575:2013.....</i>	<i>55</i>
2.6.3	<i>Influência do Desempenho Térmico no Consumo de Energia das Edificações Habitacionais..</i>	<i>58</i>
3	SISTEMA LIGHT STEEL FRAMING (LSF).....	61
4	METODOLOGIA.....	65
4.1	INTRODUÇÃO	65
4.2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	65
4.3	OBJETIVOS, ESCOPO E FRONTEIRAS DA PESQUISA	65
4.3.1	EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR MODELO	68
4.3.1.1	<i>Caracterização da Edificação Habitacional Unifamiliar.....</i>	<i>68</i>
4.3.1.2	<i>Localização e Orientação Solar</i>	<i>70</i>
4.3.1.3	<i>Zona Bioclimática.....</i>	<i>71</i>
4.3.1.4	<i>Desempenho Térmico</i>	<i>72</i>
4.3.2	UNIDADE FUNCIONAL.....	73
4.4	APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE ACVE E ACVCO ₂ ADOTADA	73
4.4.1	LEVANTAMENTO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO.....	73
4.4.2	ETAPA DE PRÉ-USO	74
4.4.2.1	<i>Extração e Processamento dos Materiais</i>	<i>74</i>
4.4.2.2	<i>Transporte dos Materiais da Fábrica até o Canteiro de Obras</i>	<i>80</i>
4.4.3	ETAPA OPERACIONAL	83
4.4.3.1	<i>Simulação no Software DesignBuilder</i>	<i>87</i>
4.4.4	ETAPA DE MANUTENÇÃO	89
4.4.5	ETAPA DE PÓS-USO.....	92
4.4.5.1	<i>Demolição/Desconstrução da EHU</i>	<i>93</i>
4.4.5.2	<i>Transporte dos Resíduos até a Destinação Final</i>	<i>94</i>
4.4.6	CICLO DE VIDA COMPLETO	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97

5.1	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO	97
5.1.1	<i>Avaliação pelo Método de Cálculo</i>	97
5.1.2	<i>Avaliação pela Simulação Computacional</i>	97
5.2	ACVE E ACVCO ₂	100
5.2.1	<i>Etapa de Pré-Uso</i>	100
5.2.2	<i>Etapa Operacional</i>	106
5.2.3	<i>Etapa de Manutenção</i>	109
5.2.4	<i>Etapa de Pós-Uso</i>	112
5.2.5	<i>Ciclo de Vida das Edificações</i>	114
5.3	DIRETRIZES DE PROJETO PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ NO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS UNIFAMILIARES	119
6	CONCLUSÕES	120
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	APÊNDICE A – FATORES DE ENERGIA (FE) E EMISSÕES DE CO₂ (FCO₂) DOS MATERIAIS	135
	APÊNDICE B – MAPAS DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE UTILIZADAS	139
	APÊNDICE C – CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÕES DE CO₂ OPERACIONAL	145
	APÊNDICE D – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EI) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂I) ETAPA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS	146
	APÊNDICE E – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (ET) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂T) ETAPA DE TRANSPORTES DOS MATERIAIS	148
	APÊNDICE F – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EM) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂M) ETAPA DE MANUTENÇÃO	150
	APÊNDICE G – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EP) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂P) ETAPA DE PÓS-USO	152
	APÊNDICE H – RESULTADOS PARTICIPAÇÃO SISTEMAS UTILIZANDO VALORES DE DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS	154
	ANEXO A – CONVERSÃO DE UNIDADES DE ENERGIA	158
	ANEXO B – PROJETO ARQUITETÔNICO	159
	ANEXO C – PROJETO ESTRUTURAL – VEDAÇÃO CONVENCIONAL	162
	ANEXO D – PROJETO DO SISTEMA DE LIGHT STEEL FRAMING	172

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- ESQUEMA ILUSTRATIVO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA. (IBICT, 2014).	29
FIGURA 2.2 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS FASES DE UMA ACV. (ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DA ABNT NBR ISO 14040:2009).	31
FIGURA 2.3- CONSUMO RESIDENCIAL DE ENERGIA. (BEN, 2015).	37
FIGURA 2.4- EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA. (ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DOS DADOS BEN, 2015).	37
FIGURA 2.5- ESQUEMA DE CONTABILIZAÇÃO DE CO ₂ . (A) - SEM CONSIDERAR A QUANTIDADE DE CO ₂ ABSORVIDA E ESTOCADA. (B) CONSIDERANDO O CO ₂ INCORPORADO NO MATERIAL BIOGÊNICO (ADAPTADO DE PAWELZIK <i>ET AL.</i> , 2013).	42
FIGURA 3.1- DESCONSTRUÇÃO DO LSF. EXPERIMENTO PARA 1M ² DE FACHADA. (PEDROSO, 2015).	63
FIGURA 4.1- ETAPAS DA METODOLOGIA UTILIZADA NA PESQUISA.	65
FIGURA 4.2- ESCOPO, ETAPAS DA EDIFICAÇÃO E FRONTEIRAS DA PESQUISA.	66
FIGURA 4.3 - VARIÁVEIS CONSIDERADAS NESTE ESTUDO	67
FIGURA 4.4 - EHU ESTUDADA NO PRESENTE TRABALHO (PEDROSO, 2015).	68
FIGURA 4.5- (A) SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNA CONVENCIONAL. (B) SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNA DE <i>LIGHT STEEL FRAMING</i> . (ELABORADO PELO AUTOR, 2015).	70
FIGURA 4.6 - (A) SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNA CONVENCIONAL. (B) SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNA DE <i>DRYWALL</i> . (ELABORADO PELO AUTOR, 2015).	70
FIGURA 4.7 - LOCALIZAÇÃO DA EHU. (<i>GOOGLE MAPS</i> , 2015).	71
FIGURA 4.8 - FLUXOGRAMA PARA ANÁLISE DO INVENTÁRIO (ELABORADO PELO AUTOR COM BASE NA ABNT NBR ISO 14044:2009, 2015)	76
FIGURA 4.9 - MODELO DA EHU SIMULADA NO SOFTWARE. (GERADA PELO SOFTWARE DESIGNBUILDER, 2015).	89
FIGURA 4.10 - DISTÂNCIA DA LOCALIZAÇÃO DA EHU ATÉ O ATERRO SANITÁRIO. (<i>GOOGLE MAPS</i> , 2015). ..	94
FIGURA 5.1 - CONSUMO DE ENERGIA DA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS E COMPONENTES.	100
FIGURA 5.2 - EMISSÕES DE CO ₂ NA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS E COMPONENTES. ..	100
FIGURA 5.3 - PARTICIPAÇÃO DA MASSA, ENERGIA INCORPORADA E EMISSÕES DE CO ₂ INCORPORADAS PARA OS SISTEMAS DA EHU DE VEDAÇÃO CONVENCIONAL.	102
FIGURA 5.4 - PARTICIPAÇÃO DA MASSA, ENERGIA INCORPORADA E EMISSÕES DE CO ₂ INCORPORADAS PARA OS SISTEMAS DA EHU DE <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	102
FIGURA 5.5 - CONSUMO DE ENERGIA NO TRANSPORTE.	103
FIGURA 5.6 - EMISSÕES DE CO ₂ NO TRANSPORTE.	104
FIGURA 5.7 - ANÁLISE DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ PARA A ETAPA DE TRANSPORTE DOS SISTEMAS DA EHU DE VEDAÇÃO CONVENCIONAL.	105
FIGURA 5.8 - ANÁLISE DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ PARA A ETAPA DE TRANSPORTE DOS SISTEMAS DA EHU DE <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	105
FIGURA 5.9 - COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA ETAPA OPERACIONAL.	106
FIGURA 5.10 - COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ NA ETAPA OPERACIONAL.	106
FIGURA 5.11 - DIVISÃO DA PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA OPERACIONAL.	107
FIGURA 5.12 - DIVISÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES OPERACIONAIS.	108
FIGURA 5.13 - CONSUMO DE ENERGIA NA MANUTENÇÃO.	109
FIGURA 5.14 - EMISSÕES DE CO ₂ NA MANUTENÇÃO.	110
FIGURA 5.15 - ANÁLISE DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ PARA A ETAPA DE MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DA EHU DE VEDAÇÃO CONVENCIONAL.	111
FIGURA 5.16 - ANÁLISE DA PARTICIPAÇÃO DA MASSA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ PARA A ETAPA DE MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DA EHU DE <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	111
FIGURA 5.17 - CONSUMO DE ENERGIA NA ETAPA DE PÓS-USO.	112
FIGURA 5.18- EMISSÕES DE CO ₂ NA ETAPA DE PÓS-USO.	112
FIGURA 5.19 - CONSUMO DE ENERGIA NO CICLO DE VIDA DAS HABITAÇÕES.	114
FIGURA 5.20 - EMISSÕES DE CO ₂ NO CICLO DE VIDA DAS HABITAÇÕES.	114
FIGURA 5.21 - PARTICIPAÇÃO DAS ETAPAS NO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DA EHU. (A) VEDAÇÃO CONVENCIONAL; (B) <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	116

FIGURA 5.22 – PARTICIPAÇÃO DAS ETAPAS NO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO ₂ DA EHU. (A) VEDAÇÃO CONVENCIONAL; (B) <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	117
FIGURA 5.23 – PARTICIPAÇÃO DOS SISTEMAS E ETAPA OPERACIONAL NO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DA EHU. (A) VEDAÇÃO CONVENCIONAL; (B) <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	118
FIGURA 5.24 – PARTICIPAÇÃO DOS SISTEMAS E ETAPA OPERACIONAL DE CO ₂ DA EHU. (A) VEDAÇÃO CONVENCIONAL; (B) <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - FASES E ETAPAS DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES (ADAPTADO DE TAVARES, 2006; SARTORI; HESTNES, 2007).....	35
TABELA 2.2 – ALGUMAS FONTES ENERGÉTICAS UTILIZADAS NO BRASIL E O ÍNDICE PCI. (ELABORADO PELO AUTOR, 2015).....	38
TABELA 2.3 – CONSUMO DE ELETRICIDADE EM EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS PARA DIFERENTES REGIÕES (AGOPYAN; JOHN, 2011).....	39
TABELA 2.4 - FASES E ETAPAS DO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO ₂ DAS EDIFICAÇÕES (ADAPTADO DE ATMACA E ATMACA, 2015; CHAU <i>ET AL.</i> , 2015).....	40
TABELA 2.5 – ALGUMAS FONTES ENERGÉTICAS COM SUAS RESPECTIVAS EMISSÕES DE CO ₂ (ELABORADO PELO AUTOR, 2015).	43
TABELA 2.6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE ALGUNS ESTUDOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS (ELABORADO PELO AUTOR, 2015).	52
TABELA 2.7 – TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE PAREDES EXTERNAS (ABNT NBR 15575-4:2013).	56
TABELA 2.8 – CAPACIDADE TÉRMICA DE PAREDES EXTERNAS DE PAREDES EXTERNAS (ABNT NBR 15575-4: 2013).	57
TABELA 2.9 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA CONDIÇÕES DE VERÃO (ABNT NBR 15575-1: 2013).	58
TABELA 2.10 – CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA CONDIÇÕES DE INVERNO (ABNT NBR 15575-1: 2013).	58
TABELA 3.1 – RESUMO DOS COMPONENTES DO LSF. (ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DE FREITAS; CASTRO, 2006, CARMINATTI JÚNIOR, 2012; PALÁCIO, 2013; CAMPOS, 2014; TAMAKI, 2015).....	64
TABELA 4.1 – ESPECIFICAÇÃO DAS VEDAÇÕES VERTICAIS EXTERNAS E INTERNAS DE LSF E VC.	69
TABELA 4.2 – ESPECIFICAÇÃO DOS FATORES DE ENERGIA UTILIZADOS NO INVENTÁRIO.	77
TABELA 4.3 – ESPECIFICAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÕES UTILIZADOS NO INVENTÁRIO.	78
TABELA 4.4 – DADOS PARA O CÁLCULO DA EI E ECO ₂ I PARA OS SISTEMAS DE VEDAÇÃO CONVENCIONAL E DE <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	78
TABELA 4.5 – DADOS PARA O CÁLCULO DA ET E ECO ₂ T.	82
TABELA 4.6 – DADOS PARA O CÁLCULO DA EO E ECO ₂ O.....	84
TABELA 4.7 – DADOS DE BRASÍLIA E DA LOCALIZAÇÃO DA EHU PARA A SIMULAÇÃO.....	87
TABELA 4.8 – DADOS DE ATIVIDADE E OCUPAÇÃO DA EHU.	87
TABELA 4.9 – AGENDA DE OCUPAÇÃO DA EHU PARA A SIMULAÇÃO.....	88
TABELA 4.10 – DADOS DOS MATERIAIS E COMPONENTES EMPREGADOS NA SIMULAÇÃO.	88
TABELA 4.11 – TEMPOS DE SUBSTITUIÇÃO E FATOR DE REPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DA EDIFICAÇÃO.....	90
TABELA 4.12 – TEMPOS DE SUBSTITUIÇÃO E FATOR DE REPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DA EDIFICAÇÃO.....	90
TABELA 5.1 – VALORES DE TRANSMITÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA ENCONTRADOS PARA OS SISTEMAS DE VEDAÇÃO.	97
TABELA 5.2 – RESUMO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA OS DOIS SISTEMAS DE VEDAÇÃO COM AS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E O NÍVEL DE DESEMPENHO.....	98
TABELA 5.3 – RESUMO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO PARA OS DOIS SISTEMAS DE VEDAÇÃO COM AS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E O NÍVEL DE DESEMPENHO.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACM	Painel de Alumínio Composto
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVCO ₂	Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO ₂
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
BEN	Balanco Energético Nacional
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
c	Calor específico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CAIXA	Caixa Econômica Federal
CaO	Óxido de Cálcio
CSI	<i>Cement Sustainability Initiative</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CoP	Eficiência do Aparelho de Ar Condicionado
Ct	Capacidade Térmica
D	Distância de Transporte do Material da Fábrica até o Canteiro de Obras
DAP	Declaração Ambiental de Produto
DATecs	Documento de Avaliação Técnica
DF	Distrito Federal
ECO ₂ D	Emissões de CO ₂ na Demolição/Desconstrução da Edificação
ECO ₂ I	Emissões de CO ₂ na Extração e Processamento dos Materiais
ECO ₂ M	Emissões de CO ₂ na Manutenção da Edificação
ECO ₂ O	Emissões de CO ₂ na Operação da Edificação
ECO ₂ P	Emissões de CO ₂ na Etapa Pós-Uso da Edificação
ECO ₂ T	Emissões de CO ₂ no Transporte da Fábrica até o Canteiro de Obras
ECO ₂ Tr	Emissões de CO ₂ no Transporte dos Resíduos
ECO ₂ TOT	Emissões de CO ₂ Totais no Ciclo de Vida da Edificação
EHU	Edificação Habitacional Unifamiliar
ED	Consumo de Energia na Demolição/Desconstrução da Edificação
EI	Consumo de Energia na Extração e Processamento dos Materiais
EM	Consumo de Energia na Manutenção da Edificação
EO	Consumo de Energia na Operação da Edificação
EP	Consumo de Energia na Etapa Pós-Uso da Edificação
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
EPS	Poliestireno Expandido
ET	Consumo de Energia no Transporte da Fábrica até o Canteiro de Obras
ETr	Consumo de Energia no Transporte dos Resíduos
ETOT	Consumo de Energia Total no Ciclo de Vida da Edificação
FCO ₂	Fator de Emissões de CO ₂
FE	Fator de Energia
FR	Fator de Reposição
GEE	Gases do Efeito Estufa
GJ	Giga joule
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HQE	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILCD	<i>Life Cycle Data System</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K	Kelvin
Kg	Quilograma

KJ	Quilo joule
kWh	Quilowatt hora
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
LWF	<i>Light Wood Framing</i>
m	Metro
m ²	Metro quadrado
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
P	Perdas dos Materiais e Componentes
PBQP-h	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat
PCI	Poder Calorífico Inferior
PECC	Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PNAD	Pesquisa Nacional de Amostras de Domicílio
PNMC	Programa Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PSQ	Programa Setorial da Qualidade
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de Vinila
Rt	Resistência Térmica Total
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliação Técnica
tCO ₂	Toneladas de CO ₂
TCPO	Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos
TN	Temperatura Neutra
U	Transmitância Térmica
UF	Unidade Funcional
UN	<i>United Nation</i>
VC	Vedação Convencional
VU	Vida Útil
VUP	Vida Útil de Projeto
α	Absortância à radiação solar
λ	Condutividade térmica do material

1 ELEMENTOS PARA COMPREENSÃO DO TRABALHO

Nesta seção foram apresentados os elementos considerados essenciais para a melhor compreensão e contextualização do presente trabalho.

1.1 INTRODUÇÃO

Novos sistemas construtivos têm sido utilizados na construção de edificações habitacionais devido a sua crescente demanda no Brasil. Estes sistemas em geral apresentam maior velocidade e produtividade na fase de execução, no entanto, torna-se importante a avaliação dos impactos ambientais gerados no seu ciclo de vida desde a etapa de extração e processamento dos materiais até a destinação final dos resíduos gerados.

Na produção das vedações verticais de edificações habitacionais, algumas tecnologias têm sido utilizadas, tais como: *light steel framing* (LSF), painéis de concreto pré-fabricado, entre outras. Estas inovações requerem uma avaliação de desempenho do ponto de vista da segurança, da habitabilidade e da sustentabilidade, exigências que devem atender os usuários da edificação.

Segundo Agopyan e John (2011), a escolha dos materiais de construção, componentes e sistemas para a produção de habitações deve incluir critérios de sustentabilidade ambiental tais como: durabilidade e facilidade de desconstrução, não toxicidade, baixa quantidade de consumo de energia e baixo percentual de emissões gasosas, líquidas e sólidas.

Uma forma de mensurar os impactos ambientais de um produto ou processo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste na mensuração das entradas (consumo de matéria prima, energia) e saídas (emissões, resíduos, efluentes e etc.) ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo e permitindo a avaliação do seu desempenho ambiental (IBICT, 2015). Relacionado ao setor da construção civil, o que tem se observado para a realidade brasileira e internacional é o foco também da ACV em questões relacionadas ao consumo de energia e emissões de CO₂ (CABEZA *et al.*, 2014; CHAU *et al.*, 2015).

De acordo com Chau *et al.* (2015), o foco no consumo de energia originou o termo Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e em relação às emissões de dióxido de carbono (CO₂), a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂).

Segundo Goldemberg e Lucon (2011), a energia exerce um papel fundamental em qualquer processo industrial, seja na queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, carvão, gás natural) ou renováveis (lenha, carvão vegetal, solar, eólica, etc.). Portanto, determinar a energia consumida na fabricação dos materiais de construção implica em conhecer os processos nela utilizados.

No Brasil, pode ser observado ao longo das últimas décadas, o crescimento do consumo energético e emissões de CO₂, impulsionado pelo crescimento das indústrias de mineração, manufatura e construção civil. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), no ano de 2014, os setores que mais consumiram energia foram o de indústrias (32,9%) e o de transportes (32,5%); as habitações consumiram 9,3% da energia total disponibilizada no Brasil. Ainda em relação à energia, observa-se o atual momento de crise energética por que o Brasil está passando, o que justifica pesquisas de levantamento da energia consumida no ciclo de vida de habitações e proposição de ações para minimização deste consumo.

As emissões de CO₂ comumente ocorrem na fabricação, transporte de materiais e componentes de construção, na operação e demolição da edificação. Portanto, em relação à sustentabilidade ambiental, é cada vez mais notória a necessidade de se desenvolver pesquisas relacionadas a este tema, principalmente em relação à energia e as emissões de CO₂ dos materiais, componentes e sistemas e edificações nas diversas etapas do seu ciclo de vida, sejam na indústria, no canteiro, no uso, na manutenção e no pós-uso.

Desta forma, estas pesquisas devem fornecer resultados que possibilitem a tomada de decisão de engenheiros e arquitetos na escolha de componentes e sistemas construtivos mais eficientes e que gerem menor quantidade de impactos ambientais.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

A presente dissertação está inserida na linha de pesquisa “Gestão e Sustentabilidade na Construção Civil” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC). O tema relacionado à Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) e emissões de CO₂ (ACVCO₂) aplicado a edificações já foi abordado em outras dissertações e teses do programa, sob a orientação da professora Dra. Rosa Maria Sposto. A seguir são apresentados de forma sucinta alguns destes trabalhos.

Nabut Neto (2011) aplicou a ACVE e ACVCO₂ na etapa de pré-uso, comparando um sistema de fachada convencional com o LSF. Gouveia (2012) também quantificou a energia incorporada e emissões de CO₂ na fase de pré-uso, no entanto, estudou fachadas com painéis de alumínio composto (ACM). A autora apresentou um avanço, pois também avaliou o potencial de reciclagem do alumínio.

Andrade (2013) propôs uma ferramenta de avaliação da facilidade de desconstrução denominada de “Matriz de Desconstrução”, baseada no consumo de energia necessário para o processo de desconstrução de galpões de concreto armado pré-fabricados. O autor concluiu que a desconstrução dos galpões pode ser facilitada se houver um melhor entendimento desse processo na fase de projeto, o qual pode ser auxiliado pela matriz proposta.

Palácio (2013) aplicou a ACVE para o sistema de LSF, relacionado ao desempenho térmico para diferentes configurações do sistema, variando isolantes térmicos e acabamentos internos.

Maciel (2013) estudou a ACVE na etapa de pré-uso e uso de uma edificação habitacional multifamiliar para três tipos de fachadas ventiladas. Foi o primeiro trabalho do programa que analisou a energia consumida na fase operacional, relacionada ao desempenho térmico dos sistemas e conforto térmico dos usuários, e a energia de manutenção dos materiais e componentes.

Pedroso (2015) aplicou a ACVE em cinco sistemas construtivos, entre eles, o convencional com blocos cerâmicos e o LSF, para todas as etapas do ciclo de vida. O foco do trabalho foi a etapa de pós-uso, no processo de desconstrução dos sistemas, a partir de um programa experimental para o levantamento de energia. O autor desenvolveu um projeto habitacional padrão que está sendo utilizado em outros estudos e no presente trabalho.

Caldas *et al.* (2015b) avaliaram as emissões de CO₂ para o ciclo de vida de uma habitação de interesse social (HIS) para realidade de Brasília – DF, chegando a um total de 1,8 tCO₂/m², sendo que a fase operacional foi a mais significativa, seguida pela manutenção e extração e processamento.

Gouveia e Sposto (2015) compararam o consumo de energia e emissões de CO₂ para fachadas de ACM, sendo que uma com recursos primários e a segunda com recursos

secundários, originados da reciclagem do alumínio. As autoras concluíram que a produção da fachada com ACM utilizando recursos secundários consome 78,13% menos energia e emite 73,63% menos CO₂ do que a produção com recursos primários.

Pedroso e Sposto (2015) levantaram a energia incorporada de desconstrução para quatro tipos de vedações verticais, entre elas: paredes de concreto, blocos de concreto estruturais, blocos cerâmicos de vedação com estrutura de concreto armado e LSF. O último sistema apresentou menor valor de energia de desconstrução enquanto o sistema com blocos cerâmicos de vedação apresentou maior valor, com uma diferença de 65% entre os dois.

A partir da análise destes trabalhos desenvolvidas no programa, é possível observar que esta é uma temática recente no programa e que cada trabalho avança em alguma lacuna existente na área de ACVE e ACVCO₂, sendo que a sua maioria foi desenvolvida com base em edificações habitacionais.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A primeira justificativa pela escolha do tema é o fato deste estar inserido em uma das linhas de pesquisa do programa. Por meio deste trabalho espera-se contribuir no avanço da fronteira do conhecimento relacionado à ACVE e ACVCO₂ aplicadas às edificações, seguindo a linha de trabalhos realizados na área de sustentabilidade na construção civil.

Nos últimos anos, no Brasil, tem-se observado o aumento de estudos na temática de sustentabilidade ambiental, especificamente na área de ACVE e de ACVCO₂, devido, entre outros fatores, a recente crise energética que o país vem enfrentando nos últimos anos e necessidade de diminuir as emissões de carbono. É visível a urgente necessidade do desenvolvimento de alternativas mais eficientes do ponto de vista do consumo energético, principalmente em setores impactantes, como é o caso da construção civil e das edificações habitacionais.

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional - BEN (2015), as edificações habitacionais brasileiras foram responsáveis por um consumo de 21,2% de toda energia elétrica brasileira e o setor residencial apresentou um crescimento de 5,7% no último ano. Portanto, é necessário diagnosticar o consumo de energia nestas edificações, para poder subsidiar formas de diminuir este consumo.

Outro impacto relacionado ao consumo de energia é a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e entre eles, o CO₂, que é apontado como um dos principais responsáveis pelo aquecimento global (BERMANN, 2003; GOLDEMBERG; LUCON, 2011). Este problema ambiental é um dos mais discutidos atualmente em nível global, eleito como prioridade nas agendas ambientais de muitos países, e, portanto, também com grande necessidade de ser estudado.

Em dezembro de 2015 ocorreu em Paris, na França, a 21ª Conferência das Partes (COP-21) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Nesta conferência adotou-se um novo acordo global que busca combater os efeitos das mudanças climáticas, bem como reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O documento elaborado foi chamado de Acordo de Paris e foi ratificado pelas 195 partes da UNFCCC e pela União Europeia (ONU BR, 2016). O Brasil definiu metas de redução dos gases de efeito estufa (GEEs) até 2025 e 2030.

Outra importante justificativa é a ABNT NBR 15575-1:2013, que recomenda aos projetistas avaliarem junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos, informações relacionadas a seu ciclo de vida, subsidiando assim a tomada de decisão em relação aos impactos ambientais causados por estes elementos.

Em relação ao LSF, a justificativa para sua escolha, foi o fato deste ser um sistema inovador no Brasil, com uma crescente utilização no setor de edificações, devido principalmente à sua maior produtividade e racionalização da construção. Além disto, a escolha se justifica pela continuidade de outros três trabalhos já desenvolvidos no programa que estudaram o LSF: Nabut Neto (2011), Palácio (2013) e Pedroso (2015). Desta forma, já se tem uma importante base de dados e espera-se enriquecer com novas informações e aprofundamento da pesquisa neste sistema construtivo.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a realização da avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) e de emissões de CO₂ (ACVCO₂), considerando as etapas do berço ao túmulo, de uma EHU localizada em Brasília - DF, comparando dois diferentes sistemas de vedação vertical (externa e interna): *light steel framing* (LSF) e blocos cerâmicos de vedação convencional (VC). Dentro deste objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliação do desempenho térmico dos dois sistemas de vedação vertical segundo os requisitos e critérios da ABNT NBR 15575-1: 2013 e ABNT NBR 15575-4: 2013, para a cidade de Brasília – DF;
2. Avaliação de quanto que a energia gasta no condicionamento ambiental, para atender a faixa de conforto térmico estabelecida para os usuários, impacta na energia e emissões de CO₂ da fase operacional das edificações;
3. Avaliação da contribuição/importância de cada etapa (pré-uso, uso e pós-uso), relacionado ao consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de cada edificação estudada;
4. Avaliação da contribuição/importância de cada sistema da EHU (estrutura/vedações verticais, cobertura, contrapiso, instalações, esquadrias e pintura), relacionado ao consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações.
5. Apresentação de diretrizes de projeto para a redução do consumo de energia e emissões de CO₂ no ciclo de vida de edificações habitacionais unifamiliares.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No decorrer da pesquisa foram encontradas dificuldades que fizeram que algumas condições fossem assumidas, possibilitando a conclusão do estudo. A seguir são listadas as limitações existentes, ressaltando que estas podem ser objeto de estudo de futuros trabalhos:

- A EHU está localizada em Brasília – DF. Como forma de comparação entre os dois sistemas de vedação vertical, foram considerados somente os requisitos e critérios de desempenho térmico previstos na norma de desempenho para edificações habitacionais, a ABNT NBR 15575-1: 2013 e ABNT NBR 15575-4: 2013 para a zona bioclimática de Brasília.
- Foi considerada somente o sistema de vedação vertical do sistema LSF, os outros sistemas da EHU se mantiveram constantes, de forma similar a EHU de VC.
- A água consumida na fabricação dos materiais e execução dos sistemas não foi considerada neste trabalho.

- Foram considerados os mesmos fatores de energia e emissão de CO₂ para as areias utilizadas na confecção do chapisco, massa única, argamassa de assentamento, argamassa colante e concreto.
- Não foi diferenciada a pintura acrílica da PVA. Foram considerados os mesmos fatores de energia e emissão de CO₂.
- Foi aplicada uma regra de corte (menor que 5% da massa total de materiais e componentes ou 5% menor que 5% da energia incorporada total), mesmo critério adotado por Silva e Silva (2015). Entre eles foram excluídos os seguintes materiais e sistemas: pregos, parafusos, vidraria, impermeabilização, rejunte, adesivo e massa utilizados no sistema de LSF.
- Não foi contabilizado o mobiliário e louças sanitárias.
- As fundações não foram contabilizadas, visto que seu dimensionamento está relacionado com as características do solo.
- Não foi considerada a etapa de execução da EHU visto que, por ser uma edificação unifamiliar, a maior parte dos serviços é realizada por mão de obra humana e com poucos equipamentos ou maquinários eletrônicos; além disto, em geral esta fase é pouco considerada em outros estudos, como pode ser verificado nos estudos apresentados por Cabeza *et al.* (2014).
- Foram levantadas somente as emissões de CO₂. De acordo com as metodologias voltadas para a quantificação das emissões de carbono, recomenda-se que sejam levantadas as emissões de gás carbônico equivalente¹ (CO_{2e}), no entanto, devido as dificuldades encontradas nos dados dos inventários utilizados, foi necessário realizar esta simplificação.
- Não foi considerado o carbono armazenado nos materiais biogênicos e no processo de carbonatação dos materiais cimentícios, visto que em muitos estudos não fica claro esta contabilização.
- Em relação aos dados de inventário não foi considerada a fronteira tecnológica.

¹ De acordo com Goldemberg e Lucon (2011), para o levantamento do CO_{2e} são contabilizadas as emissões de CO₂, metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O).

- A energia consumida na etapa operacional foi considerada constante ao longo da vida útil da edificação. Esta simplificação é comumente utilizada nos estudos de ACVE e ACVCO₂ tanto nacionais como internacionais, como o de Tavares (2006), Huberman e Pearlmutter (2008), Paulsen e Sposto (2013), Devi L. e Palaniappan (2014), Atmaca e Atmaca (2015), Oliveira (2015) e Pedroso (2015).
- Não foi considerado o processo de aterramento, reciclagem ou reutilização dos resíduos gerados, somente a etapa de demolição/desconstrução e transporte até o local de destinação final.

1.6 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi estruturado em seis capítulos.

No primeiro capítulo foi apresentada uma abordagem geral da pesquisa, com a introdução do tema, as justificativas, limitações e objetivos deste estudo.

No segundo capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais relacionados à área da pesquisa.

No terceiro capítulo são relatados alguns conceitos relacionados ao sistema de LSF.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados.

Em seguida são apresentadas as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

Por fim, é apresentada a bibliografia de referência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram reunidos conceitos e informações essenciais consideradas necessárias para a realização desta dissertação.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ENERGIA E EMISSÕES DE CO₂ NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Nos últimos anos aumentaram consideravelmente as discussões relacionadas aos impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente. Desta forma, surgiram, principalmente a partir do início da década de 60, iniciativas internacionais para tratar e regulamentar as relações das atividades humanas e o meio ambiente (SEIFFERT, 2011).

Neste contexto, surge o conceito de desenvolvimento sustentável, que pode ser definido como a utilização dos recursos naturais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas necessidades (BRUNTLAND, 1987). Sachs (1993) complementou afirmando que este só poderá ser alcançado por meio de um equilíbrio integrado entre cinco pressupostos básicos: ecológicos, sociais, econômicos, culturais e geográficos.

Em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, também chamada de Rio 92. Nesta conferência foram reunidos 103 chefes de Estado, onde foram aprovados alguns acordos internacionais. Dentre estes acordos, um dos mais valiosos, que serviu de base para políticas, planos e programas ambientais de diversos países, inclusive do Brasil, foi a Agenda 21 (SEIFFERT, 2011).

A Agenda 21 é um importante documento que explicita as principais questões da relação do ser humano com o meio ambiente, por metas e ações a serem ratificadas como compromissos pelos países signatários, visando o desenvolvimento sustentável. Relacionado às questões de energia e emissões de CO₂, na Agenda é apresentado um capítulo (capítulo 9), denominado por “Proteção Atmosférica” (UN, 1992).

Em relação à construção civil, Isaia (2007) afirma que tal atividade é responsável pela causa de diferentes impactos ambientais, entre eles poluição dos corpos hídricos, do solo e da atmosfera, degradação da paisagem, destruição de ecossistemas, perda da

biodiversidade, destruição da camada de ozônio, aquecimento global e etc., que são proporcionais ao avanço social e tecnológico de cada localidade.

Dois aspectos relacionados a diferentes impactos ambientais, que tem recebido grande destaque nos últimos anos são: o elevado consumo de energia e as grandes quantidades de emissões de CO₂. A recente crise energética enfrentada pelo Brasil nos últimos anos faz voltar à atenção novamente, de forma mais preocupante, para a necessidade do desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e o incentivo para a utilização de fontes de energia alternativas e menos poluidoras.

Em 1973, o mundo passou por uma grave crise energética, ocasionada pela “Crise do Petróleo”. De acordo com Roméro e Bruna (2010) esta foi a principal motivação para os países desenvolvidos organizarem e aprovarem, com força de lei, normas e regulamentos que priorizassem a eficiência energética no setor das edificações. Estados Unidos e França foram os pioneiros, aprovando seus regulamentos em 1974.

Segundo Keeler e Burke (2010), com o passar dos anos outros aspectos, como necessidade de redução do consumo de água, diminuição da geração de resíduos sólidos, melhoria da qualidade do ar interior, conforto térmico, acústico e seleção de materiais e componentes geradores de menores impactos ambientais começaram a fazer parte de alguns projetos de edificações, culminando no surgimento das edificações sustentáveis e das certificações ambientais voltadas para edificações.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as certificações de maior destaque no mundo são: a inglesa *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM); a francesa *Haute Qualité Environnementale* (HQE), que posteriormente serviu de base para a criação da certificação brasileira Alta Qualidade Ambiental (AQUA), e a norte-americana *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED).

Apesar da diversidade de critérios e formas de avaliação dos impactos ambientais relacionadas às edificações presentes nestas certificações ambientais, todas elas apresentam requisitos relacionados à questão energética e às emissões de CO₂ (CARDOSO; PABLOS, 2014).

No Brasil, a questão da eficiência energética ganhou maior destaque com a promulgação da Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001) e o Decreto nº 4059 (BRASIL, 2001). Esta lei dispõe

sobre a Política Nacional e Uso Racional de Energia e o decreto estabelece os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energéticas baseados em indicadores técnicos desenvolvidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

Especificamente relacionado às edificações, no ano de 2003, foi instituído o Procel Edifica, cujo objetivo foi promover o uso racional de energia elétrica nas edificações. Apesar dos avanços ocorridos nos últimos anos, nota-se ainda a carência de estudos que comprovem a eficiência energética de novos materiais e sistemas construtivos utilizados nas edificações, possibilitando que o projetista faça uma especificação mais consciente (LAMBERTS *et al.*, 2012).

Além da questão energética, outra grande preocupação de diversos países, portanto um problema de escala mundial é o aquecimento global (BERMAN, 2003). Com o desenvolvimento industrial e a crescente emissão de gases poluentes, denominados posteriormente de gases do efeito estufa (GEE), a atmosfera passou a conter concentrações mais elevadas, principalmente de CO₂, e assim passar por um processo de “superaquecimento”. Este efeito passou a ser chamado de efeito estufa, que é apontado como a principal causa do aquecimento global (GOLDEMBERG; LUCON, 2011).

A queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral ou petróleo, destruição de florestas e manejo do solo são as principais fontes antrópicas de emissão dos GEE. Além destas atividades, as indústrias de uma forma geral, incluindo a construção civil, possuem uma contribuição significativa nestas emissões (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Em relação ao aquecimento global, foi criado o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), em 1988, pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial. O IPCC se tornou a principal fonte de informação científica relacionada às mudanças climáticas (SEIFFERT, 2011).

Ainda segundo a mesma autora, posteriormente, no Japão, em 1997, foi assinado o Protocolo de Kyoto. O evento reuniu representantes de 166 países para discutir ações a serem realizadas a respeito do aquecimento global. Foi estabelecida como meta para 37 países industrializados a redução dos GEE em 5,2% no período de 2008 a 2012, em relação aos níveis existentes em 1990.

Neste contexto, mesmo o Brasil não sendo considerado um país industrializado, este tomou um passo importante, por meio da aprovação da Lei 12.187 (BRASIL, 2009), que trata da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). A partir desta lei, o país se comprometeu a realizar um conjunto de ações governamentais e setoriais cujo objetivo é a mitigação e a adaptação aos efeitos das mudanças climáticas. Com a PNMC iniciou-se à elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima, regulamentados pelo Decreto nº 7.390 (BRASIL, 2010).

Relacionado ao setor da construção civil, foi proposto incluir nos planos setoriais inicialmente alguns materiais como o alumínio, a cal, o cimento, o ferro-gusa e o aço. Segundo dados de 2005, esses setores foram responsáveis por quase 90% das emissões diretas dos GEE da Indústria de Transformação e mais de 50% das emissões derivadas da queima de combustíveis fósseis na indústria (MDIC, 2012).

De acordo com Roméro e Reis (2012), relacionado especificamente às edificações, a melhoria da eficiência energética resultará na redução das emissões de CO₂, visto que mesmo a matriz elétrica do país sendo composta de sua maior parte de fonte hidráulica, ainda assim é responsável por quantidades significantes de emissões deste gás.

A partir do que foi discutido anteriormente nota-se a necessidade do desenvolvimento de estudos relacionados ao setor da construção civil que mensurem o consumo de energia e as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações. Desta forma, há possibilidade da seleção de sistemas de menor consumo e mais eficientes.

Uma metodologia que vem sendo bastante utilizada na mensuração dos diversos impactos ambientais, inclusive relacionados ao consumo de energia e emissões de CO₂, causados pelo setor da construção civil é a avaliação do ciclo de vida, que será discutida nas próximas seções.

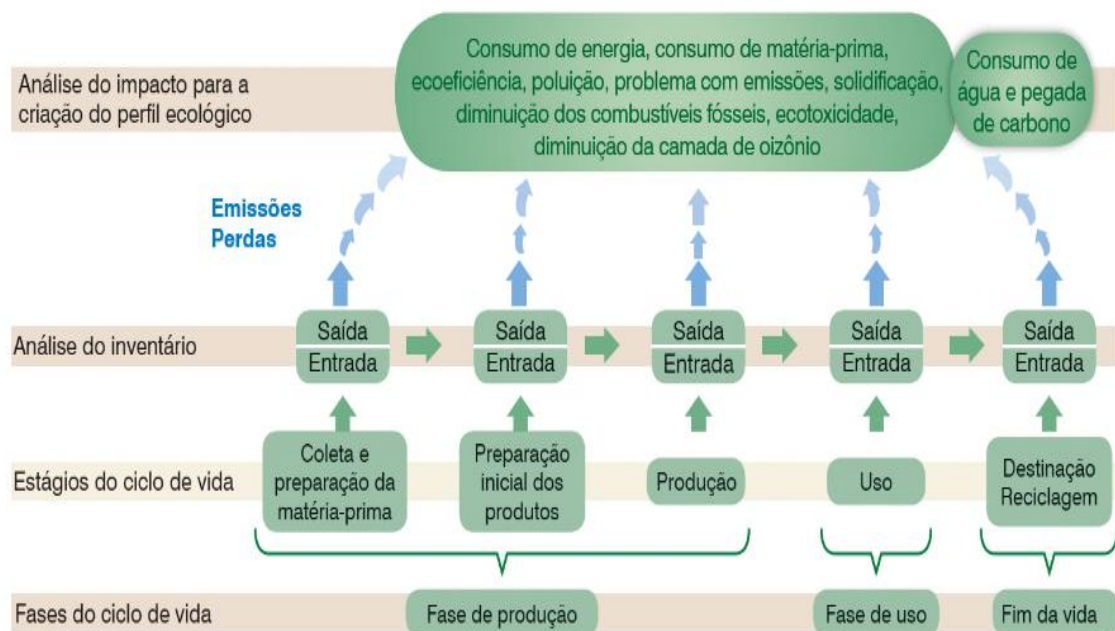
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 Definições, estrutura e aplicações da ACV

A ACV pode ser definida como uma metodologia de análise dos impactos ambientais das principais etapas de um produto, sistema ou processo. Ela se inicia na aquisição da matéria prima, e segue pelo processo produtivo, incluindo o uso até a etapa final, que pode ser a

etapa de reutilização, reciclagem ou disposição final (SILVA, 2005; KEELER; BURKE, 2010). Em um estudo de ACV são levantadas as entradas e as saídas mais importantes relacionadas aos potenciais impactos ambientais causados pelo sistema de produção do produto durante todo seu ciclo de vida (ABNT NBR ISO 14040:2009). Um esquema que mostra o funcionamento da ACV é apresentado na figura 2.1.

Figura 2.1- Esquema ilustrativo da avaliação do ciclo de vida. (IBICT, 2014).



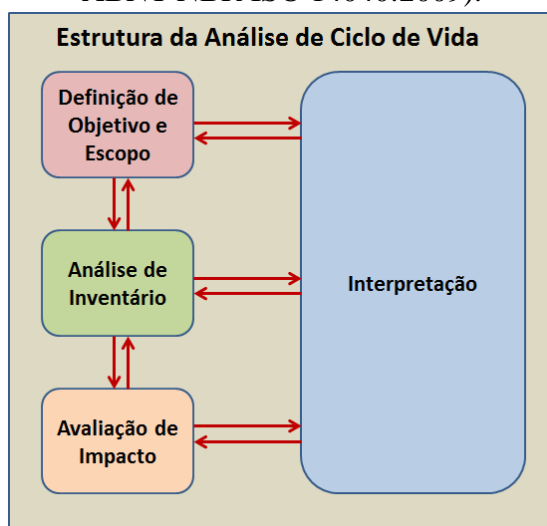
Como forma de criar um padrão de interpretações e servir como um guia de estudo para a ACV, uma instituição pioneira que merece destaque é a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). É uma organização científica, com representantes da universidade, governo e indústrias, que foi criada em 1979, nos Estados Unidos. No entanto, somente a partir de 1989, com a criação da SETAC Europa, é que se iniciou o desenvolvimento dos estudos sobre ACV (TAVARES, 2006).

Assim a ACV é uma importante ferramenta que pode subsidiar a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos, o nível de informação dos tomadores de decisão nos diversos setores do país, a seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, o marketing, a rotulagem ambiental e a elaboração de uma declaração ambiental de produto – EPD ou DAP (ABNT NBR ISO 14044, 2009). Silva (2005) e Tavares (2006) apontam outras aplicações de uma ACV, listadas a seguir:

- Análise da origem de um problema relacionado a um produto ou serviço específico;
- Levantamento dos limites do processo produtivo de algum produto;
- Orientação no projeto e design de novos produtos;
- Identificação das oportunidades de melhoria e aspectos ambientais críticos de um produto ou sistema;
- Comparação das características ambientais entre diferentes produtos e sistemas;
- Metodologia para a seleção de materiais sustentáveis ou de menor impacto ambiental;
- Ferramenta de suporte para o desenvolvimento de novos produtos;
- Ferramenta de apoio para avaliação e desenvolvimento de políticas públicas e legislações ambientais.

Neste trabalho foi adotada a metodologia proposta nas normas da série ISO, traduzida nas normas brasileiras NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). Segundo as normas citadas, a ACV é dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação, conforme é apresentado na figura 2.2. A seguir são apresentadas a descrição e os requisitos necessários em cada fase da ACV.

Figura 2.2 - Esquema ilustrativo das fases de uma ACV. (Elaborado pelo autor a partir da ABNT NBR ISO 14040:2009).



2.2.2 Objetivo e Escopo de uma ACV

O objetivo deve conter as justificativas para a realização do estudo, ser claro e objetivo quanto à aplicação pretendida e ao público alvo para o qual os resultados serão apresentados (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

De acordo com Frenette *et al.* (2010), o objetivo e escopo devem englobar o sistema do produto que será estudado, as funções do sistema de produto, a unidade funcional, os limites e as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação, as categorias de impacto selecionadas, juntamente com a metodologia de avaliação de impacto, seguidas pelas interpretações a serem realizadas, os dados necessários e as suposições feitas para o estudo.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a unidade funcional (UF) pode ser definida como a unidade de referência em um estudo de ACV. O principal objetivo da UF é proporcionar referências para relacionar as entradas e saídas do sistema adotado e possibilitar a comparação entre diferentes estudos. De acordo com Cabeza *et al.* (2014) apesar das diferentes UF adotadas nos diversos estudos internacionais realizados relacionados ao setor da construção civil, a área de piso bruta e a edificação completa são as mais utilizadas.

Em relação às fronteiras, elas podem ser geográficas (exemplo: diferentes países), temporais (estudos de períodos diferentes), tecnológicas (diferentes processos produtivos). Podem ser classificadas da seguinte forma: “berço ao berço”: é possível realizar um estudo que considere desde a extração das matérias-primas, até a destinação dos resíduos, quando

estes últimos são incorporados à fase inicial de outros processos produtivos, por meio da reciclagem ou reutilização; "berço ao túmulo": quando a ACV é usada para analisar os potenciais impactos ambientais de produtos em todos os estágios do seu ciclo de vida (extração da matéria prima à disposição final); "berço ao portão": se considera o impacto da extração das matérias primas e a manufatura do material, até o momento em que o produto seja finalizado pela indústria; e "portão ao portão": é analisada apenas a fase que ocorre no interior da indústria (SILVA, 2013).

Segundo Carvalho (2002), a etapa de identificação de fronteiras necessita ser mais bem solucionada, pois não existe um consenso entre os pesquisadores de ACV, cada caso deve ser analisado individualmente. No entanto, há concordância de que estes limites e suas implicações devem estar muito claros às partes interessadas no estudo. Ainda segundo a autora, outra análise importante que deve ser realizada no escopo é a exclusão ou omissão de uma etapa, que deverá sempre ser definida de acordo com a significância do seu impacto.

2.2.3 Análise do Inventário de uma ACV

Nesta etapa ocorre a coleta de dados e a escolha dos procedimentos de cálculo utilizados para contabilizar as entradas (*inputs*) e as saídas (*outputs*) do sistema. Ela consiste em um processo iterativo, em que podem ser acrescentados novos requisitos ou limitações a partir do momento em que se vai conhecendo de forma mais aprofundada o sistema estudado. Em alguns casos, devido às condições do sistema, são realizadas revisões do objetivo e escopo do estudo (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Na coleta de dados devem ser contabilizadas as entradas de energia, matéria – prima e entradas auxiliares importantes; as saídas em forma de produtos, resíduos sólidos, efluentes líquidos, emissões atmosféricas e outros aspectos ambientais considerados importantes. (JOHN, 2010).

Nos cálculos devem ser incluídas a validação dos dados coletados e a correlação destes aos processos elementares do sistema, sempre relacionando com a unidade funcional adotada. A metodologia utilizada para os cálculos deve ser condizente com o sistema a ser estudado, considerando a que melhor se aplica, entre as diferentes metodologias existentes (CARVALHO, 2002).

2.2.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

São utilizados os resultados provenientes do inventário para realizar a avaliação dos potenciais impactos ambientais relativos ao produto ou processo em estudo. Essa etapa geralmente envolve a associação dos dados do inventário com categorias de impacto e de indicadores específicos. A avaliação de impacto tem o objetivo de determinar a significância relativa de cada item do inventário de modo que os resultados obtidos através dele sejam agregados em um grupo menor de indicadores (CARVALHO, 2010).

Devido à subjetividade presente na avaliação da categoria dos impactos, é necessário que os critérios utilizados fiquem claramente descritos e relatados, a fim de proporcionar transparência. Por fim, deve ficar claro que a etapa de avaliação dos impactos é limitada, já que apenas os impactos ambientais definidos no objetivo e escopo são avaliados, podendo ter sido excluídas outras questões ambientais relevantes (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Segundo John (2007), a decisão de quais impactos devem ser analisados depende da agenda ambiental de cada país, podendo ainda ser mais específica para cada região ou setor industrial. Os impactos podem ser analisados em nível global, como a degradação da camada de ozônio e o aquecimento global; em nível regional, como as chuvas ácidas; ou em nível local como emissões de materiais particulados.

2.2.5 Interpretação do Ciclo de Vida

São combinadas as constatações da análise do inventário e da avaliação do impacto, consistentes com o objetivo e o escopo definidos no estudo. A partir daí, são apresentadas conclusões e recomendações, de forma compreensível, consistente e o mais completa possível, segundo os objetivos e escopo do estudo. Porém, pode ocorrer da ACV ser refeita para suprir alguma carência identificada durante a interpretação (FRENETTE *et al.*, 2010).

A interpretação das etapas de uma ACV pode resultar em análises não concordantes, podendo atribuir mais importância a um ou outro aspecto ambiental. Isto se deve ao fato da complexidade da estrutura da ACV, o que leva a pesquisa a ser simplificada, podendo haver a omissão de alguns dados que inicialmente são considerados como irrelevantes, mas ao final podem trazer grandes diferenças (CARVALHO, 2002).

Por fim, segundo Silva (2005), a fonte dos dados utilizados é um fator muito importante, pois varia de estudo para estudo, de país para país, diferentes metodologias de análise e etc.

por isto, as fontes utilizadas sempre devem estar explícitas para informar a quem for estudar ou avaliar a ACV quais os critérios que foram adotados.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE)

2.3.1 Conceitos e Definições

De acordo com Tavares (2006) a ACVE é uma abordagem em que todos os consumos energéticos de um produto ou processo são contabilizados; observa-se a importância do termo energia incorporada dos materiais, resultante dos insumos energéticos necessários para as etapas referentes ao processo de fabricação, transporte e outros insumos indiretos, além das etapas de uso, manutenção e disposição final de resíduos, onde também a energia incorporada deve ser mensurada.

Viljoen e Bohn (2001) defendem que a forma mais correta de mensurar o impacto ambiental relacionado à energia está relacionada ao conceito de energia incorporada. Ela descreve a quantidade de energia consumida na produção de um objeto. Pode ser calculada a energia incorporada de um bloco de vedação ou do sistema de vedação. A mensuração da energia incorporada de um material, componente ou sistema construtivo é importante devido à utilização das fontes não renováveis de energia, como os combustíveis fósseis, que, segundo o autor, é a principal causa da degradação ambiental no planeta.

Desta forma muitos estudos, que serão apresentados na seção 2.5, vêm sendo realizados com foco específico na questão da energia incorporada dos materiais de construção, por meio da ACVE. Embora seja criticada por alguns pesquisadores, que defendem que tal simplificação não retrata os reais impactos ambientais, não se pode negar os impactos relacionados ao consumo energético e que estudos de ACV podem ser complexos quando não se define um foco inicial.

De acordo com Saade (2013), para a realidade brasileira, a utilização da ACV iniciou-se de forma tardia, quando comparada ao uso desta metodologia nos países europeus e norte-americanos. Para que a ACV alcance no país o mesmo grau de desenvolvimento que possui em outros países, é importante o incentivo à criação de critérios de normatização.

Desta forma, estudos que considerem somente alguns aspectos ambientais da ACV, como é o caso da ACVE, ACVCO₂ e a ACV modular talvez seja mais interessante, visto que o

país ainda possui uma carência de dados para vários setores, inclusive o da construção civil.

Assim, a ACVE e ACVCO₂ (que será apresentada de forma mais detalhada a seguir) se tornam uma importante ferramenta a fim de mensurar a energia gasta e emissões de CO₂ em todo o processo de uma edificação. Como resultados podem ser comparados duas edificações ou sistemas construtivos.

Como forma de facilitar o estudo da ACVE é interessante discriminar as fases e as etapas do ciclo de vida das edificações, como é apresentado na tabela 2.1, a seguir.

Tabela 2.1 - Fases e etapas do ciclo de vida energético das edificações (Adaptado de TAVARES, 2006; SARTORI; HESTNES, 2007).

Item	Fases	Energias	Etapas
1	Prospecção, fabricação e transporte de insumos	Energia Incorporada Inicial	Pré - Uso
2	Fabricação dos materiais de construção		
3	Transporte materiais de construção da fábrica ao canteiro de obras		
4	Energia Consumida por equipamentos na obra		
5	Perdas dos materiais		
6	Transporte das perdas		
7	Energia consumida por equipamentos eletrodomésticos	Energia de Operação	Uso
8	Energia para a cocção dos alimentos		
9	Reposição de materiais (reforma e manutenção)	Energia Incorporada de Manutenção/ Recorrente	
10	Demolição/desconstrução e remoção dos resíduos	Energia de Demolição/Desconstrução	Pós - Uso
11	Transporte do material demolido até a destinação final		

Segundo Sartori e Hestnes (2007), as energias incorporadas normalmente são levantadas no formato de energia primária, no entanto a energia operacional é calculada inicialmente em formato de energia de uso final (energia secundária). Portanto, é necessário converter a energia de uso final em energia primária por meio de um fator de conversão (FC). O FC é um coeficiente que deve ser multiplicado para converter a energia secundária em energia primária.

2.3.2 Fontes Energéticas e Panorama Energético Brasileiro

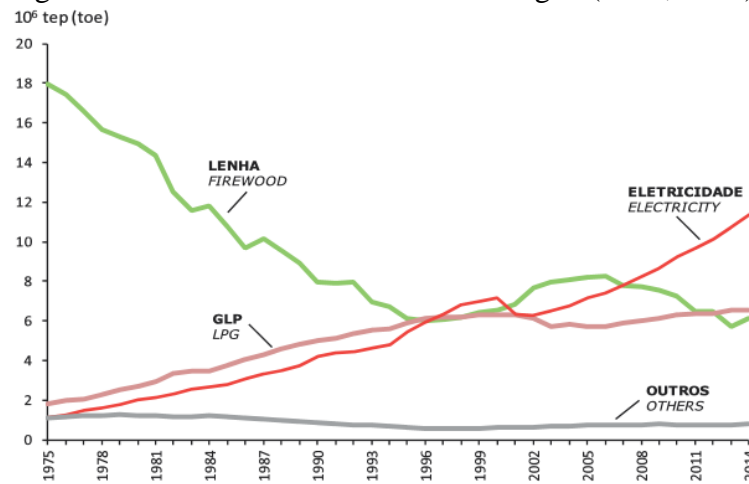
As fontes energéticas podem ser classificadas em função da renovabilidade. Por exemplo, os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral) são considerados não renováveis pois levam milhões de anos para se formarem e sua disponibilidade é limitada em função do esgotamento das reservas. Já a energia solar, eólica, biomassa e hidráulica, são fontes renováveis, pois sofrem reposição em um curto espaço de tempo (BERMANN, 2003; GOLDEMBERG; LUCON, 2011).

Desta forma, é necessário que cada país ou região avalie suas fontes e potenciais energéticos a fim de planejar questões relacionadas à produção e consumo de energia. Neste sentido os balanços energéticos são importantes ferramentas de análise da situação de uma dada região (como um país) em um determinado período de tempo.

O Balanço Energético Nacional (BEN) surgiu em 1976 com o objetivo de expor estatísticas de energia no Brasil, visto que até esta data, o país não possuía dados gerais sobre energia, apenas estatísticas setoriais. A motivação para sua criação foi a crise mundial do petróleo, que ocorreu em 1973 (ROMÉRO e BRUNA, 2010). Deve-se destacar que os dados publicados no BEN são fundamentais para a realização de estudos relacionados à energia e emissões de CO₂.

De acordo com dados do BEN (2015), o consumo de eletricidade no país, para o ano de 2014, registrou um aumento de 2,9%, suprido a partir da expansão da geração térmica, especialmente das usinas movidas a carvão mineral, gás natural e biomassa. Os setores residencial e comercial foram os que apresentaram maior contribuição para o crescimento da demanda de eletricidade, com um aumento de 5,7% e 7,4%, respectivamente. De toda energia utilizada no Brasil, no ano de 2014, o setor residencial representou uma participação de 9,3% e para o consumo de eletricidade sua participação foi de 21,2%. Na figura 2.3 é apresentado o consumo residencial de energia.

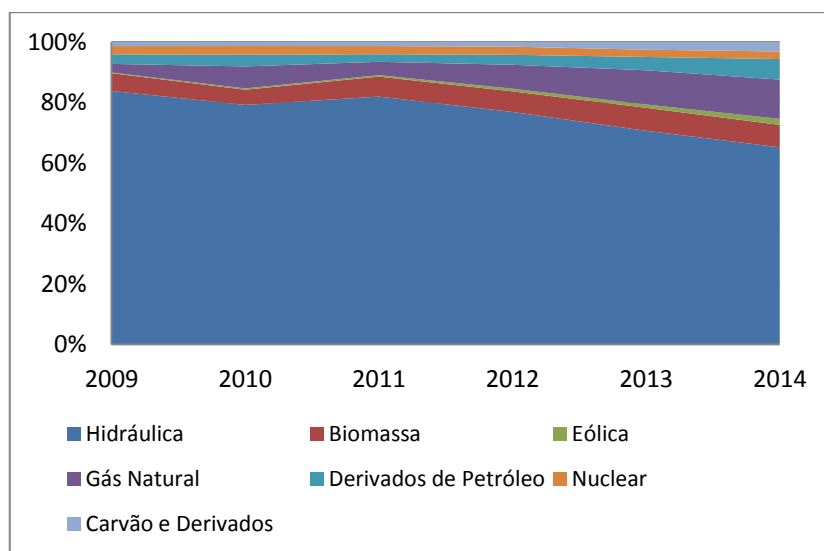
Figura 2.3– Consumo residencial de energia. (BEN, 2015).



Nota-se que a lenha teve um decréscimo enquanto o GLP um aumento de consumo nos últimos anos nas habitações brasileiras. Esta evolução é resultado, provavelmente, do aumento da taxa de urbanização, e também do aumento da disponibilidade do GLP. Desta forma, se espera que a utilização de lenha se torne cada vez mais restrita ao setor rural.

Outro ponto de destaque apresentado na figura 5.4 é o aumento da importância da participação da eletricidade nas edificações habitacionais, e assim, se faz necessário explorar qual a participação das diversas fontes energéticas existentes no país que compõe a matriz elétrica brasileira, como é apresentado na figura 2.4.

Figura 2.4– Evolução da Matriz elétrica brasileira. (Elaborado pelo autor a partir dos dados BEN, 2015).



É possível constatar a participação majoritária da fonte hidráulica na matriz elétrica brasileira. Nota-se que essa fonte tem um máximo em 2011, com 81,9%, e desde então vem caindo, até atingir um valor mínimo dos últimos cinco anos, de 65,2% em 2014. Em seguida vem o gás natural, biomassa, derivados de petróleo, carvão e derivados, nuclear, e por último a eólica. A participação do gás natural, derivados de petróleo e carvão e derivados tiveram um crescimento nos últimos anos. No entanto, ainda é possível observar a grande participação de fontes renováveis, representados pela hidráulica, biomassa e eólica, totalizando 74,6% para o ano de 2014.

Em relação às fontes energéticas, é importante saber qual o poder calorífico inferior² (PCI). Comparando duas fontes com diferentes PCIs e mesma massa ou volume, a que apresentar maior PCI será mais eficiente, visto que liberará maior quantidade de energia para a mesma massa ou volume oxidado. Na tabela 2.2 são apresentadas algumas fontes energéticas com seus respectivos PCIs.

Tabela 2.2 – Algumas fontes energéticas utilizadas no Brasil e o índice PCI. (Elaborado pelo autor, 2015).

Fontes energéticas	PCI (MJ/kg)	Fonte
Óleo Combustível	40,1	BEN (2015)
Óleo Diesel	42,2	BEN (2015)
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	46,4	BEN (2015)
Gás Natural ¹	41,5	BEN (2015)
Carvão Mineral	26,8	BEN (2015)
Coque de Petróleo	35,1	BEN (2015)
Piche	40,2	IPCC (2006)
Biomassa	11,6	IPCC (2006)

¹ PCI de 41,5 MJ/m³.

2.3.3 Consumo de Energia nas Edificações

Segundo Sartori e Hestnes (2007), as edificações demandam energia em seus ciclos de vida, tanto diretamente como indiretamente. Diretamente na construção, na energia de operação, na reabilitação/manutenção e na demolição; indiretamente por meio da produção de todos os seus materiais e componentes constituintes. Ainda segundo os mesmos autores, as edificações habitacionais demandam uma quantidade considerável de energia, seja nas etapas iniciais de pré-uso, mas principalmente na etapa de uso. Esta energia é consumida na fase operacional, nos equipamentos e instalações de iluminação, aquecimento,

² PCI: é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume, no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível (GOLDEMBERG; LUCON, 2011).

refrigeração e funcionamento dos utensílios domésticos na forma de eletricidade. A fase operacional aumenta sua importância no ciclo de vida das habitações à medida que são utilizados equipamentos de baixa eficiência energética.

Na cocção, para o preparo dos alimentos, são consumidos combustíveis como o GLP, a lenha e o gás natural (BEN, 2015). A partir da tabela 2.3 são apresentados os principais usos finais da eletricidade em diferentes regiões brasileiras.

Tabela 2.3 – Consumo de eletricidade em edificações habitacionais para diferentes regiões (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Região	Refrigeração	Água Quente	Iluminação Artificial	Condicionamento Ambiental	Outros
Sudeste	19,50%	30%	17,80%	3,30%	29,30%
Sul	25,20%	43,90%	12,60%	10,10%	8,20%
Norte	16,80%	0,40%	10,20%	18%	54,50%
Nordeste	20,20%	12,30%	6,50%	4,90%	56,20%
Centro - Oeste	21,20%	18%	13,60%	6,40%	40,90%
Brasil	20,40%	20,6	12,20%	8,70%	38%

A partir da tabela 2.3 é possível ter uma ideia de como ocorre a distribuição do consumo de eletricidade nas edificações habitacionais. O primeiro ponto a ser observado é a não homogeneidade da distribuição para as diferentes regiões brasileiras, principalmente para água quente e ar condicionado, visto que ambos estão diretamente relacionados às condições socioeconômicas e climáticas da região.

Quando se observa a média brasileira, a água quente e a refrigeração foram os que tiveram maior participação individual. Nos quesitos iluminação e condicionamento ambiental a participação também foi considerável. Portanto, a partir do diagnóstico do consumo de eletricidade que ocorrem nas edificações habitacionais, é possível traçar estratégias para a diminuição do consumo de energia, priorizando as fontes de maior consumo e aquelas que estão diretamente relacionadas ao desempenho da envoltória das edificações, como a iluminação e condicionamento ambiental.

De acordo com Lamberts *et al.* (2012), a melhoria do projeto, por meio do emprego de técnicas passivas ligada a arquitetura bioclimática, como seleção de sistemas com o desempenho térmico adequado, ventilação cruzada, dimensionamento adequado das aberturas para a entrada e aproveitamento da luz natural, podem resultar na economia da energia operacional relacionada a iluminação artificial e o condicionamento ambiental.

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO₂ (ACVCO₂)

2.4.1 Conceitos e Definições

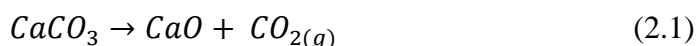
A Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂) aplicada ao setor da construção civil, pode ser definida como uma metodologia de quantificação e avaliação das emissões de CO₂ geradas nas principais etapas envolvidas ao longo do ciclo de vida de um material, componente, sistema ou edificação (ATMACA; ATMACA, 2015; CHAU *et al.*, 2015). Na tabela 2.4 é apresentada a organização das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de uma edificação.

Tabela 2.4 - Fases e etapas do ciclo de vida de emissões de CO₂ das edificações (Adaptado de ATMACA e ATMACA, 2015; CHAU *et al.*, 2015).

Item	Fases	Energias	Etapas
1	Emissões de CO ₂ originados das reações químicas naturais	CO ₂ Incorporado Inicial	Pré - Uso
2	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis utilizados na prospecção, fabricação e transporte de insumos		
3	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis utilizados fabricação dos materiais de construção		
4	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis utilizados no transporte materiais de construção das fábricas até o canteiro		
5	Emissões de CO ₂ originados da energia elétrica consumida por equipamentos na obra		
6	Perdas dos materiais		
7	Transporte das perdas		
8	Emissões da CO ₂ energia consumida por equipamentos eletrodomésticos	CO ₂ Operacional	Uso
9	Emissões da CO ₂ da energia para a cocção dos alimentos		
10	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis fósseis utilizados na reposição de materiais (reforma e manutenção)	CO ₂ Incorporado de Manutenção/ Recorrente	
11	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis utilizados na demolição/desconstrução e remoção dos resíduos	CO ₂ de Demolição/Desconstrução	Pós -Uso
12	Emissões de CO ₂ originados dos combustíveis utilizados no transporte do material demolido até a destinação final		

De acordo com Chau *et al.* (2015), os estudos na temática de avaliação das emissões de CO₂ são mais recentes, quando comparados com os estudos de ACVE. Pode-se dizer que a ACVCO₂ complementa a ACVE, pois como pode ser observado na tabela 2.4, grande parte das emissões de CO₂ são originadas a partir de fontes energéticas, principalmente da parcela proveniente de combustíveis fósseis. A principal diferença é o item 1, relacionado as emissões que ocorrem em reações químicas. No caso da construção civil, a reação de calcinação do carbonato de cálcio é a principal.

De acordo com Bauer (2003), na calcinação do calcário natural, o carbonato de cálcio (CaCO₃), submetido à ação do calor, decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) e CO₂, conforme é apresentado na equação 2.1. Agopyan e John (2011) afirmam que são gerados 440 Kg de CO₂ para cada 1000 kg de CaCO₃.

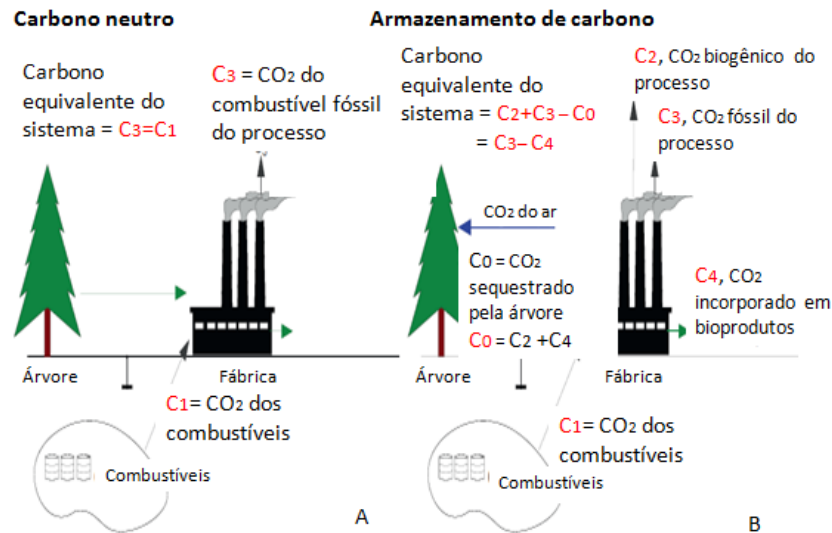


Segundo Chau *et al.* (2015), a produção de cimento tem se mostrado como a maior fonte de emissões de CO₂ relacionada a questões não energéticas. Estima-se que para cada tonelada de cimento é emitido em média 850 kg de CO₂, isto fazendo uma média das emissões em nível mundial. Já a indústria brasileira apresenta um dos menores níveis de CO₂, com emissões em torno de 600 kg por tonelada de cimento (CSI, 2012).

Pawelzik *et al.* (2013) citam a norma que trata da pegada de carbono dos produtos, a ISO 14067 (2013), e que estabelece que, em geral, para o cálculo da pegada de carbono para todo o ciclo de vida de um produto todas as emissões e remoções (biogênicos e fósseis) devem ser considerados.

Isto significa que o armazenamento de carbono biogênico em produtos de base biológica, como a madeira, por exemplo, deve ser contabilizado como uma remoção da atmosfera. Portanto, com base nessa norma, para uma análise do berço ao portão, o carbono armazenado nesses materiais deve ser descontado nos cálculos de emissão de CO₂. Na figura 2.5 são demonstradas as duas análises, uma sem contabilizar o CO₂ absorvido e outra com a contabilização do carbono estocado nos materiais biogênicos.

Figura 2.5– Esquema de contabilização de CO₂. (A) - Sem considerar a quantidade de CO₂ absorvida e estocada. (B) Considerando o CO₂ incorporado no material biogênico (Adaptado de PAWELZIK *et al.*, 2013).



No entanto, de acordo com os mesmos autores, para uma análise do berço ao túmulo, na qual o presente trabalho está enquadrado, os materiais são enviados à destinação final e sofrem degradação microbológica, sendo que o CO₂ estocado é devolvido à atmosfera. Desta forma, no presente trabalho não foi considerado o carbono estocado nos painéis de OSB e madeira utilizada na cobertura.

Outro item relacionado à contabilização das emissões de CO₂ é o processo de carbonatação³ que ocorre nos materiais cimentícios, verificado nos estudos de Collins (2010), Purnell *et al.* (2010), Tae *et al.* (2011) e Nordby e Shea (2013). No entanto, ela também não foi considerada no presente trabalho.

Em relação às fontes energéticas, de posse dos valores de consumo de energia encontrados podem-se obter as emissões a partir de um fator de conversão, que relaciona uma quantidade de emissões de CO₂ por quantidade de energia gerada. Os fatores de conversão dos principais combustíveis utilizados nas indústrias e no setor da construção civil são apresentados na tabela 2.5.

³ De acordo com Metha e Monteiro (2006), a carbonatação é definida como a reação natural do CO₂ atmosférico com os compostos de cálcio presentes na matriz cimentícia, retornando ao estado de carbonato de cálcio (CaCO₃).

Tabela 2.5 – Algumas fontes energéticas com suas respectivas emissões de CO₂
(Elaborado pelo autor, 2015).

Fontes Energéticas	CO₂ (Kg CO₂/MJ)	Fonte
Óleo Combustível	0,077	IPCC (2006)
Óleo Diesel	0,074	IPCC (2006)
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,063	IPCC (2006)
Gás Natural	0,056	IPCC (2006)
Carvão Mineral	0,096	IPCC (2006)
Coque de Petróleo	0,098	IPCC (2006)
Piche	0,081	IPCC (2006)
Biomassa ¹	0,102	IPCC (2006)
Solar	0,043	Goldemberg e Lucon (2011)
Eólica	0,004	Miranda (2012)
Nuclear	0,004	Miranda (2012)
Hidráulica	0,024	Miranda (2012)

¹ Sem descontar o carbono biogênico

A partir da análise da tabela 2.5, observa-se que a biomassa é o combustível de maior quantidade de emissões de CO₂, mas que pode diminuir suas emissões quando é contabilizado o carbono biogênico, devendo ser avaliado cada caso. Os combustíveis fósseis apresentam valores de emissões que variam entre 0,056 a 0,098 kg CO₂/MJ, sendo o menor valor para o gás natural e o maior para o coque de petróleo. Já as fontes renováveis, com exceção da biomassa, apresentam valores de emissões inferiores, e, portanto, deve-se incentivar a utilização destas fontes energéticas nos processos de fabricação e produção dos materiais, caso se deseje diminuir as emissões de carbono.

Miranda (2012) levantou a quantidade de emissões de CO₂ relacionada à eletricidade gerada no Brasil, originada a partir da matriz energética brasileira do ano de 2010. A autora chegou ao valor aproximado de 0,035 kgCO₂/MJ. Este dado difere do valor apresentado no BEN (2015), que foi de 0,038 kgCO₂/MJ. Esta diferença provavelmente deve estar relacionada a mudança da matriz energética brasileira, que no ano de 2014, teve um incremento da participação de usinas movidas a carvão mineral, gás natural e biomassa (BEN, 2015).

2.5 ESTADO DA ARTE RELACIONADA À ACV, ACVE E ACVCO₂

Nos últimos anos, cresceu o número de trabalhos sobre ACV, ACVE e ACVCO₂ relacionados ao setor da construção civil, no Brasil e em diversos países. Um dos trabalhos pioneiros no país foi o de Guimarães (1985), que levantou o consumo energético de duas edificações habitacionais, uma unifamiliar e outra multifamiliar.

Grigoletti (2001) pesquisou os principais impactos envolvidos na produção de componentes cerâmicos, como tijolos, blocos e telhados em indústrias localizadas no Rio Grande do Sul. Foram analisados impactos relacionados à matéria prima, fontes energéticas, geração de resíduos, emissões de CO₂, ambiente de trabalho e produto acabado.

Carvalho (2002) estudou a aplicação da ACV na produção do cimento Portland com adição de resíduos. Neste estudo foram avaliados impactos ambientais em nível global, regional e local, comparando emissões nacionais e internacionais. Mastella (2002) aplicou os conceitos de ACV de produtos para blocos cerâmicos e de concreto utilizados em alvenaria estrutural, com a finalidade de melhor entendimento do processo e da cadeia produtiva destes materiais.

Muitos estudos começaram a focar apenas a questão de consumo energético nas edificações, e o trabalho de Tavares (2006) merece destaque, por ser um dos primeiros estudos brasileiros que realizou o levantamento, a partir da ACVE, de diferentes habitações, considerando o berço ao túmulo do ciclo de vida. O autor calculou o consumo energético de diversos materiais e componentes utilizados no setor da construção civil e os resultados apresentados são até hoje uma importante base de dados.

Bessa (2010) aplicou a ACVCO₂ para a quantificação de emissões de CO₂ de diferentes tipos de fachadas de edificações de escritório para realidade de São Paulo. Esta pesquisa foi interessante por abordar a realidade de edificações não residenciais e apresentar fatores de emissões de carbono para alguns materiais e componentes da construção civil.

Lobo (2010) demonstrou um método de cálculo da energia incorporada e as emissões de CO₂ a partir da planilha de serviços de uma obra. Ao final da pesquisa foi desenvolvida uma ferramenta na qual foram simulados os valores de energia incorporada e emissões de CO₂ de uma edificação até a conclusão da obra. Este trabalho foi interessante por desenvolver um estudo em obras públicas.

Carminatti Júnior (2012) aplicou a ACVE para a mensuração da energia incorporada inicial de uma edificação habitacional de interesse social (HIS), comparando três sistemas construtivos: LSF, blocos cerâmicos estruturais e blocos de concreto estruturais. O autor concluiu que o sistema em blocos cerâmicos apresentou o menor valor de energia incorporada, seguidos pelo LSF e blocos de concreto.

Costa (2012) quantificou as emissões de CO₂ para os principais materiais e componentes de construção civil utilizados no país (cimento, cerâmica, vidro, PVC, blocos de concreto e etc.) e depois quantificou as emissões totais em uma HIS. As emissões de CO₂ dos materiais utilizados neste trabalho serviram como uma importante fonte de dados a ser utilizada em outras pesquisas e no presente trabalho.

Saade (2013) aplicou a ACV para avaliação dos impactos ambientais de diferentes tipos de cimento Portland, com diferentes percentuais de adição de escória de alto-forno, para análise comparando os resultados decorrentes do uso de diferentes critérios de alocação de impactos e expansão das fronteiras do sistema.

Oliveira (2013) avaliou um conjunto de indicadores a fim de integrar aspectos fundamentais de sustentabilidade, entre eles o desempenho técnico, de durabilidade ambiental e econômico, como forma de subsidiar a tomada de decisão para o dimensionamento de estruturas de concreto. Foi utilizada a ACV em conjunto com a avaliação do custo de ciclo de vida (CCV) para a avaliação de 31 estudos de caso de tipologia vertical em concreto armado e protendido.

Silva (2013), em seu estudo, apresentou a construção de uma ferramenta para ACV das edificações para a fase de pré-uso (extração, fabricação materiais, transporte até a obra e execução da edificação). Este estudo foi importante por trazer um estado da arte detalhado sobre trabalhos nacionais e internacionais que estudaram ACV aplicada a edificações e materiais de construção, além de mensurar o consumo de energia e emissões de CO₂, da fase de construção, relacionada aos equipamentos e maquinários utilizados, sendo que muitos trabalhos desconsideraram essa fase.

Munarim (2014) propôs um método de avaliação ambiental aplicando a ACV para a comparação entre a edificação a ser reabilitada ou demolida para a construção de uma nova. Concluiu que a reabilitação de uma edificação antiga é mais favorável do ponto de vista ambiental.

Pereira (2014) aplicou a ACVE e a ACVCO₂, quantificando o consumo de energia e as emissões de CO₂ na etapa de pré-uso, para a comparação de três tipos de coberturas, entre elas a vegetal, a de fibrocimento e a de telhas cerâmicas. Concluiu que a cobertura vegetal apresentou os melhores resultados, principalmente relacionado às emissões de CO₂.

Silva (2014) aplicou a ACV e procedeu à avaliação do custo de ciclo de vida, quantificando o consumo de energia relacionado à execução de um pilar de concreto armado, variando a resistência a compressão, de 30 a 50 MPa, e os tipos de cimento, CP II – F, CP IV e CP V – ARI. Concluiu que o pilar que apresentou os melhores resultados tanto do ponto de vista ambiental como econômico foi a configuração com resistência de 50 MPa, utilizando o cimento CP IV.

Oliveira (2015) aplicou a ACVE na mensuração da energia consumida em uma edificação habitacional com fachadas vivas (vegetais). A autora concluiu que o sistema não foi sustentável do ponto de vista energético, pois a redução obtida na energia operacional não compensou o investimento energético com a instalação e a manutenção das fachadas vivas.

Sombrio (2015) aplicou a ACV de acordo com a metodologia do *Life Cycle Data System* (ILCD) em uma edificação habitacional, constituída de painel pré-moldado de blocos cerâmicos e de concreto armado. Os resultados demonstram a maior participação do concreto nos impactos produzidos na fabricação componentes da edificação, e, portanto, há uma necessidade de se buscar sistemas alternativos como uma possível solução para minimizar os impactos ambientais.

Em relação ao meio técnico, algumas iniciativas isoladas estão surgindo no setor de construção civil brasileira com o interesse em aplicar a ACV, ACVE e ACVCO₂. Entre elas merecem destaque os estudos do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), o manual desenvolvido pelo Sindicato da Construção de São Paulo (SindusCon – SP, 2013) e o estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2013) e Saade *et al.* (2013).

É importante citar a atuação do CBCS, que criou a chamada ACV modular (ACV-m), cujo intuito é a criação de uma plataforma de informações com indicadores de sustentabilidade de materiais, produtos e componentes para auxiliar profissionais e consumidores na tomada de decisão. O projeto propõe o levantamento de cinco aspectos ambientais, entre eles o consumo de energia, de água, de matérias primas, geração de resíduos e emissões de CO₂

(CBCS, 2016). Já foram realizadas a ACV-m de blocos de concreto e pavimentos intertravados.

O SindusCon – SP (2013) publicou um guia metodológico para o inventário de gases do efeito estufa no setor de edificações, como forma de incentivar a quantificação de emissões destes gases nas construtoras e diversos integrantes da cadeia da indústria da construção (projetistas, fabricantes, fornecedores e etc.). O manual publicado é uma importante ferramenta que poderá servir de base metodológica para outros manuais e outros estados brasileiros.

Silva e Silva (2015), Silva *et al.* (2013) e Saade *et al.* (2013) iniciaram a construção de inventários de ciclo de vida para materiais de construção nacionais e a validação de inventários internacionais, por meio da análise dos seus processos produtivos; utilizaram para tal dados para modelagem dos ciclos de produção de materiais e componentes de construção coletados da literatura e adaptados da base de dados do *Ecoinvent*, considerando a análise do berço ao portão. Na pesquisa de Silva e Silva (2015) são apresentados estes materiais e componentes com dados de energia e emissões de CO₂ para o contexto brasileiro.

Em relação às publicações internacionais, alguns trabalhos merecem destaque como o de Adalberth (1997a) e Adalberth (1997b) relacionados à energia gasta no ciclo de vida das edificações. No primeiro, Adalberth (1997a), propôs um método para calcular esta energia consumida, apresentando equações, fatores energéticos e tempo de vida útil dos principais componentes e elementos de construção. No segundo, o autor aplicou esta metodologia em três edificações habitacionais unifamiliares construídas na Suécia entre 1991 e 1992.

Fay *et al.* (2000) explicam brevemente algumas das questões teóricas associadas a ACVE e, em seguida, utilizam esta metodologia para demonstrar seu uso na avaliação de alternativas de concepção para uma edificação habitacional unifamiliar australiana eficiente. Verificou-se que a adição de níveis mais elevados de isolamento térmico na envoltória da edificação culminou no aumento da sua energia incorporada inicial, e que para ser compensada ao longo do ciclo de vida, a partir da diminuição da energia operacional, com um tempo de retorno de 12 anos.

Keoleian *et al.* (2001) avaliaram o consumo de energia e emissões de CO₂ comparando uma edificação habitacional unifamiliar padrão em relação a uma energeticamente

eficiente, ambas localizadas em Michigan (Estados Unidos). A edificação eficiente apresentou uma redução em torno de 60% da energia e emissões de CO₂ em relação à edificação padrão.

Mithraratne e Vale (2004) pesquisaram a energia incorporada e operacional ao longo do ciclo de vida para três tipos de sistemas construtivos, sendo eles: tipo leve (*wood framing*), de concreto e com isolamento térmico na Nova Zelândia. A edificação em *wood framing* apresentou melhores resultados.

Thormark (2006) analisou a escolha dos materiais de construção relacionada à energia incorporada, operacional e de manutenção de uma habitação localizada na Suécia, avaliando o projeto original com modificações de alguns materiais.

No estudo de Sartori e Hestnes (2007) é realizada a definição dos principais tipos de energia envolvidos em uma edificação, entre elas energia incorporada inicial e total, energia recorrente ou de manutenção, operacional e de utilização final, além de definir edifícios convencionais, de baixa energia e passivos. É um dos estudos internacionais mais citados nos trabalhos na área.

Huberman e Pearlmutter (2008) avaliaram o consumo de energia e emissão de CO₂ de um modelo de uma edificação habitacional localizada no deserto de Negev, em Israel. Foram comparados cinco sistemas construtivos de vedação externa, sendo o de referência de estrutura de concreto armado, dois convencionais (em blocos de concreto e autoclavado) e dois alternativos (blocos com cinza volante e solo estabilizado). No escopo do estudo foi avaliado a energia incorporada inicial, operacional e as emissões de CO₂ dos materiais e aquelas relacionadas à operação da edificação e desempenho térmico dos sistemas utilizados.

Gustavsson e Joelsson (2010) avaliaram diferentes edificações habitacionais localizadas na Suécia, construídas em diferentes anos, entre 1976, 1996, 2001 e 2006. Foi avaliada a influência de isolantes térmicos na envoltória da edificação, tecnologias de aquecimento e fontes energéticas para o aquecimento (carvão, gás natural e biomassa). A partir deste estudo conclui-se que a escolha da fonte energética e tecnologia de aquecimento empregada teve um maior impacto na eficiência energética das edificações que as medidas empregadas na envoltória.

No estudo de Ramesh *et al.* (2010) foi realizada uma revisão crítica da literatura referente a ACVE e edificações, resultando em 73 casos distribuídos em 13 países. O estudo inclui tanto edificações habitacionais e comerciais. Os resultados mostraram que a energia operacional chegou a 80-90%, enquanto a energia incorporada a 10-20%.

Bribían *et al.* (2011) apresentaram uma comparação dos principais materiais utilizados no setor da construção civil espanhola em relação a materiais ecológicos, utilizando três categorias de impacto, consumo de energia primária, emissões de CO₂ e consumo de água. O estudo provou que o impacto ambiental pode ser reduzido pela substituição do emprego dos materiais convencionais por aqueles que passaram por um processo de reaproveitamento ou reciclagem, proveniente de outros processos.

Kim (2011) comparou o consumo energético e as emissões de CO₂ entre uma fachada transparente especial e outra com um sistema de cortina de vidro para uma edificação localizada nos Estados Unidos. No primeiro sistema, que apresenta um melhor desempenho térmico, foi alcançada uma redução de 7% no consumo de energia operacional e 11% na redução de emissões de CO₂.

No estudo de Nordby e Shea (2013), foram comparadas as emissões de CO₂ de três tipos de vedações verticais, uma de concreto com lã de rocha, uma com fibra de madeira e outra com fibra de madeira e cal. Foi utilizado um programa computacional, o WUFI Pro para fixar os requisitos de desempenho higrotérmico das vedações. Este estudo mostra a importância de se considerar o desempenho nos estudos de ACV/ACVE/ACVCO₂.

Para a realidade brasileira o estudo de Paulsen e Sposto (2013) merece destaque. Avaliaram o consumo de energia ao longo de todo o ciclo de vida de uma edificação habitacional de baixo padrão, localizada na cidade de Brasília. Concluíram que o sistema de vedações verticais foi o que apresentou a maior participação da massa total construída e do consumo de energia da edificação, em torno de 57%. As etapas operacional, manutenção, fabricação e processamento dos materiais foram as mais impactantes em termos quantitativos. Um resultado interessante foi a participação do consumo de energia das tintas, principalmente na manutenção da habitação.

Rakhshan *et al.* (2013) estudaram a diminuição no consumo de energia operacional e nas emissões de CO₂ como resultado do aumento da espessura de camadas de isolantes

térmicos em fachadas de edificações localizadas em Dubai. Concluíram que para o clima de Dubai é vantajoso aumentar estas camadas, com a utilização de EPS, por exemplo.

Vários outros trabalhos recentes, como Radhi e Sharples (2013), Taborianski e Prado (2012) e Iwaro e Mwashu (2013) também tratam da relação entre as vedações verticais e impactos ambientais relacionados ao desempenho térmico, ao consumo energético e as emissões de CO₂ das edificações. Portanto, observa-se que é um tema atual e de grande interesse em vários países do mundo.

Cabeza *et al.* (2014) realizaram um amplo e detalhado estado da arte sobre a ACV aplicada ao setor da construção civil. Foram pesquisadas 187 referências internacionais de diversos países, dos últimos 20 anos. Os autores dividiram a pesquisa em ACV, ACVE e Avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV), tratando sobre materiais de construção, sistemas da edificação e a edificação como um todo. A principal contribuição destes autores foi a apresentação de uma tabela resumo contendo os trabalhos pesquisados divididos conforme o escopo do trabalho, vida útil utilizada, fronteiras do sistema, localização e tipologia das edificações que pode ser facilmente consultada, auxiliando os estudos desta temática.

Devi L. e Palaniappan (2014) realizaram uma ACVE em edificações típicas do sudeste indiano, considerando as etapas de pré-uso, uso e pós-uso. Foram considerados cenários de máxima à mínima eficiência energética nas edificações. Os materiais que mais contribuíram foram o cimento e os vergalhões de aço, ambos utilizados na estrutura, enquanto o de menor participação foram às instalações hidrossanitárias. Mais uma vez a etapa de energia operacional foi a que apresentou o maior consumo energético do ciclo de vida da edificação.

Wen *et al.* (2015) compararam os impactos ambientais, por meio do cálculo da energia incorporada e emissões de CO₂, entre um sistema construtivo industrializado e um convencional localizados na Malásia. O sistema industrializado apresentou menores valores de energia e emissões.

Atmaca e Atmaca (2015) avaliaram o consumo de energia e emissões de CO₂ para duas edificações habitacionais multifamiliares, uma localizada em um centro urbano e a outra na zona rural, construídas na cidade de Gaziantep, Turquia. O estudo foi realizado com base no escopo do berço ao túmulo e concluíram que a energia operacional foi a que apresentou a maior participação, sendo que a edificação localizada na região urbana apresentou

consumo de energia e emissões de CO₂ da etapa operacional em torno de 18% superior à edificação localizada na zona rural, por causa do tipo de combustível utilizado.

Brás e Gomes (2015) também avaliaram o consumo de energia e emissões de CO₂ entre dois cenários para uma escola localizada em Portugal. Foi comparado um cenário base (*baseline*) e um cenário de *retrofit* das fachadas com diferentes argamassas, sendo que estas tiveram parte dos aglomerantes (de cimento e cal) substituídos por resíduos. A substituição resultou em uma diminuição da energia incorporada e melhoria das propriedades térmicas da argamassa, entre elas diminuição da condutividade, o que refletiu em uma melhoria do desempenho térmico do sistema de vedação vertical e a redução do consumo de energia operacional e emissões de CO₂.

Peng (2016) avaliou as emissões de CO₂ no ciclo de vida de uma edificação localizada em Nanjing, China, englobando o escopo do berço ao túmulo. A principal contribuição deste estudo foi a utilização do *Building Modelling Information* (BIM) como ferramenta de apoio para a contabilização das emissões. Espera-se que estudos conduzidos com a aplicação do BIM e ACV sejam cada vez mais frequentes, como o apresentado por Caldas *et al.* (2015a).

Tendo como base os estudos mencionados, observa-se que grande parte deles tem o objetivo de avaliar a relação entre desempenho térmico, consumo de energia e emissões de CO₂ nas edificações. Em relação às etapas estudadas, a maioria dos estudos foca nas etapas de pré-uso e de uso, visto que são as mais significativas. A maioria⁴ dos estudos chegaram ao consenso que a etapa operacional é a mais impactante no ciclo de vida da edificação.

Foi observado que poucos adotam em seu escopo as etapas de construção (execução), manutenção e destinação final. A justificativa para a não consideração das etapas de execução e destinação final é o fato delas serem inferiores às etapas de pré-uso e de uso ou a falta de dados. Em relação à etapa de manutenção, a grande dificuldade é prever o tempo de reposição dos materiais, mas esta etapa não deve ser desconsiderada, visto que em alguns estudos sua contribuição foi próxima ou até superior a etapa de pré-uso.

⁴ Existem algumas exceções, quanto a maior participação da energia e emissões operacionais ao longo do ciclo de vida das edificações. Esta diferença pode ocorrer em edificações com baixo consumo de energia (*low energy buildings*) e nas edificações zero energia (*net zero energy buildings*), como é discutido por Silva e Silva (2015).

A respeito dos dados utilizados, nota-se que a grande maioria deles são do tipo secundários e retirados da literatura. Para a etapa de uso, em muitos estudos, é utilizada simulação computacional termoenergética, relacionando o consumo de energia com o desempenho térmico da edificação.

Observa-se que os temas de ACV, ACVE e ACVCO₂ relacionado às edificações e materiais de construção está sendo pesquisado em vários países, como Índia, Suécia, Finlândia, Itália, Espanha, Portugal, Canadá, Malásia, Israel, China, Brasil e etc., com a maior quantidade de publicações internacionais em países norte-americanos e europeus. Na maioria dos estudos a unidade funcional adotada foi m² de área de piso bruta ou a edificação completa.

Percebe-se que no contexto brasileiro, algumas iniciativas caminham para o emprego da abordagem da ACV, ACVE e ACVCO₂ aplicados ao setor da construção civil, no entanto, ainda se encontra em um estágio embrionário. Os estudos levantados serviram de embasamento para a definição da metodologia utilizada na presente dissertação, que será detalhada no Capítulo 4.

Foram reunidos e apresentados a seguir alguns resultados de estudos nacionais e internacionais que aplicaram à ACVE e ACVCO₂ em edificações habitacionais unifamiliares de pequeno porte como forma de comparar os resultados encontrados e ter alguns valores de referência. Todos os estudos selecionados (tabela 2.6) utilizaram a mesma unidade funcional (área de piso bruta) e calcularam o consumo de energia e/ou emissões de CO₂ para a edificação completa.

Tabela 2.6 – Comparação dos resultados de alguns estudos nacionais e internacionais (Elaborado pelo autor, 2015).

Estudos	País	Categorias ambientais	Pré-Uso	Operação	Manutenção	Pós-Uso	Total
Tavares (2006) ¹	Brasil	Energia (GJ/m ²)	4,63	16,61	2,43	0,49	24,16
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	0,39	0,45	0,16	0,04	1,04
Carminatti Júnior (2012) - Modelo LSF	Brasil	Energia (GJ/m ²)	3,90	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Carminatti Júnior (2012) - Modelo Alvenaria Estrutural Cerâmica	Brasil	Energia (GJ/m ²)	3,00	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Carminatti Júnior (2012) - Modelo Alvenaria Estrutural de Concreto	Brasil	Energia (GJ/m ²)	6,60	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Costa (2012)	Brasil	Energia (GJ/m ²)	-	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	0,20	0,24	-	-	0,44

Estudos	País	Categorias ambientais	Pré-Uso	Operação	Manutenção	Pós-Uso	Total
Paulsen e Sposto (2013)	Brasil	Energia (GJ/m ²)	3,80	17,56	7,60	0,27	29,23
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Caldas <i>et al.</i> (2015b)	Brasil	Energia (GJ/m ²)	-	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	0,50	0,68	0,66	0,01	1,85
Adalberth (1997)	Suécia	Energia (GJ/m ²)	1,15-1,40	12,15-13,65	-	-	13,33-14,40
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Winter e Hestenes (1999) ²	Noruega	Energia (GJ/m ²)	0,60-0,63	5,7-6,6	-	-	6,33-7,20
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Winter e Hestenes (1999) ²	Noruega	Energia (GJ/m ²)	4,32	11,34	-	-	15,66
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Thormark (2002) ²	Suécia	Energia (GJ/m ²)	1,95	6,0	-	-	7,95
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Thormark (2006)	Suécia	Energia (GJ/m ²)	5,04-6,15	3,05-10,99	1,03-1,41	0,045-0,049	9,14-18,61
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Rossi <i>et al.</i> (2012) ²	Bélgica/ Portugal/ Suécia	Energia (GJ/m ²)	1,22-1,31	8,73-16,39	-	-	9,95-17,69
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-
Radhi e Sharples (2013)	Reino de Bahrain	Energia (GJ/m ²)	-	-	-	-	-
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	0,22-0,49	1,79 – 2,80	-	-	2,04-2,80
Devi L. e Palaniappan (2014)	Índia	Energia (GJ/m ²)	12,18	21,09	-	0,36	33,63
		CO ₂ (tCO ₂ /m ²)	-	-	-	-	-

¹ Modelo de habitação de baixo padrão.

² Estudos retirados de Karimpour *et al.* (2014).

É possível observar que no Brasil, são poucos os estudos que avaliaram o consumo de energia e emissões de CO₂ para a edificação completa. Além disso, nota-se certa dispersão dos resultados encontrados: variando de 3,0 a 6,6 GJ/m² e 0,19 a 0,49 tCO₂/m² para a etapa de pré-uso; 16,61 a 17,56 GJ/m² e 0,24 a 0,68 tCO₂/m² para a etapa operacional; 2,43 a 7,6 GJ/m² e 0,16 a 0,66 tCO₂/m² para a etapa de manutenção; 0,27 a 0,49 GJ/m² e 0,01 a 0,04 tCO₂/m² para a etapa de pós-uso; e 24,14 a 29,23 GJ/m² e 1,04 a 1,85 tCO₂/m² para o ciclo de vida das edificações habitacionais.

Já nos estudos internacionais esta variação é maior ainda. Os países europeus apresentaram valores de energia total inferiores aos casos brasileiros e asiáticos (Índia e Reino de Bahrain). Esta diferença está associada ao fato de muitas destas habitações europeias serem consideradas de baixo consumo de energia (*low energy buildings*) e, portanto, apresentam baixos valores de energia operacional. Em alguns estudos foram verificados também baixos valores da energia de pré-uso, que provavelmente se deve a seleção dos materiais e

componentes utilizados nas habitações e a ausência de contabilização de alguns componentes.

Pode-se concluir que existe uma considerável dispersão nos resultados dos estudos de ACVE e ACVCO₂. Estas diferenças ocorrem devido às diversas considerações realizadas nestes estudos, como por exemplo: as fontes dos inventários dos materiais utilizados, os equipamentos eletrônicos considerados nas edificações, o tipo de combustível para cocção dos alimentos, a vida útil dos materiais e intervalos de reposição e o tipo de demolição/desconstrução adotado. Estas diferenças ao final do estudo podem gerar resultados discrepantes e com elevada dispersão.

No entanto, é importante definir intervalos para avaliar se os novos estudos que vem sendo realizados (como é o caso do presente trabalho) apresentam resultados próximos a estes que foram verificados. Este levantamento é de grande valor pois serve como *benchmarks*⁵, além de alimentar o banco de dados e auxiliar a formação do inventário brasileiro de ciclo de vida para o setor da construção civil.

2.6 DESEMPENHO TÉRMICO E CONSUMO DE ENERGIA RELACIONADOS ÀS VEDAÇÕES VERTICAIS

2.6.1 Importância da Vedação Vertical nas Edificações Habitacionais

A envoltória da edificação, composta pelas vedações verticais e horizontais, é um dos principais elementos da edificação, e é responsável pela proteção do ambiente interior dos agentes ambientais externos. A envoltória protege o ambiente interno contra a poluição, ruídos, vento, chuva e radiação solar, desempenhando papel importante nas questões de conforto ambiental e consumo de energia (IWARO; MWASHA, 2013).

As vedações verticais possuem uma participação considerável da massa de uma EHU, variando conforme o sistema construtivo empregado. Tavares (2006) avaliou cinco modelos com vedação convencional em blocos de concreto e cerâmico, encontrando valores entre 23 e 36,34%. Carminatti Júnior (2012) avaliou três sistemas de vedação,

⁵ *Benchmarks* definem um nível típico de consumo, permitindo a rápida comparação, avaliação, e identificação de potencial para melhoria (CBCS, 2014).

sendo eles em LSF (23,9%), blocos cerâmicos (36,2%), estruturais e blocos de concreto estruturais (71%).

Paulsen e Sposto (2013) avaliaram uma HIS composta de blocos cerâmicos estruturais, onde as vedações tiveram uma participação na massa total da EHU de 47%. Portanto, observa-se a importância de se estudar as EHU com foco nas vedações verticais para a realidade brasileira.

Na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) a vedação vertical é definida como uma das partes da edificação habitacional que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, podendo ser as fachadas, as paredes ou as divisórias internas.

As exigências dos usuários referentes às vedações verticais contempladas na norma são as seguintes: desempenho estrutural, segurança contra incêndio, estanqueidade, desempenho térmico, acústico, durabilidade e manutenibilidade (ABNT NBR 15575-4, 2013).

2.6.2 Desempenho Térmico nas Edificações Habitacionais Segundo a ABNT NBR 15575:2013

De acordo com Akutsu e Lopes (1988) o desempenho térmico pode ser definido como a interação entre a edificação e o ambiente térmico em que a mesma está inserida, ou seja, referente às suas condições de exposição.

Rivero (1985) destaca a importância das condições climáticas como a temperatura, umidade do ar, velocidade e direção dos ventos e radiação solar; além disto, devem ser analisadas as condições de implantação como latitude, longitude, topografia, orientação solar com o ambiente vizinho à edificação, além dos materiais e componentes, que dão forma e dimensões da edificação.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) define os requisitos e critérios para a verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico necessário para as vedações verticais externas. Existem dois procedimentos para a verificação do desempenho térmico, o procedimento 1, chamado de simplificado ou normativo; e o procedimento 2, o de medição ou informativo (ABNT NBR 15575-1, 2013). Duas propriedades importantes, relacionada ao desempenho térmico, precisam ser definidas, a transmitância térmica e a capacidade térmica.

A transmitância térmica (U) pode ser definida como a capacidade de conduzir certa quantidade de calor por unidade de área e variação de temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2012). É calculada como o inverso da resistência térmica total, como é mostrado na equação 2.2, e é normalmente expressa em W/m².K. É o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes a cada camada de um componente, elemento ou sistema. Está diretamente relacionada à espessura e condutividade térmica dos materiais que compõe as camadas (ABNT NBR 15220-2, 2008).

$$U = \frac{1}{Rt} \quad (2.2)$$

Onde,

U é a transmitância térmica total, em W/m².K

Rt é a resistência total, em m².K/W.

Na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) são apresentados os valores máximos para o critério de transmitância térmica das vedações, de acordo com a tabela 2.7, aplicados a cada zona bioclimática brasileira.

O Brasil é dividido em 8 zonas bioclimáticas, sendo que a cidade de Brasília – DF, localidade onde o presente estudo foi considerado, está localizada na zona de número 4 (ABNT NBR 15220-3:2005).

Tabela 2.7 – Transmitância térmica de paredes externas (ABNT NBR 15575-4:2013).

Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	α ¹ ≤ 0,6	α ¹ ≥ 0,6
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

¹α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

A capacidade térmica (Ct) pode ser definida como a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, de área igual à unidade e uma espessura determinada normalmente expressa em kJ/m²K (RIVERO, 1985). É calculada pelo somatório das capacidades térmicas de cada componente, elemento ou sistema, conforme apresentado na equação 2.3.

$$Ct = \sum_{i=1}^n ei. ci. \varphi i \quad (2.3)$$

Onde,

Ct é a capacidade térmica, em J/K.

ei é a espessura da camada, em metros (m).

Ci é o calor específico do material da camada, em J/kg.K;

ϕ_i é a densidade de massa aparente do material da camada, em kg/m³.

Na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) são apresentados os valores mínimos para o critério de capacidade térmica das vedações, de acordo com a tabela 2.8, aplicados a cada zona bioclimática brasileira.

Tabela 2.8 – Capacidade térmica de paredes externas de paredes externas (ABNT NBR 15575-4: 2013).

Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem requisito	CT \geq 130

No caso da avaliação do desempenho térmico por simulação computacional, na NBR 15575-1 (ABNT, 2013) podem ser consultados alguns parâmetros relacionados aos dados de entrada, descritos a seguir:

- As informações sobre a localização geográfica e os dados climáticos correspondentes devem ser retiradas das tabelas A.1, A.2 e A.3 da NBR 15575-1 (ABNT, 2013), localizada no anexo A da norma;
- Para a realização das simulações computacionais recomenda-se o emprego de softwares que utilizem máquina de simulação termoenergética similar ao EnergyPlus.
- A geometria do modelo de simulação deve representar a situação real da edificação;
- Na seleção dos materiais e componentes utilizados na simulação da edificação, devem-se utilizar dados das propriedades térmicas dos materiais e/ou componentes, obtidos em laboratório, ou os apresentados na NBR 15220-2 (ABNT, 2008);
- Devem ser efetuadas simulação de todos os ambientes da edificação, considerando as trocas térmicas entre eles;
- A orientação deve ser definida conforme a implantação;

- Deve-se adotar uma taxa de ventilação mínima dos ambientes de 1renov/h.

Os critérios a serem atendidos são os “valores máximos de temperatura” na condição de verão e os “valores mínimos de temperatura” para as condições de inverno, conforme é apresentado nas tabelas 2.9 e 2.10.

Tabela 2.9 – Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão (ABNT NBR 15575-1: 2013).

Nível de desempenho	Critério
M	Zonas 1 a 8
	$T_{i,máx} \leq T_{e,máx}$

$T_{i,máx}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C .
 $T_{e,máx}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C .
 Nota: Zonas bioclimáticas de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Tabela 2.10 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno (ABNT NBR 15575-1: 2013).

Nível de desempenho	Critério	
M	Zonas 1 a 5	Zona 6, 7 e 8
	$T_{i,mín} \geq T_{e,mín}$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado

$T_{i,mín}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C .
 $T_{e,mín}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C .
 Nota: Zonas bioclimáticas de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

2.6.3 Influência do Desempenho Térmico no Consumo de Energia das Edificações Habitacionais

De acordo com Lamberts *et al.* (2012), a maior parte do consumo de eletricidade nas edificações habitacionais é destinado a geladeiras, chuveiros e iluminação. No entanto, nos últimos anos o sistema de condicionamento ambiental vem aumentando sua participação no consumo total, chegando a 20% na média nacional. É importante ressaltar que com o crescente desenvolvimento social, a diminuição dos custos dos aparelhos de ar condicionado, e com a execução de edificações não adequadas ao clima, a aquisição destes

aparelhos tem sido cada vez mais frequente, resultando no aumento do consumo de energia elétrica no setor residencial.

Deve-se ressaltar que com o aumento do custo da energia elétrica que ocorreu nos últimos anos no país, a aquisição e utilização de aparelhos de ar condicionado tendem a diminuir. O aumento do preço a ser pago na conta de energia ficará fora do orçamento de muitas famílias, principalmente aquelas de baixo poder aquisitivo. Conclui-se que relacionado ao uso de aparelhos de climatização em habitações de famílias de baixo poder aquisitivo tem-se um futuro incerto a respeito do aumento ou diminuição destes aparelhos nestes tipos de habitações.

Ainda segundo os mesmos autores, as decisões de projeto impactam diretamente o desempenho térmico, visual e energético da edificação. O projetista deve considerar a adequação do seu projeto ao clima local, por meio da utilização de estratégias da luz natural, resfriamento e aquecimento passivo dos ambientes. Referente ao resfriamento e aquecimento passivo, a escolha dos componentes e sistemas de desempenho térmico adequado exerce grande influência, e, portanto, deve ser atentado para a sua correta especificação durante a etapa de projeto.

Taborianski e Prado (2012) avaliaram as emissões de CO₂ no ciclo de vida de uma edificação de escritórios, localizada na cidade de São Paulo, para cinco diferentes sistemas de fachadas. Os sistemas avaliados foram: *structural glazing* incolor, *structural glazing* reflexivo, alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento em argamassa, alvenaria de blocos de concreto com revestimento em argamassa e alvenaria de blocos cerâmicos com ACM.

Em relação às emissões referentes à etapa operacional, a situação com a fachada em *structural glazing incolor* foi a que apresentou maior quantidade de emissões, e isto ocorreu principalmente devido ao menor desempenho térmico dos materiais constituintes deste tipo de fachada, que apresentou um maior consumo de eletricidade para o condicionamento da edificação.

Maciel (2013) avaliou a relação entre desempenho e conforto térmico com o consumo de energia operacional relacionado ao condicionamento ambiental de uma edificação habitacional localizada em Brasília – DF. Foram avaliadas três tipologias de fachadas ventiladas, uma com porcelanato, outra com placas pétreas e outra com ACM. A fachada

de ACM foi a que apresentou menor valor de transmitância e também menor consumo de energia operacional relacionada ao condicionamento ambiental da edificação.

Rakhshan *et al.* (2013) avaliaram o consumo de energia e as emissões de CO₂ de uma edificação habitacional típica de Dubai, relacionando ao desempenho térmico das fachadas com e sem EPS. A fachada com EPS apresentou um desempenho térmico superior à fachada sem o material. Os autores constataram um aumento do consumo de energia e emissões iniciais devido à camada de EPS (na fase de processamento e transporte do ciclo de vida), no entanto, após nove meses de operação, a edificação com fachada com EPS recupera esta diferença devido a seu menor consumo de energia e menores emissões de carbono na fase operacional.

A partir destes estudos é possível notar a importante relação existente entre o desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical, principalmente das fachadas, em relação ao consumo de energia e emissões de CO₂ na fase operacional das edificações. Como já foi discutido anteriormente, esta fase foi a que apresentou maior participação no ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ das edificações estudadas, sugerindo que a escolha do sistema de vedação com o desempenho adequado deve receber uma atenção especial, para a diminuição do consumo de energia e emissões de CO₂ da fase operacional.

Embora muitos trabalhos tenham considerado a relação entre o desempenho térmico e o consumo de energia na etapa operacional, muitos avaliaram esta relação para edificações multifamiliares ou edificações localizadas em locais de clima mais quentes, como foi o caso de Dubai.

No entanto, falta ainda avaliar a relação entre desempenho térmico, consumo de energia e emissões de CO₂ para edificações mais simples, como edificações habitacionais familiares unifamiliares de baixo padrão, localizadas em Brasília. De acordo com Goulart *et al.* (1997), a cidade de Brasília apresentou o maior percentual de horas de conforto em relação a outras 13 cidades estudadas de diferentes regiões brasileiras.

3 SISTEMA LIGHT STEEL FRAMING (LSF)

O *Light Steel Framing* (LSF), estrutura leve em aço, teve origem no início do século XIX, iniciando com as habitações em madeira construídas no território norte americano, chamado de *Light Wood Framing* (LWF). O crescimento populacional e a expansão das cidades naquela época demandavam sistemas construtivos com maior rapidez, o que proporcionou o cenário ideal para a difusão do sistema de LWF (FREITAS; CRASTO, 2006).

No entanto, observou-se que o sistema composto por madeira era bastante vulnerável ao fogo. Um incêndio que ocorreu em Chicago, em 1871, consumiu parte considerável da cidade, que era construída em grande parte por madeira. Em 1933, com o intenso desenvolvimento da indústria de aço nos Estados Unidos, foi lançado, na Feira Mundial de Chicago, o protótipo para uma habitação em LSF (CAMPOS, 2014).

No Japão, as primeiras construções em LSF começaram a surgir no período pós Segunda Guerra Mundial, quando foi necessária a rápida construção das habitações destruídas durante os bombardeios. O governo restringiu a utilização de madeira devido à vulnerabilidade ao fogo deste material e a fim de proteger os recursos florestais que poderiam se exaurir. Neste contexto, a indústria de aço japonesa iniciou a produção de perfis leves de aço para a construção das habitações e atualmente o Japão é um país bastante desenvolvido na área de construções em perfis leves de aço (FREITAS; CRASTO, 2006).

Desta forma, observa-se que o LSF é um sistema construtivo bastante utilizado em países onde o setor da construção civil é predominantemente industrializado, como é o caso dos Estados Unidos e do Japão, ao contrário do Brasil, onde os processos artesanais predominam. O LSF é um sistema construtivo inovador⁶ no Brasil e com um processo construtivo industrializado, já que a execução resume-se à montagem de componentes provenientes de indústrias.

Por ser um processo inovador, o sistema de LSF é tratado nos Documentos de Avaliação Técnica (DATEcs) e o organismo avaliador responsável pelo processo é o Sistema

⁶ É considerado produto inovador aquele que não possui norma harmonizada e que entra no mercado por meio de um apoio técnico consolidado (AMANCIO *et al.*, 2012). Até a data de escrita desta dissertação o sistema de LSF era considerado inovador.

Nacional de Avaliação Técnica (SiNAT), que está vinculado ao Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H).

Atualmente existem três DATecs que tratam do LSF, o de nº 014, de nº 015 e de nº 016, além da Diretriz Técnica do SiNAT nº 003. Nestes documentos estão contidos os requisitos e critérios que necessitam ser atendidos pelos elementos e componentes do sistema de LSF, assim como, algumas especificações destes componentes.

De acordo com Armancio e Fabricio (2015), as diretrizes e as avaliações técnicas do SiNAT são elaboradas com base no conceito de desempenho da norma brasileira de desempenho, a NBR 15575 (ABNT, 2013).

A principal característica do LSF é a sua estrutura constituída de perfis de aço galvanizado formados a frio, que são utilizados para a composição de painéis estruturais e não estruturais, vigas, tesouras de telhado e demais componentes. Devido à industrialização deste sistema, é possível uma construção a seco (permite a minimização do uso de água na montagem do sistema) com grande rapidez de execução (RODRIGUES, 2006).

Campos (2014) destaca algumas vantagens ambientais do sistema LSF, entre elas:

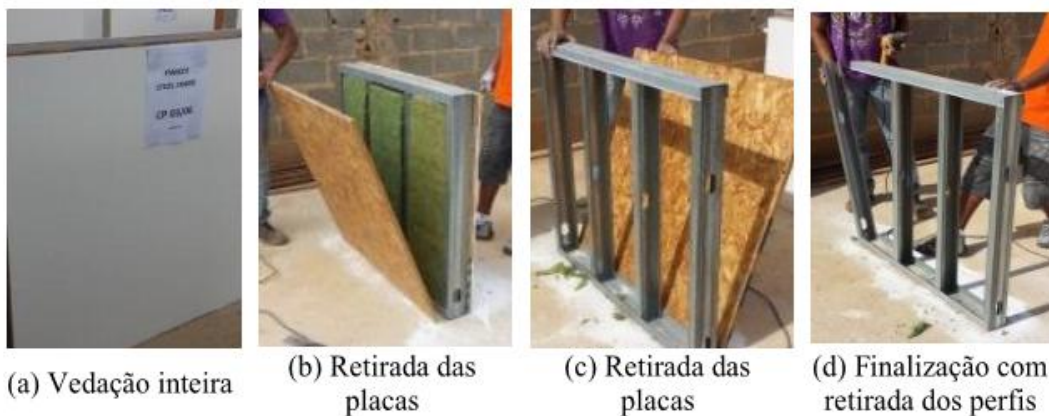
- Pelo fato de ser um sistema industrializado, a quantidade de resíduos gerados em uma obra de LSF é menor que em uma obra convencional em alvenaria;
- Os principais materiais utilizados neste sistema, aço, *oriented strand board* (OSB) e gesso, podem ser reciclados. O aço é um material com potencial de reciclagem de aproximadamente 70%, o que pode ser feito diversas vezes, mantendo sempre suas características. O OSB, por ser formada por ripas de madeira, pode se tornar fertilizante orgânico, serragem, lenha e até mobiliário, no entanto, em relação à queima deve ser avaliado o impacto da resina utilizada na fabricação das chapas.
- O gesso pode ser processado e transformado em pó de gesso (sulfato de cálcio) e empregado como fertilizante para agricultura ou retornar para o setor da construção civil por meio da utilização na fabricação de cimento. Deve-se ressaltar que deve ser avaliado o impacto dos materiais reciclados na qualidade dos produtos finais.
- O processo de desconstrução e remontagem em outra localidade é uma realidade, pois como seus encaixes são feitos por parafusos, é possível transportar seus

componentes e reutiliza-los sem perdas expressivas dos materiais utilizados. Caso não seja possível reutilizá-los podem ser reciclados;

- Por ser um sistema construtivo a seco, há uma drástica redução no consumo de água e permite a montagem de edificações em regiões com escassez deste recurso;






Pedroso (2015) avaliou o potencial de desconstrução do sistema de LSF e a partir da figura 3.1 é possível observar que o aço e as chapas de OSB, classificados como resíduos classe B podem ser reaproveitados, pois após o processo de desconstrução da vedação, eles não são danificados e dificilmente sofrerão degradação pois ficam protegidos dos agentes ambientais pelos acabamentos externo e interno.

Figura 3.1– Desconstrução do LSF. Experimento para 1m² de fachada. (PEDROSO, 2015).



O LSF é composto por vários componentes, como isolantes térmicos e acústicos, de fechamento interno e externo, instalações elétricas e hidráulicas. Para que o sistema como um todo cumpra os requisitos de desempenho e funções para o qual foi projetado, é necessário que os componentes sejam compatíveis entre si. Na tabela 3.1 são apresentadas algumas características dos principais componentes do LSF.

Tabela 3.1 – Resumo dos componentes do LSF. (Elaborado pelo autor a partir de FREITAS; CASTRO, 2006, CARMINATTI JÚNIOR, 2012; PALÁCIO, 2013; CAMPOS, 2014; TAMAKI, 2015).

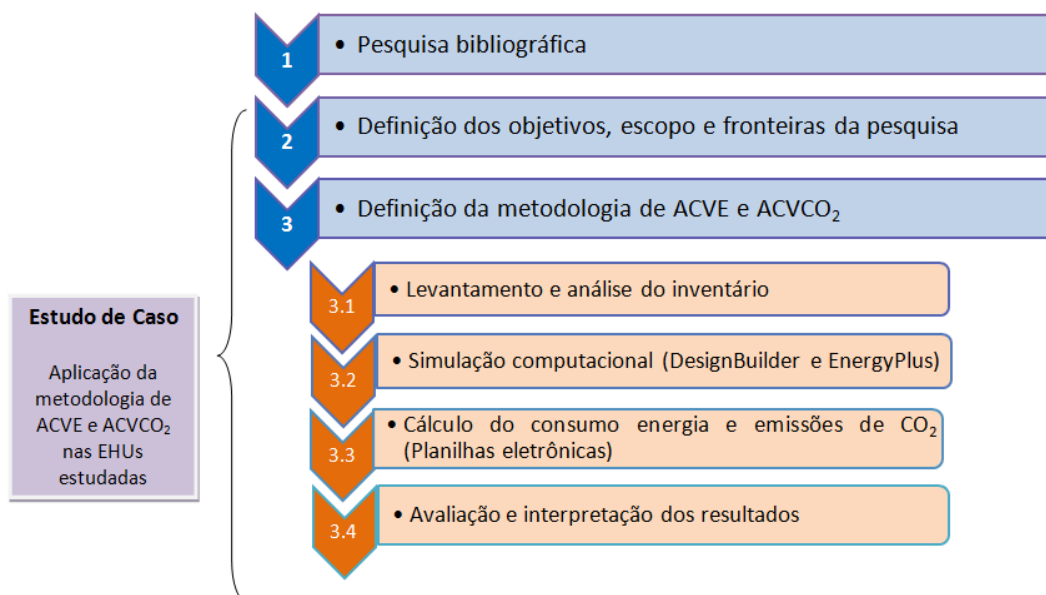
Componentes LSF	Descrição	Ilustração
Perfis de Aço	Para o caso do LSF, o aço de interesse são os perfis formados a frio (PFF). Os perfis estruturais, como vigas em I, H, U, e T e cantoneiras são produzidos em laminadores. As espessuras mais usuais são 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm, considerando o revestimento mínimo de zinco de 180 g/ m ² . Existem dois tipos principais, as guias e os montantes.	 <p>Sistema de perfis de aço Fonte: Campos (2014)</p> <p>Guias e montantes Fonte: Acervo do autor (2015)</p>
OSB	As chapas de OSB são formadas por partículas de madeira orientadas e prensadas, e no LSF são instaladas entre o perfil de aço e o revestimento. O OSB é utilizado como reforço da parede, que pode ser no perímetro externo e, internamente, nas paredes que vão receber cargas diferenciadas.	 <p>Chapa de OSB instalada Fonte: Palácio (2013)</p> <p>Fechamento em OSB Fonte: LP Brasil (2015)</p>
Fechamento Externo	Para o fechamento externo, há placas cimentícias, placas de fibrocimento, e siding, que pode ser vinílico (PVC), de madeira ou cimentício. A característica comum a todos é a rápida instalação, além da resistência à ação dos ventos, água e umidade. A placa cimentícia é bastante utilizada, composta de cimento, fibras de celulose e agregados, reforçada com tela de fibra de vidro em ambas as faces.	 <p>Execução fechamento externo Fonte: Tamaki (2015)</p>
Placa de Gesso Acartonado	O fechamento interno é constituído por chapas de gesso acartonado. As placas têm dimensões de acordo com o fabricante, e espessuras que variam de 6,5 mm, 9,5 mm, 12,5 mm e 15 mm.	 <p>Instalação placa de gesso Fonte: Tamaki (2015)</p>
Isolantes Térmicos e Acústicos	O isolamento térmico e acústico no LSF é o de multicamada: os espaços entre as placas são preenchidos por mantas isolantes. A mais adotada é a lã de vidro, normalmente com 50 mm. A lã de rocha normalmente tem custo superior, no entanto, apresenta maiores valores de resistência térmica e acústica. Também existem no mercado materiais como lã de PET, EPS, poliuretano, entre outros.	 <p>Instalação Lã de PET Fonte: Tamaki (2015)</p> <p>Lã de rocha Fonte: Campos (2014)</p>

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

A metodologia utilizada na presente dissertação foi dividida em três etapas principais, conforme é apresentado na figura 4.1.

Figura 4.1– Etapas da metodologia utilizada na pesquisa.



4.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica envolveu o levantamento de dissertações, teses, artigos de congressos, periódicos (nacionais e internacionais), como também boletins e fichas técnicas de materiais e componentes, páginas eletrônicas e entidades ligadas à área de estudo. Parte essencial do conteúdo pesquisado está apresentado nos itens 2 e 3 desta dissertação. Os dados e informações coletadas na pesquisa bibliográfica foram reunidos e analisados, sendo essenciais para a fundamentação dos métodos utilizados e as formas de apresentação e discussão dos resultados.

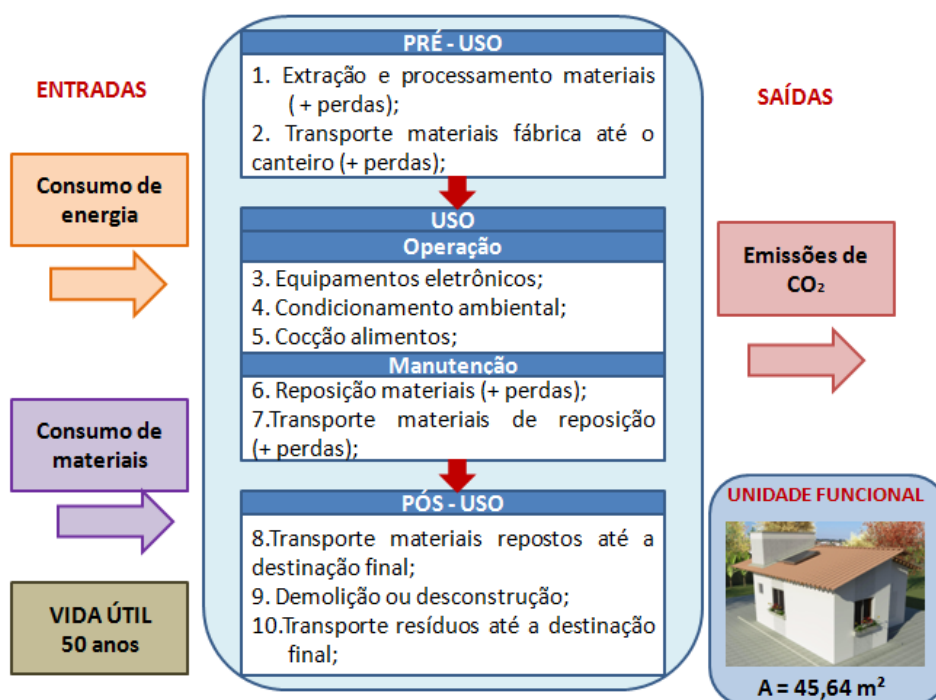
4.3 OBJETIVOS, ESCOPO E FRONTEIRAS DA PESQUISA

O escopo e as fronteiras da pesquisa foram definidos com o objetivo de preencher algumas das lacunas existentes nos trabalhos de Nabut Neto (2011), Palácio (2013) e Pedroso (2015) e ao mesmo tempo se adequando ao prazo e recursos disponíveis para a sua execução. Como o trabalho trata da realização de uma ACVE e de uma ACVCO₂, ele foi embasado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e na NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), sendo

que a primeira trata dos princípios e da estrutura de ACV e a segunda dos requisitos e orientações para sua realização.

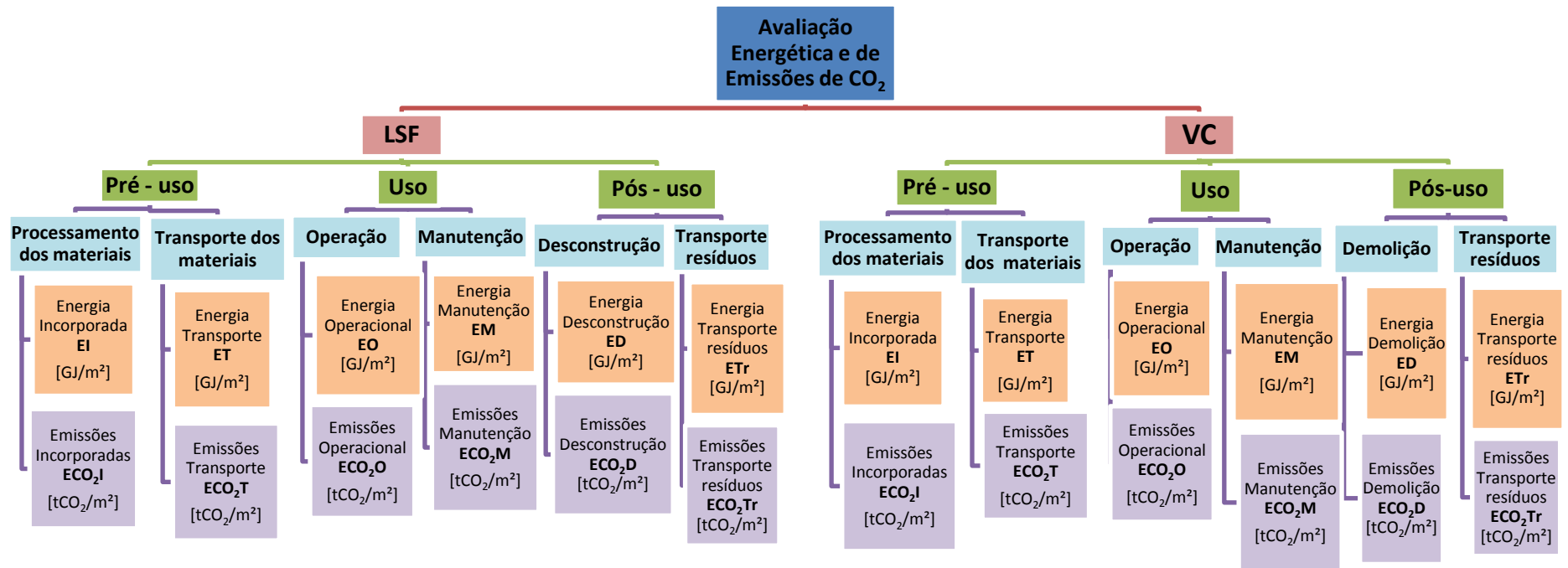
Foi adotada neste trabalho a vida útil da EHU de 50 anos pelo fato de ser a vida útil mínima para edificações habitacionais apresentada na ABNT NBR 15575-1:2013. Outra justificativa, foi o fato de no estudo realizado por Cabeza *et al.* (2014), ter sido observado que 50% dos estudos na área de ACV/ACVE/ACVCO₂ relacionadas às edificações, foi considerado o tempo de vida útil de 50 anos e desta forma, os resultados encontrados no presente trabalho poderão ser comparados com outros estudos nacionais e internacionais. Na figura 4.2 são apresentados o escopo, as etapas do ciclo de vida da edificação e as fronteiras da pesquisa.

Figura 4.2– Escopo, etapas da edificação e fronteiras da pesquisa.



No presente trabalho são considerados duas variáveis, referentes ao consumo de energia e as emissões de CO₂, de acordo com as etapas do ciclo de vida da EHU, conforme é apresentado na figura 4.3.

Figura 4.3 – Variáveis consideradas neste estudo



4.3.1 EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR MODELO

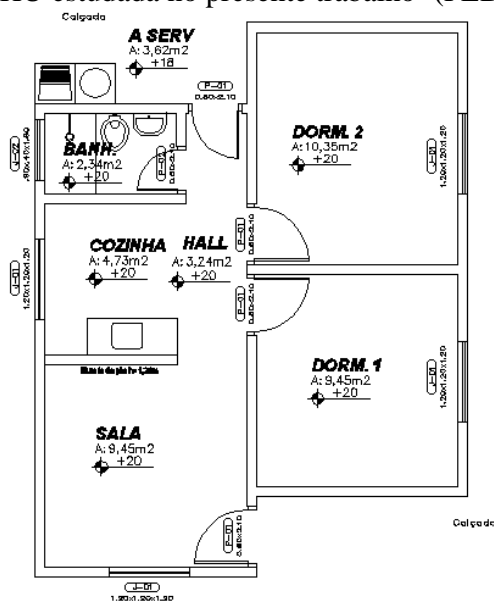
4.3.1.1 Caracterização da Edificação Habitacional Unifamiliar

A EHU estudada está localizada em Brasília – DF, com área de piso bruta de 45,64 m². Ela possui dois dormitórios, uma sala, uma cozinha, um banheiro e uma área de serviço na parte exterior. Possui duas portas exteriores, três portas internas e cinco janelas. Foi considerado contrapiso de argamassa e revestimento de porcelanato, instalações de PVC, portas internas de madeira, portas externas e janelas de aço, cobertura com estrutura de madeira, forro de PVC e telhas cerâmicas.

Foram considerados quatro usuários na EHU (dois adultos e duas crianças). Os outros projetos utilizados, obtidos de Pedrosa (2015), estão apresentados nos Anexos B, C e D.

Foram avaliados dois sistemas construtivos utilizados nas vedações verticais: a vedação convencional com blocos cerâmicos e pilares e vigas de concreto armado e o *light steel framing* (LSF). Na figura 4.4 é apresentada a planta baixa da EHU estudada no presente trabalho.

Figura 4.4 – EHU estudada no presente trabalho⁷ (PEDROSO, 2015).



⁷ Esta é uma habitação modelo da Caixa Econômica Federal, que vem sendo utilizada em vários outros trabalhos do programa de pós-graduação onde esta dissertação se insere.

Para a comparação dos sistemas construtivos foi considerado a diferença somente das vedações verticais externas e vedações verticais internas. Na tabela 4.1 são apresentadas as características das vedações externas e internas avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 4.1 – Especificação das vedações verticais externas e internas de LSF e VC.

Sistemas de vedação	Vedação interna	Vedação externa	Transmitância térmica (W/m ² .K)	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)
VC	Blocos cerâmicos de vedação (9x19x19 cm), com juntas de argamassa de assentamento (10 mm), chapisco (5 mm) e massa única (10 mm) nas faces externas e internas.	Pilares de concreto armado (14 x 30 cm), blocos cerâmicos de vedação (9x19x19cm), com juntas de argamassa de assentamento (10 mm), chapisco (5 mm) e massa única (20 mm) nas faces externas e internas	2,49	158
LSF	Sistema <i>drywall</i> - 2 guias (92 x 38 mm), 4 montantes (90 x 40 x 12 mm), 2 placas de gesso na parte interna e externa (12,5 mm cada).	2 guias (92 x 38 mm), 4 montantes (90 x 40 x 12 mm), 1 placas cimentícia na parte externa (10 mm), 1 placa de gesso acartonado na parte interna (12,5 mm) e 2 chapas de OSB (18,3 mm cada) como elemento de contraventamento e lã de rocha (50 mm)	0,66	133

Para a especificação de ambos os sistemas foram adotados dois critérios:

- Atendimento dos critérios mínimos de desempenho térmico exigidos na NBR 15575-4 (ABNT, 2013): transmitância térmica menor que 2,5 W/m².K, capacidade térmica maior que 130 kJ/m².K e absorvância (α) menor que 0,6, já que foi adotada a pintura da EHU em cor branca;
- Ser uma especificação capaz de ser realizada na prática de mercado.

Os desenhos esquemáticos das vedações verticais (externas e internas) estão apresentados nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Figura 4.5– (A) Sistema de vedação vertical externa convencional. (B) Sistema de vedação vertical externa de *light steel framing*. (Elaborado pelo autor, 2015).

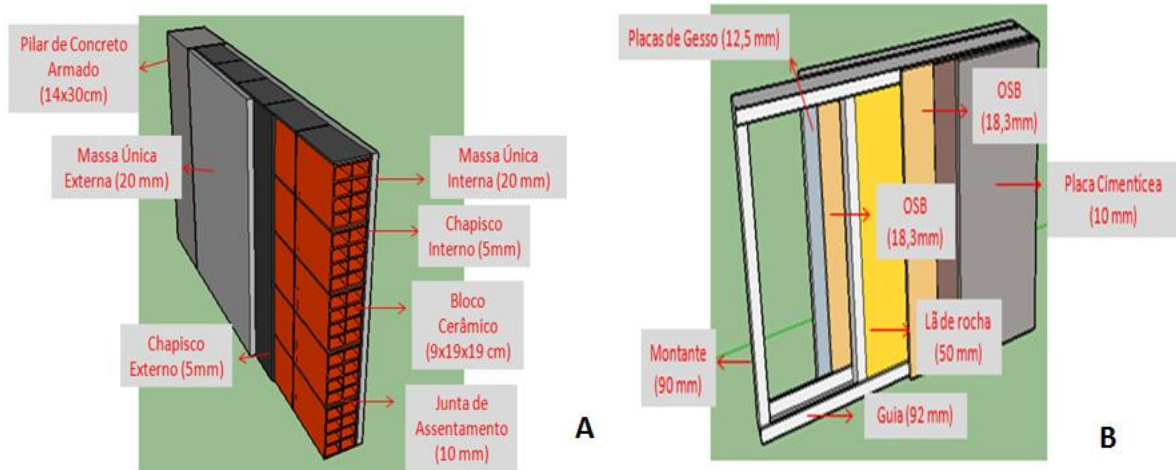
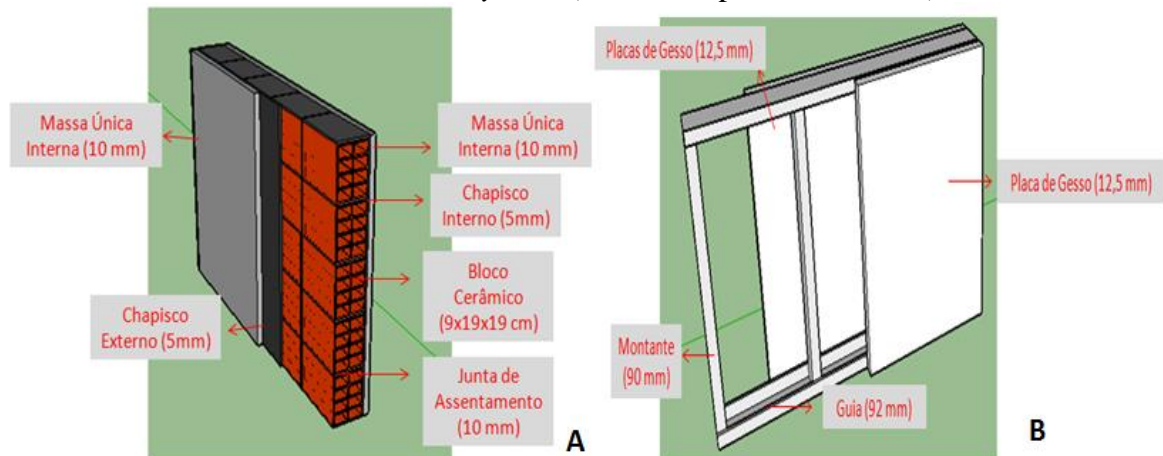


Figura 4.6 – (A) Sistema de vedação vertical interna convencional. (B) Sistema de vedação vertical interna de *drywall*. (Elaborado pelo autor, 2015).

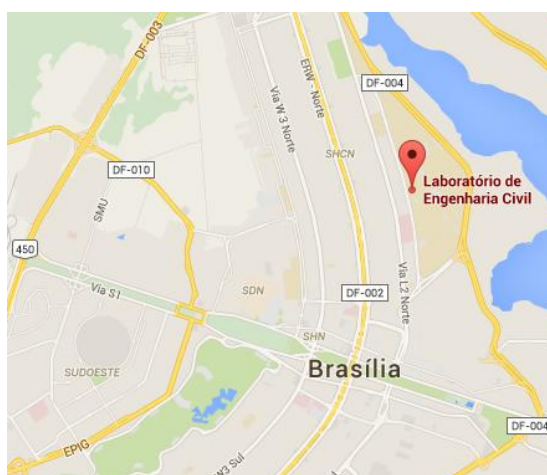


Em relação aos outros sistemas da EHU, referentes à cobertura, ao contrapiso, à pintura e às instalações, estes foram considerados os mesmos para ambos os sistemas.

4.3.1.2 Localização e Orientação Solar

Foi adotado como localização da obra o Laboratório de Engenharia Civil do Prédio SG 12, onde está situado o Programa de Pós-Graduação de Estruturas e Construção Civil (PECC), que está situado na Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, nas coordenadas geográficas de latitude: $-15,45^\circ$ e longitude: $-47,95^\circ$. O mapa com a localização da EHU (situada no marcador “Laboratório de Engenharia Civil”) se encontra na figura 4.7.

Figura 4.7 – Localização da EHU. (*Google Maps*, 2015).



A justificativa para a escolha desta localização foi o fato dela já ter sido adotada em outras pesquisas, como a de Nabut Neto (2011) e Caldas *et al.* (2015b).

Com relação à orientação solar, foram realizados diversos testes, por meio de simulações computacionais, com diferentes orientações. Ao final, foi definida a orientação cujas aberturas dos dormitórios ficassem voltadas para Norte, para retratar a pior condição climática da localidade.

4.3.1.3 Zona Bioclimática

Como apresentado anteriormente, Brasília está localizada na Zona Bioclimática 04. A ABNT NBR 15220-3:2005 e Lamberts *et al.* (2012) apresentam algumas recomendações de projeto para as edificações localizadas na zona bioclimática 4: a) aberturas médias; b) sombreamento nas aberturas durante toda a época do ano; c) paredes pesadas (com grande inércia e capacidade térmica) e d) cobertura leve com isolamento térmico.

Considerando-se que para a vedação vertical nesta zona é recomendado o uso de paredes pesadas, prevê-se de antemão, que o sistema de VC apresentará melhor desempenho térmico que o sistema de LSF devido ao seu maior valor de capacidade térmica. Surge assim o questionamento, por que estudar um sistema leve, como o LSF, sabendo que ele não é o mais indicado para a cidade de Brasília?

O primeiro motivo pela escolha do LSF foi o fato dele ser industrializado e com crescente uso na região. O segundo motivo foi saber o quanto esta desvantagem no seu desempenho

térmico influenciará no consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de uma EHU para a realidade de Brasília.

4.3.1.4 Desempenho Térmico

Neste trabalho foi empregado somente o procedimento 1, denominado de simplificado ou normativo⁸. Foi verificado o atendimento aos requisitos e critérios para o sistema de vedação, de acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e a simulação computacional termoenergética.

O requisito que foi avaliado é denominado de “Adequação as paredes externas”. Os valores de U e Ct foram encontrados de acordo com o procedimento de cálculo descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2008) e estão apresentados na Tabela 4.1, apresentados anteriormente.

Na NBR 15575-1 (ABNT, 2013) é recomendado que em caso de desempenho térmico insatisfatório dos requisitos e critérios definidos na NBR 15575-4 (ABNT, 2013), há a necessidade de avaliação do desempenho térmico da edificação pelo método da simulação computacional. Embora os valores já tenham sido estabelecidos como os mínimos, e, portanto, atendendo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), optou-se pelo emprego da simulação computacional, pois desta forma é possível realizar a avaliação do desempenho térmico da edificação como um todo, o que refletirá no consumo de energia e emissões de CO₂ da etapa operacional, ao longo do ciclo de vida da edificação.

Foram seguidos os requisitos, critérios e métodos descritos na NBR 15575-1 (ABNT, 2013), considerando para a cidade de Brasília a temperatura máxima diária de 31,2 °C para o dia típico de verão e a temperatura mínima diária de 10,0 °C para o dia típico de inverno.

Para a simulação computacional foi utilizado o software DesignBuilder. Foram analisadas as temperaturas do ar (*Air Temperature*) para o interior da edificação e a temperatura externa do bulbo seco (*Outside Dry-Bulb Temperature*). Foram avaliadas as temperaturas horárias para um dia típico de verão e inverno para os ambientes de longa permanência (sala, dormitório 1 e dormitório 2).

⁸ Segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) o procedimento 1, também chamado de simplificado ou normativo é atendido quando é calculado os valores de transmitância (U) e capacidade térmica (Ct) estão de acordo com a ABNT NBR 15575-4 e 15575-5. Caso os valores de U e Ct não sejam atendidos deve ser realizada a simulação computacional. O procedimento 2 é realizado por meio de medições em edificações ou protótipos.

4.3.2 UNIDADE FUNCIONAL

A unidade funcional (UF) adotada neste estudo foi a unidade de área (m²). Os valores de consumo de energia (GJ) e emissões de CO₂ (em toneladas - t), de cada etapa, foram divididos pela área da edificação de 45,64 m². Foi escolhido esta UF para possibilitar a comparação dos resultados obtidos com outros estudos, como o de Tavares (2006), Carminatti Júnior (2012), Costa (2012), Paulsen e Sposto (2013) e Caldas *et al.* (2015b).

Silva e Silva (2015) ressaltam que a normalização por área, desde que descritas às características da edificação (tipologia, sistema construtivo, número de pavimentos e etc.), elimina a necessidade de avaliação dos projetos arquitetônicos para cada edificação, facilitando a orientação de políticas e disponibilização de dados governamentais.

4.4 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE ACVE E ACVCO₂ ADOTADA

4.4.1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Embora os estudos de ACV, ACVE e ACVCO₂ podem ser feitos tomando bases de dados já consolidadas, como a do *Ecoinvent, European reference Life Cycle Database (ELCD), GaBi Databases*, entre outras, neste trabalho foram considerados dados da literatura internacional e principalmente nacional, justificando que os últimos são mais voltados para a realidade brasileira. Em relação às metodologias de estruturação, podem ser citadas a do ILCD (IBICT, 2015), que pode ser utilizada para ACV, ACVE e ACVCO₂ e a do Programa de Conservação de Energia em Sistemas de Edificações e Comunidades (EBC) da Agência Internacional de Energia (IEA), que implementou o Anexo 57 (SILVA; SILVA, 2015) para ACVE e ACVCO₂.

Por esta dissertação se tratar de um estudo de caso, específico para a cidade de Brasília, o ideal seria utilizar dados primários levantados para as indústrias consideradas, no entanto, devido ao cronograma, recursos disponíveis e a dificuldade de acesso às informações das indústrias não foi possível levantar estes dados. Foram adotados dados do inventário com intervalos de valores mínimo, médio e máximo, dos valores disponíveis na literatura.

É importante ressaltar alguns dados primários levantados para a realidade de Brasília, que foram o consumo de energia para a produção de blocos cerâmicos, apresentado por Sposto (2004) e o consumo de energia para a desconstrução de vedações de LSF e demolição das vedações de VC, apresentadas por Pedroso (2015).

Silva (2005) ressalta a importância da delimitação das fronteiras temporais, geográficas e tecnológica dos dados. Cabe destacar que na presente dissertação não foram consideradas as fronteiras tecnológicas, somente as fronteiras temporais, com dados dos últimos vinte anos e as fronteiras geográficas com estudos publicados para a realidade brasileira e internacional, variando para cada material e componente.

Os dados dos inventários foram organizados pelas etapas do ciclo de vida da EHU (pré-uso, uso e pós-uso) e serão apresentados de forma detalhada nos próximos itens.

4.4.2 ETAPA DE PRÉ-USO

Foram consideradas as etapas de extração e processamento dos materiais (EI e ECO₂I) e transporte dos materiais da fábrica até o canteiro de obras (ET e ECO₂T).

4.4.2.1 Extração e Processamento dos Materiais

Primeiramente foram levantadas as quantidades dos principais materiais e componentes constituintes da habitação e estes foram convertidos em massa, para a posterior quantificação da extração e processamento dos materiais e emissões de CO₂. Foram considerados apenas aqueles que apresentaram percentuais em massa ou de energia da habitação superior a 5%.

Para o levantamento dos materiais e componentes, foram consultadas as composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), devido ao fato do projeto estudado ser padrão da Caixa Econômica Federal^{9*}.

No entanto, para alguns subsistemas como cobertura, telhado e etc., que não possuem composição no SINAPI, foram adotadas as composições da Tabela de Composições de Preços para Orçamentos - TCPO (2012). Para o LSF (vedações externas) foram utilizadas as orientações descritas na Diretriz Técnica do SINAT n° 003 (2012), enquanto para o *drywall* (vedações internas) foi utilizada a composição da TCPO (2012).

Os fatores de energia (FE) e emissões (FCO₂) adotados para o cálculo da EI e ECO₂I foram retirados da literatura nacional e internacional. Este método empregado é denominado de

⁹ De acordo com o decreto n° 7893 (BRASIL, 2013), os orçamentos de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União devem fazer uso das composições do SINAPI.

análise híbrida, em que são listados os insumos considerados em cada etapa de estudo de caso e os fatores utilizados são apresentados com as fontes consultadas.

De acordo com Pedroso (2015), autores como Langston e Langston (2008), Crowford e Treolar (2005) e Alcoirn e Baird (1996) concluíram que o método de análise híbrida pode ser utilizado para a avaliação do ciclo de vida das edificações, quando não é possível levantar dados na fonte. Atmaca e Atmaca (2015) também defendem a utilização da análise híbrida, visto que é um método que pode ser considerado confiável e de relativa facilidade de obtenção dos dados.

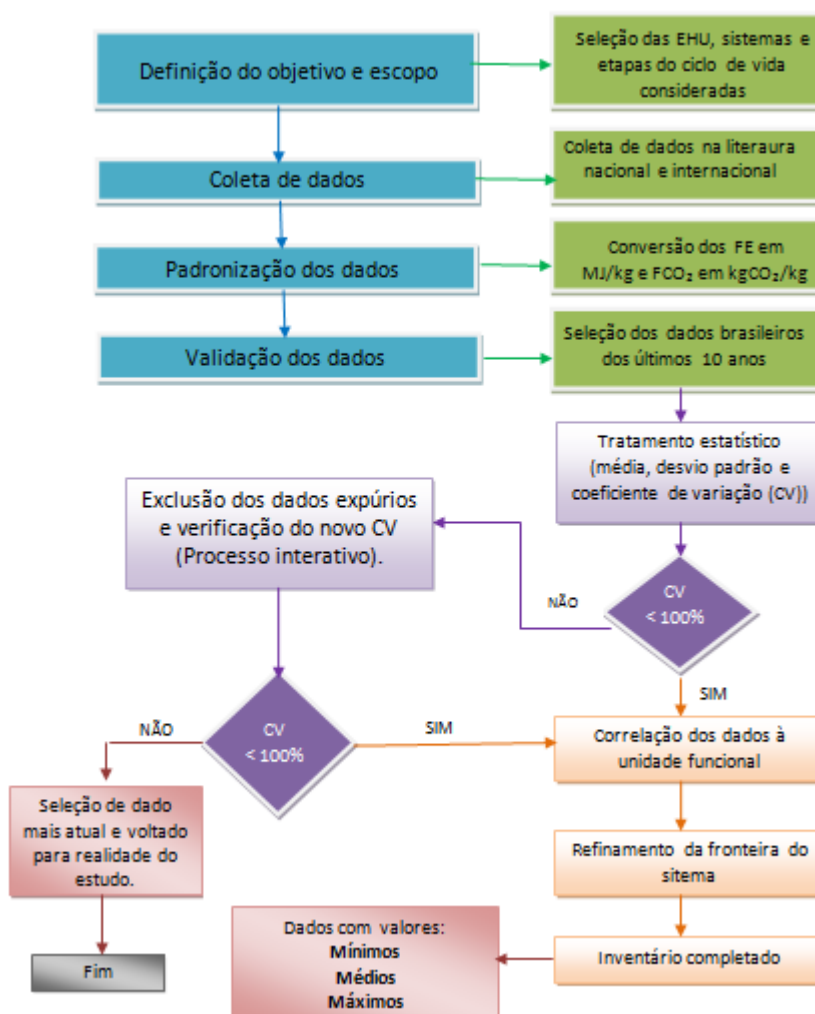
Outra justificativa para a utilização do método de análise híbrida é o fato dele já ter sido utilizado nas pesquisas anteriores realizadas no programa da UnB, como o de Nabut Neto (2011), Gouveia (2012), Maciel (2013), Palácio (2013) e Pedroso (2015). Outros estudos nacionais como o de Tavares (2006), Graf (2011), Carminatti Júnior (2012), Pereira (2014) e Oliveira (2015) também optaram pelo emprego deste método.

Na figura 4.8 é apresentado o procedimento adotado para a escolha dos dados do inventário utilizados nesta dissertação. Primeiramente foram levantados dados nacionais e internacionais dos fatores de energia (FE) e emissões de CO₂ (FCO₂), na literatura, apresentados nos Apêndices A e B. Posteriormente buscou-se utilizar dados nacionais, retirados de dissertações, teses, artigos e estudos setoriais dos últimos 10 anos. No entanto, para alguns materiais/componentes estes dados não foram encontrados ou após a análise estatística verificou que o coeficiente de variação (CV) estava superior a 100%, e desta forma, os dados espúrios (muito distantes da média) foram descartados. Optou-se por fixar o CV, como critério de validação dos dados, para evitar dados excessivamente dispersos, o que geraria resultados muito discrepantes.

A exclusão foi feita baseado na dispersão de valores, por meio de um processo iterativo, em que a partir da exclusão dos dados, era analisado o novo CV, até atingir um valor inferior a 100%. A sequência de exclusão deu-se pelos dados mais antigos, sempre priorizando dados mais recentes. Ao final chegou-se a dados para materiais e componentes com valores mínimos, médios e máximos, sendo que alguns materiais/componentes foram adotados somente um valor, que foi o caso da madeira (seca ao ar livre), argamassa de revestimento e assentamento, argamassa colante e piso cerâmico (apenas FE). Com o

refinamento da fronteira, chegaram-se a dados nacionais e internacionais dos últimos 20 anos.

Figura 4.8 – Fluxograma para análise do inventário (Elaborado pelo autor com base na ABNT NBR ISO 14044:2009, 2015)



Optou-se por realizar a análise de dados de valores mínimos, médios e máximos, semelhante à realizada por Campos (2012) e Garcia (2014).

Para o sistema convencional foram adotados fatores oriundos da literatura nacional, originados de dissertações, teses e artigos. A justificativa para esta escolha está na maior facilidade de obtenção de dados de materiais convencionais empregados no setor da construção civil brasileira, como blocos cerâmicos e cimento, por exemplo.

Para as tintas, PVC e sistema LSF foram adotados fatores provenientes da literatura nacional e internacional, tendo em vista a maior dificuldade de se encontrar dados somente nacionais. Somente para o aço foram utilizados dados nacionais.

Nas tabelas 4.2 e 4.3 são apresentados os valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), fronteiras geográficas e temporais dos dados utilizados, para o FE e FCO₂, respectivamente. Por fim, na tabela 4.4 são apresentados os fatores FE e FCO₂ (mínimos, médios e máximos) adotados nos cálculos e as perdas dos materiais e componentes utilizados na EHU.

Tabela 4.2 – Especificação dos fatores de energia utilizados no inventário.

Fatores de Energia (FE)					
Materiais e componentes	Média	Desvio Padrão	CV	Fronteira geográfica	Fronteira temporal
Aço	20,14	13,95	69,3%	Nacional	2006-2015
Areia	0,05	0,02	51,6%	Nacional	2006-2015
Argamassa	2,10	0,00	0,0%	Nacional	2006-2011
Argamassa colante	1,01	-	-	Nacional	2015
Blocos cerâmicos	3,11	0,72	23,3%	Nacional	2006-2015
Chapa cimentícia	2,85	1,76	61,7%	Nacional e Internacional	2006-2015
Chapa de Gesso	4,04	0,71	17,5%	Nacional e Internacional	1996-2011
Cimento	3,07	0,79	25,60%	Nacional	2006-2015
Concreto	0,81	0,55	68,4%	Nacional	2006-2015
Lã de rocha	21,60	6,78	31,4%	Nacional e Internacional	2011-2015
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	0,50	-	-	Nacional	2006
Madeira MDF	13,36	3,80	28,5%	Nacional	2011-2015
Painéis de OSB	6,00	3,33	55,5%	Nacional e Internacional	1996-2006
Piso cerâmico	13,00	-	-	Nacional	2006
PVC	79,97	15,49	19,4%	Nacional e Internacional	1996-2006
Telhas Cerâmicas	3,50	2,69	77,1%	Nacional	2006-2015
Tinta	80,26	7,29	9,08%	Nacional e Internacional	1996-2006

Tabela 4.3 – Especificação dos fatores de emissões utilizados no inventário.

Fatores de Emissões (FCO ₂)					
Materiais e componentes	Média	Desvio Padrão	CV	Fronteira geográfica	Fronteira temporal
Aço	1,61	0,27	16,7%	Nacional	2007-2015
Areia	0,01	0,00	43,1%	Nacional	2007-2015
Argamassa	0,16	0,00	1,3%	Nacional	2011-2012
Argamassa colante	1,01	-	-	Nacional	2015
Blocos cerâmicos	0,40	0,29	72,9%	Nacional	2007-2015
Chapa Cimentícia	0,20	0,04	20,1%	Nacional e Internacional	2011-2013
Chapa de Gesso	0,45	0,03	6,3%	Nacional e Internacional	2012
Cimento	0,63	0,18	28,3%	Nacional	2007-2015
Concreto	0,14	0,03	24,2%	Nacional	2012-2015
Lã de rocha	1,10	0,41	37,6%	Nacional e Internacional	2011-2012
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	0,04	-	-	Nacional	2015
Madeira MDF	0,53	0,32	61,4%	Nacional	2012-2015
Painéis de OSB	0,48	0,20	40,7%	Nacional e Internacional	2011-2012
Piso Cerâmico	0,45	0,15	33,9%	Nacional	2012
PVC	0,45	0,15	33,9%	Nacional	2012
Telhas Cerâmicas	0,77	0,20	25,6%	Nacional	2012-2015
Tinta	1,27	0,52	41,20%	Nacional e Internacional	2012-2015

Tabela 4.4 – Dados para o cálculo da EI e ECO₂I para os sistemas de vedação convencional e de *light steel framing*.

Dados	Quantidade (kg/m ²)	Perdas ¹	Valores FE (MJ/kg)			Valores FCO ₂ (kgCO ₂ /kg)		
			Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Sistema de Vedação Vertical VC								
Bloco cerâmico de vedação	165,0	26%	2,52	3,11	3,92	0,17	0,40	0,91
Argamassa ³ (revestimento e assentamento)	375,0	20%	2,10	2,10	2,10	0,16	0,16	0,16
Concreto ² (estrutura)	138,3	15%	0,42	0,81	1,20	0,10	0,14	0,16
Madeira (formas - estrutura) ²	28,3	15%	9,00	13,4	16,00	0,32	0,53	0,86
Aço ² (estrutura)	10,9	10%	10,27	20,14	30,00	1,45	1,61	1,83
Sistema de Vedação Vertical LSF								
Aço (Guias e Montantes)	14,95	10%	10,27	20,14	30,00	1,45	1,61	1,83
Painéis de OSB	71,24	15%	2,50	6,00	10,80	0,34	0,48	0,62
Chapa de Gesso	49,06	9%	2,90	4,04	4,50	0,43	0,45	0,47
Chapa Cimentícia	44,39	9%	1,90	2,85	6,00	0,16	0,20	0,24
Lã de Rocha	9,03	0%	16,80	21,60	26,39	0,69	0,10	1,51

Dados	Quantidade (kg/m ²)	Perdas ¹	Valores FE (MJ/kg)			Valores FCO ₂ (kgCO ₂ /kg)		
			Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Outros Sistemas da Edificação								
Tinta (pintura)	4,9	15%	74,67	80,26	88,50	0,90	1,27	1,64
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	3,6	1%	60,70	79,97	106,00	0,34	0,45	0,55
Telhas Cerâmicas (cobertura)	67,1	10%	1,59	3,50	5,40	0,63	0,77	0,91
Madeira (cobertura)	17,2	4%	0,50	0,50	0,50	0,04	0,04	0,04
PVC (forro - cobertura)	2,4	1%	60,70	79,97	106,00	0,34	0,45	0,55
Cimento (piso)	14,2	20%	2,47	3,07	4,20	0,37	0,65	0,97
Areia (piso)	69,2	20%	0,03	0,05	0,08	0,007	0,010	0,014
Argamassa colante ³ (piso)	8,6	20%	0,99	0,99	0,99	1,01	1,01	1,01
Revestimento Cerâmico ³ (piso)	11,0	2%	13,00	13,00	13,00	0,86	0,88	0,91
Aço (esquadrias externas)	14,4	2%	10,27	20,14	30,00	1,45	1,61	1,83
Madeira (esquadrias internas)	8,5	1%	9,00	13,4	16,00	0,32	0,53	0,86

¹ Os valores de perda dos componentes argamassa e blocos cerâmicos foram retirados da TCPO (2012). Para os outros componentes dos outros sistemas da EHU foram adotado os valores de Agopyan *et al.* (1998), de forma similar aos estudos de Bessa (2010), Caldas *et al.* (2015b) e Pedroso (2015).

² Foram contabilizadas vigas baldrame para o sistema convencional, visto que é um estrutura reticulada, diferente do LSF que é estrutural e trabalha com carga distribuída. Foi adotada a fundação do tipo radier para ambos os sistemas.

³ Não foram considerados os valores mínimo, médio e máximo.

De posse dos valores de FE e FCO₂ foram calculadas a EI e ECO₂I. Para o cálculo da EI e ECO₂I foram utilizadas as equações 4.1 e 4.2. Os cálculos, para os valores médios, são apresentados no Apêndice D.

$$EI = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times FE_i \times (1 + \frac{P_i}{100})}{A \times 1000} \quad (4.1)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;

n- número de materiais;

m – massa do material utilizado na EHU (kg);

FE – fator de energia do material (MJ/kg);

P – perdas do material (%);

A – área da EHU (m²);

EI – energia extração e processamento dos materiais (GJ/m²).

$$ECO_2I = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x FCO_{2i} x (1 + \frac{P_i}{100})}{Ax1000} \quad (4.2)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;

n- número de materiais;

m – massa do material utilizado na EHU (kg);

FCO₂ – fator de energia do material (kgCO₂/kg);

P – perdas do material (%);

A – área da EHU (m²);

ECO₂I – emissões de CO₂ extração e processamento dos materiais (tCO₂/m²).

4.4.2.2 Transporte dos Materiais da Fábrica até o Canteiro de Obras

Para o cálculo do consumo de energia (ET) e emissões de CO₂ (ECO₂T) da etapa de transporte foram utilizadas as equações 4.3 e 4.4, respectivamente.

Quanto ao consumo médio de diesel utilizado no transporte dos materiais, foi utilizado o valor de 0,0137 L/t.km, apresentado por Nabut Neto (2011), considerando caminhões cheios na trajetória de ida (fábrica à localização do canteiro de obras) e vazios na trajetória de volta (canteiro à fábrica). Sabendo que 1L de óleo diesel equivale a 35,50 MJ (BEN, 2015) e 2,63 kg CO₂ (IPCC, 2006), foram encontrados os coeficientes 0,49 e 0,04.

$$ET = \frac{\sum_{i=1}^n 0,49 x D_i x m_i}{Ax1000} \quad (4.3)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;

n- número de materiais;

D – distância do material transportado da fábrica até o canteiro de obras (km);

m – massa de material transportado na ida ou volta (t);

A – área da EHU (m²);

ET – energia do transporte de materiais da fábrica até a obra (GJ/m²).

$$ECO_2T = \frac{\sum_{i=1}^n 0,04 x D_i x m_i}{Ax1000} \quad (4.4)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;

n- número de materiais;

D – distância do material transportado da fábrica até o canteiro de obras (km);

m – massa de material transportado na ida ou volta (t);

A – área da EHU (m²);

ECO₂T – emissões de CO₂ do transporte de materiais da fábrica até a obra (tCO₂/m²).

Neste trabalho foram consideradas somente as distâncias das fábricas de produção dos materiais até o canteiro de obras, onde a EHU está localizada. O critério de seleção das fábricas dos materiais e componentes utilizados na EHU foi realizado a partir do levantamento dos Programas Setoriais de Qualidade (PSQ), que estão inseridas no PBQP-H para os materiais e componentes que possuem PSQ, e consulta nas associações de empresas ou outras fontes para o restante.

Este critério foi utilizado tendo em vista a necessidade de limitar a quantidade de fábricas no país e valorizar empresas que estão aderidas no PSQ ou associações, como forma de selecionar materiais com desempenho, qualidade e que atendam as normas técnicas brasileiras.

Outra justificativa do critério adotado foi o fato dele também ser empregado na lista de requisito dos programas de certificações ambientais de edificações, como LEED, AQUA e Selo Caixa Azul (CARDOSO; PABLOS, 2014). Os dados referentes às fábricas selecionadas dos materiais e componentes foram tabulados em planilha eletrônica (Excel) e foram calculadas as distâncias por meio do *Google Maps*, em que se adotou a fábrica que possuía a menor distância em relação à localização da EHU.

É importante lembrar que os valores utilizados de FE e FCO₂ não foram obtidos nas fábricas escolhidas, o qual seria a situação ideal, levantar dados primários das fábricas onde os componentes e materiais foram produzidos. A utilização de dados com valores mínimos, médios e máximos, é uma forma de diminuir as incertezas, visto que não foi possível levantar estes dados no local. Seria interessante, que todas as fábricas que desejassem participar dos PSQs ou associações apresentassem relatórios com base na metodologia de ACV, indicando os potenciais impactos ambientais de seus produtos, torando os estudos de ACV, ACVE e ACVCO₂, mais simples, com dados reais e ao mesmo tempo incentivando a disseminação de materiais e componentes com a qualidade atestada no mercado.

Na tabela 4.5 estão apresentadas as cidades e as distancias consideradas para o cálculo do consumo de energia e emissões de CO₂ relacionadas à etapa de transporte dos materiais. Os mapas com as distancias dos materiais e componentes, retiradas do *Google Maps*, se encontram no Apêndice B. Os cálculos, para os valores médios, se encontram no Apêndice E.

Tabela 4.5 – Dados para o cálculo da ET e ECO₂T.

Materiais e componentes	Cidade da Fábrica (latitude, longitude)	Cidade do Canteiro de Obras (latitude, longitude)	Distância (km)
Sistema de Vedação Vertical VC			
Bloco cerâmico de vedação	Rondonópolis - MT (-16,53°, -54,75°)	Brasília - DF (-15,45°, -47,95°)	917
Argamassa (revestimento e assentamento)	Sobradinho - DF (-15,58°, -47,87°)		29,7
Concreto (estrutura)	Brasília - DF (-15,79°, -47,98°)		16,8
Madeira (formas - estrutura)	União da Vitória - PR (-26,23°, -51,09°)		1470
Aço (estrutura)	Ouro Branco - MG (-20,51°, -43,74°)		843
Sistema de Vedação Vertical LSF			
Aço (Guias e Montantes)	Brasília - DF (-15,81°, -47,96°)	Brasília - DF (-15,45°, -47,95°)	16,9
Painéis de OSB	Ponta Grossa - PR (-24,99°, -50,14°)		1298
Chapa de Gesso	Queimados - RJ (-22,74°, -43,56°)		1195
Chapa Cimentícia	Goiânia - GO (-16,51°, -49,25°)		213
Lã de Rocha	São Paulo -SP (-23,56°, -46,75°)		1014
Outros Sistemas da Edificação			
Tinta (pintura)	Aparecida de Goiania - GO (-16,79°, -49,25°)	Brasília - DF (-15,45°, -47,95°)	224
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	Anápolis - GO (-16,39°, -48,94°)		165
Telhas Cerâmicas (cobertura)	Mara Rosa - GO (-13,99°, -49,21°)		337
Madeira (cobertura)	Franca - SP (-20,54°, -47,41°)		687
PVC (forro - cobertura)	Aparecida de Goiânia - GO (-16,81°, -49,22°)		225
Cimento (piso)	Sobradinho - DF (-15,58°, -47,87°)		29,7
Areia (piso)	Ipameri - GO (-17,71°, -48,18°)		277
Argamassa colante (piso)	Sobradinho - DF (-15,58°, -47,87°)		29,7
Revestimento Cerâmico (piso)	Pará de Minas - MG (-19,88°, -44,63°)		740
Aço (esquadrias externas)	Goiânia - GO (-16,65°, -49,31°)		214
Madeira (esquadrias internas)	Goiânia - GO (-16,76°, -49,29°)		222

4.4.3 ETAPA OPERACIONAL

O consumo de energia (EO) e de emissões de CO₂ (ECO₂O) referentes à etapa operacional da EHU está relacionado à utilização da energia elétrica para o funcionamento dos aparelhos eletrônicos, condicionamento ambiental e cocção de alimentos. Neste trabalho foi realizada a seleção de equipamentos eletrônicos mais comuns em uma habitação de baixo padrão.

O critério de escolha da maioria dos equipamentos eletrônicos foi feito a partir do levantamento do percentual de participação, observado na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), realizada pelo instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2012 (IBGE, 2013). Foram escolhidos os equipamentos que apresentaram participação nas habitações do Distrito Federal superior a 65%, sendo eles: iluminação elétrica, telefone, fogão, geladeira, máquina de lavar roupa, televisão e computador.

É preciso destacar a escolha do aparelho de ar condicionado, visto que neste tipo de edificação habitacional ela é pouco utilizada, no entanto, para o fim a que esta pesquisa se destina (avaliando o impacto do desempenho térmico), e a crescente utilização deste aparelho nas habitações brasileiras, ele foi considerado.

Foi adotado um aparelho de ar-condicionado tipo *split no fresh air* por este ser um dos modelos mais simples existentes no mercado e disponível na base de dados do software DesignBuilder. Foi considerada a eficiência do aparelho (CoP) de 2,80, que corresponde ao valor mínimo de eficiência para aparelhos com Selo Procel C. (PROCEL, 2015). Foi adotado o selo Procel nível C (mínimo) pelo fato da EHU estudada ser de baixo padrão, e normalmente os usuários deste tipo de edificação optam por aparelhos de menor custo e provavelmente de menor eficiência.

Para escolha do ambiente da EHU onde o aparelho de ar condicionado seria colocado foram simulados três cenários no software DesignBuilder: (1) um aparelho, em um dos dormitórios; (2) dois aparelhos, em cada um dos dormitórios; e (3) um aparelho, na sala de estar. Os aparelhos para os cenários (1) e (2) não apresentaram diferença para os dois sistemas de vedação vertical estudados, já o cenário (3) apresentou uma diferença significativa e, portanto, foi adotado no presente trabalho o aparelho de ar-condicionado

localizado na sala de estar da EHU. Os equipamentos eletrônicos adotados neste estudo estão presentes na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dados para o cálculo da EO e ECO₂O.

Equipamentos Eletrônicos	n°	Pot Média ¹ (Watts)	Dias de uso no mês ¹	Tempo de utilização ¹ h/dia	Consumo médio mensal (kwh)	Consumo anual (kwh)
Geladeira 1 porta	1	35	30	24	25,2	302,4
Chuveiro Elétrico	1	4500	30	0,53	71,6	858,6
Lâmpadas	5	15	30	5	11,25	135
Fogão GLP 4 Bocas ²	1	14,8	30	3	1,33	15,9
Televisão 29"	1	101	30	5	15,15	181,8
Ferro Elétrico	1	1050	12	1	12,6	151,2
Lava Roupas	1	147	12	1	1,76	21,17
Aparelho de som	1	110	8	3	2,64	31,6
Telefone	1	3	20	24	1,44	17,2
Computador	1	63	30	8	15,12	181,4
Ar condicionado <i>Split no Air</i> - VC	1	-	-	-	8,47**	101,63*
Ar condicionado <i>Split no Air</i> - LSF	1	-	-	-	13,51**	162,75*

¹ Dados obtidos no Procel (2015).

² Obtido da página www.electrolux.com.br.

* Foram obtidos a partir da simulação termoenergética no software *Design Builder*.

** Foram obtidos pela divisão do consumo anual por 12 meses.

A partir da tabela 4.4 chegou-se em um consumo mensal de 171,61 kWh/mês para a EHU de LSF e 166,56kWh/mês para a EHU de VC. Comparando com outros autores, Bermann (2003) adotou um valor de 220 kWh/mês, enquanto Tavares (2006), Paulsen e Sposto (2013) e Pedroso (2015) adotaram valores menores: 140 kWh/mês, 161 kWh/mês e 135,5 kWh/mês, respectivamente.

Tavares (2006) e Paulsen Sposto (2013) adotam este resultado com base em estatísticas do setor e Pedroso (2015) levantou equipamentos eletrônicos típicos de uma habitação, no entanto, sem considerar o chuveiro elétrico, partindo do pressuposto da utilização de painéis solares nas habitações. Sabendo que o chuveiro é um dos principais consumidores em uma habitação o valor obtido foi inferior. Deve-se destacar que nenhum dos autores considerou equipamentos de climatização (ar condicionado). Desta forma, na presente dissertação preferiu-se levantar equipamentos eletrônicos típicos deste tipo de habitação, incluindo o consumo dos aparelhos de climatização, método similar ao adotado por Oliveira (2015).

Para a contabilização da energia consumida pelo ar condicionado nas horas de desconforto, foi necessário primeiramente definir qual a temperatura neutra (TN). A partir da TN definida e nos momentos de ocupação da habitação o aparelho de climatização é ligado e a energia para o condicionamento ambiental é contabilizada.

Pereira e Assis (2010) avaliaram quatro índices de conforto adaptativo e identificaram que a equação proposta por Aluciems (1981) é a mais adequada para o contexto brasileiro. Desta forma, foi utilizada a equação desenvolvida por Aluciems (1981) *apud* Pereira e Assis (2010): $TN = 17,6 + 0,314T$, em que T é a temperatura média do ar mensal externa (em °C). Sabendo que T para a cidade de Brasília é 21,2°C, a TN resultante foi de 24,3°C. Este valor é inferior ao definido por Givoni (1992), de 29°C, e, portanto, consumirá maior quantidade de energia do aparelho de ar condicionado, sendo assim o pior caso.

Como só foi considerado o equipamento de climatização na sala de estar, pior situação, só foram contabilizados os horários entre 17h00 – 00h00 (dias de semana) e 9h00 -00h00 (fins de semana) visto que normalmente é neste período que os moradores se encontram neste ambiente. Em futuras pesquisas pode ser explorado diferentes horários de ocupação dos usuários a fim de saber o impacto do consumo dos aparelhos de climatização.

Para o cálculo da energia e emissões provenientes durante o processo de cocção realizado na EHU foi considerado neste estudo apenas a utilização de GLP. Com base em Bermann (2003), foi adotado um consumo mensal mínimo, para uma família comum, com quatro pessoas, de 13 kg de GLP (um botijão de gás).

Sabe-se que o Brasil ainda possui uma grande participação da utilização de lenha como fonte energética nas residências, principalmente para a cocção dos alimentos. No entanto, esta situação é mais frequente nas zonas rurais, que não é a realidade deste estudo. Outro motivo pela escolha do GLP no lugar da lenha é fato que segundo Bermann (2003), a utilização de lenha em ambientes residenciais é causadora de diversas doenças respiratórias devido à liberação de material particulado, e, portanto, seu uso nas residências brasileiras deve ser abolido.

Para o cálculo do consumo de energia elétrica, foi levantado o consumo de energia elétrica mensal da EHU, em kWh/mês, que foi transformado no consumo anual, em MJ, que foi multiplicado pelo fator de conversão (FC), de 1,62 (mesmo valor adotado por Pedrosa, 2015 e Paulsen e Sposto, 2013), e ao final o consumo total para a vida útil de 50 anos

somada a energia gasta pelo consumo de GLP, que foi considerado o mesmo para as duas EHUs, com um fator de 46,4 MJ/kg de GLP (BEN, 2015). O resultado final foi transformado para GJ e dividido pela unidade funcional adotada (45,64 m²), resultando em GJ/m².

Para o levantamento das emissões de CO₂, primeiramente a energia elétrica total consumida foi multiplicada pelas emissões de CO₂ referente à produção de eletricidade no Brasil (FCO₂). Este fator foi encontrado com base na consulta dos dados disponíveis no BEN (2015), sendo utilizado o valor médio dos últimos seis anos, a mesma metodologia adotada por Bessa (2010). A tabela com os dados utilizados está presente no Apêndice C. O fator encontrado foi de 0,036 kgCO₂/MJ de energia elétrica. Este valor ficou próximo aos valores encontrados por Miranda (2012), de 0,035 kgCO₂/MJ e pelo BEN (2015) de 0,038 kgCO₂/MJ.

O segundo passo foi a determinação das emissões de CO₂ da atividade de cocção, que foi realizado por meio da multiplicação da quantidade de GLP ao longo da vida útil de 50 anos pelo FCO₂ do GLP, de 0,063 kg CO₂/MJ (IPCC, 2006). Por fim foram somadas as emissões encontradas pelo consumo de energia elétrica e do GLP, sendo que o resultado foi convertido em tCO₂ e dividido pela unidade funcional, resultando em tCO₂/m². Para o cálculo da EO e ECO₂O foram utilizadas as equações 4.5 e 4.6.

$$EO = \frac{(43,2 \times C_e \times VU \times FC) + (556,8 \times C_{glp} \times VU)}{A \times 1000} \quad (4.5)$$

Onde:

C_e – consumo mensal equipamentos eletrônicos (kWh/mês);

VU- vida útil adotada da EHU (anos);

FC – fator de correção adotado, para conversão da energia secundária em primária (adimensional);

C_{GLP} – consumo mensal de GLP na EHU (kg);

A – área da EHU (m²);

EO – energia operacional (GJ/m²).

$$ECO_2O = \frac{(43,2 \times C_e \times VU \times FC \times FCO_2) + (35,08 \times C_{glp} \times VU)}{A \times 1000} \quad (4.6)$$

Onde:

C_e – consumo mensal equipamentos eletrônicos (kWh/mês);

VU- vida útil adotada da EHU (anos);

FC – fator de correção adotado, para conversão da energia secundária em primária (adimensional);

FCO₂ – fator de pelas emissões de CO₂ referente à produção de eletricidade no Brasil (kgCO₂/MJ);
 C_{GLP} – consumo mensal de GLP na EHU (kg);
 A – área da EHU (m²);
 EO – emissões operacionais (tCO₂/m²).

4.4.3.1 Simulação no Software DesignBuilder

Foi escolhido o software DesignBuilder v4.5.0.148 (DESIGN BUILDER, 2014) pela sua interface amigável, por ter o EnergyPlus como máquina de simulação, e pelo fato do DesignBuilder já ter sido empregado em outros estudos do Programa de pós-graduação onde esta dissertação está sendo desenvolvida tais como o de Maciel (2013) e o de Santos Filho (2015). Foi importante escolher um software que tivesse integração com EnergyPlus, pois este é o software recomendado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e pelo Procel Edifica.

Para a simulação termoenergética no software DesignBuilder foram utilizados os dados de entrada apresentados a seguir, conforme as tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

- Localização

Tabela 4.7 – Dados de Brasília e da localização da EHU para a simulação.

Requisito	Padrão Adotado
Latitude	-15,87°
Longitude	-47,93°
Nível do mar	1060 m
Exposição do vento	Normal
Orientação solar	0°
<i>Template</i> de localização	BRASILIA (AEROPORTO)
Dados Meteorológicos	Obtidos no LabEEE ¹ (2012)

¹ Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE).

- Atividade e Ocupação

Tabela 4.8 – Dados de atividade e ocupação da EHU.

Requisito	Padrão Adotado
Categoria	Espaço Residencial
Região	Brasil
Densidade (pessoa/m ²)	0,09 (4 pessoas)
Fator metabólico	0,90 (padrão do software)
Vestimentas inverno (clo)	1 (padrão do software)
Vestimentas verão (clo)	0,5 (padrão do software)
Mínimo de Ar Fresco (L/pessoa)	1 (padrão software)
Iluminância (lux)	150 (padrão software)

Para a ocupação da edificação, foi criada uma agenda (*Schedule*) para a sala de estar que foi chamada de “Ocupação EHU”, como forma de representar a ocupação da edificação no cálculo dos ganhos térmicos, horas de conforto e desconforto e parte do consumo energético (relacionado ao resfriamento pelo aparelho de ar-condicionado). Na tabela 4.7 é apresentada a agenda criada e utilizada na simulação. Ela foi considerada para todo o ano, sendo que não foram contabilizados os feriados.

Tabela 4.9 – Agenda de ocupação da EHU para a simulação.

Dia da Semana	Horário Ocupado
Segunda - Feira	17h00às 00h00
Terça - Feira	17h00às 00h00
Quarta - Feira	17h00às 00h00
Quinta - Feira	17h00às 00h00
Sexta - Feira	17h00às 00h00
Sábado	09h00às 00h00
Domingo	09h00 às 00h00

- Materiais e Componentes

Tabela 4.10 – Dados dos materiais e componentes empregados na simulação.

Material	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade¹ (kg/m³)	Fonte
Argamassa	1,15	1000	1950	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Bloco Cerâmico	0,9	920	1600	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Telha Cerâmica	0,9	920	1500	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Placa Cimentícia	0,65	840	1800	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Placa de Gesso	0,35	840	1000	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Painéis de OSB	0,2	2300	1000	ABNT NBR 15220-2 (2008) e LP Brasil (2015)
Lã de rocha	0,045	750	100	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Vidro comum incolor	0,9	1000	2500	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Concreto	1,75	1000	2300	ABNT NBR 15220-2 (2008)
Revestimento cerâmico	1,4	840	2500	Banco de dados do software
PVC	0,16	1000	1380	Banco de dados do software

¹ Foram adotadas as médias dos valores.

- Iluminação

Foram definidas luminárias fluorescentes compactas para os ambientes dos dormitórios, sala e banheiro e fluorescente T5 para a cozinha, com base no banco de dados do software.

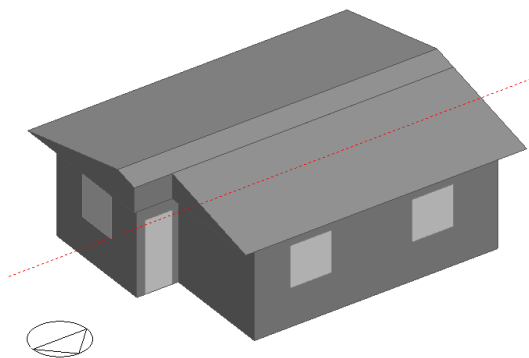
- Ventilação e Aquecimento dos Ambientes

No presente estudo não foram consideradas ventilação mecanizada e natural. Também não foram considerados sistemas de aquecimento nos ambientes.

- Simulação

Foram realizadas simulações anuais (8760 horas) com os dois modelos de EHU modificando somente as vedações verticais (externas e internas), sistema de VC e o LSF. Na figura 4.9 é apresentada a EHU modelada que foi simulada no software DesignBuilder.

Figura 4.9 – Modelo da EHU simulada no software. (Gerada pelo software DesignBuilder, 2015).



4.4.4 ETAPA DE MANUTENÇÃO

O consumo de energia (EM) e de emissões de CO₂ (ECO₂M) referentes à etapa de manutenção foi estimado de acordo com os intervalos de reposição dos sistemas utilizados na EHU, considerando o mesmo método adotado por Tavares (2006), Paulsen e Sposto (2013), Oliveira (2015) e Atmaca e Atmaca (2015). O Fator de reposição (FR) foi calculado pela divisão da vida útil da edificação, adotada de 50 anos, e o tempo de vida útil de projeto (VUP) de cada componente ou sistema. Primeiramente foram levantados FR utilizados em outros estudos, nacionais e internacionais, conforme é apresentado na tabela 4.11 e posteriormente partiu-se para a seleção dos FR, de acordo com tabela 4.12.

Tabela 4.11 – Tempos de substituição e fator de reposição dos sistemas da edificação.

Sistemas da edificação	Treolar <i>et al.</i> (1999) ¹	Chen <i>et al.</i> (2001) ¹	Keoleian <i>et al.</i> (2001) ¹	Scheuer <i>et al.</i> (2003) ¹	Chau <i>et al.</i> (2007) ¹	Ding (2007) ¹	Tavares (2006)	ABNT NBR 15575-1:2013 ³	Paulsen and Sposto (2013)	Atmaca e Atmaca (2015)	Média
Países	Austrália	Hong Kong	EUA	EUA	Hong Kong	Austrália	Brasil	Brasil	Brasil	Turquia	-
Vedações exteriores	1,1	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,1	1,1
Vedações interiores	1,1	1,0	-	1,0	1,0	2,4	1,0	2,5	2,5	1,1	1,5
Esquadrias	-	1,3	2,0	1,5 - 1,9	-	1,5-2	1,1	2,5-4,2 ⁴	1,3	2,0	1,8
Estrutura cobertura	2,0	2,0	-	3,8	2,5	4,0	1,0	2,5	-	3,0	2,6
Telhas	-	1,3	2,0	3,8	2,5	2,4	1,3 ²	2,5	2,5	2,0	2,4
Piso cerâmico	4,0	3,0	2,5	4,16	2,5	3,0	1,7	3,8	3,8	3,0	3,1
Pintura	8,0	5,0	5,0	15,0	5,0	6,0-8,6	4,2-6,5	4,2-12,5	-	5,0	7,1

¹ Estudos retirados de Atmaca e Atmaca (2015).

² Foi considerado a média das telhas levantadas pelo autor.

³ Foi considerado os valores de VUP mínima.

⁴ Valores para esquadrias internas.

Tabela 4.12 – Tempos de substituição e fator de reposição dos sistemas da edificação.

Sistemas da Edificação	VUP (Fonte)	Fator de Reposição
Estrutura	50 (ABNT NBR 15575-1:2013)	1,00
Vedação vertical externa	40 (ABNT NBR 15575-1:2013)	1,25
Vedação vertical interna ¹	30 (Palácio, 2013)	2,50
Pintura externa	12 (Tavares, 2006)	4,17
Pintura interna	8 (Tavares, 2006)	6,25
Estrutura cobertura	30 (Tavares, 2006)	1,67
Telhas	20 (ABNT NBR 15575-1:2013)	2,50
Pisos internos	30 (Tavares, 2006)	1,67
Esquadrias externas	40 (Paulsen e Sposto, 2013)	1,25
Esquadrias internas	40 (Paulsen e Sposto, 2013)	1,25
Hidrossanitário ²	45 (Tavares, 2006)	1,11

¹Somente para o LSF.

Foram adotados valores de VUP de outras fontes além da ABNT NBR 15575-1:2013, por serem dados mais específicos para alguns componentes e sistemas avaliados neste estudo, já que os valores apresentados na norma são mais genéricos.

É possível observar certa proximidade para a maioria dos FR adotados no presente trabalho e o valor médio encontrado com base nos outros estudos. Os sistemas de vedações verticais internas, estrutura da cobertura e pisos internos foram os que apresentaram valores mais distantes das médias calculadas. Esta tabela também serve como uma importante fonte de dados, podendo balizar outros estudos de ACV, ACVE e ACVCO₂.

Em relação à VC, foi considerado à reposição somente do revestimento de argamassa, com uma VUP de 40 anos, para os blocos cerâmicos e a estrutura de concreto foi considerado uma VUP de 50 anos. Em relação ao LSF, foi considerada uma VUP de 50 anos para a estrutura de aço galvanizado, 40 anos para as placas cimentícias e 30 anos para as chapas de OSB utilizadas, 30 anos para as placas de gesso utilizadas internamente e 30 anos para a lâ de rocha. Estas informações foram obtidas no estudo de Palácio (2013) e com pesquisa com fabricantes. Para o cálculo da EM e ECO₂M foram utilizadas as equações 4.7 e 4.8.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times FE_i \times (FR_i - 1)}{A \times 1000} \quad (4.7)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;
n- número de materiais;
m – massa do material utilizado na EHU, considerando as perdas (kg);
FE – fator de energia do material (MJ/kg);
A – área da EHU (m²);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
EM – energia dos materiais utilizados na manutenção (GJ/m²).

$$ECO_2M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times FCO_{2i} \times (FR_i - 1)}{A \times 1000} \quad (4.8)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;
n- número de materiais;
m – massa do material utilizado na EHU, considerando as perdas (kg);
FCO₂ – fator de energia do material (kgCO₂/kg);
A – área da EHU (m²);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
ECO₂M – emissões de CO₂ dos materiais utilizados na manutenção (tCO₂/m²).

Foram utilizados os mesmos valores de FE e FCO₂ adotados na etapa de pré-uso (apresentados na tabela 4.2).

Para o cálculo da energia (EMt) e das emissões de CO₂ (ECO₂Mt) relacionadas ao transporte dos materiais e componentes necessários à manutenção foram utilizadas as mesmas equações utilizadas na etapa de transporte, as equações 4.3 e 4.4, respectivamente. Foram considerados os mesmos critérios e distâncias utilizadas no transporte da etapa pré-uso. Portanto, a energia e as emissões de CO₂ totais da etapa de manutenção foram calculadas pela somatória da energia (EMi) e das emissões (ECO₂Mi) referentes aos materiais utilizados na manutenção juntamente com o transporte e as perdas associadas. Os cálculos para os valores médios estão apresentados no Apêndice F.

4.4.5 ETAPA DE PÓS-USO

O consumo de energia (EP) e as emissões de CO₂ (ECO₂P) referente à etapa de pós-uso foram levantados com base na consideração de duas fases: demolição/desconstrução da EHU (ED e ECO₂D) juntamente com os materiais utilizados na manutenção; e transporte dos resíduos gerados (considerando também os resíduos gerados na manutenção) até a destinação final (ETr e ECO₂Tr). Não foi considerado o processamento dos resíduos. Para o cálculo da EP e ECO₂P foram utilizadas as equações 4.9 e 4.10. Os cálculos, para os valores médios são apresentados no Apêndice G.

$$EP = ED + ETr \quad (4.9)$$

ED – energia da demolição/desconstrução (GJ/m²);
ETr – energia de transporte dos resíduos gerados na demolição (GJ/m²);
EP – energia da etapa de pós-uso (GJ/m²).

$$ECO_2P = ECO_2D + ECO_2Tr \quad (4.10)$$

ECO₂D – emissões de CO₂ da demolição/desconstrução (tCO₂/m²);
ECO₂Tr – emissões de CO₂ de transporte dos resíduos gerados na demolição (tCO₂/m²);
ECO₂P – emissões de CO₂ da etapa de pós-uso (tCO₂/m²).

4.4.5.1 Demolição/Desconstrução da EHU

O consumo de energia (ED) e as emissões de CO₂ (ECO₂D) foram calculados com base no processo de desconstrução ou demolição dos sistemas, considerando os materiais e componentes utilizados na manutenção (com o acréscimo do FR), conforme as equações 4.11 e 4.12, respectivamente.

$$ED = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times FE_{d_i} \times FR_i}{Ax1000} \quad (4.11)$$

i – material de construção discriminado;
n- número de materiais;
m – massa do material utilizado na EHU, considerando as perdas (kg);
FE_d – fator de energia da demolição/desconstrução (MJ/kg);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
A – área da EHU (m²);
ED – energia da demolição/desconstrução (GJ/m²).

$$ECO_2D = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times FCO_{2d_i} \times FR_i}{Ax1000} \quad (4.12)$$

i – material de construção discriminado;
n- número de materiais;
m – massa do material utilizado na EHU, considerando as perdas (kg);
FCO_{2d} – fator de emissões de CO₂ da demolição/desconstrução (kgCO₂/kg);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
A – área da EHU (m²);
ECO₂D – emissões de CO₂ da demolição/desconstrução (tCO₂/m²).

Foi adotado no presente trabalho que o sistema de VC será demolido e o sistema de LSF passará pelo processo de desconstrução ao final da vida útil da EHU. Para as outras partes da edificação (cobertura, pisos, instalações, acabamentos e esquadrias) foi adotado o processo de demolição para ambos os casos, como é apresentado a seguir:

- Sistema de VC: toda edificação é demolida, utilizando martelos rompedores e pás-carregadeira, e posteriormente, os resíduos serão enviados ao aterro sanitário de Brasília. Foi adotado o fator de energia de desconstrução (FE_d) encontrado por Tavares (2006) adaptado pelas composições do TCPO (2012), para este tipo de demolição, de 0,0354 MJ/kg. O fator de emissões de CO₂ (FCO_{2d}) foi encontrado

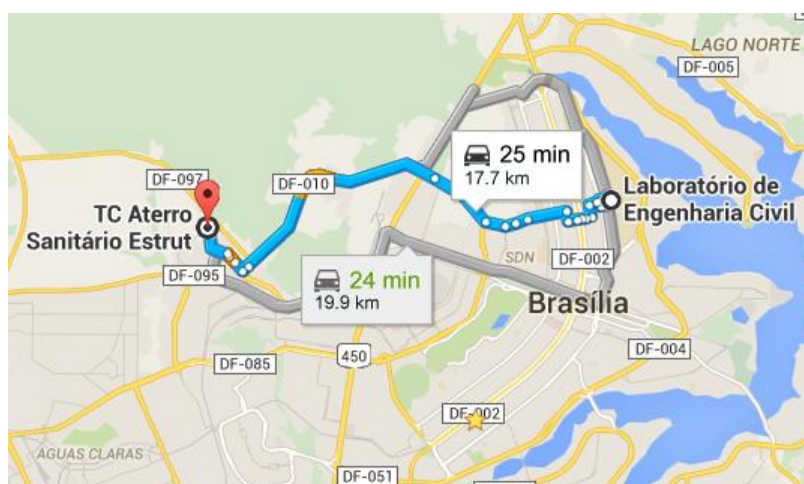
pela multiplicação dos fatores de energia do óleo diesel e gasolina automotiva, combustíveis utilizados nos martelos rompedores e pás-carregadeiras, pelos fatores de emissão de CO₂, de 0,0741 kgCO₂/MJ para a óleo diesel e 0,0693 kgCO₂/MJ para a gasolina automotiva (IPCC, 2006), resultando em 0,00247 kgCO₂/kg.

- Sistema de LSF: apenas o sistema de vedação vertical passa pelo processo de desconstrução, enquanto os outros sistemas da edificação passam pelo mesmo processo de demolição descrito anteriormente para o sistema de VC. Foi adotado o fator de energia de desconstrução para as vedações verticais de LSF encontrado por Pedroso (2015), de 0,00257 MJ/kg e 0,0354 MJ/kg para a demolição dos outros sistemas da edificação, o mesmo utilizado no sistema de VC. O fator de emissões de CO₂ encontrado foi de 0,000092 kgCO₂/kg para o sistema de vedação de LSF (a partir da multiplicação de 0,00257 MJ/kg pelo fator de emissões de energia elétrica, 0,036 kgCO₂/MJ) e 0,00247 kgCO₂/kg para os outros sistemas da EHU.

4.4.5.2 Transporte dos Resíduos até a Destinação Final

Para o levantamento da distância de transporte entre a EHU e o aterro sanitário de Brasília foi utilizado o Google Maps, conforme é apresentado na figura 4.10.

Figura 4.10 – Distância da localização da EHU até o aterro Sanitário. (*Google Maps*, 2015).



A partir da figura 4.9, é possível observar a possibilidade de três caminhos para se chegar até o aterro sanitário do Distrito Federal, foi adotada neste estudo a menor distância, de 17,7 Km. Foram utilizados os mesmos coeficientes da etapa de transporte dos materiais da

fábrica até o canteiro, com diferença da distância e considerando os materiais utilizados na manutenção (com o acréscimo do FR), conforme as equações 4.13 e 4.14.

$$ETr = \frac{\sum_{i=1}^n 0,49xD_{di}xm_i xFR_i}{Ax1000} \quad (4.13)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;
n - número de materiais;
DD. – distância da obra ao local de destinação final de ida (km);
m – massa de material transportado, considerando as perdas (t);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
A – área da EHU (m²);
ETr – energia de transporte dos resíduos gerados na demolição (GJ/m²).

$$ECO_2Tr = \frac{\sum_{i=1}^n 0,043xD_{di}xm_i xFR_i}{Ax1000} \quad (4.14)$$

Onde:

i – material de construção discriminado;
n - número de materiais;
Dd – distância da obra ao local de destinação final de ida (km);
m – massa de material transportado, considerando as perdas (t);
FR – fator de reposição do material (adimensional);
A – área da EHU (m²);
ECO₂Tr – emissões de CO₂ de transporte dos resíduos gerados na demolição (tCO₂/m²).

4.4.6 CICLO DE VIDA COMPLETO

Ao final foi calculado o consumo de energia (ETOT) e emissões de CO₂ (ECO₂TOT) totais ao longo do ciclo de vida da EHU para os dois sistemas. Foram utilizadas as equações 4.15 e 4.16.

$$ETOT = EI + ET + EO + EM + EP \quad (4.15)$$

Onde:

EI – energia da extração e processamento dos materiais (GJ/m²);
ET – energia do transporte de materiais da fábrica até o canteiro de obras (GJ/m²);
EO – energia da etapa operacional da edificação (GJ/m²);
EM – energia dos materiais utilizados na manutenção (GJ/m²);
EP – energia da etapa de pós-uso (GJ/m²);
ETOT – energia total do ciclo de vida da EHU (GJ/m²).

$$ECO_2TOT = ECO_2I + ECO_2T + ECO_2O + ECO_2M + ECO_2P \quad (4.16)$$

Onde:

ECO₂I – emissões de CO₂ extração e processamento dos materiais (tCO₂/m²);

ECO₂T – emissões de CO₂ do transporte de materiais da fábrica até o canteiro de obras (tCO₂/m²);

ECO₂O – emissões de CO₂ da etapa operacional da edificação (tCO₂/m²);

ECO₂M – emissões de CO₂ dos materiais utilizados na manutenção (tCO₂/m²);

ECO₂P – emissões de CO₂ da etapa de pós-uso (tCO₂/m²).

ECO₂TOT – emissões totais de CO₂ do ciclo de vida da EHU (tCO₂/m²).

Todos os cálculos foram realizados por meio da utilização de uma planilha eletrônica (Microsoft Excel), empregando as equações apresentadas anteriormente. As planilhas geradas, para a situação de valores médios, estão apresentadas nos Apêndices D, E, F e G.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os objetivos propostos e conforme a metodologia de pesquisa utilizada partiu-se para a apresentação e discussão dos resultados encontrados.

5.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

5.1.1 Avaliação pelo Método de Cálculo

A partir dos valores de transmitância (U) e a capacidade térmica (Ct) dos sistemas de VC e LSF, apresentados na tabela 5.1, observa-se que ambos os sistemas atendem os critérios exigidos de U (máximo de 2,5 W/m².K) e Ct (mínimo de 130 kJ/m².K) definidos na NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela 5.1 – Valores de transmitância e capacidade térmica encontrados para os sistemas de vedação.

Sistemas de vedação	U (W/m ² .K)	Ct (kJ/m ² .K)
VC	2,49	158
LSF	0,66	133

5.1.2 Avaliação pela Simulação Computacional

Para a avaliação do desempenho térmico dos dois sistemas construtivos com base na simulação computacional foram verificadas as variações de temperatura diárias de um dia típico de verão (09/11) e um dia típico de inverno (21/06) para os ambientes de longa permanência da EHU (sala, dormitório 1 e dormitório 2), conforme os requisitos da NBR 15575-1 (ABNT, 2013)¹⁰, para as condições de Brasília. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 5.2.

¹⁰ Conforme foi abordado no item 4.3.1.4 da Metodologia.

Tabela 5.2 – Resumo da avaliação de desempenho térmico para os dois sistemas de vedação com as variações de temperatura e o nível de desempenho

Ambientes	Período	VC	LSF
Sala	Verão	Atende	Atende
		3,6	3,3
		I	I
	Inverno	Atende	Atende
		2,2	0,6
		M	M
Dormitório 1	Verão	Atende	Atende
		4,1	2,8
		S	I
	Inverno	Atende	Atende
		2,3	0,5
		M	M
Dormitório 2	Verão	Atende	Atende
		4,3	3,1
		S	I
	Inverno	Atende	Atende
		2,1	0,5
		M	M

S – Nível superior da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

I – Nível intermediário da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

M – Nível mínimo da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Observa-se que ambos os sistemas de vedação vertical atendem os critérios estabelecidos na NBR 15575-1 (ABNT, 2013) para as condições de Brasília, no entanto, com algumas diferenças. Os valores apresentados na tabela 5.2 mostram a diferença entre a temperatura interna do ar no interior da edificação e a temperatura externa, sendo que as células em vermelho representam o nível mínimo, em roxo o nível intermediário e em verde o nível superior da norma.

Para as condições de verão, ambos os sistemas apresentaram melhor desempenho, conseguindo atingir níveis intermediário e superior. No caso do LSF, este apresentou somente níveis intermediários e já a VC apresentou valores intermediários e superiores, e, portanto, apresentando um melhor desempenho para as condições de verão.

Já para o inverno ambos os sistemas apresentaram nível mínimo, mas também é possível notar que as diferenças entre a temperatura interna e externa da VC são superiores as diferenças do LSF, o que mostra o melhor desempenho da VC. Portanto, apesar de ambos os sistemas terem atendido os critérios definidos na norma, o sistema de VC apresentou um melhor desempenho térmico para as condições de verão e inverno.

Desta forma, como é sugerido por Lamberts *et al.* (2012), para o caso de Brasília, a utilização de vedações verticais pesadas (com grande inércia térmica) são recomendadas devido à grande amplitude térmica do clima, e, portanto, entre os dois sistemas, do ponto de vista do desempenho térmico, o sistema de VC é mais vantajoso do que LSF. Assim, para a realidade de Brasília, a capacidade térmica exerce maior influência no desempenho térmico que a transmitância térmica, confirmando as diretrizes previstas na ABNT NBR 15220-3.

A energia gasta para atingir a faixa de conforto estabelecida (a partir de 24,3°C) só é contabilizada a partir do horário que os usuários estão presentes na edificação e no ambiente onde o aparelho de ar condicionado está instalado, que neste caso é a sala, das 17h às 00h. Assumindo estas condições, foi obtido um consumo de energia, para o funcionamento do ar condicionado, de 101,63 kWh/ano para a EHU de VC e 162,18 kWh/ano para a EHU de LSF, portanto, com uma diferença considerável, de 40%. No entanto, notou-se um baixo consumo de energia para o condicionamento ambiental, para as condições definidas no presente estudo, quando comparada com a somatória do consumo dos outros equipamentos eletrônicos da EHU. Mais detalhes, relacionados ao consumo de energia e emissões de CO₂ serão apresentados no item 5.2.2.

Conclui-se, então, que o desempenho térmico do sistema de vedação vertical influenciou no consumo de energia relacionada ao condicionamento ambiental das EHU. No entanto, não apresentou valores significativos em termos do consumo total da fase operacional. Os baixos valores de consumo são resultado dos pequenos intervalos de horas de desconforto para a cidade de Brasília, das poucas horas de ocupação dentro da edificação e da adoção de somente um aparelho de ar condicionado. Se fossem avaliadas outras edificações, como comerciais, públicas ou até habitacionais de multipavimentos, provavelmente o consumo de energia pelo condicionamento ambiental seria superior e com diferenças mais significativas entre os dois sistemas de vedação vertical.

Os resultados e discussões relacionados ao consumo de energia e emissões de CO₂ da etapa operacional das edificações serão apresentados no item 5.2.2.

5.2 ACVE E ACVCO₂

5.2.1 Etapa de Pré-Uso

Para a etapa de pré-uso foram considerados o consumo de energia e emissões de CO₂ para as EHUs com os dois sistemas de vedação vertical e para as três situações analisadas (valores mínimos, médios e máximos), a partir das fases de extração, processamento (EI e ECO₂I) e transporte dos materiais da fábrica até o canteiro de obras (ET e ECO₂T). Nas figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os valores de EI e ECO₂I encontrados.

Figura 5.1 – Consumo de energia da extração e processamento dos materiais e componentes.

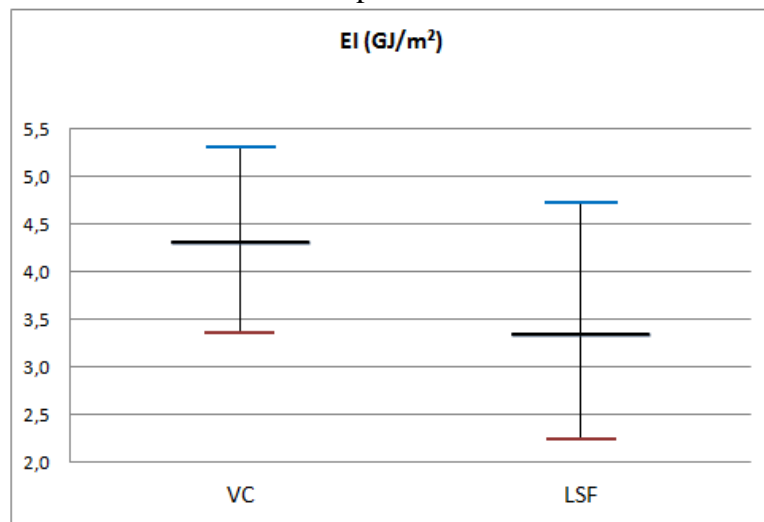
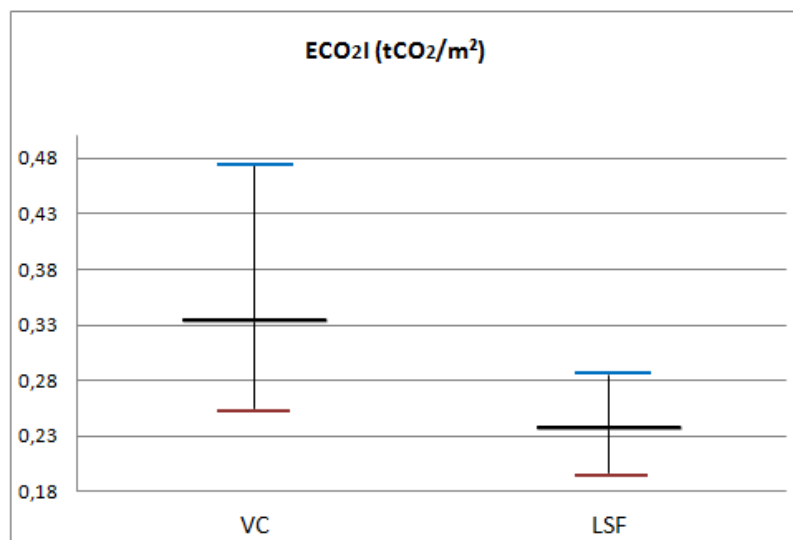


Figura 5.2 – Emissões de CO₂ na extração e processamento dos materiais e componentes.



É possível observar que a EI foi superior para a EHU de VC para todas as situações (mínimo, médio e máximo). A diferença entre as edificações com a utilização de valores mínimos foi de 34%, o valor médio foi de 22% e na situação de valores máximos de 11%. O maior valor de EI para o sistema de VC, comparado ao LSF, já foi verificado no estudo apresentado por Carminatti Júnior (2012), que também avaliou uma edificação unifamiliar. Pedroso (2015) chegou a valores maiores para o sistema de LSF, no entanto, considerou as vedações internas com painéis de OSB e lã de rocha, enquanto no presente trabalho foi considerado somente as placas de gesso (sistema *drywall*).

Em relação ao ECO₂I, ela também foi superior para o sistema de VC para as três situações de dados, sendo que a diferença foi de 23% com a utilização de valores mínimos, 29% para o médio e 40% para o máximo.

Quando se comparam os resultados de EI e ECO₂I é possível notar que as situações apresentadas para o as emissões de CO₂ possuem dados com considerável diferença, principalmente para os valores médios e máximos. Tal resultado foi consequência da dispersão de dados de emissões disponíveis na literatura, maior massa do sistema de VC, como também da quantidade de emissões de CO₂ por quantidade de energia gerada dos blocos cerâmicos e argamassa (principais materiais da VC), quando comparada ao aço, chapas de OSB e placas de gesso (principais materiais do LSF).

Em relação aos valores encontrados para EI e ECO₂I, para as três situações eles se encontram dentro do intervalo apresentado na revisão bibliográfica de trabalhos nacionais para EHUs, entre 3,0 e 6,6 GJ/m² (TAVARES, 2006; CARMINATTI JÚNIOR, 2012; PAUSEN; SPOSTO, 2013) e 0,19 a 0,49 tCO₂/m² (TAVARES, 2006; COSTA, 2012; CALDAS *et al.*, 2015), mostrando que são resultados coerentes. Somente o valor de EI do LSF para situação de mínimo, de 2,23 GJ/m², está fora do intervalo.

Para a verificação da participação de cada sistema da EHU, foi avaliada somente a situação de valores médios, conforme as figuras 5.3 e 5.4. Os resultados das situações de valores mínimos e máximos estão apresentados no Apêndice H.

Figura 5.3 – Participação da massa, energia incorporada e emissões de CO₂ incorporadas para os sistemas da EHU de vedação convencional.

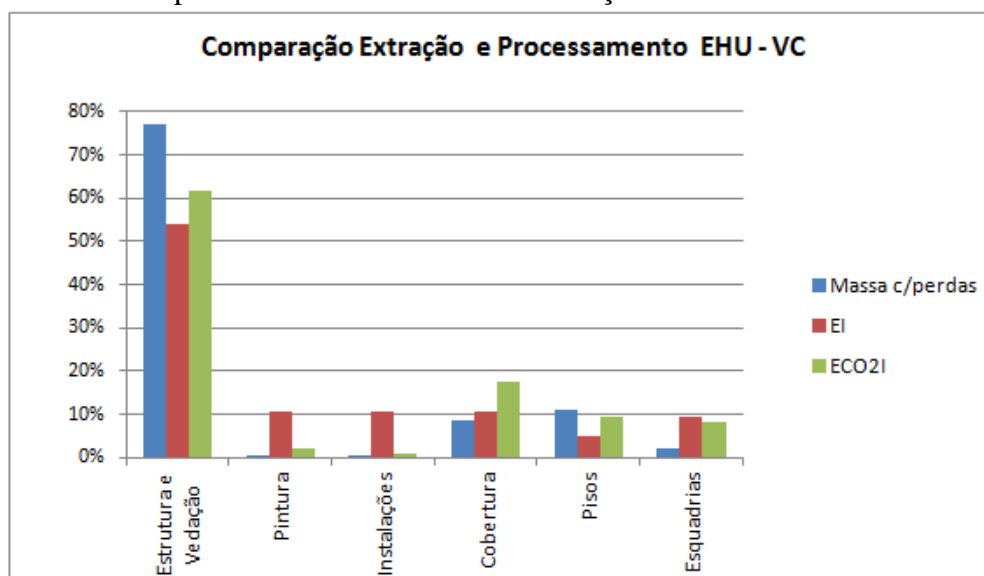
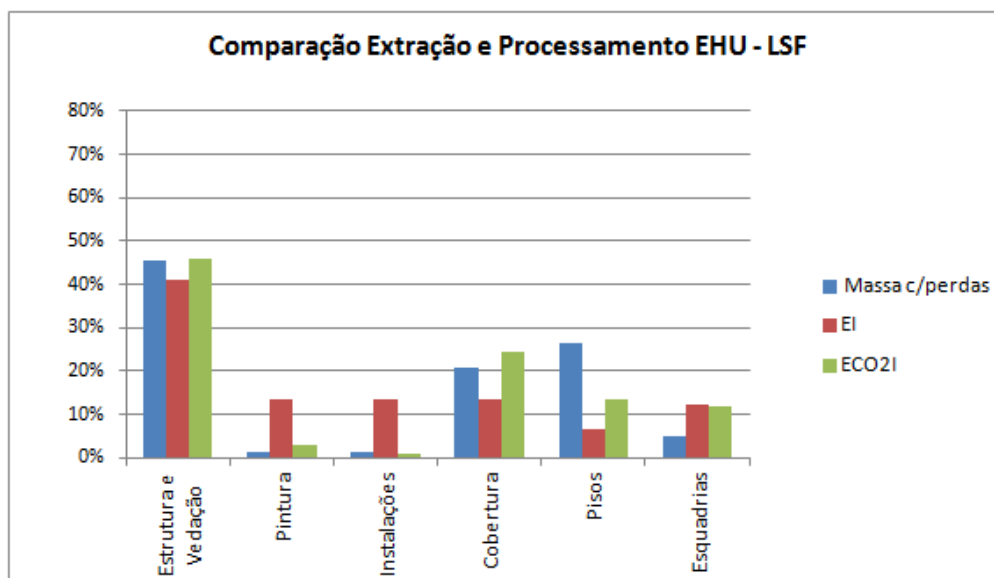


Figura 5.4 – Participação da massa, energia incorporada e emissões de CO₂ incorporadas para os sistemas da EHU de *light steel framing*.



Nota-se que para a EHU de VC, as vedações verticais apresentaram a maior participação em massa (76%), EI (55%) e ECO₂I (62%). Estes resultados vão ao encontro com os resultados de Tavares (2006) e Paulsen e Sposto (2013), que concluíram a grande importância do sistema de vedação vertical nas edificações habitacionais brasileiras.

Os outros sistemas, referentes a pintura, instalações, cobertura, pisos e esquadrias, apresentaram participação semelhante para o consumo de energia. O sistema de pintura e

instalações foram influenciados pela alta intensidade energética dos materiais utilizados, enquanto o sistema de cobertura e pisos pelo consumo de materiais (maior massa). Por fim o sistema de esquadrias não se destacou, apresentou valores médios tanto para o consumo de materiais como para a intensidade energética dos materiais e componentes.

Em relação às emissões de CO₂ a cobertura apresentou considerável participação, que foi consequência da alta massa do sistema e intensidade de emissões da telha cerâmica. Os outros sistemas apresentaram valores menores, a pintura e instalações possuem baixo valor de massa e menor intensidade de CO₂ dos materiais e os pisos e coberturas valores médios.

Para a EHU de LSF, a participação do sistema de vedação vertical foi menor quando comparado com o sistema de VC, resultando no aumento da participação dos outros sistemas. Estes outros apresentaram comportamento semelhante à edificação de VC.

Nota-se que o consumo de materiais teve uma importante influência neste resultado, pois mesmo o aço e as chapas de OSB possuindo maiores intensidades energéticas, quando comparada ao bloco cerâmico e argamassa, não conseguiram superar os valores da EHU de VC.

A fase de transporte é apresentada nas figuras 5.5 e 5.6.

Figura 5.5 – Consumo de energia no transporte.

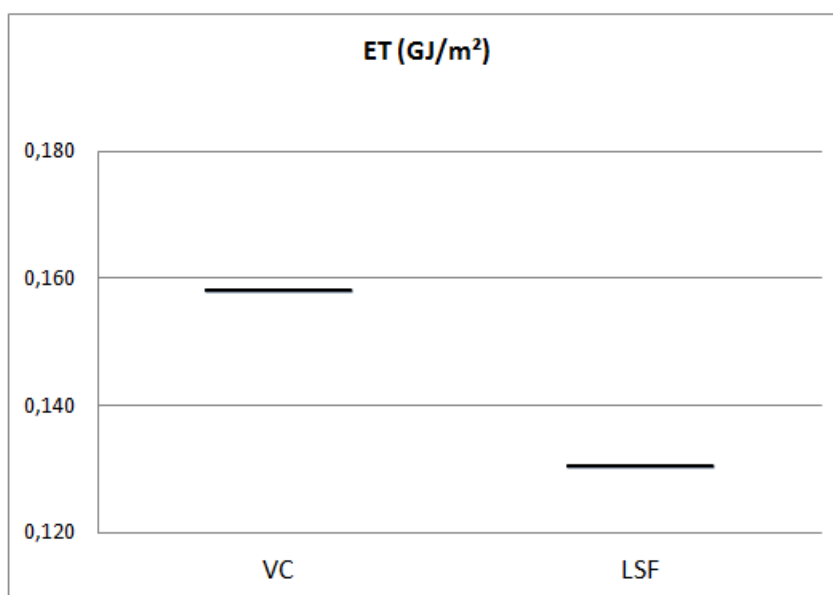
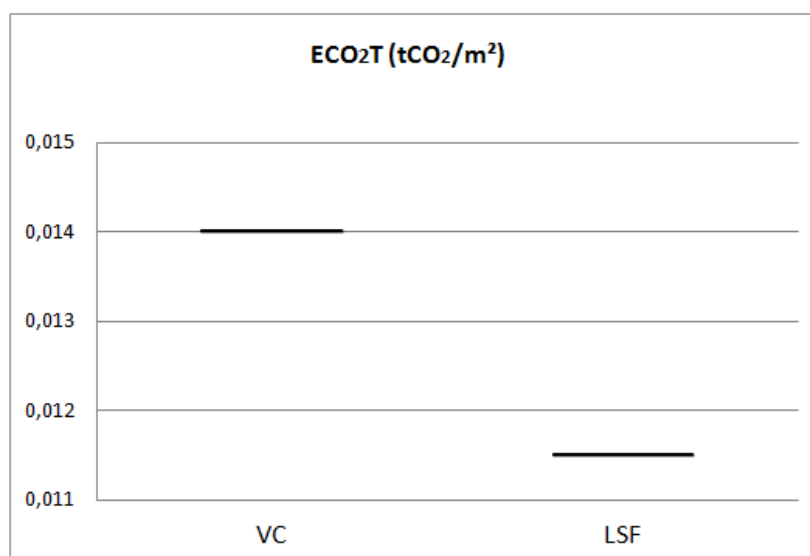


Figura 5.6 – Emissões de CO₂ no transporte.



Em relação à etapa de transporte, quanto maior for a massa e as distâncias percorridas dos materiais e componentes maior será o consumo de energia e as emissões de CO₂. Sabendo que os outros sistemas da EHU são os mesmos, a diferença está no sistema de vedações verticais.

Comparando a massa dos sistemas de vedação vertical, o LSF apresentou uma massa cerca da metade do sistema de VC. No entanto, os resultados finais de ET e ECO₂T não ficaram muito distantes, com uma diferença aproximada de 15%. Isto ocorreu pelas maiores distâncias percorridas pela maioria dos materiais e componentes dos LSF, que acabou por compensar a elevada massa do sistema de VC.

Conclui-se, então, que para o caso específico da localidade tratada no estudo, o sistema de VC apresentou maiores impactos no transporte que o sistema de LSF, influenciado principalmente pela elevada massa do sistema. Desta forma, no momento de comparação entre diferentes tipos de sistemas construtivos esta é uma avaliação importante a ser realizada.

Nas figuras 5.7 e 5.8 é apresentada a participação dos sistemas da EHU na etapa de transporte para os sistemas da habitação.

Figura 5.7 – Análise da participação da massa, consumo de energia e emissões de CO₂ para a etapa de transporte dos sistemas da EHU de vedação convencional.

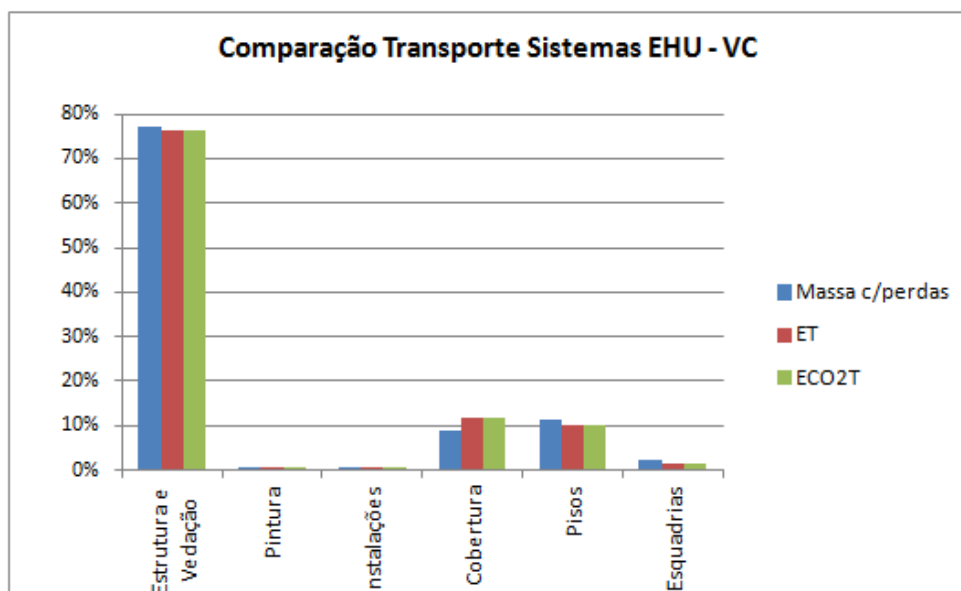
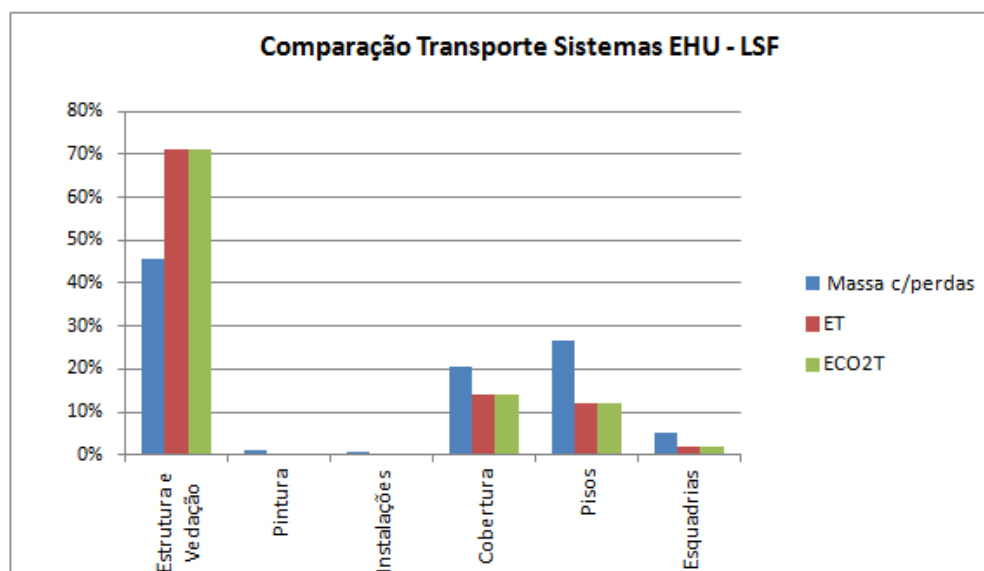


Figura 5.8 – Análise da participação da massa, consumo de energia e emissões de CO₂ para a etapa de transporte dos sistemas da EHU de *light steel framing*.



Em relação à participação de cada sistema da EHU na etapa de transporte, também é observado o maior impacto do sistema de vedações verticais tanto para o LSF como para a VC. Para esta tipologia de edificação a estrutura em conjunto com as vedações verticais sempre serão as mais impactantes, pois englobam a maioria dos componentes e sistemas da EHU. Os sistemas de pintura e instalações foram quase desprezíveis devido ao baixo valor das massas desses sistemas, enquanto os sistemas de cobertura e pisos valores

intermediários e próximos um do outro, influenciados também pela massa e distâncias médias.

5.2.2 Etapa Operacional

Os resultados da etapa operacional, EO e ECO_2O , estão apresentados nas figuras 5.9 e 5.10, respectivamente.

Figura 5.9 – Comparação do consumo de energia na etapa operacional.

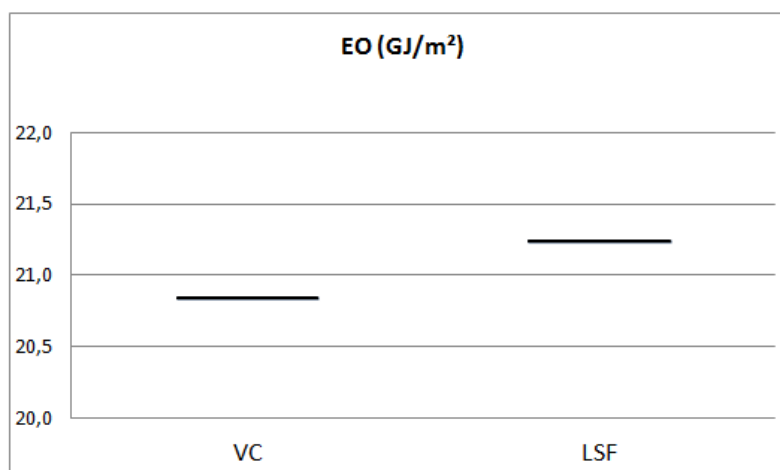
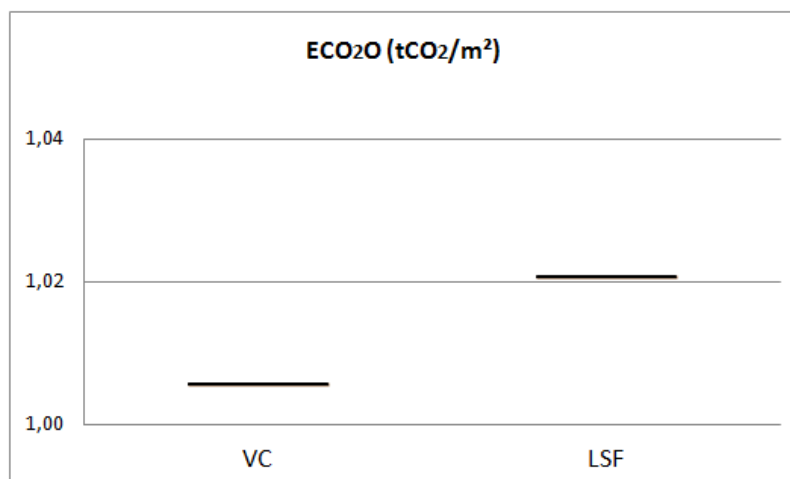


Figura 5.10 – Comparação das emissões de CO_2 na etapa operacional.



A EHU de VC apresentou valores de 20,85 GJ/m² e 1,01 tCO₂/m² e a de LSF de 21,24 GJ/m² e 1,02 tCO₂/m². Sabendo que a única variável foi o condicionamento ambiental foi possível notar que a diferença entre as duas edificações foi pouco considerável, principalmente em relação às emissões de CO₂. Comparando com valores obtidos na literatura nacional, 16,6 GJ/m² de Tavares (2006) e 17,56 GJ/m² de Paulsen e Sposto

(2013), os valores apresentados foram maiores que os estudos citados. A diferença está no fato da consideração da climatização e diferenças do consumo e fontes de cocção.

Em relação às emissões de CO₂, os valores obtidos na literatura nacional foram de 0,45tCO₂/m² encontrado por Tavares (2006) e 0,68 tCO₂/m² de Caldas *et al.* (2015). Estes valores ficaram distantes dos valores encontrados. Comparando a metodologia empregada nesta dissertação e nestes dois estudos, a principal diferença evidenciada foi o fator de emissões referente à geração de energia elétrica.

No presente trabalho foi adotado o valor de 0,036 kgCO₂/MJ, enquanto nos estudos de Tavares (2006) e Caldas *et al.* (2015) foram utilizados o valor 0,018 kgCO₂/MJ, portanto, metade do valor adotado, o que resultou em uma diferença considerável nos resultados de emissões da etapa operacional. Nas figuras 5.11 e 5.12 estão apresentados a participação do condicionamento ambiental, cocção e equipamentos eletrônicos na etapa operacional para o consumo de energia e emissões de carbono.

Figura 5.11 – Divisão da participação da energia operacional.

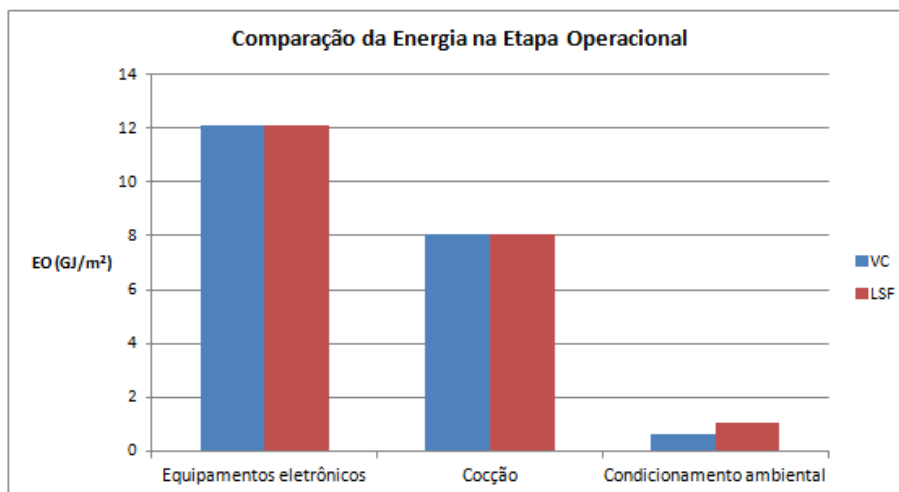
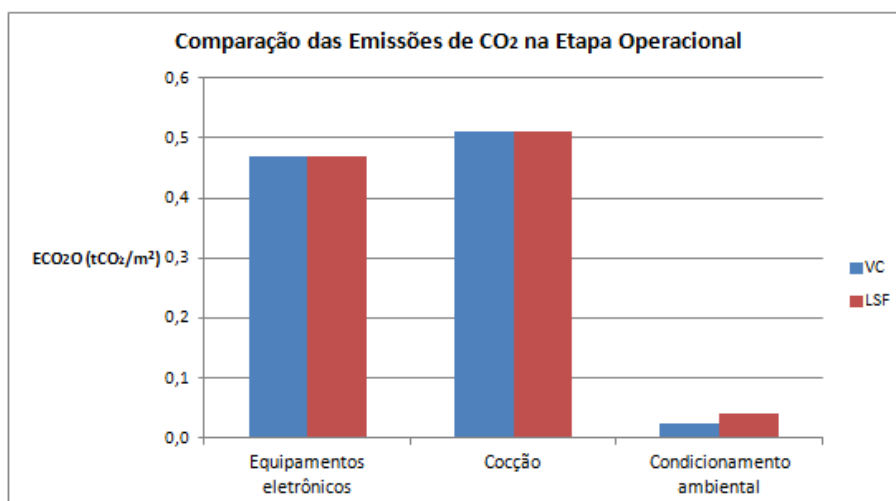


Figura 5.12 – Divisão da participação das emissões operacionais.



Percebe-se que a participação do condicionamento ambiental (uso do aparelho de ar condicionado) foi bastante inferior à soma dos equipamentos eletrônicos e a cocção, com 3% para o consumo de energia e 2,6% para as emissões para a EHU de VC e 5,2% para o consumo de energia e 4,1% para as emissões para a edificação de LSF.

Este resultado é diferente do apresentado por outros estudos, visto que a EHU estudada refere-se a um projeto mais simples que o de edificações multifamiliares como o de Maciel (2013) e Oliveira (2015) ou edificações públicas e comerciais, como Kim (2011) e Taborianski e Prado (2012), além de não ter o impacto do consumo de energia para o aquecimento da habitação, como ocorre em outros países, como verificado por Mithraratne e Vale (2004), ou climas mais severos (de deserto, por exemplo), como Huberman e Pearlmutter (2008) e Rakhshan *et al.* (2013).

Outro possível motivo por este baixo valor do consumo dos aparelhos de ar condicionado são as premissas adotadas neste estudo (tipo e quantidade dos aparelhos de ar condicionado, agenda de ocupação, entre outros). Sabe-se que a simulação computacional não consegue retratar de forma ideal a real situação de conforto dos usuários, ainda mais no consumo de energia para o condicionamento ambiental, visto que os hábitos dos usuários impactam de forma significativa e estes dados climáticos podem não tratar de forma adequada o clima atual.

Por fim, é importante ressaltar que a medida que cai o consumo dos outros equipamentos eletrônicos e da cocção, o consumo dos equipamentos de condicionamento exercem maior

impacto na energia e emissões operacionais finais, ressaltando a importância da especificação de sistemas com desempenhos térmicos adequados.

O consumo de energia elétrica pelos aparelhos eletrônicos se mostrou o mais impactante, sendo que o chuveiro elétrico foi o que apresentou maior participação, seguido pela geladeira, como apresentado por Lamberts *et al.* (2012). Destaca-se aqui a necessidade do incentivo para a utilização de sistemas de aquecimento solar, o qual que pode ser objeto de estudo de futuros trabalhos relacionados a ACV/ACVE/ACVCO₂.

Em relação à cocção, ela é mais representativa nas emissões de CO₂, sendo até superior aos equipamentos eletrônicos. Estas emissões são dependentes do tipo de combustível utilizado para a cocção dos alimentos, podendo ser mais ou menos impactante. Se tivesse sido adotada a utilização de lenha, por exemplo, a quantidade de emissões de CO₂ provavelmente seria superior, visto que a lenha é um combustível pouco eficiente (necessita de mais material para gerar a mesma quantidade de energia) e mais poluente em termos de emissões de CO₂ quando comparada ao GLP e ao gás natural. Também pode ser objeto de estudo para futuras pesquisas comparar diferentes cenários de cocção utilizando diferentes fontes de combustíveis, como é verificado no estudo de Gustavsson e Joelsson (2010).

5.2.3 Etapa de Manutenção

Para a etapa de manutenção foram encontrados os resultados apresentados nas figuras 5.13 e 5.14.

Figura 5.13 – Consumo de energia na manutenção.

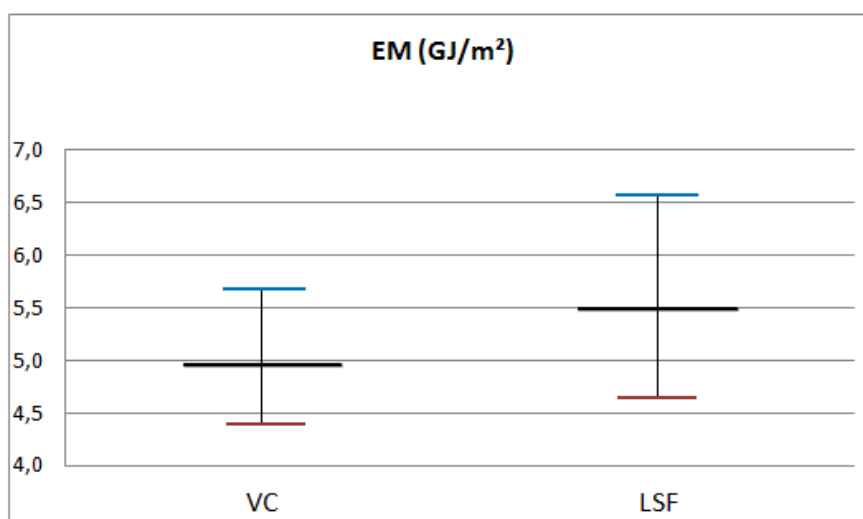
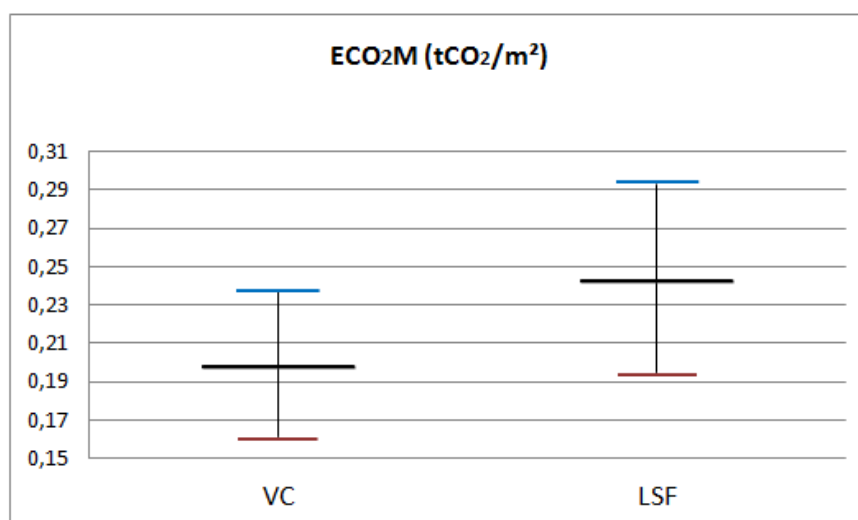


Figura 5.14 – Emissões de CO₂ na manutenção.



A EHU de LSF apresentou maiores valores de EM e ECO₂M para as três situações, utilizando os valores mínimos, médios e máximos. Este resultado foi consequência dos maiores fatores energéticos (FE) e de emissões (FCO₂) das chapas de gesso, painéis de OSB e chapa cimentícia, quando comparados aos componentes e materiais da VC, como também da menor VUP adotada para estes componentes.

Enquanto que, para o sistema de LSF foi adotado que estes três componentes sofrem reposição, para o sistema de VC foi considerado que somente a argamassa de revestimento sofre reposição ao longo da vida útil de 50 anos. A reposição da pintura foi considerada a mesma nos dois sistemas. Esta variação nos valores de VUP dos componentes pode ser explorada em futuras pesquisas.

Nas figuras 5.15 e 5.16 é apresentada a participação dos sistemas da EHU na etapa de manutenção.

Figura 5.15 – Análise da participação da massa, consumo de energia e emissões de CO₂ para a etapa de manutenção dos sistemas da EHU de vedação convencional.

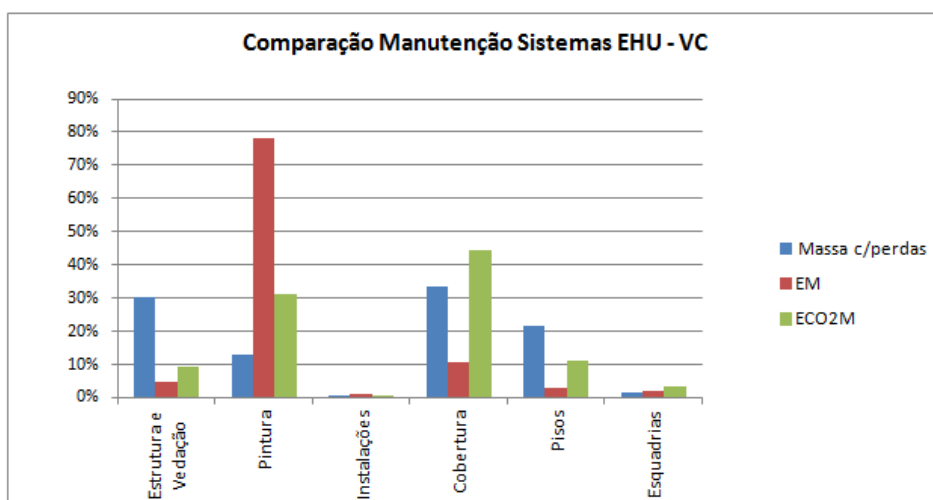
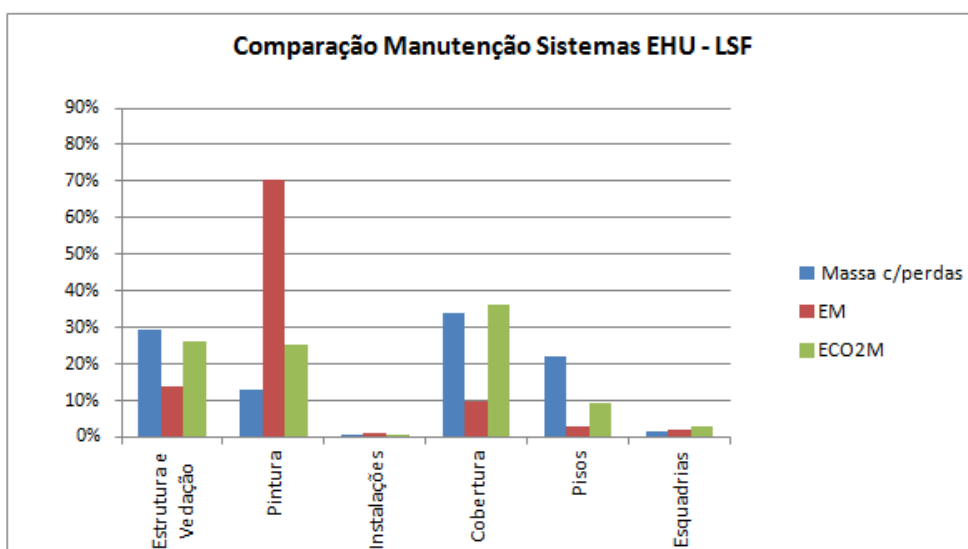


Figura 5.16 – Análise da participação da massa, consumo de energia e emissões de CO₂ para a etapa de manutenção dos sistemas da EHU de *light steel framing*.



Observa-se que o sistema que apresentou maior consumo de energia relacionada à manutenção foi o de pintura, para ambas EHUs. Isto ocorreu devido à baixa vida útil somado ao elevado fator de energia das tintas. A participação dos outros sistemas foi semelhante para as duas edificações. Em relação as emissões de CO₂ o sistema de cobertura apresentou maior participação, que foi resultado da vida útil média das telhas somada ao seu elevado fator de emissões.

A partir destes resultados, nota-se a importância da etapa de projeto, em que devem ser especificados materiais e componentes com maior durabilidade e vida útil, principalmente

as tintas, como forma de diminuir a necessidade de reposição, além da atenção aos critérios de consumo de energia e emissões de CO₂ que ocorrem na extração e fabricação destes.

Outro ponto que merece destaque é a atenção para a manutenibilidade (facilidade de manutenção) e a elaboração dos planos de manutenção para ser entregue aos futuros usuários da edificação, o que auxiliará na redução da necessidade de reposição dos materiais, sendo que ambas as medidas estão previstas na norma de desempenho (ABNT NBR 15575:2013).

5.2.4 Etapa de Pós-Uso

Para etapa de pós-uso foram encontrados os resultados apresentados nas figuras 5.17 e 5.18.

Figura 5.17 – Consumo de energia na etapa de pós-uso.

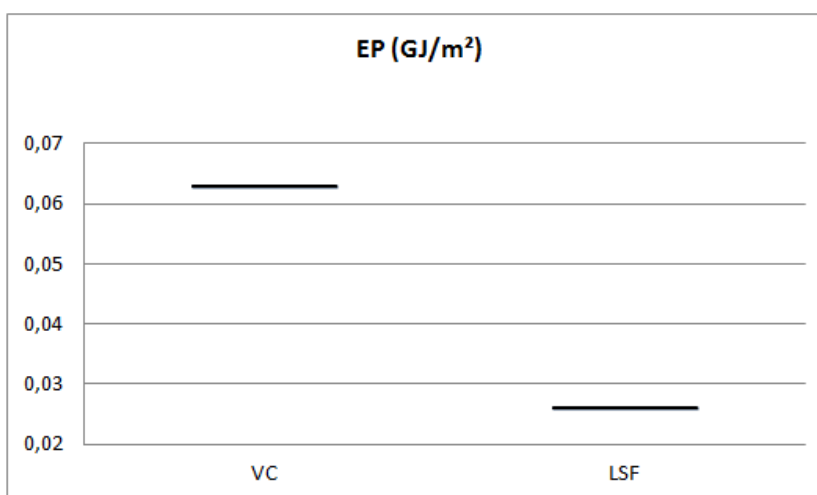
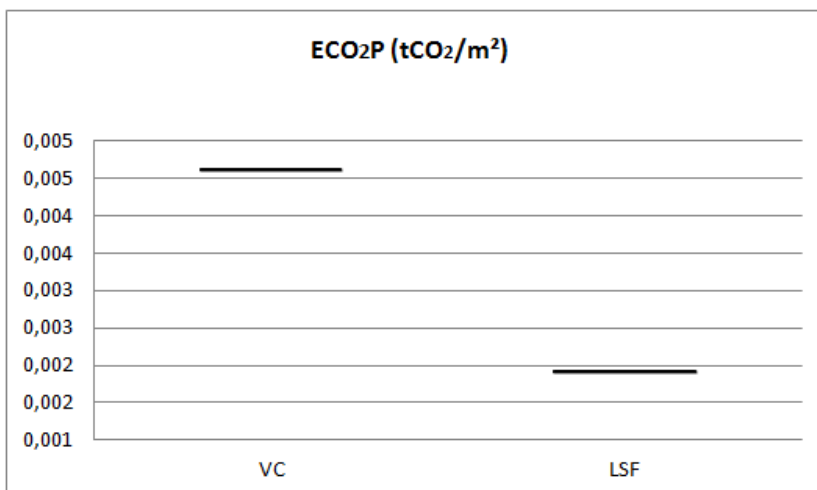


Figura 5.18– Emissões de CO₂ na etapa de pós-uso.



Para esta etapa foi verificado que a massa é o principal fator que influencia nos valores de EP e ECO₂P, pois as distâncias percorridas para a destinação final estão fixas. Neste sentido, quanto maior for a massa maior serão os valores de energia e emissões consumidas na demolição ou desconstrução do sistema e transporte dos resíduos gerados.

A durabilidade e a vida útil dos componentes também influenciaram, pois, se necessitam sofrer maior quantidade de reposição ao longo do ciclo de vida, mais energia e emissões são geradas com o transporte destes resíduos até o aterro sanitário.

O transporte é relevante, pois a medida que se aumentam as distâncias de transporte maior será o consumo de energia e emissões. No caso do presente estudo, como foi adotado o mesmo local de destinação final de todos os resíduos gerados, o impacto do transporte também só foi influenciado pela massa dos resíduos.

Quando se comparam os dois sistemas, a edificação com LSF apresentou menores valores de energia e emissões, do que a edificação com VC, uma diferença de aproximadamente 40% para a energia e o CO₂. Esta diferença foi resultado da menor massa do sistema de LSF e pelo menor consumo de energia e geração de emissões pelos equipamentos utilizados na desconstrução. O consumo de energia gasto no processo de desconstrução é menor que quando ocorre a demolição.

Comparando a participação das duas fases consideradas na etapa de pós-uso, a desconstrução da EHU com LSF apresentou uma participação de 72% para energia e 67% para as emissões, enquanto a etapa de transporte 28% para energia e 33% para emissões. Já para a EHU com VC, a demolição representou 80% para energia e 76% para as emissões e o transporte dos resíduos de 20% para energia e 24% para as emissões.

Desta forma, conclui-se que para diminuir os impactos da etapa de pós-uso devem ser especificados materiais e componentes para a composição de sistemas mais leves, com possibilidade de desconstrução e que tenham locais de destinação final (seja o reaproveitamento, reciclagem, incineração ou disposição em aterro sanitário) próximos à localização da edificação.

Por fim, se fosse considerada a reciclagem dos perfis de aço no sistema de LSF, provavelmente este sistema teria alguma redução no consumo de energia e emissões de CO₂. Esta hipótese também pode ser verificada em trabalhos futuros.

5.2.5 Ciclo de Vida das Edificações

A partir do levantamento do consumo de energia e emissões de CO₂ das três etapas (pré-uso, uso e pós-uso), foi calculado o consumo de energia total (ETOT) e emissões de CO₂ totais (ECO₂TOT) para a EHU com os dois sistemas de vedação vertical estudados, conforme apresentado nas figuras 5.19 e 5.20.

Figura 5.19 – Consumo de energia no ciclo de vida das habitações.

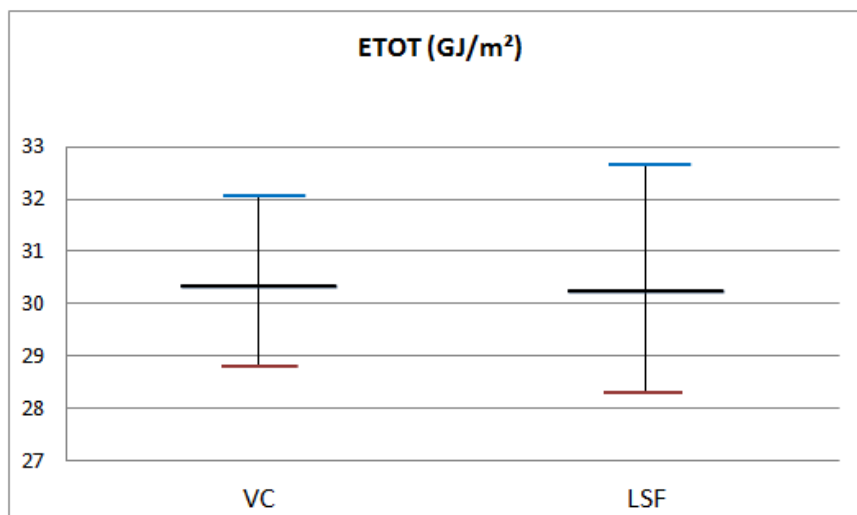
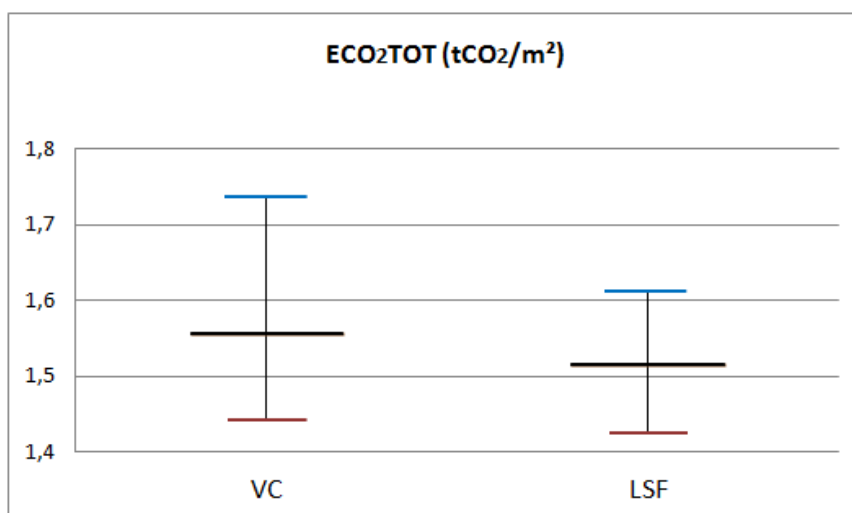


Figura 5.20 – Emissões de CO₂ no ciclo de vida das habitações.



A EHU de LSF apresentou valores de ETOT variando entre 28,28 GJ/m² a 32,68 GJ/m², com um valor utilizando os valores médios de 30,26 GJ/m². Já a EHU de VC apresentou valores de ETOT variando entre 28,83 GJ/m² a 32,08 GJ/m², e 30,36 GJ/m² utilizando os valores médios.

Comparando com estudos nacionais, como o de Tavares (2006), que obteve 24,3 GJ/m² e Paulsen e Sposto (2013) com 29,2 GJ/m²; e internacionais como o de Adalberth (1997b), com valores entre 27,4 e 31,7 GJ/m², Huberman e Pearlmutter (2008), com valores entre 26,5 e 32,9 GJ/m² e Devi L. e Palaniappan (2014) que encontraram 33,5 GJ/m², os resultados que utilizaram os valores mínimos e médios são os que mais se aproximam dos resultados encontrados por estes autores. Conclui-se assim, que os resultados encontrados estão coerentes, mesmo que diferentes considerações tenham sido realizadas nestes outros estudos.

Quando se avaliam as emissões de CO₂, a EHU de LSF apresentou valores de ECO₂TOT variando entre 1,43 tCO₂/m² a 1,61 tCO₂/m², utilizando os valores médios de 1,52 tCO₂/m². Já a EHU de VC apresentou valores de ECO₂TOT variando entre 1,44 tCO₂/m² a 1,74 tCO₂/m², com um valor médio de 1,56 tCO₂/m². Comparando com estudos nacionais, como o de Tavares (2006), que obteve 1,04 tCO₂/m² e Caldas *et al.* (2015) com 1,9 tCO₂/m²; e internacionais como Adalberth *et al.* (2001) com 1,5 tCO₂/m², Huberman e Pearlmutter (2008), com valores entre 2,1 e 2,8 tCO₂/m², Mc Grath *et al.* (2012) com 2,7 tCO₂/m² e Radhi e Sharples (2013), com valores entre 1,9 e 2,4 tCO₂/m².

Deve-se ressaltar que a comparação do consumo de energia e emissões de CO₂ do presente trabalho com outros trabalhos internacionais serve somente para possibilitar a visualização de uma ordem de grandeza dos resultados finais, verificando se os resultados obtidos estão coerentes. Embora tenham sido pesquisados trabalhos internacionais de edificações habitacionais unifamiliares, as diferentes práticas construtivas, tecnologias, eficiência dos equipamentos, e, principalmente diferenças climáticas dos países e até mesmo dentro de um mesmo país, não permitem uma comparação direta, necessitando de uma avaliação cuidadosa.

Assim, a edificação de VC apresentou maior valor do consumo de energia (para duas das situações de dados, utilizando valores mínimos e médios), com uma diferença em relação à edificação de LSF variando de 1 a 2%. Referente às emissões de carbono, a edificação de VC apresentou maior valor de emissões para todas as situações, no entanto com uma diferença em relação à edificação de LSF variando de 1 a 7%.

Desta forma, pode-se concluir que a edificação utilizando o sistema de LSF foi mais promissora no aspecto energia e emissões de CO₂, para as premissas adotadas neste

trabalho, mesmo apresentado pior desempenho térmico. Outra vantagem do LSF que pode ser avaliado em pesquisas futuras, é o seu impacto na fundação, pois, por ser um sistema mais leve, provavelmente, consumirá menor quantidade de materiais no sistema de fundações, podendo resultar em menor consumo de energia e emissões de CO₂, como também o potencial de reciclagem do aço que já foi discutido anteriormente.

Estes resultados foram influenciados pela maior massa e maior quantidade de emissões dos materiais cimentícios e dos blocos cerâmicos, sendo que os primeiros emitem grande parte de carbono no processo de calcinação do CaCO₃ e o segundo provavelmente pela utilização de combustíveis de baixa eficiência como a lenha, principalmente no Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país, lembrando que em alguns casos, como o estado de São Paulo, é utilizada a eletricidade, o que diminuiria este valor de emissões. A etapa de pré-uso seguida pela de manutenção, foram as que apresentaram maior impacto na diferença gerada entre os dois sistemas.

Nas figuras 5.21 e 5.22 é apresentada a participação de cada etapa no ciclo de vida das EHUs para o consumo de energia e emissões de CO₂.

Figura 5.21 – Participação das etapas no ciclo de vida energético da EHU.
(A) Vedação Convencional; (B) *Light Steel Framing*.

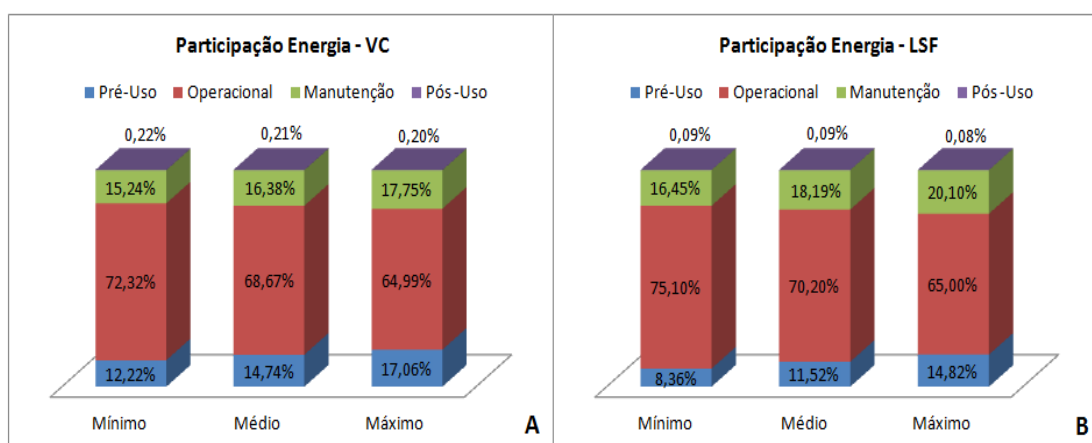
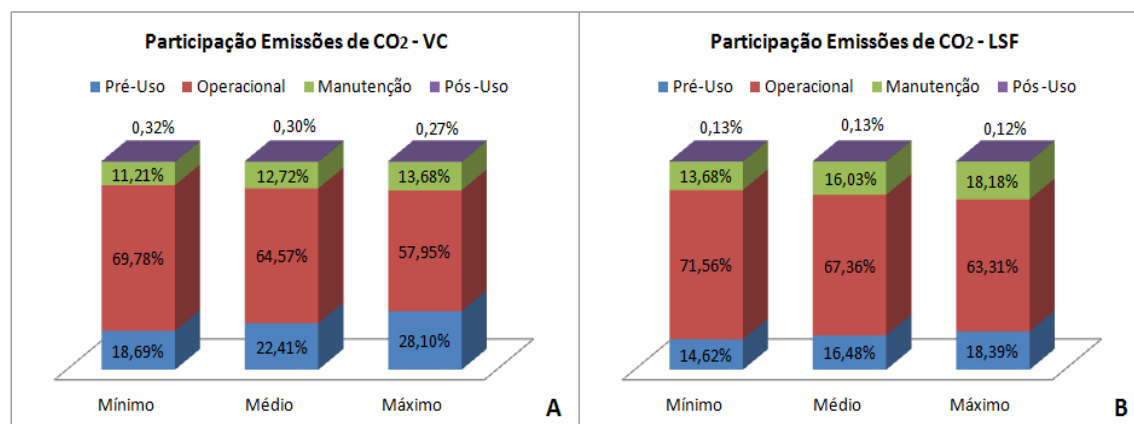


Figura 5.22 – Participação das etapas no ciclo de vida de emissões de CO₂ da EHU.
(A) Vedação Convencional; (B) *Light Steel Framing*.



Observa-se que tanto para o consumo de energia total como as emissões de CO₂ a etapa de uso (operacional e manutenção) foi a mais significativa ao longo do ciclo de vida para a edificação, isto para os dois sistemas de vedação, sendo que a operacional foi superior à de manutenção. As etapas de transporte e de pós-uso foram as que apresentaram menor participação. A etapa de extração e processamento dos materiais apresentou participação considerável. Estes resultados vão ao encontro dos resultados apresentados por Tavares (2006), Paulsen e Sposto (2013), Caldas *et al.* (2015b) e diversos estudos internacionais, apresentados por Sartori e Hestnes (2007), Ramesh *et al.* (2010) e Cabeza *et al.* (2014).

É importante ressaltar que quando se compara a participação da energia e emissões da etapa operacional, as emissões de CO₂ apresentaram menor valor devido à grande participação da fonte hidráulica na matriz energética brasileira, que emite menor quantidade de emissões quando comparada a outras fontes como a térmica.

Comparando as três situações de dados do inventário, quando se utilizam os valores máximos, as etapas de extração e processamento dos materiais e manutenção ganham maior participação no ciclo de vida da EHU, diminuindo a participação da fase operacional, que se manteve constante. Nota-se que devido aos elevados valores máximos de emissões de carbono para o sistema de VC, a participação da etapa de pré-uso chega a uma participação de aproximadamente 27%.

Comparando os dois sistemas construtivos, o LSF apresenta maior participação da etapa de manutenção, enquanto o sistema de VC a participação da etapa de pré-uso.

Por fim, foi quantificado o consumo de energia e emissões de CO₂ totais ao longo do ciclo de vida das EHUs, avaliando agora a participação de cada sistema, incluindo as fases de fabricação, transporte e manutenção, relacionando com a etapa operacional, conforme é apresentado nas figuras 5.23 e 5.24.

Figura 5.23 – Participação dos sistemas e etapa operacional no ciclo de vida energético da EHU. (A) Vedação Convencional; (B) *Light Steel Framing*.

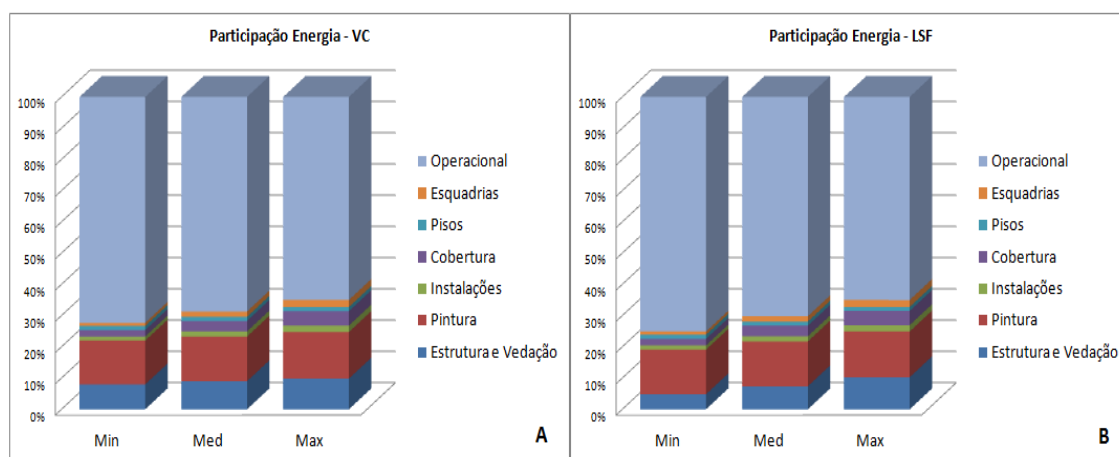
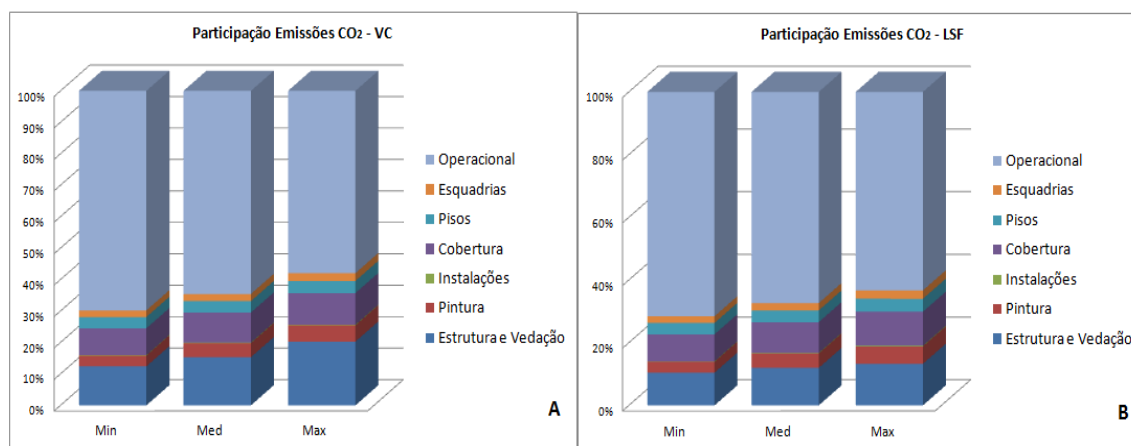


Figura 5.24 – Participação dos sistemas e etapa operacional de CO₂ da EHU. (A) Vedação Convencional; (B) *Light Steel Framing*.



Como já verificado a etapa operacional é a que exerce maior influência, tanto para o consumo de energia como para as emissões de CO₂. No entanto, o que chama atenção é a elevada participação da pintura, para o consumo de energia. Isto foi consequência da elevada parcela da manutenção da pintura somada à alta intensidade energética das tintas. Desta forma conclui-se que além dos sistemas de vedação vertical, o sistema de pintura pode apresentar considerável participação no ciclo de vida energético de uma edificação.

O sistema de cobertura apresentou participação considerável, principalmente nas emissões de carbono. Os outros sistemas da edificação apresentaram menor participação, principalmente as instalações.

5.3 DIRETRIZES DE PROJETO PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS UNIFAMILIARES

A partir dos resultados obtidos quantitativamente no presente trabalho foram elaboradas algumas diretrizes de projeto, de forma qualitativa, consideradas essenciais para a diminuição do consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de uma edificação habitacional, apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resumo da avaliação de desempenho térmico para os dois sistemas de vedação com as variações de temperatura e o nível de desempenho

Etapas	Fases	Diretrizes de Projeto
Pré- uso	Extração e processamento	Especificação de materiais, componentes e sistemas com baixo valor de energia e emissões de CO ₂ incorporadas e que tenham desempenho térmico adequado à localidade da edificação.
	Transporte	Especificação de materiais, componentes e sistemas leves e localizados próximos ao canteiro de obras.
Uso	Operação	Equipamentos eletrônicos: Utilização de equipamentos eficientes, que consomem menor quantidade de energia elétrica. Para o caso do Brasil recomenda-se a utilização de equipamentos classificados pelo Procel na etiqueta A. Foi observado que o chuveiro foi o equipamento de maior consumo para EHU de baixo padrão, desta forma, recomenda-se a instalação de painéis solares para aquecimento da água. Cocção dos alimentos: Recomenda-se o emprego de combustíveis eficientes e mais limpos em termos de emissões de CO ₂ , como o GLP e o gás natural. Devem ser evitados o uso da lenha e da biomassa. Condicionamento ambiental: A especificação de sistemas com desempenho térmico adequado à localidade onde a edificação está localizada é importante, pois diminuirá o consumo de energia para a climatização artificial da edificação. O impacto do desempenho térmico na necessidade de climatização da habitação variará dependendo da localidade e clima.
	Manutenção	Especificação de materiais, componentes e sistemas com baixo valor de energia e emissões de CO ₂ incorporadas. Especificação de materiais, componentes e sistemas duráveis e com elevada vida útil. Atentar para a manutenção dos sistemas a fim de prolongar a vida útil e evitar a reposição total do dado material, componente ou sistema.
Pós- uso	Demolição/Desconstrução	Especificação de sistemas que possam ser desconstruídos ou desmontados ao invés de serem demolidos.
	Transporte resíduos	Especificação de sistemas mais leves e locais de destinação final próximos ao canteiro.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi estudada uma edificação habitacional unifamiliar (EHU) localizada em Brasília-DF, comparando dois sistemas de vedações verticais (externas e internas). Foram comparados a vedação convencional de blocos cerâmicos (VC) e o sistema inovador *light steel framing* (LSF). Foi avaliado o desempenho térmico, e quantificado o consumo de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida destas edificações por meio da ACVE e ACVCO₂, respectivamente. Foram utilizados valores de dados do inventário mínimos, médios e máximos. Os resultados foram apresentados em forma de intervalos.

Em relação ao desempenho térmico, ambos os sistemas atenderam os requisitos e critérios definidos na ABNT NBR 15575-1 (2013) e ABNT NBR 15575-4 (2013). No entanto, a EHU com VC foi a que apresentou melhor desempenho para as condições de Brasília, a partir da avaliação por meio da simulação computacional. A maior capacidade e inércia térmica do sistema de VC foram as responsáveis por este melhor comportamento.

Embora o sistema de VC tenha apresentado melhor desempenho térmico, este comportamento não refletiu de forma significativa no consumo de energia e emissões de CO₂ da fase operacional, pois o condicionamento ambiental, para as premissas adotadas neste estudo, apresentou pequena participação quando comparada aos outros equipamentos eletrônicos e cocção. A diferença de consumo de energia e de emissões, da fase operacional, variou somente entre 1,9% e 1,5% respectivamente.

Em relação à energia total consumida ao longo do ciclo de vida das edificações (ETOT), a edificação com o sistema VC apresentou maior valor de ETOT para as situações de valores mínimos e médios, variando de 28,83 a 32,08 GJ/m². Enquanto a de LSF apresentou intervalos variando entre 28,28 a 32,68 GJ/m². Observa-se uma diferença média de 1,6% entre o consumo de energia ao longo do ciclo de vida das edificações. A etapa de uso foi a que apresentou maior participação, variando de 83 a 88% na EHU de VC e 85 a 92% na de LSF e a etapa de pós-uso a menor participação, menor que 1% para ambas as EHUs.

No aspecto emissões de CO₂, a edificação de VC apresentou maiores valores para as três situações, variando de 1,44 a 1,74 tCO₂/m² enquanto a edificação de LSF de 1,43 a 1,61 tCO₂/m², com uma diferença média, entre as três situações, de 4%. As etapas de uso e pós-uso também foram as que apresentaram maior e menor participação, respectivamente.

Foi verificado neste trabalho que um sistema pode ter menor consumo de energia, no entanto, pode emitir maior quantidade de emissões de CO₂, que foi o caso da edificação com o sistema de VC, para a situação de dados máximos. Conclui-se assim que além de especificar materiais de menor consumo de energia deve-se pensar em como esta energia é gerada, priorizando fontes renováveis e de baixa emissão de carbono.

Comparando os sistemas da edificação, sem considerar a fase operacional, o sistema de pintura seguida pela estrutura e vedações verticais, se mostraram os mais impactantes no ciclo de vida energético; já em relação ao ciclo de vida de emissões de CO₂, o sistema de estrutura e vedações verticais também se mostrou o mais impactante seguido pelo sistema de cobertura.

Pode-se dizer que a principal contribuição deste trabalho foi relacionar aspectos que normalmente se encontram separados nos trabalhos desenvolvidos no Brasil, sendo eles o desempenho térmico (por meio de simulação computacional), consumo de energia e emissões de CO₂, além de ser realizado para todo o ciclo de vida e envolvendo os principais sistemas de uma edificação. Muitos dos trabalhos desenvolvidos no país focam apenas em um ou dois destes aspectos, considerando apenas em algumas etapas do ciclo de vida e sistemas isolados da edificação, como a vedação ou a cobertura.

Por fim, destaca-se que para EHUs, localizadas em Brasília, a partir dos dados adotados neste trabalho o LSF foi o sistema de vedação vertical mais vantajoso do ponto de vista energético e de emissões de carbono.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das lacunas e limitações observadas na presente dissertação apresentam-se aqui algumas sugestões para ser objeto de estudo de pesquisas futuras:

- Estudo para diferentes especificações de LSF, blocos de vedação e blocos estruturais;
- Avaliação de outros sistemas construtivos inovadores ou industrializados como, por exemplo, *light wood framing*, painéis pré-moldados de concreto armado, painéis pré-moldados mistos de concreto armado e blocos cerâmicos e etc.;

- Levantamento de outros aspectos ambientais dos sistemas estudados, como emissões de CO_{2eq}, consumo de água, geração de resíduos e etc.;
- Avaliação de outros requisitos e critérios de desempenho, como por exemplo, o acústico e a estanqueidade;
- Comparação de custos e aspectos sociais do ciclo de vida associados aos aspectos ambientais;
- Avaliação com simulação termoenergética para outras zonas bioclimáticas do Brasil;
- Desenvolvimento de equações para quantificar a variação do consumo de energia operacional ao longo do ciclo de vida das edificações;
- Avaliação de diferentes cenários para a etapa de pós-uso (reuso e reciclagem dos materiais e componentes utilizados).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADALBERTH, K. **Energy use during the Life Cycle of Buildings: a Method.** Building and Environment. v. 32. n. 4. p. 317 – 320. 1997a.

ADALBERTH, K. **Energy use during the Life Cycle of Single – Unit Dwellings: Examples.** Building and Environment. v. 32. n. 4. p. 321 – 329. 1997b.

ADALBERTH, K.; ALMGREN, A.; HOLLERIS PETERSEN, E. **Life-cycle assessment of four multi-family buildings.** International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings. v. 2. p. 1 - 21. 2001.

AGOPYAN, V. et al. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras.** Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1355 p. Setembro de 1998.

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

AKUTSU, M.; LOPES, D. **Simulação do desempenho térmico de edificações.** In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Tecnologia das Edificações. São Paulo: PINI, 1988.

AMANCIO, R. C. A.; FABRICIO, M. M. Avaliação técnica do produto de construção inovador: contexto brasileiro e internacional. In: FABRICIO, M. M.; ONO, R (Ed.). **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras – Manutenção e percepção dos usuários.** Porto Alegre: ANTAC, 2015. p. 13-26.

AMANCIO, R. C. A.; FABRICIO, M. M. Produtos de construção inovadores: análise da avaliação de órgãos homologadores internacionais. In: ENTAC – ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: UFJF, 2012.

ANDRADE, F. R. **Metodologia para Avaliação do Processo de Desconstrução de Estruturas de Concreto Armado Pré-Fabricado de galpões: Estudo de Caso no DF e GO.** Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Edição 2014.** São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 21 p.

_____. **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 46 p.

_____. **NBR 15220-1.** Desempenho Térmico de Edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. ABNT, 2005. 7 p.

_____. **NBR 15220-2**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. ABNT, 2008. 34 p.

_____. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005. 30 p.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-4**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

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.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2014: **Relatório Síntese ano base 2013**. Brasília-DF, 2014.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2015: **Relatório Síntese ano base 2014**. Brasília-DF, 2015.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 2003.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: Para quê? Para quem?** 2ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

BESSA, V. M. T. **Contribuição à Metodologia de Avaliação das Emissões de Dióxido de Carbono no Ciclo de Vida das Fachadas de Edifícios de Escritórios**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BLENGINI, G. A. **Life cycle of buildings, demolition and recycling potential : A case study in Turin, Italy**. Building and Environment. v. 44. p. 319 – 330. 2009.

BRÁS, A.; GOMES, V. **LCA implementation in the selection of thermal enhanced mortars for energetic rehabilitations of school buildings**. Energy and Buildings. v. 92. p. 1 – 9. 2015.

BRASIL. **Decreto nº 7.983 de 8 de abril de 2013**. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências. Diário Oficial. Brasília, 2013.

_____. Caixa Econômica Federal. Disponível em: <http://www14.caixa.gov.br/portal/rse/home/produtos_servicos/selo_casa_azul>. Acesso em 16/08/15.

_____. Programa Nacional de Conservação de Energia (Procel). Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm>>. Acesso em 15/08/15.

BRASILIT. Disponível em: <<http://www.brasilit.com.br/>> Acesso em 08/07/2015. 13h55.

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

BRUNTLAND, G.H. **Our common Future: The world commission on environment and Development.** Oxford. Oxford University Press. 398 p. 1987.

BUENO, C. **Avaliação de ciclo de vida na construção civil: análise de sensibilidade.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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.; NASCIMENTO, M. L. M.; CARVALHO, M. T. M.; SPOSTO, R. M. Diagnóstico da Produção Científica Relacionada à Aplicação do BIM à Metodologia de Avaliação do Ciclo De Vida (ACV). In: IBERO-LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 36, 2015, Rio de Janeiro. **Anais do XXXVI CILAMCE.** Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015a.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M.; 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 - INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 9, 2015, São Carlos. **Anais do IX SIBRAGEC.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2015b.

CAMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais. Guia orientativo para atendimento a NBR 15575.** Brasília, 2013.

CAMPOS, E. F. **Emissão de CO₂ de madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional.** Dissertação (Mestrado). Faculdade Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CAMPOS, P. F. **Light Steel Framing – Uso em Construções Habitacionais Empregando a Modelagem Virtual como Processo e Planejamento.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

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 JÚNIOR, R. **Análise do Ciclo de Vida Energético de Projeto de Habitações de Interesse Social Concebido em Light Steel Framing.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

CARVALHO, J. **Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CARVALHO, M. B. M. **Avaliação de ciclo de vida: Ferramenta do pensamento sistêmico.** Sustentabilidade em Debate, 2p, 2010. Disponível em: <<http://www.red.unb.br/index.php/sust/article/viewFile/736/452>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

CARVALHO, M. T. M. **Metodologia para Avaliação da Sustentabilidade de Habitação de Interesse Social com Foco no Projeto.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CAVALCANTI, E. **Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida – PBACV. Workshop Mercosul. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.** 2012. Disponível em < http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1283451608.pdf> Acesso em 03/07/2015.

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.

CHVATAL, K. M. S. **Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014.

COLLINS, F. **Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint.** International Journal of Life Cycle Assessment. v.15. p. 549-556. 2010.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of building addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic.** Brussels: CEN, 2007.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Benchmarking consumo de energia em edificações.** Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/CTEnergia-benchmark/CBCS_Benchmarking_objetivos.pdf> Acesso em 12/07/2015.

_____. **Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto.** 2014. Disponível em: <<http://www.acv.net.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=DE0D28E8-7BDE-4495-9405-8604588186C5>> . Acesso em 19/06/2015.

_____. **Site institucional.** Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/comite-tematico/atividades-em-andamento.asp?cctCode=F472AF7C-BB46-400C-84C2-7F6FBD7E347E>>. Acesso em 14/01/2016.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e Estatística.** 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COTTA, J. O.; VIEIRA, J. L. O desempenho térmico de ambientes de trabalho nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. In: GONÇALVES, J. K.; BODE, K. (Org.). **Edifício Ambiental.** Cap. 3. p. 79 -102. 2015.

CRASTO, R. C. M.; FREITAS, A. M. S **Steel Framing: Arquitetura.** Série Manual de Construção em Aço. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006.

DESIGN BUILDER. **Site oficial.** Disponível em <<http://www.designbuilder.co.uk>>. Acesso em 05/10/2015.

DEVI L, P; PALANIAPPAN, S. **A case study on life cycle energy use of residential buildings Southern India.** Energy and Buildings. v. 80. p. 247-259. 2014.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de Aço: conceitos, técnicas e linguagem.** 3ª ed. São Paulo: Editora Ziguarte, 2000.

ETERNIT. Disponível em: <<http://www.etermit.com.br/produtos/solucoes-construtivas/placas-cimenticias/eterplac-standard>> Acesso em 08/07/2015.

FARIA, R. **Governo cria programa de incentivos para geração caseira de energia elétrica.** Área construída. Técnica. Edição 226, ano 24, janeiro de 2016.

FAY, R. G.; TRELOAR, U.; IYER-RANIGA. **Life-cycle energy analysis of buildings: a case study.** Building Research and Information. v. 28. p. 31–41. 2000.

FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço. 2006.

FREITAS, M. L. G.; CARVALHO FILHO, A. C.; BRAYNER, F. M. M. A Desconstrução como Fator de Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil. In: V ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO- AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. **Anais do V ELECS.** Recife, 2009.

FRENETTE, C. D.; BULLE, C.; BEAUREGARD, R.; SALENIKOVICH, A.; DEROME, D. **Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies.** Building and Environment, v. 45. p. 2111-2122. 2010.

GARCIA, K. R. P. **Potencial de reducción de las emisiones de CO₂ y la energía incorporada en la construcción de viviendas em Brasil mediante el incremento Del uso de la madera.** 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Investigación em la Energía y El Medio Ambiente em la Arquitectura e Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidad Politécnica de Cataluña e Universidade de São Paulo , São Paulo, 2014.

GERHARD, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa.** 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIVONI, B. **Confort climate analysis and building design guidelines.** Energy and Buildings, v. 18, p. 11-23. 1992.

GOLDEMBERG, J. **Energia e Desenvolvimento Sustentável**. Série Sustentabilidade, Vol. 4. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

GOMES, A. P.. **Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares em Light Steel Framing**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GOULART, S., LAMBERTS, R. e FIRMINO, S, **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades Brasileiras**, PW ed., São Paulo, dez. 1997.

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**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

GOUVEIA, G. M. M. M.; SPOSTO, R. M. **Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM” em Brasília**. *Arquitextos*, São Paulo, ano 16, n. 181.06, Vitruvius, jun. 2015.

GRAF, G. F. **Transmitância térmica e energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GRIGOLETTI, G. C. **Caracterização de Impactos Ambientais de Indústrias de Cerâmica Vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GUIMARÃES, G. D. **Análise Energética na Construção de Habitações**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Nuclear e Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A. **Life cycle primary energy analysis of residential buildings**. *Energy and Buildings*. v.42. p. 210 – 220. 2010.

HENDRIKS, C. F.; NIJKERK, A. A.; VAN KOPPEN, A. E. **O Ciclo da Construção**. 1ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2007.

HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. **A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert**. *Energy and Buildings*.v.40.p. 837-848. 2008.

INABA, R. **A Importância Do Aço na Construção a Seco**. 2014. Disponível em< <http://www.cbca-iabr.org.br/upfiles/fckeditor/file/2014-03-21-a-importancia-do-aco-na-construcao-a-seco.pdf>> Acesso em 04/07/2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). Disponível em: <[HTTP://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp)> Acesso em 04/07/2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílio – Síntese de Indicadores 2012**. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Desenvolvimento sustentável e avaliação do ciclo de vida**. Brasília, 2014.

_____. **Diálogos Setoriais no Brasil e União Europeia Desafios e Soluções para o Fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília, 2015.

IPCC. 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 2- Energy. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>> Acesso em 20/03/2015.

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.

JOHN, V.M. **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. In: ISAIA, G. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 97-121.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese de livre docência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KARIMPOUR, M.; BELUSKO, M.; XING, K.; BRUNO, F. **Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis**. Building and Environment. v. 73. p. 106 – 114. 2014.

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

KEOLEIAN, G. S.; BLANCHARD, P.; REPPE. **Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house**, Journal of Industrial Ecology. v.4. p. 135–156. 2001.

KIM, K. H. **A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system**. Energy and Buildings. v. 43. p. 3436-3445. 2011.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Site institucional**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/>> Acesso em 15/07/2015.

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

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

LP BRASIL. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/institucional/lpbrasil.asp>> Acesso em 07/07/2015.

MACHADO, E. **Excelentes Perspectivas de Crescimento no Mercado Residencial Imobiliário Brasileiro**. Revista Arquishow. São Paulo, março de 2008.

MACIEL, A. C. F. **Energia incorporada de fachadas ventiladas. Estudo de caso para edificação habitacional em Brasília-DF**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MASTELLA, D. V. **Comparação Entre o Processo de Produção de Blocos Cerâmicos e de Concreto Para Alvenaria Estrutural, Através da Análise do Ciclo de vida**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MC GRATH, T.; NANUKUTTAN, S.; OWENS, K.; BASHEER, M.; KEIG, P. **Retrofit versus new-build house using life-cycle assessment**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability. v. 166. p. 122-137. 2013.

METHA; P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3^a ed. McGraw-Hill. 2006.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). **Subsídios para a Elaboração de Uma Estratégia Industrial Brasileira para Economia de Baixo Carbono. Caderno 1 – Nota Técnica Mensuração, Relato e Verificação de Inventários Bottom – up de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1416842958.pdf> Acesso em 20/07/15.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MITHRARATNE, N.; VALE, B. **Life cycle analysis model for New Zealand houses**. Building and Environment. v. 39. p. 483 – 492. 2004.

MUNARIM, U. **Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado: análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

NABUT NETO, A.C. **Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas. Estudo de Caso do Steel Frame para Utilização em Brasília**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NORDBY, A. S.; SHEA, A. D. **Building Materials in The Operational Phase – Impacts of Direct Carbon Exchanges and Hygrothermal Effects** . Journal of Industrial Ecology. v. 17. n.5 p. 763-776. 2013.

OLIVEIRA, F. R. M. **Integração de Indicadores De Desempenho Técnico-Funcional, Ambiental E Econômico De Sistemas Estruturais Verticais Em Concreto**. Tese

(Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

OLIVEIRA, L. B. **A influência do sistema de fachada viva em manta no ciclo de vida energético de uma residência unifamiliar em clima tropical.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). **Site institucional.** Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/cop21/>> Acesso em 25/01/2016.

PALÁCIO, C. D. U. **Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico. Estudo de caso com utilização do Light Steel Frame no Entorno do DF.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

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.** Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PEDROSO, G. M.; SPOSTO, R. M. Energia incorporada de sistemas de vedação de habitações na fase de desconstrução: estudo de caso para o DF, Brasil. LATIN AMERICAN AND EUROPEAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS AND COMMUNITIES. **Anais do Euro ELECS.** 2015. Guimarães, Portugal p. 1327-1336.

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

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. **Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático.** Ambiente Construído, v.10, nº 1, p.31-51, 2010.

PEREIRA, M. F. **Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PURNELL, P.; FARAH, E.; SHORT, N. R. **Supercritical carbonation of lime based sustainable structural ceramics.** Advances in Applied Ceramics. p. 280-286. 2010.

RADHI, H., SHARPLES, S. **Global Warming implications of façade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain.** Environmental Impact Assessment Review. v. 38. p. 99-108. 2013.

- RAKSHAN, K.; FRIESS, W. A.; TAJERZADEH, S. **Evaluating the sustainability of improved building insulation: A case study in the Dubai residential environment.** Building and Environment. v. 67. p. 105-110. 2013.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. **Life cycle energy analysis of buildings: An overview.** Energy and Buildings. v.42. p. 1592-1600. 2010.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural.** 1 ed. Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores: Ed. Da Universidade, UFRGS, 1985.
- RODRIGUES, F. C. **Steel Framing: Engenharia.** 1 ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2006.
- ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. **Metrópoles e Desafio Urbano Frente ao Meio Ambiente.** Série Sustentabilidade, Vol. 6. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- ROMÉRO, M. A.; REIS, L. B. **Eficiência Energética em Edifícios.** Série Sustentabilidade. 1 ed. São Paulo: Editora Manolé, 2012.
- SAADE, M. R. M. **Influência Da Alocação de Impactos na Indústria Siderúrgica sobre a Avaliação de Ciclo De Vida de Cimentos.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.
- SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente.** São Paulo: Studio Nobel: Fundap, 1993.
- SANTOS FILHO, V. M. **Análise de Desempenho Térmico e Acústico de Fachadas Ventiladas de Porcelanato à Luz da Norma de Desempenho. Estudo de Caso em Brasília - DF.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- SARTORI, I.; HESTNES, A. G. **Energy Use In The Life Cycle of Conventional and Low – Energy Buildings: A Review Article.** Energy and Buildings. v.39. p. 249 – 257. 2007.
- SEIFFERT, M. E. B. **Gestão Ambiental – Instrumentos, esferas de ação e educação ambiental.** 2 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2011.
- SILVA, A. O. **Estudo comparativo do ciclo de vida e de custo de pilar de diferentes traços de concreto.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- SILVA, B. V. **Construção de Ferramenta Para a Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- SILVA, J. G. **Análise do Ciclo de Vida de Tijolos Prensados de Escória de Alto Forno.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

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.

SILVESTRE, J. D.; BRITO, J.; PINHEIRO, MD. **Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials e calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle**. Journal of Cleaner Production. v. 66. p. 37-45. 2014.

SINDICATO DA CONSTRUÇÃO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). **Guia Metodológico para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Construção Civil**. São Paulo, 2013.

SOMBRIO, C. M. O. **ACV de painéis de blocos cerâmicos e concreto armado: um exercício de aplicação do manual do ILCD**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SOUZA, R. B. **Estudo da Retração em Fibrocimento Reforçado com Fibra Polimérica**. Tese (Doutorado) Programa de Pós – Graduação em Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. **Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva**. Ambiente Construído, v.4, n° 4, p.33-46, 2004.

SPOSTO, R. M. **Gestão e tecnologia para a sustentabilidade e qualidade de componentes e alvenaria cerâmicos**. FINEP, Habitare, Brasília, 2004.

STACHERA JR, T. CASAGRANDE JR, E. F. Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 9., 2007, Curitiba. **Anais ...** Curitiba: UFPR, 2007. p. 1-13.

TABELA DE COMPOSIÇÃO DE PREÇOS PARA ORÇAMENTOS (TCPO). **TCPO 14**. 14 ed. São Paulo: Pini, 2012.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. **Methodology of CO₂ emission in the life cycle of office building façades**. Environmental Impact Assessment Review. v. 33. p. 41-47. 2012.

TAE, S.; BAEK, C.; SHIN, S. **Life cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete**. Environmental Impact Assessment Review. v.58. p. 253-260. 2011.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de Conceitos da Ecologia Industrial para a Produção de Materiais Ecológicos: O Exemplo do Resíduo de Madeira**. Dissertação (Mestrado) - Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

THORMARK, C.. **The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building.** Building and Environment. v. 41. p. 1019-1026. 2006.

UNITED NATIONS (UN). United Nations Conference on Environment & Development. Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992. **Agenda 21.** Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>> Acesso em: 12/07/2015.

VILJOEN, A.; BOHN, K. **The Environmental Impact of Building Materials.** 2001. In: Ecohouse: A Design Guide. ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. Capítulo 2. p. 45-69. Architecture Press, Oxford, MA, USA. 2001. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/142742043/Ecohouse-a-Design-Guide2001>>. Acesso em 18/08/2015.

WEN, T. J.; SIONG, H. C.; NOOR, Z. Z. **Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: Case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia.** Energy and Buildings. v. 93. p. 295-302. 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A – FATORES DE ENERGIA (FE) E EMISÕES DE CO₂ (FCO₂) DOS MATERIAIS

Tabela A.1 – Fatores de Energia (FE) para diversos materiais de construção obtidos de estudos internacionais.

MATERIAIS	FE (MJ/Kg Material)													
	Boustead e Hancock ¹	Blanchard; Reppe ¹	Scheuer; Reppe ¹	Alcorn ¹	Lawson ¹	Andersen ¹	Monahan ¹	Bribián et al ¹	Tae et al	Kim	Radhi e Sharples	Bastos et al.	Devi L e Palaniappan	Atmaca e Atmaca
País	Reino Unido	USA	USA	Nova Zelândia	Austrália	Dinamarca	Reino Unido	Espanha	Coreia	EUA	Reino de Bahrain	Portugal	Índia	Turquia
Ano	1979	1998	2003	1996	1996	1993	2010	2011	2011	2011	2013	2014	2014	2015
Aço	36,00	37,30	30,60	32,00	-	37,22	42,70	24,34	35,30	30,00	-	-	35,10	21,6
Alumínio	251,00	207,80	207,00	191,00	170,00	-	-	136,80	-	169,00	155,88	-	-	-
Areia	0,60	-	0,60	0,10	-	-	-	-	0,05	-	-	-	0,15	-
Argamassa	-	1,90	0,10	2,10	-	-	6,42	2,17	-	-	1,80	0,97	-	1,80
Blocos de concreto	1,40	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	0,83	-	0,75	-
Cal hidratada	5,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,50	5,63	-
Cerâmica (blocos)	2,60	-	2,70	2,50	2,50	-	8,17	3,56	-	-	2,99	3,00	-	6,90
Cerâmica (piso)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,00	3,30	12,00
Cerâmica (telhas)	-	4,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,30	6,50
Cimento	7,80	-	3,70	7,80	5,60	-	-	4,23	6,92	-	-	-	6,85	3,17
Concreto	1,30	1,60	0,50	1,40	1,90	0,88	-	1,10	-	-	-	1,10	-	0,80
Lã de rocha	-	-	-	-	-	-	-	26,39	-	-	-	-	-	16,80
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	-	-	-	0,30	0,50	-	-	18,39	-	-	-	-	-	-
Madeira MDF	-	-	-	11,90	-	-	-	27,30	-	-	-	10,00	-	11,00
Placa cimentícia	-	1,90	0,10	2,10	-	-	-	2,17	-	-	1,55	-	-	-
Placa de Gesso	-	3,80	-	4,50	2,90	10,05	-	-	-	-	-	-	-	-
Placa de OSB	5,50	5,80	10,80	2,50	3,40	13,19	-	36,33	-	-	-	-	-	-
PVC	96,30	77,40	60,70	70,00	80,00	103,21	-	-	708,42	-	-	-	106,00	77,20
Tint	-	77,60	-	88,50	-	29,31	-	-	652,69	-	-	-	144,00	10,50

¹ Retirado de Tavares (2006).

Tabela A.2 – Fatores de Energia (FE) para diversos materiais e componentes de construção obtidos de estudos nacionais.

MATERIAIS	MJ/Kg Material											
	MIC-Cetec MG ¹	Gonçalves ¹	Tavares	Spoto	Graf	Nabut Neto	Silva	Rossi	Souza	Falcão	CBCS	Silva e Silva
País	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil
Ano	1982	1985	2006	2004	2011	2011	2013	2013	2013	2013	2014	2015
Aço	21,81	25,59	30,00	-	-	-	-	-	-	-	-	10,27
Alumínio	95,87	-	98,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	0,02	0,06	0,05	-	-	-	-	-	0,08	0,03	-	-
Argamassa	0,54	3,47	2,10	-	-	2,10	-	-	-	-	-	-
Cal hidratada	4,03	-	-	-	-	-	4,00	-	-	-	-	0,24
Argamassa colante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
Cerâmica (blocos)	2,87	3,60	2,90	3,92	-	-	-	-	-	-	-	2,52
Cerâmica (piso)	-	-	13,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cerâmica (telhas)	12,56	5,76	5,40	-	-	-	-	-	-	-	-	1,59
Cimento	4,96	4,04	4,20	-	-	-	3,00	-	-	-	2,61 ²	2,47 ³
Concreto	0,56	-	1,20	-	-	-	-	13,51	-	-	-	0,42 ⁴
Lã de rocha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	-	-	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira MDF	8,37	-	9,00	-	-	-	16,00	-	-	-	-	15,08 ⁴
Placa cimentícia	0,54	3,47	2,10	-	6,00	-	-	-	-	-	-	-
Placa de Gesso	-	-	4,50	-	4,50	-	-	-	-	-	-	-
Placa de OSB	-	-	7,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PVC	0,54	3,47	80,00	-	-	-	9,00	-	-	-	-	65,24
Tinta	1,25	2,19	74,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Retirado de Tavares (2006).

² Foram considerados os valores médios.

³ Considerado CP II-E-32.

⁴ Foi convertido em kgCO₂ por kg de material a partir da massa específica.

Tabela A.3 – Fatores de Emissões (FCO₂) para diversos materiais e componentes de construção obtidos de estudos internacionais.

Materiais	FCO ₂ (KgCO ₂ /Kg Material)							
	<i>Gonzalez et al¹</i>	<i>Bribían et al</i>	<i>Tae et al</i>	Monahan ¹	Kim	Radhi e Sharples	<i>Bastos et al.</i>	Atmaca e Atmaca
País	Espanha	Espanha	Coreia	Reino Unido	EUA	Reino de Bahrain	Portugal	Turquia
Ano	2006	2011	2011	2010	2011	2013	2014	2015
Aço	0,517	1,526	3,520	3,800	0,900	-	-	1,900
Alumínio	-	8,570	-	-	9,900	8,250	-	-
Areia	-	-	0,003	-	-	-	-	-
Argamassa	-	0,241	-	0,390	-	0,150	0,160	0,100
Argamassa colante	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal hidratada	-	-	-	-	-	-	0,900	-
Cerâmica (blocos)	-	0,271	-	0,520	-	0,230	0,240	0,600
Cerâmica (piso)	-	-	-	0,520	-	-	0,780	0,800
Cerâmica (telhas)	-	0,406	-	-	-	-	-	0,500
Cimento	-	0,819	0,556	0,390	-	-	-	-
Concreto	-	0,137	-	-	-	-	0,100	0,100
EPS	-	7,360	-	-	-	2,550	-	-
Lã de rocha	-	1,510	-	-	-	-	-	1,100
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	-	0,267	1,200	-	-	-	-	-
Madeira MDF	-	0,541	-	-	-	-	0,310	0,700
Placa cimentícia	-	0,241	-	-	-	0,210	-	-
Placa de Gesso	-	-	-	-	-	-	-	-
Placa de OSB	-	0,620	-	-	-	-	-	-
PVC	-	-	50,870	-	-	-	-	-
Tinta	-	-	48,010	-	-	-	-	0,900

¹ Retirados de Nabut Neto (2011).

Tabela A.4 – Fatores de Emissões (FCO₂) para diversos materiais e componentes de construção obtidos de estudos nacionais

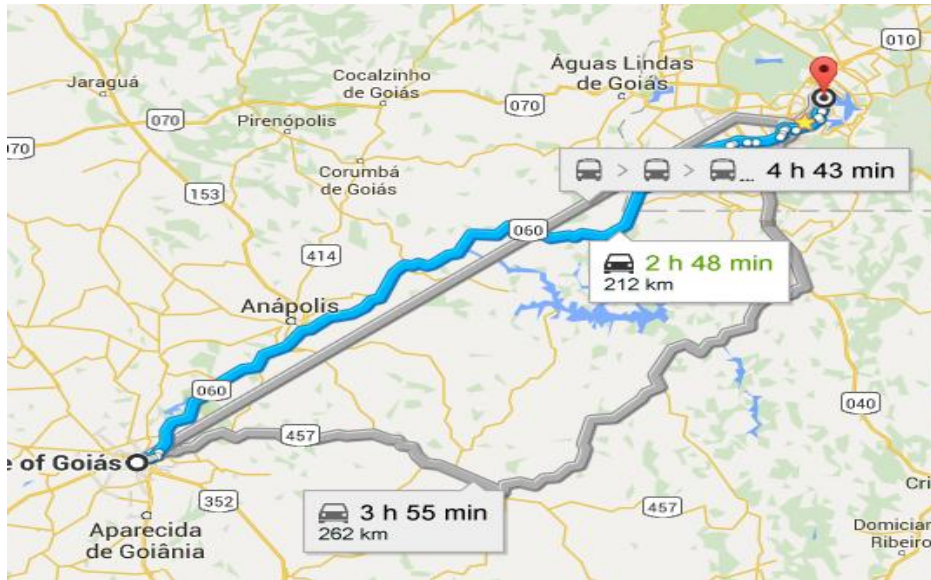
Materiais	Stachera e Casagrande ¹	Soares e Pereira	Carvalho	Nabut Neto	Costa	Taborianski e Prado	Silva	Souza	CBCS	Silva e Silva
	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil
Ano	2007	2002	2002	2011	2012	2012	2013	2013	2014	2015
Aço	1,450	-	-	-	1,830	-	-	-	-	1,550
Alumínio	-	-	-	-	4,030	3,162	-	-	-	-
Areia	0,014	-	-	-	0,007	-	-	0,007	-	-
Argamassa	-	-	-	0,160	0,163	-	-	-	-	-
Argamassa colante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,100
Cal hidratada	0,786	-	-	-	0,810	1,270	1,100	-	-	0,740
Cerâmica (blocos)	0,380	0,330	-	-	0,909	0,169	-	-	-	0,230
Cerâmica (piso)	0,857	-	-	-	0,908	-	-	-	-	-
Cerâmica (telhas)	-	-	-	-	0,908	-	-	-	-	0,630
Cimento	0,969	-	0,565	-	0,631	0,670	0,580	-	0,630	0,370 ²
Concreto	-	-	-	-	0,156	-	0,160	-	-	0,100 ³
EPS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã de rocha	-	-	-	-	-	0,685	-	-	-	-
Madeira - aparelhada seca ao ar livre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,038 ³
Madeira MDF	-	-	-	-	0,401	0,860	-	-	-	-
Placa cimentícia	-	-	-	-	0,160	-	-	-	-	-
Placa de Gesso	-	-	-	-	0,470	0,430	-	-	-	-
Placa de OSB	-	-	-	-	0,343	-	-	-	-	-
PVC	-	-	-	-	0,553	0,339	-	-	-	5,920
Tinta	-	-	-	-	-	1,640	-	-	-	-

¹ Retirados de Nabut Neto (2011).

² Considerado CP II-E-32.

³ Foi convertido em kgCO₂ por kg de material a partir da massa específica.

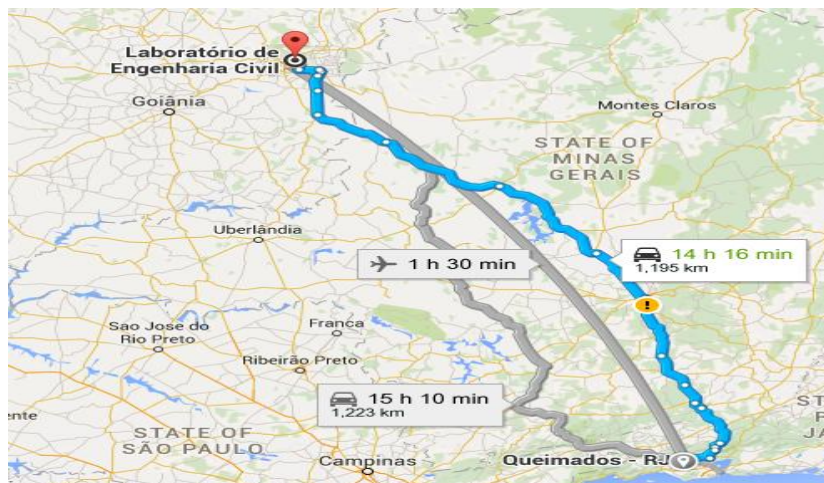
Placas Cimentícia



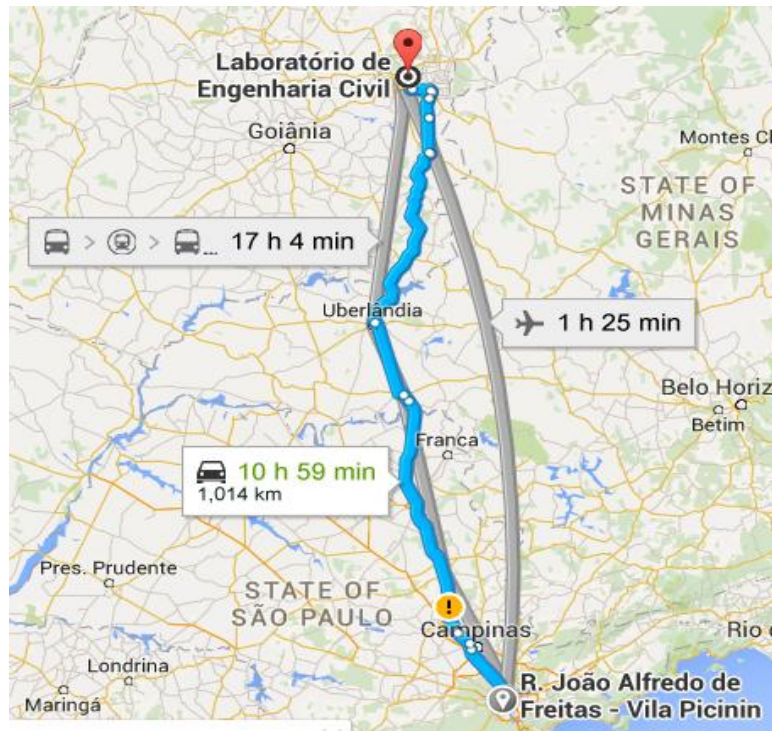
Painéis de OSB



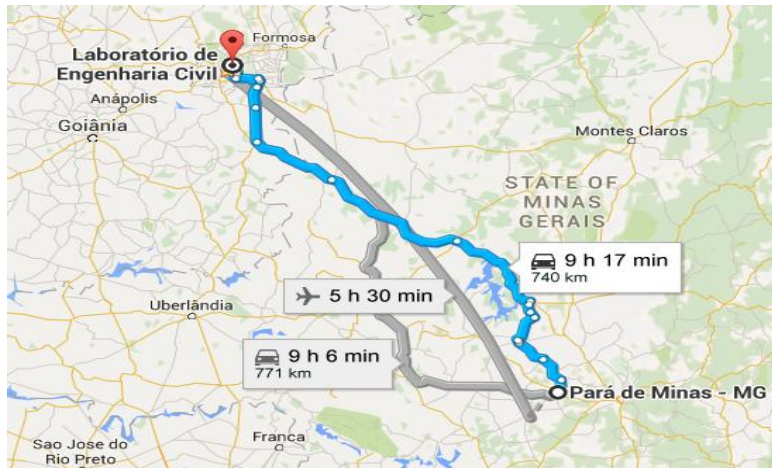
Placa de Gesso



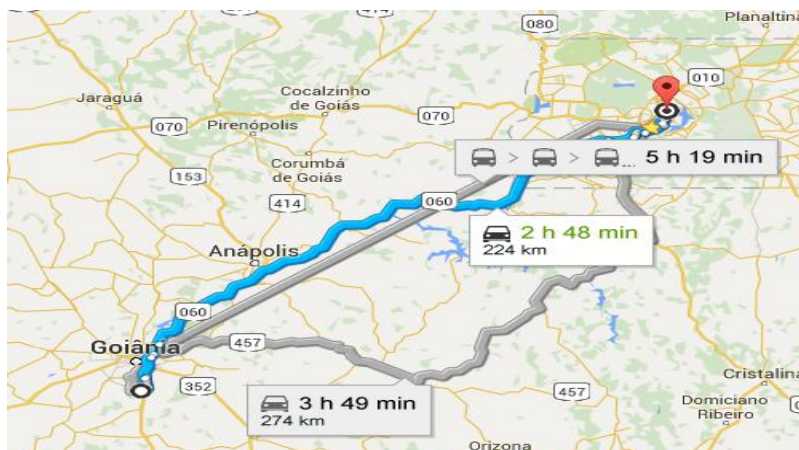
Lã de Rocha



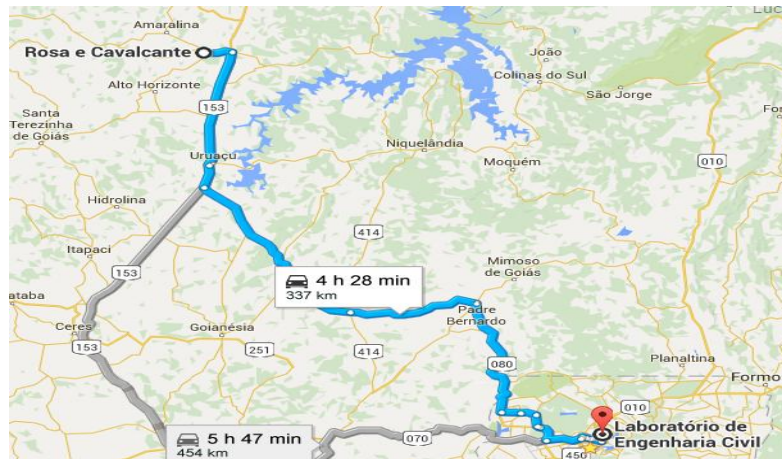
Revestimento Cerâmico



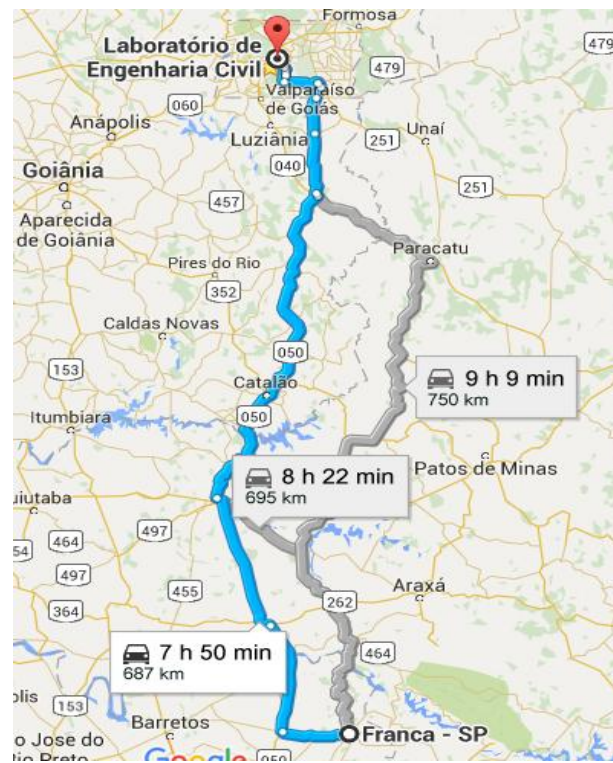
Tintas



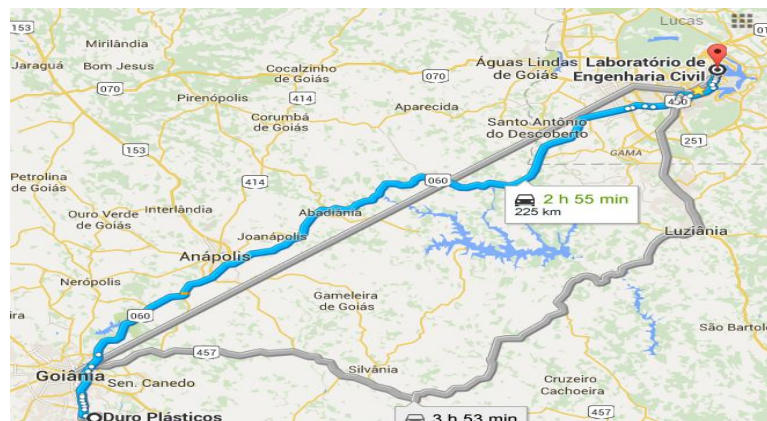
Telhas Cerâmicas



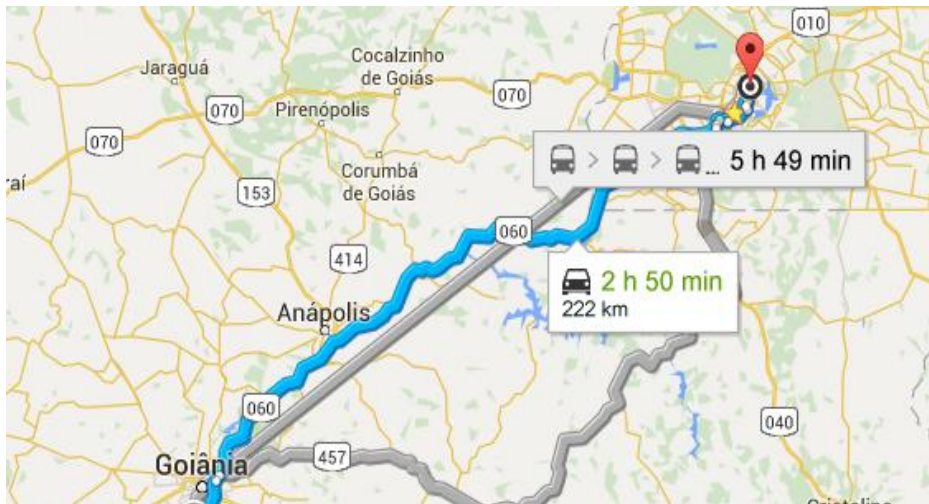
Madeira (Cobertura)



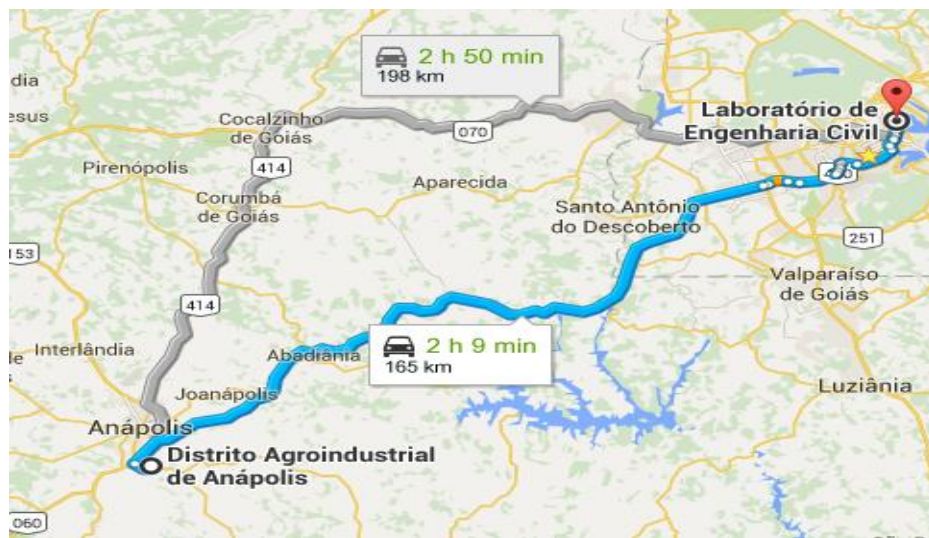
Forro de PVC



Portas de Madeira



Tubos de PVC



APÊNDICE C – CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÕES DE CO₂ OPERACIONAL

Tabela C.1 – Cálculo do fator de emissões de CO₂ para a matriz elétrica brasileira.

Fontes Energéticas	CO ₂ (kgCO ₂ /MJ)	2014 BEN (2015)		2013 BEN (2014)		2012 BEN (2013)		2011 BEN (2012)		2010 BEN (2011)		2009 BEN (2010)	
		%	FCO ₂	%	FCO ₂	%	FCO ₂	%	FCO ₂	%	FCO ₂	%	FCO ₂
Hidráulica	0,0240	65,2%	0,016	70,6%	0,0169	76,9%	0,0185	81,9%	0,01966	74,0%	0,0178	76,9%	0,01846
Biomassa	0,1019	7,4%	0,008	7,6%	0,0077	6,8%	0,0069	6,6%	0,00672	4,7%	0,0048	5,4%	0,0055
Eólica	0,0040	2,0%	8E-05	1,1%	4E-05	0,9%	4E-05	0,5%	0,00002	0,4%	2E-05	0,2%	8E-06
Gás Natural	0,0561	13,0%	0,007	11,3%	0,0063	7,9%	0,0044	4,4%	0,00247	6,8%	0,0038	2,6%	0,00146
Derivados de Petróleo	0,0757	6,8%	0,005	4,4%	0,0033	3,3%	0,0025	2,5%	0,00189	3,6%	0,0027	2,9%	0,0022
Nuclear	0,0039	2,5%	1E-04	2,4%	9E-05	2,7%	0,0001	2,7%	0,00011	2,7%	0,0001	2,5%	9,8E-05
Carvão e Derivados	0,0961	3,2%	0,003	2,6%	0,0025	1,6%	0,0015	1,4%	0,00135	1,3%	0,0012	1,3%	0,00125
Importação ¹	0,0240	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	6,5%	0,0062	8,1%	0,00778
FCO ₂ Final (kgCO ₂ /MJ)		0,039		0,037		0,034		0,032		0,037		0,037	
FCO₂ Médio (kgCO₂/MJ)		0,036											

APÊNDICE D – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EI) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂I) ETAPA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS

Tabela D.1 – Planilha de cálculo do consumo de energia (EI) e emissões (ECO₂I) da extração e processamento dos materiais e componentes – sistema de VC.

Dados									Cálculos		
Materiais e componentes	Quantidade Original (kg/m ²)	Participação	Participação por Sistema	FE (MJ/kg)	Valores dos dados	FCO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Valores dos dados	Perdas	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	EI (MJ/EHU)	ECO ₂ I (KgCO ₂ /EHU)
Sistema de Vedação Vertical											
Bloco cerâmico de vedação	165,00	18%	76,3%	3,11	Med	0,40	Med	15%	189,8	590,8	76,6
Argamassa (revestimento e assentamento)	375,02	40%		2,10	Med	0,16	Med	20%	450,0	945,0	72,7
Concreto (estrutura)	138,29	15%		0,81	Med	0,14	Med	9%	150,7	121,9	20,9
Madeira (formas - estrutura)	28,31	3%		13,36	Med	0,53	Med	15%	32,6	435,0	17,2
Aço (estrutura)	10,90	1,2%		20,14	Med	1,61	Med	10%	12,0	241,4	19,3
Outros Sistemas da Edificação											
Tinta (pintura)	4,9	1%	0,5%	80,26	Med	1,27	Med	15%	5,6	450,4	7,1
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	5,6	0,6%	0,6%	79,97	Med	0,45	Med	1%	5,6	450,5	2,5
Telhas Cerâmicas (cobertura)	67,1	7%	9,2%	3,50	Med	0,77	Med	10%	73,7	257,7	56,7
Madeira (cobertura)	17,2	2%		0,50	Med	0,04	Med	4%	17,9	8,9	0,7
PVC (forro - cobertura)	2,4	0,3%		79,97	Med	0,45	Med	1%	2,4	190,3	1,1
Cimento (pisos)	14,2	2%	11,0%	3,1	Med	0,63	Med	20%	17,1	56,2	11,1
Areia (pisos)	69,2	7%		0,05	Med	0,01	Med	20%	83,1	4,0	0,8
Argamassa colante (pisos)	8,6	1%		0,99	Med	1,01	Med	20%	10,3	10,2	10,4
Revestimento Cerâmico (pisos)	11,0	1%		13,00	Med	0,88	Med	2%	11,2	145,3	9,9
Aço (esquadrias externas)	14,4	2%	2,4%	20,14	Med	1,61	Med	2%	14,6	294,7	23,6
Madeira (esquadrias internas)	8,5	1%		13,36	Med	0,53	Med	1%	8,6	115,3	4,6
Massa Total (kg/m ²)	940,6	100%	100%	-	-	-	Med	-	1085,2	4,32	0,34

Tabela D.2 - Planilha de cálculo do consumo de energia (EI) e emissões (ECO₂I) da extração e processamento dos materiais e componentes – sistema de LSF.

Dados									Cálculos		
Materiais e componentes	Quantidade Original (kg/m ²)	Participação	Participação por Sistema	FE (MJ/kg)	Valores dos dados	FCO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Valores dos dados	Perdas	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	EI (MJ/EHU)	ECO ₂ (KgCO ₂ /EHU)
Sistema de Vedação Vertical											
Aço (Guias e Montantes)	14,95	4%	45,8%	20,14	Med	1,61	Med	10%	16,45	331,18	26,48
Painéis de OSB	71,24	17%		6,00	Med	0,48	Med	15%	81,92	491,54	39,45
Chapa de Gesso	49,06	12%		4,04	Med	0,45	Med	9%	53,48	216,05	24,07
Chapa Cimentícia	44,39	11%		2,85	Med	0,20	Med	9%	48,39	138,11	9,86
Lã de Rocha	9,03	2%		21,60	Med	1,10	Med	0%	9,03	195,08	9,92
Outros Sistemas da Edificação											
Tinta (pintura)	4,9	1,2%	1,2%	80,3	Med	1,27	Med	15%	5,6	450,4	7,1
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	5,6	1%	1,4%	80,0	Med	0,45	Med	1%	5,6	450,5	2,5
Telhas Cerâmicas (cobertura)	67,1	16%	21,1%	3,5	Med	0,77	Med	10%	73,7	257,7	56,7
Madeira (cobertura)	17,2	2%		0,5	Med	0,04	Med	10%	18,9	9,5	0,7
PVC (forro - cobertura)	2,4	1%		80,0	Med	0,45	Med	1%	2,4	190,3	1,1
Cimento (pisos)	14,2	3%	25,0%	3,1	Med	0,63	Med	20%	17,1	56,2	11,1
Areia (pisos)	69,2	17%		0,0	Med	0,01	Med	20%	83,1	4,0	0,8
Argamassa colante (pisos)	8,6	2%		1,0	Med	1,01	Med	20%	10,3	10,2	10,4
Revestimento Cerâmico (pisos)	11,0	3%		13,0	Med	0,88	Med	2%	11,2	145,3	9,9
Aço (esquadrias externas)	14,4	3%	5,6%	20,1	Med	1,61	Med	2%	14,6	294,7	23,6
Madeira (esquadrias internas)	8,5	2%		13,4	Med	0,53	Med	1%	8,6	115,3	4,6
Massa Total (kg/m ²)	411,8	98%	100%	-	-	-	-	-	460,5	3,36	0,24

APÊNDICE E – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (ET) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂T) ETAPA DE TRANSPORTES DOS MATERIAIS

Tabela E.1 - Planilha de cálculo do consumo de energia (ET) e emissões (ECO₂T) do transporte dos materiais e componentes – Sistema de VC.

Dados					Cálculos		
Materiais e componentes	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	Cidade Fábrica	Cidade Obra	Distância (km)	Consumo diesel (L/t.Km)	ET (MJ/EHU)	ECO ₂ T (KgCO ₂ /EHU)
Sistema de Vedação Vertical							
Bloco cerâmico de vedação	189,8	Rondonópolis - MT	Brasília - DF	917	0,0137	84,8	7,5
Argamassa (revestimento e assentamento)	450,0	Sobradinho - DF		29,7	0,0137	6,5	0,6
Concreto (estrutura)	150,7	Brasília - DF		16,8	0,0137	1,2	0,1
Madeira (formas - estrutura)	32,6	União da Vitória - RS		470	0,0137	23,3	2,1
Aço (estrutura)	12,0	Ouro Branco - MG		843	0,0137	4,9	0,4
Outros Sistemas da Edificação							
Tinta (pintura)	5,6	Aparecida de Goiania	Brasília - DF	224	0,0137	0,6	0,1
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	5,6	Anápolis		165	0,0137	0,5	0,04
Telhas Cerâmicas (cobertura)	73,7	Mara Rosa - GO		337	0,0137	12,1	1,1
Madeira (cobertura)	17,9	Franca - SP		687	0,0137	6,0	0,5
PVC (forro - cobertura)	2,4	Aparecida de Goiânia - GO		225	0,0137	0,3	0,02
Cimento (piso)	17,1	Sobradinho - DF		29,7	0,0137	0,2	0,02
Areia (piso)	83,1	Ipameri - GO		277	0,0137	11,2	1,0
Argamassa colante (piso)	10,3	Sobradinho - DF		29,7	0,0137	0,1	0,0
Revestimento Cerâmico (piso)	11,2	Pará de Minas - MG		740	0,0137	4,0	0,4
Aço (esquadrias externas)	14,6	Goiânia - GO		214	0,0137	1,5	0,1
Madeira (esquadrias internas)	8,6	Goiânia - GO		222	0,0137	0,9	0,1
Total						0,158	0,014

Tabela E.2 - Planilha de cálculo do consumo de energia (ET) e emissões (ECO₂T) do transporte dos materiais e componentes – Sistema de LSF.

Dados					Cálculos		
Materiais e componentes	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	Cidade Fábrica	Cidade Obra	Distância (km)	Consumo diesel (L/t.Km)	ET (MJ/EHU)	ECO ₂ T (KgCO ₂ /EHU)
Sistema de Vedação Vertical							
Aço (Guias e Montantes)	16,45	Brasília - DF	Brasília - DF	16,9	0,0137	0,14	0,01
Painéis de OSB	81,92	Ponta Grossa - PR		1298	0,0137	51,83	4,59
Chapa de Gesso	53,48	Queimados - RJ		1195	0,0137	31,15	2,76
Chapa Cimentícia	48,39	Goiânia - GO		213	0,0137	5,02	0,44
Lã de Rocha	9,03	São Paulo - SP		1014	0,0137	4,47	0,40
Outros Sistemas da Edificação							
Tinta (pintura)	5,6	Aparecida de Goiania	Brasília - DF	224	0,0137	0,6	0,1
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	5,6	Anápolis		165	0,0137	0,5	0,04
Telhas Cerâmicas (cobertura)	73,7	Mara Rosa - GO		337	0,0137	12,1	1,1
Madeira (cobertura)	18,9	Franca - SP		687	0,0137	6,3	0,6
PVC (forro - cobertura)	2,4	Aparecida de Goiânia - GO		225	0,0137	0,3	0,02
Cimento (piso)	17,1	Sobradinho - DF		29,7	0,0137	0,2	0,02
Areia (piso)	83,1	Ipameri - GO		277	0,0137	11,2	1,0
Argamassa colante (piso)	10,3	Sobradinho - DF		29,7	0,0137	0,1	0,01
Revestimento Cerâmico (piso)	11,2	Pará de Minas - MG		740	0,0137	4,0	0,4
Aço (esquadrias externas)	14,6	Goiânia - GO		214	0,0137	1,5	0,1
Madeira (esquadrias internas)	8,6	Goiânia - GO		222	0,0137	0,9	0,1
Total						0,130	0,012

APÊNDICE F – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EM) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂M) ETAPA DE MANUTENÇÃO

Tabela F.1 - Planilha de cálculo do consumo de energia (EM) e emissões (ECO₂M) da manutenção – Sistema de VC.

Materiais e componentes	Extração e Processamento dos Materiais						Transporte materiais de reposição		Manutenção Total		
	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	Vida Útil Edificação (anos)	Vida Útil Sistemas (anos)	FR	Quantidade Materiais Manutenção final (Kg/EHU)	EMi (MJ/EHU)	ECO ₂ Mi (KgCO ₂ /EHU)	EMt (MJ/EHU)	ECO ₂ Mt (KgCO ₂ /EHU)	EM (MJ/EHU)	ECO ₂ M (KgCO ₂ /EHU)
Sistema de Vedação Vertical											
Bloco cerâmico de vedação	189,8	50,0	50,0	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Argamassa (revestimento e assentamento)	450,0	50,0	40,0	1,25	112,5	236,3	18,2	1,6	0,1	237,9	18,3
Concreto (estrutura)	150,7	50,0	50,0	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Madeira (formas - estrutura)	32,6	50,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aço (estrutura)	12,0	50,0	50,0	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros Sistemas da Edificação											
Tinta (pintura)	5,6	50,0	5,2	9,62	48,4	3880,5	61,4	5,3	0,5	3885,8	61,9
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	6	50,0	45,0	1,11	0,6	50,1	0,3	0,05	0,004	50,1	0,3
Telhas Cerâmicas (cobertura)	73,7	50,0	20,0	2,50	110,6	386,6	85,1	18,2	1,6	404,8	86,7
Madeira (cobertura)	17,9	50,0	30,0	1,67	11,9	6,0	0,5	4,0	0,4	9,9	0,8
PVC (forro - cobertura)	2,4	50,0	30,0	1,67	1,6	126,8	0,7	0,2	0,02	127,0	0,7
Cimento (pisos)	17,1	50,0	30,0	1,67	11,4	37,5	7,4	0,2	0,01	37,6	7,4
Areia (pisos)	83,1	50,0	30,0	1,67	55,4	2,7	0,5	7,5	0,7	10,1	1,2
Argamassa colante (pisos)	10,3	50,0	30,0	1,67	6,9	6,8	7,0	0,1	0,01	6,9	7,0
Revestimento Cerâmico (pisos)	11,2	50,0	30,0	1,67	7,4	96,8	6,6	2,7	0,24	99,5	6,8
Aço (esquadrias externas)	14,6	50,0	40,0	1,25	3,7	73,7	5,9	0,4	0,03	74,1	5,9
Madeira (esquadrias internas)	8,6	50,0	40,0	1,25	2,2	28,8	1,1	0,2	0,02	29,0	1,2
Total					0,373	4,93	0,19	0,040	0,004	4,97	0,198

Tabela F.2 - Planilha de cálculo do consumo de energia (EM) e emissões (ECO₂M) da manutenção – Sistema de LSF.

Materiais e componentes	Extração e Processamento dos Materiais						Transporte materiais de reposição		Manutenção Total		
	Quantidade com Perdas (kg/EHU)	Vida Útil Edificação (anos)	Vida Útil Sistemas (anos)	FR	Quantidade Materiais Manutenção final (Kg/EHU)	EMi (MJ/EHU)	ECO2Mi (KgCO2/EHU)	EMt (MJ/EHU)	ECO2Mt (KgCO2/EHU)	EM (MJ/EHU)	ECO2M (KgCO2/EHU)
Sistema de Vedação Vertical											
Aço (Guias e Montantes)	16,45	50	50	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Painéis de OSB	81,92	50	30	1,67	54,6	327,7	26,3	76,2	6,7	403,9	33,0
Chapa de Gesso	53,48	50	30	1,67	35,7	144,0	16,0	45,8	4,1	189,8	20,1
Chapa Cimentícia	48,39	50	40	1,25	12,1	34,5	2,5	2,8	0,2	37,3	2,7
Lã de Rocha	9,03	50	30	1,67	6,0	130,1	6,6	6,6	0,6	136,6	7,2
Outros Sistemas da Edificação											
Tinta (pintura)	5,61	50	5,2	9,6	48,4	3880,5	61,4	5,3	0,5	3885,8	61,9
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	5,63	50	45,0	1,1	0,6	50,1	0,3	0,1	0,0	50,1	0,3
Telhas Cerâmicas (cobertura)	73,74	50	20,0	2,5	110,6	386,6	85,1	18,2	1,6	404,8	86,7
Madeira (cobertura)	18,94	50	30,0	1,7	12,6	6,3	0,5	4,2	0,4	10,5	0,9
PVC (forro - cobertura)	2,38	50	30,0	1,7	1,6	126,8	0,7	0,2	0,0	127,0	0,7
Cimento (piso)	17,05	50	30,0	1,7	11,4	37,5	7,4	0,2	0,0	37,6	7,4
Areia (piso)	83,07	50	30,0	1,7	55,4	2,7	0,5	7,5	0,7	10,1	1,2
Argamassa colante (piso)	10,34	50	30,0	1,7	6,9	6,8	7,0	0,1	0,0	6,9	7,0
Revestimento Cerâmico (piso)	11,17	50	30,0	1,7	7,4	96,8	6,6	2,7	0,2	99,5	6,8
Aço (esquadrias externas)	14,64	50	40,0	1,3	3,7	73,7	5,9	0,4	0,0	74,1	5,9
Madeira (esquadrias internas)	8,63	50	40,0	1,3	2,2	28,8	1,1	0,2	0,0	29,0	1,2
Total					0,369	5,33	0,228	0,17	0,015	5,50	0,243

APÊNDICE G – PLANILHAS DE CÁLCULO ENERGIA (EP) E EMISSÕES DE CO₂ (ECO₂P) ETAPA DE PÓS-USO

Tabela G.1 - - Planilha de cálculo do consumo de energia (EP) e emissões (ECO₂P) do pós-uso – Sistema de VC.

Demolição da EHU						Transporte Resíduos e Materiais Substituídos até destinação final		Pós - Uso Total	
Materiais e componentes	Fator Energia Demolição (MJ/kg)	Fator CO ₂ Demolição (KgCO ₂ /kg)	ED (MJ/EHU)	ECO ₂ D (KgCO ₂ /EHU)	Distância Obra - Destinação Final (Km)	ETr (MJ/EHU)	ECO ₂ Tr (KgCO ₂ /EHU)	EP (MJ/EHU)	ECO ₂ P (KgCO ₂ /EHU)
Bloco cerâmico de vedação	0,0354	0,00247	6,72	0,47	17,70	1,65	0,14	8,36	0,61
Argamassa (revestimento e assentamento)	0,0354	0,00247	19,91	1,39	17,70	4,88	0,43	24,79	1,82
Concreto (estrutura)	0,0354	0,00247	5,34	0,37	17,70	1,31	0,11	6,64	0,49
Madeira (formas - estrutura)	0,0354	0,00247	0,00	0,00	17,70	0,28	0,02	0,28	0,02
Aço (estrutura)	0,0354	0,00247	0,42	0,03	17,70	0,10	0,01	0,53	0,04
Tinta (pintura)	0,0354	0,00247	1,91	0,13	17,70	0,47	0,04	2,38	0,17
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	0,0354	0,00247	0,22	0,02	17,70	0,05	0,00	0,28	0,02
Telhas Cerâmicas (cobertura)	0,0354	0,00247	6,53	0,46	17,70	1,60	0,14	8,12	0,60
Madeira (cobertura)	0,0354	0,00247	1,05	0,07	17,70	0,26	0,02	1,31	0,10
PVC (forro - cobertura)	0,0354	0,00247	0,14	0,01	17,70	0,03	0,00	0,17	0,01
Cimento (pisos)	0,0354	0,00247	1,01	0,07	17,70	0,25	0,02	1,25	0,09
Areia (pisos)	0,0354	0,00247	4,90	0,34	17,70	1,20	0,11	6,10	0,45
Argamassa colante (pisos)	0,0354	0,00247	0,61	0,04	17,70	0,15	0,01	0,76	0,06
Revestimento Cerâmico (pisos)	0,0354	0,00247	0,66	0,05	17,70	0,16	0,01	0,82	0,06
Aço (esquadrias externas)	0,0354	0,00247	0,65	0,05	17,70	0,16	0,01	0,81	0,06
Madeira (esquadrias internas)	0,0354	0,00247	0,38	0,03	17,70	0,09	0,01	0,48	0,03
Total			0,05	0,004	-	0,01	0,001	0,063	0,005

Tabela G.2 - Tabela G.1 - - Planilha de cálculo do consumo de energia (EP) e emissões (ECO₂P) do pós-uso – Sistema de LSF.

Maeriais e componentes	Demolição da EHU				Transporte Resíduos e Materiais Substituídos até destinação final			Pós - Uso Total	
	Fator Energia Demolição (MJ/kg)	Fator CO ₂ Demolição (KgCO ₂ /kg)	ED (MJ/EHU)	ECO ₂ D (KgCO ₂ /EHU)	Distância Obra - Destinação Final (Km)	ETr (MJ/EHU)	ECO ₂ Tr (KgCO ₂ /EHU)	EP (MJ/EHU)	ECO ₂ P (KgCO ₂ /EHU)
Aço (Guias e Montantes)	0,00257	0,0000925	0,04	0,00	17,7	0,14	0,01	0,18	0,01
Painéis de OSB	0,00257	0,0000925	0,35	0,01	17,7	1,18	0,10	1,54	0,12
Chapa de Gesso	0,00257	0,0000925	0,23	0,01	17,7	0,77	0,07	1,00	0,08
Chapa Cimentícia	0,00257	0,0000925	0,16	0,01	17,7	0,52	0,05	0,68	0,05
Lã de Rocha	0,00257	0,0000925	0,04	0,00	17,7	0,13	0,01	0,17	0,01
Tinta (pintura)	0,0354	0,00247	1,91	0,13	17,70	0,47	0,04	2,38	0,17
PVC (Instalações elétricas e hidráulicas)	0,0354	0,00247	0,22	0,02	17,70	0,05	0,00	0,28	0,02
Telhas Cerâmicas (cobertura)	0,0354	0,00247	6,53	0,46	17,70	1,60	0,14	8,12	0,60
Madeira (cobertura)	0,0354	0,00247	1,12	0,08	17,70	0,27	0,02	1,39	0,10
PVC (forro - cobertura)	0,0354	0,00247	0,14	0,01	17,70	0,03	0,00	0,17	0,01
Cimento (piso)	0,0354	0,00247	1,01	0,07	17,70	0,25	0,02	1,25	0,09
Areia (piso)	0,0354	0,00247	4,90	0,34	17,70	1,20	0,11	6,10	0,45
Argamassa colante (piso)	0,0354	0,00247	0,61	0,04	17,70	0,15	0,01	0,76	0,06
Revestimento Cerâmico (piso)	0,0354	0,00247	0,66	0,05	17,70	0,16	0,01	0,82	0,06
Aço (esquadrias externas)	0,0354	0,00247	0,65	0,05	17,70	0,16	0,01	0,81	0,06
Madeira (esquadrias internas)	0,0354	0,00247	0,38	0,03	17,70	0,09	0,01	0,48	0,03
Total			0,02	0,001	-	0,01	0,001	0,026	0,002

APÊNDICE H – RESULTADOS PARTICIPAÇÃO SISTEMAS UTILIZANDO VALORES DE DADOS MÍNIMOS E MÁXIMOS

Figura H.1 – EI e ECO₂I – utilização de valores mínimos para sistema de VC.

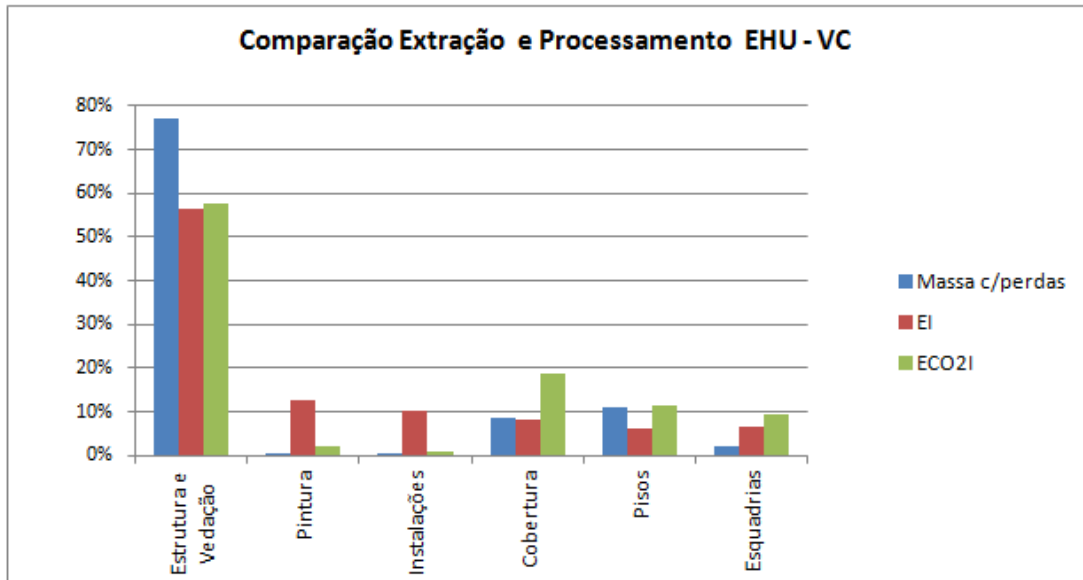


Figura H.2 – EI e ECO₂I – utilização de valores máximos para sistema de VC.

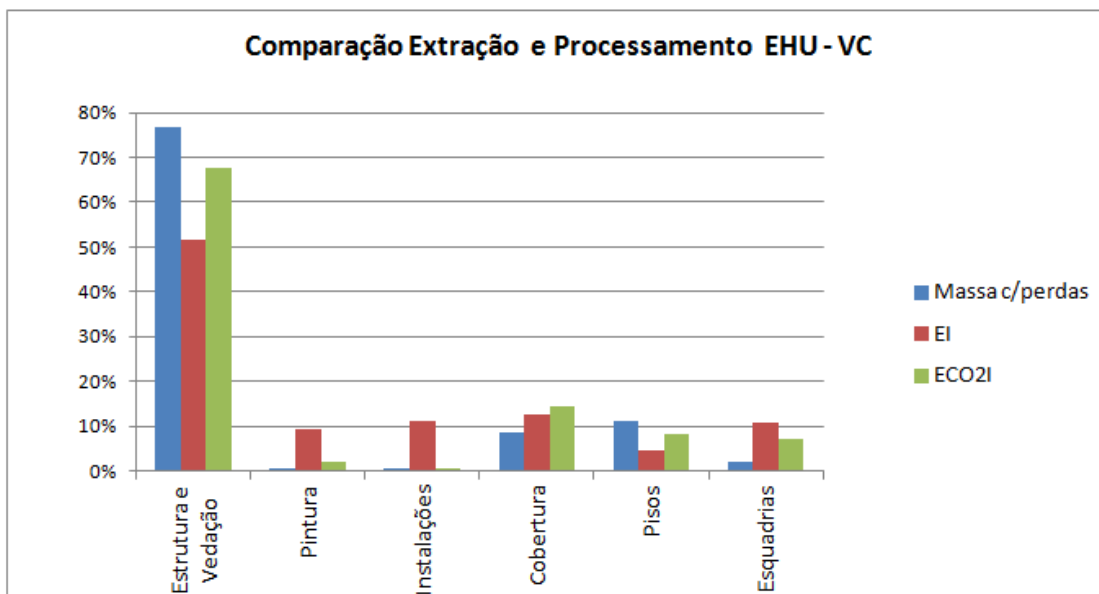


Figura H.3 – EI e ECO₂I – utilização de valores mínimos para sistema de LSF.

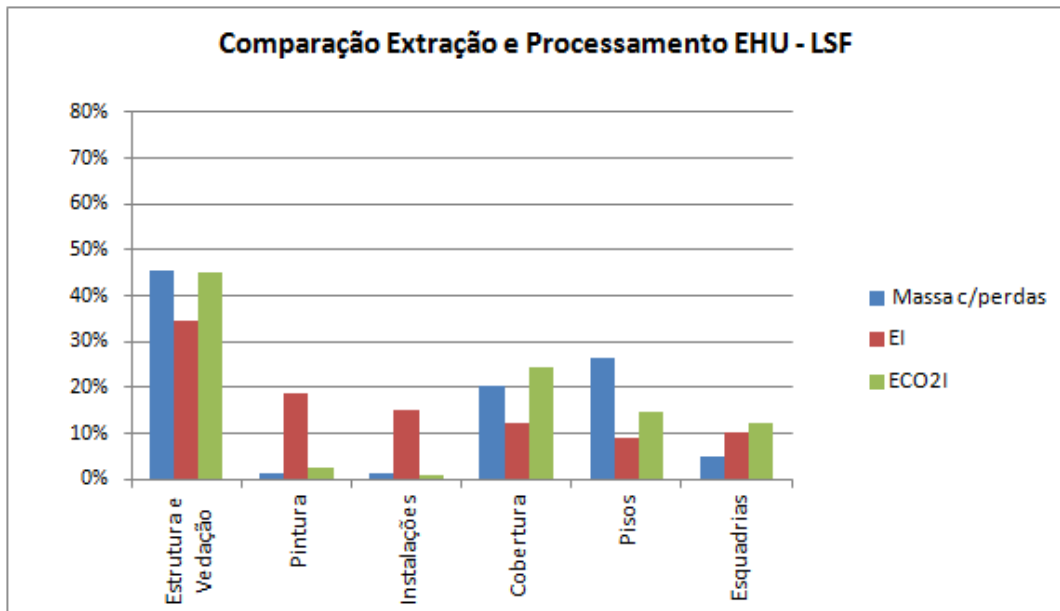


Figura H.4 – EI e ECO₂I – utilização de valores máximos para sistema de LSF.

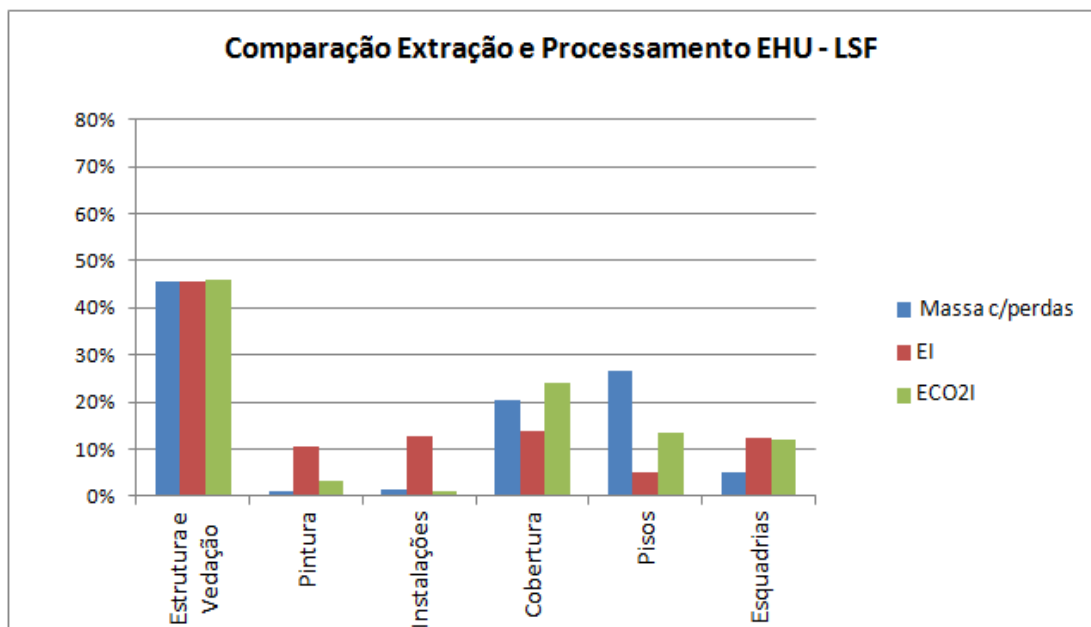


Figura H.5 – EM e ECO₂M – utilização de valores mínimos para sistema de VC.

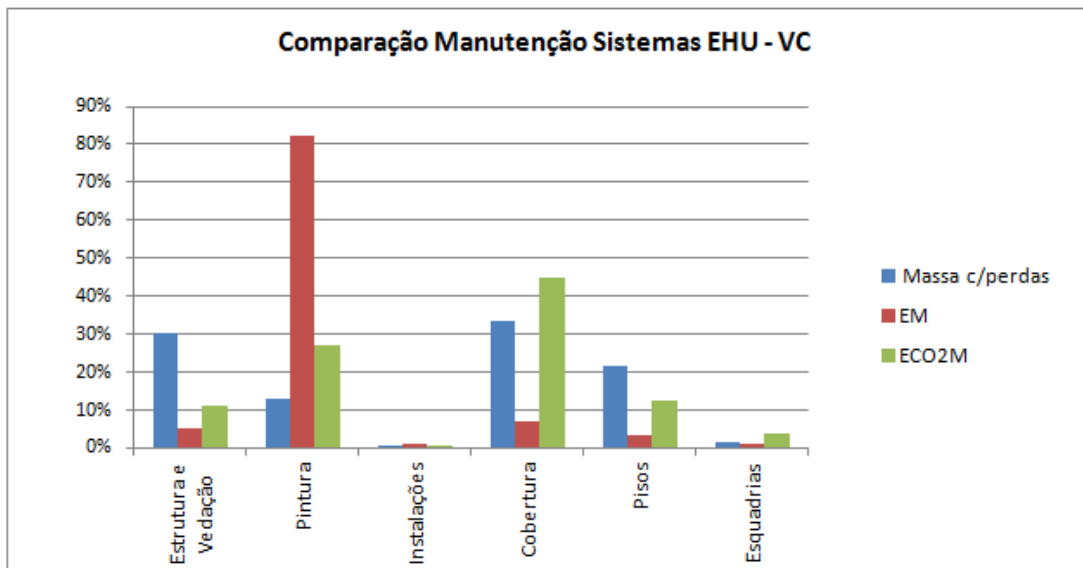


Figura H.6 – EM e ECO₂M – utilização de valores máximos para sistema de VC.

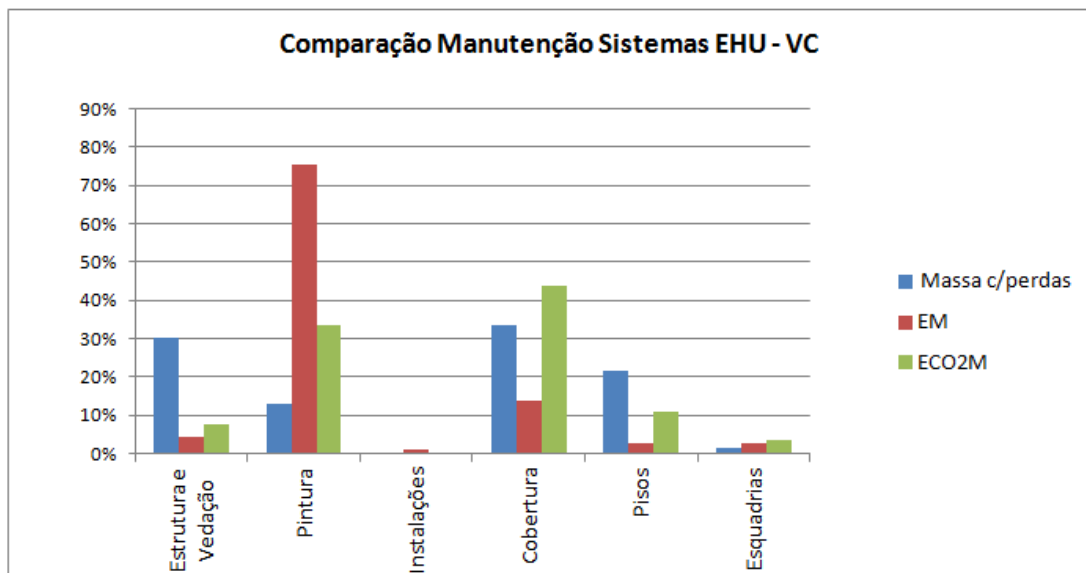


Figura H.7 – EM e ECO₂M – utilização de valores mínimos para sistema de LSF.

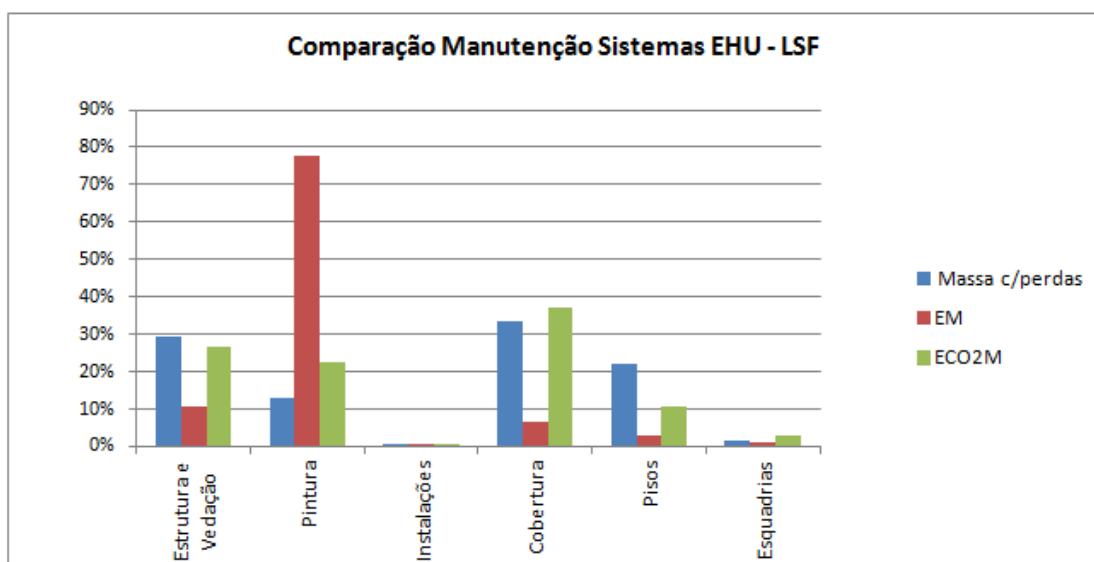
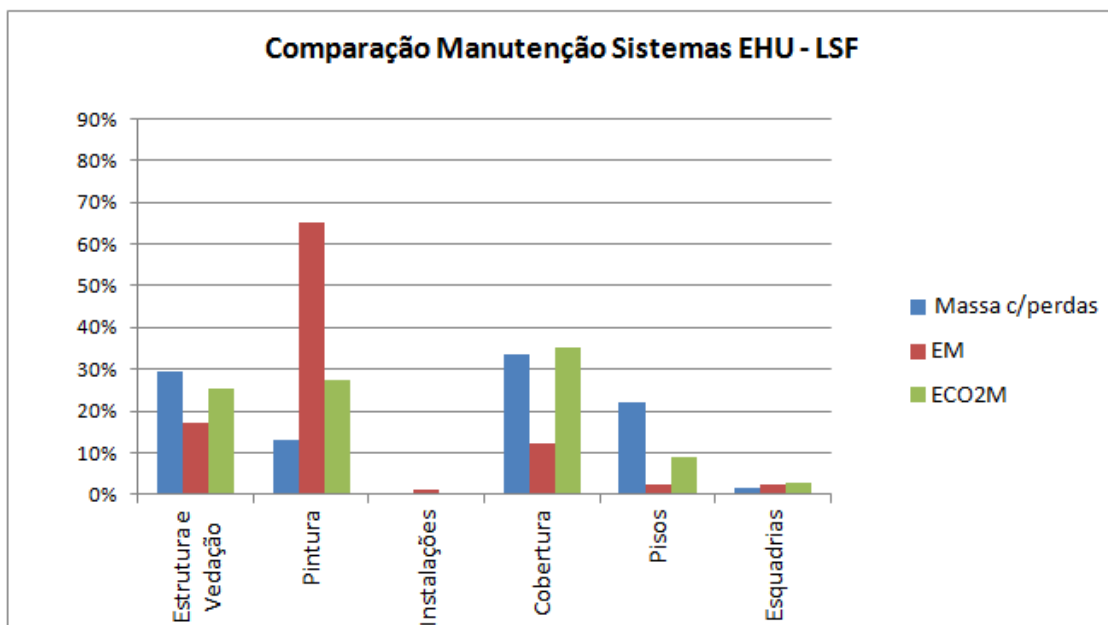


Figura H.8 – EM e ECO₂M – utilização de valores máximos para sistema de LSF.

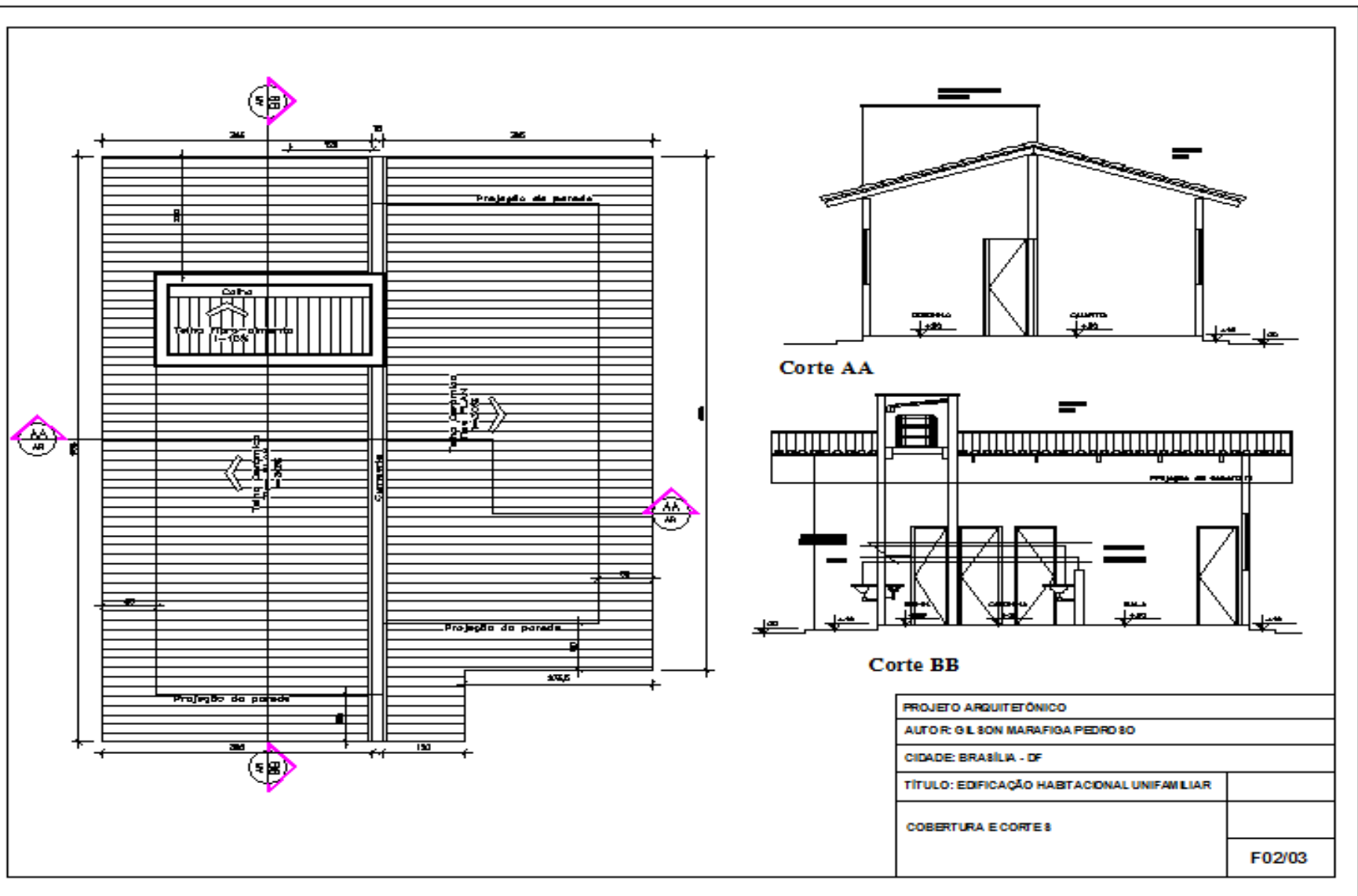


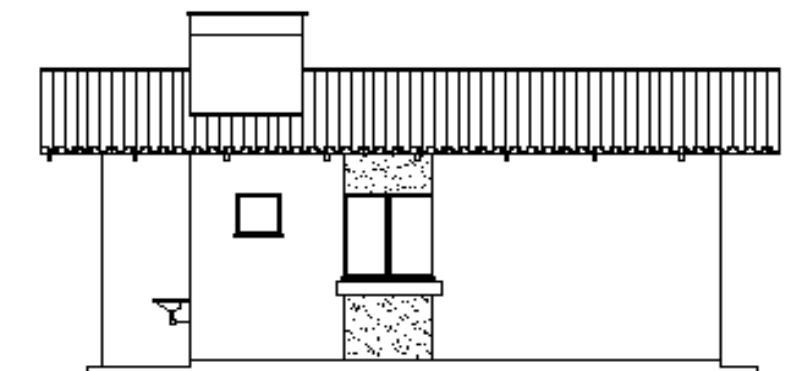
ANEXOS

ANEXO A – CONVERSÃO DE UNIDADES DE ENERGIA

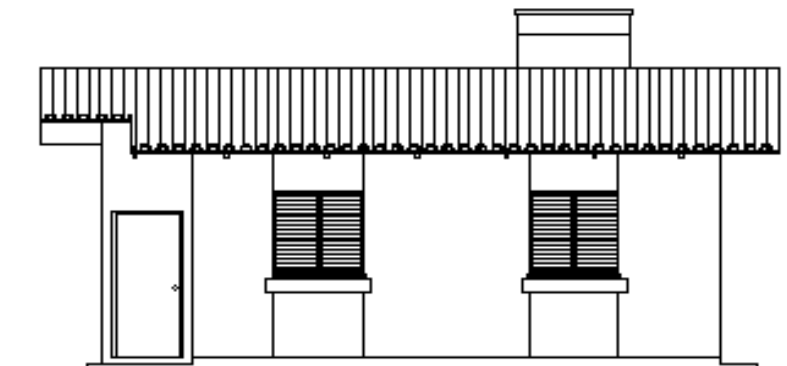
Tabela A.1 – Fatores para conversão das unidades de energia (BEN, 2015).

Unidades de Energia	Joule (J)	Gigajoule (GJ)
Joule (J)	1	1,00E-09
Unidade térmica britânica (BTU)	1055	1,06E-06
Caloria (cal)	4,18	4,18E-09
Quilowatt-hora (kWh)	3,60E+06	3,60E-03
Tonelada equivalente de petróleo (tep)	4,19E+10	4,19E+01

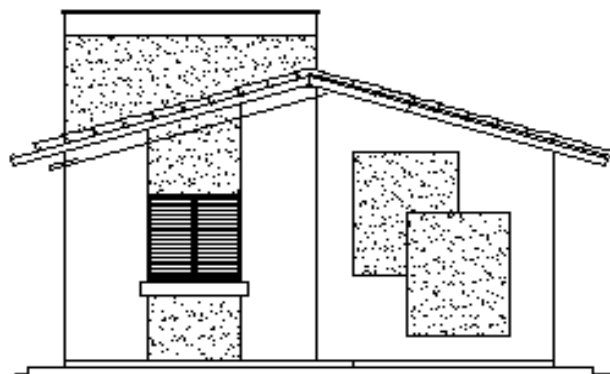




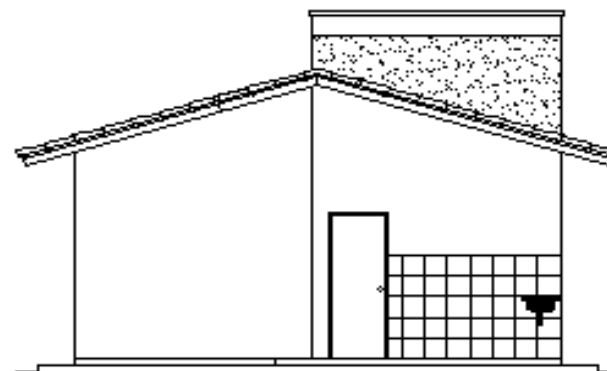
Fachada Lateral Esquerda



Fachada Lateral Direita



Fachada Frontal

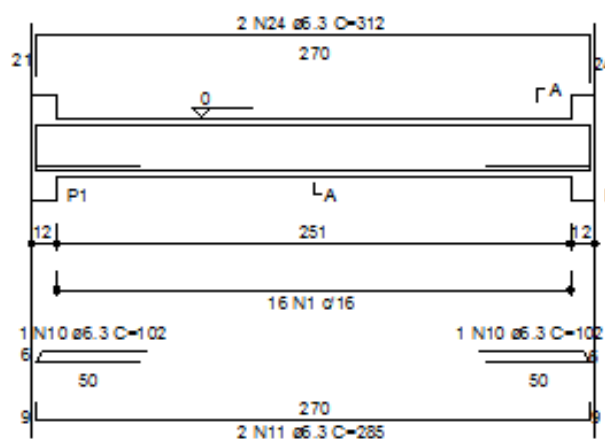


Fachada Fundos

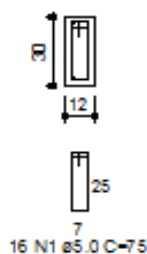
PROJETO ARQUITETÔNICO	
AUTOR: GILSON MARAFICA PEDROSO	
CIDADE: BRASÍLIA - DF	
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR	
FACHADAS	F03/03

VB1

1:30

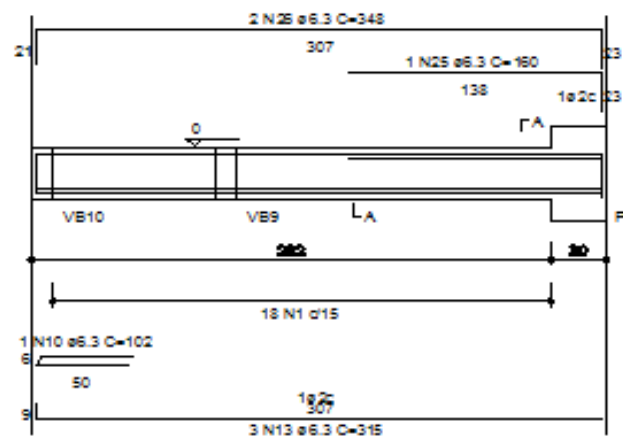


SEÇÃO A-A
ESC 1:25

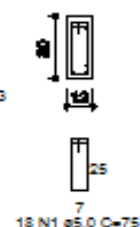


VB2

1:30

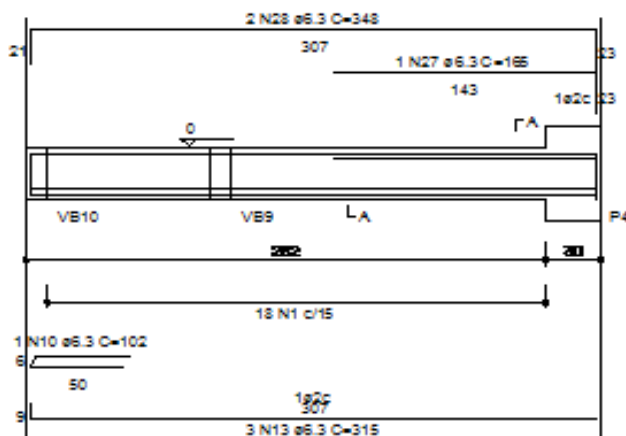


SEÇÃO A-A
ESC 1:25

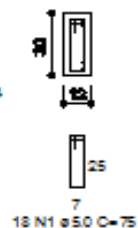


VB3

1:30



SEÇÃO A-A
ESC 1:25



PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

AUTOR: GILSON MARAFIJA PEDRO SO

CIDADE: BRASÍLIA - DF

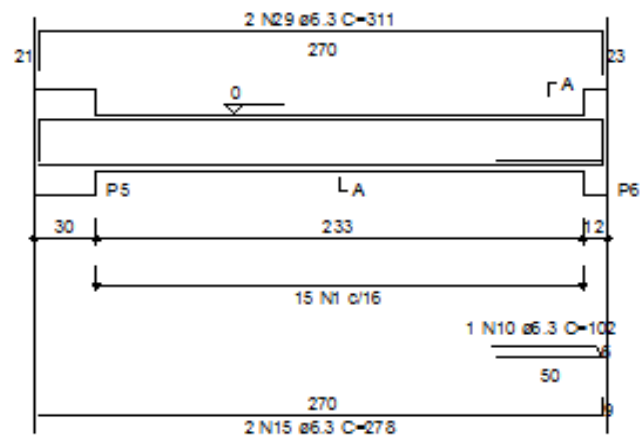
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR

PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

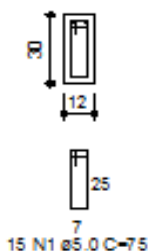
F02/10

VB4

1:30

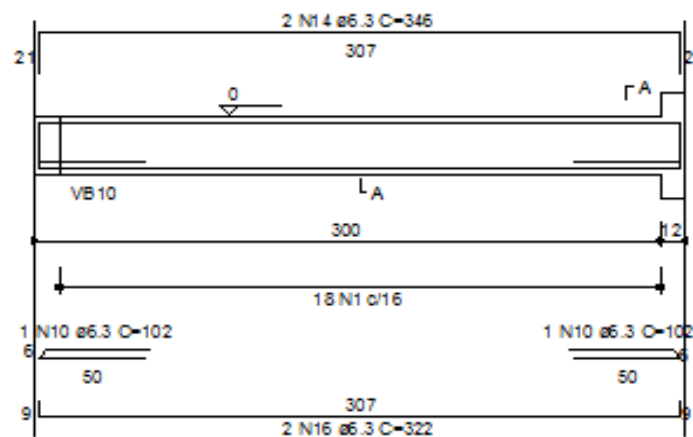


SEÇÃO A-A
ESC 1:25

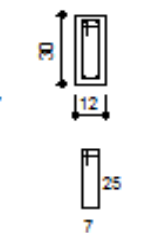


VB5

1:30

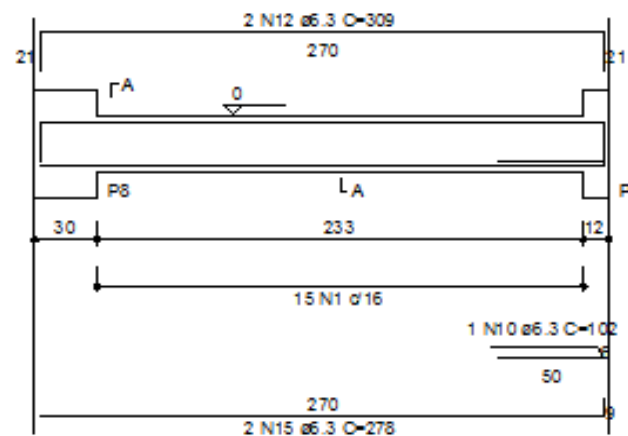


SEÇÃO A-A
ESC 1:25

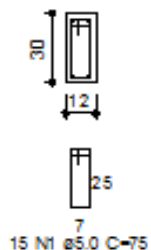


VB6

1:30



SEÇÃO A-A
ESC 1:25



PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

AUTOR: GILSON MARAFIGA PEDRO SO

CIDADE: BRASÍLIA - DF

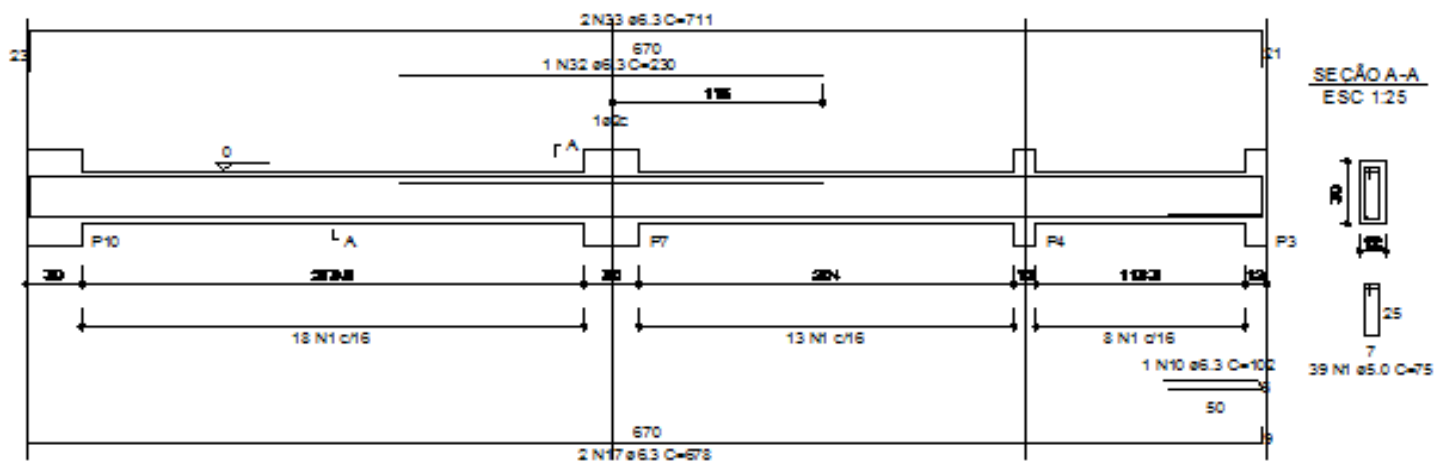
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR

PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

F03/10

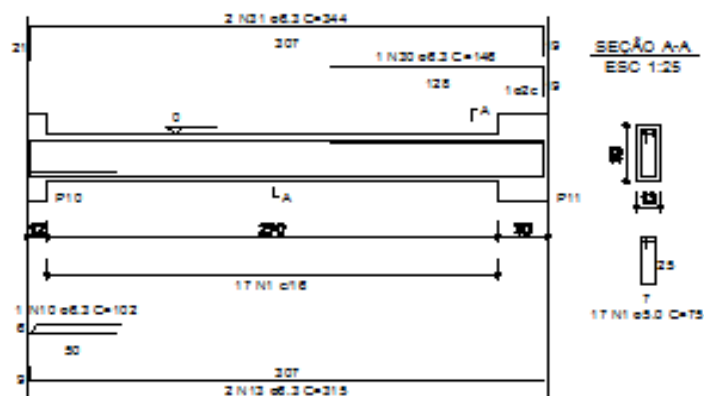
VB8

1:30



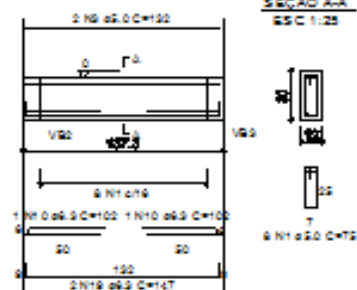
VB7

1:30



VB9

1:30



PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

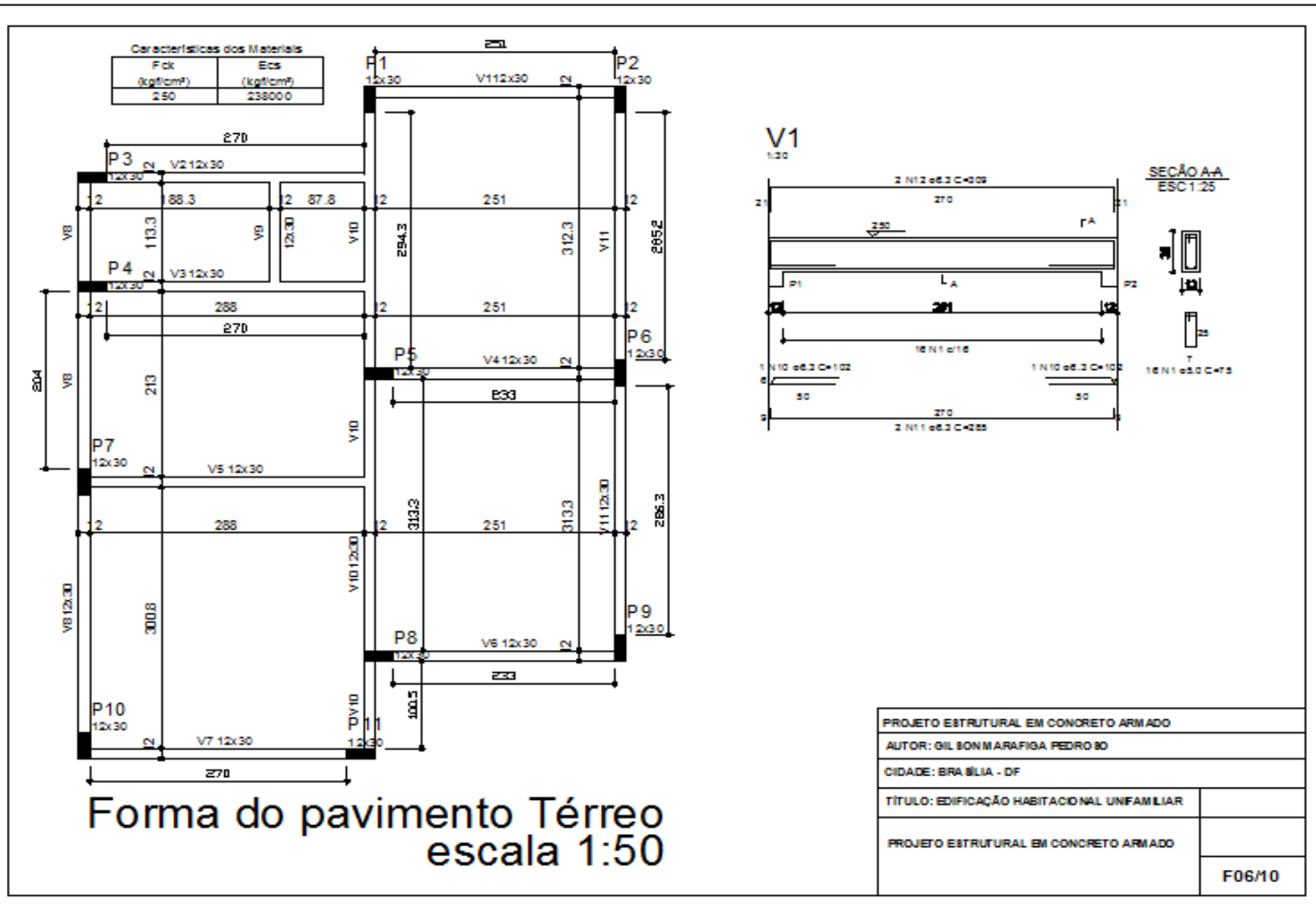
AUTOR: GILSON MARAFICA PEDROSO

CIDADE: BRASÍLIA - DF

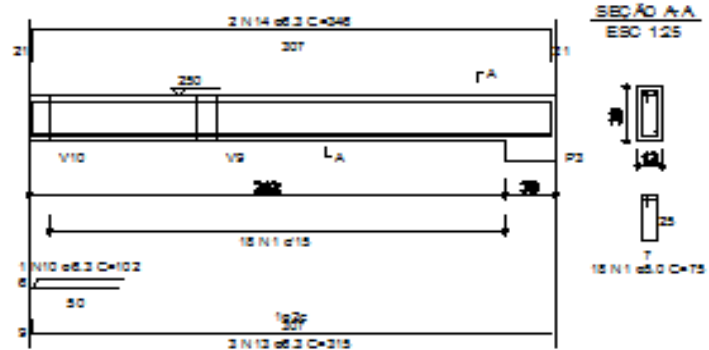
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR

PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

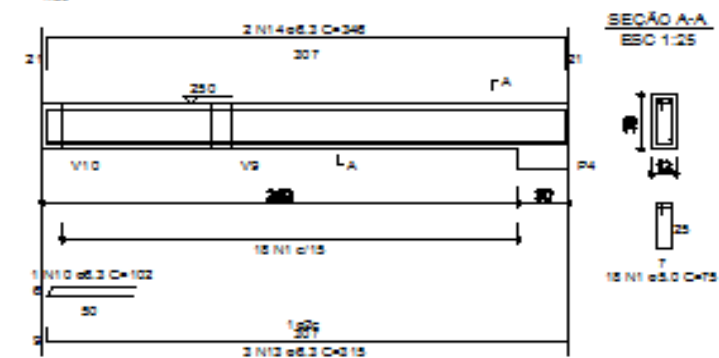
F04/10



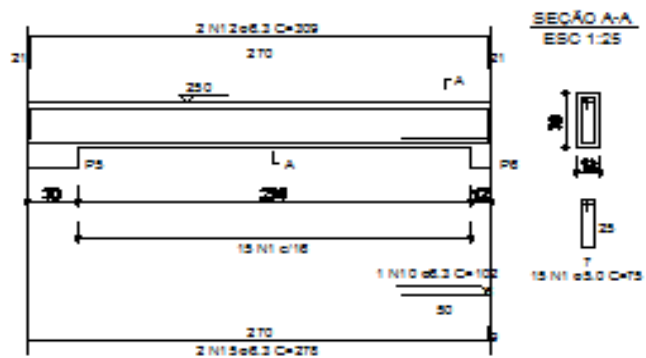
V2
1:30



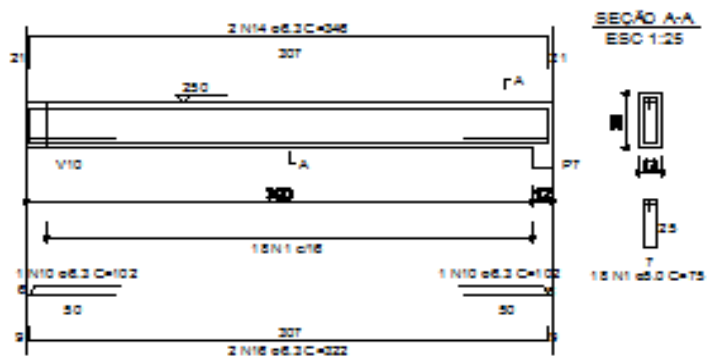
V3
1:30



V4
1:30



V5
1:30



PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

AUTOR: GILSON MARIANCA PEDROSO

CIDADE: BRASÍLIA - DF

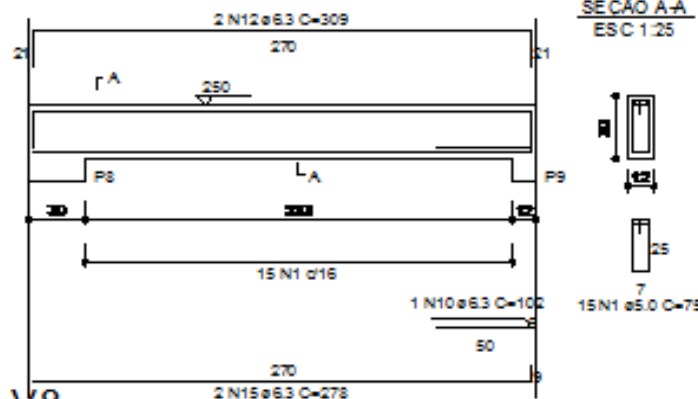
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR

PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

F07/10

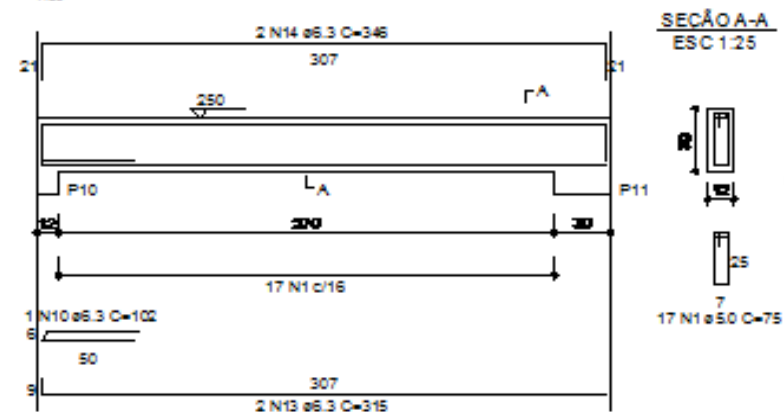
V6

1:30



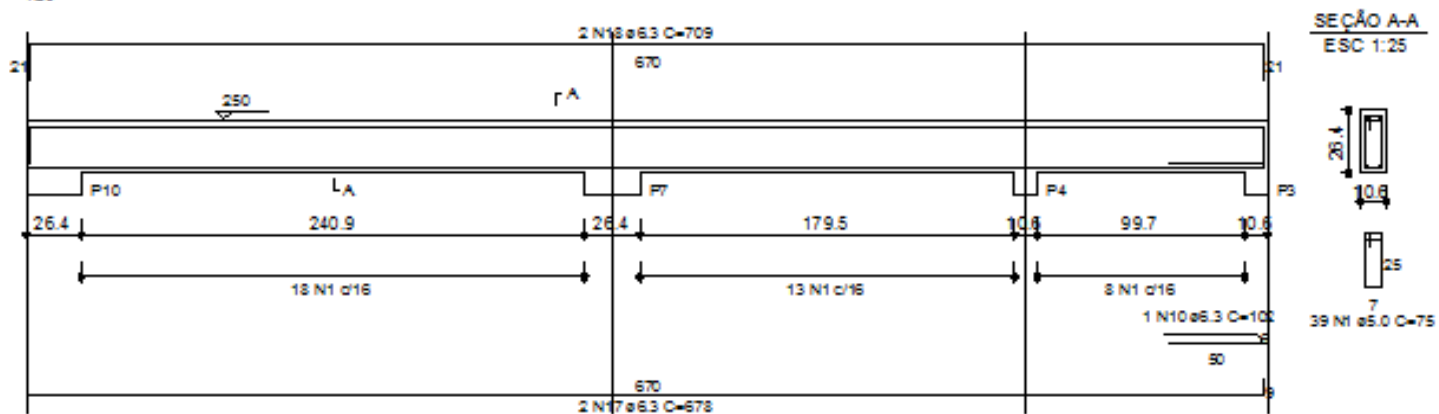
V7

1:30



V8

1:30



PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

AUTOR: GIL SON MARAFIGA PEDRO SO

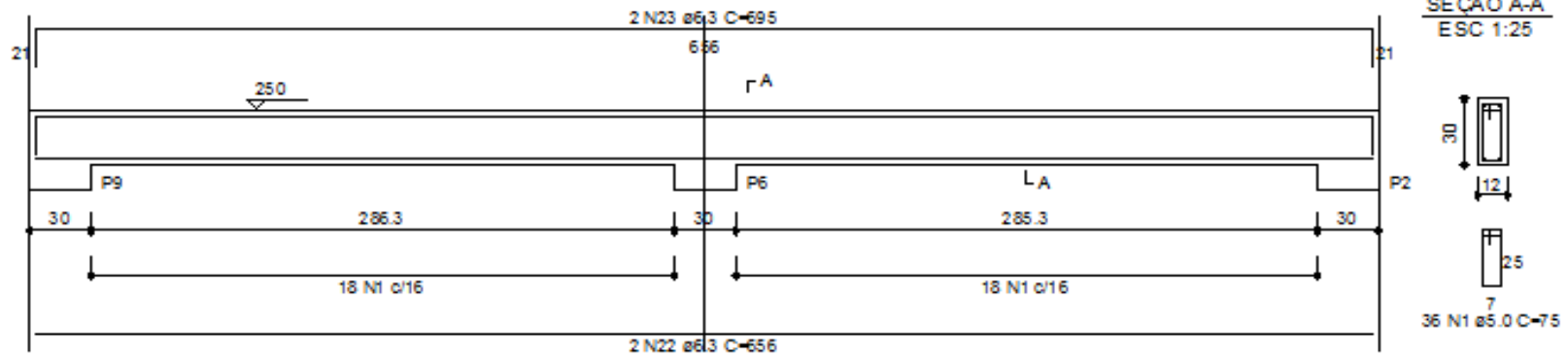
CIDADE: BRASÍLIA - DF

TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR

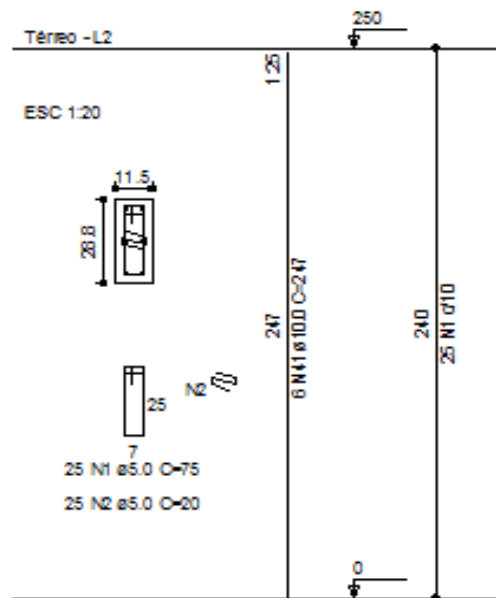
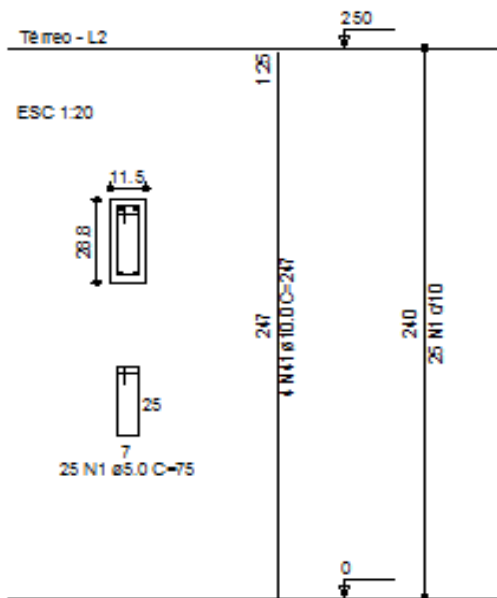
PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

F08/10

V11
1:30

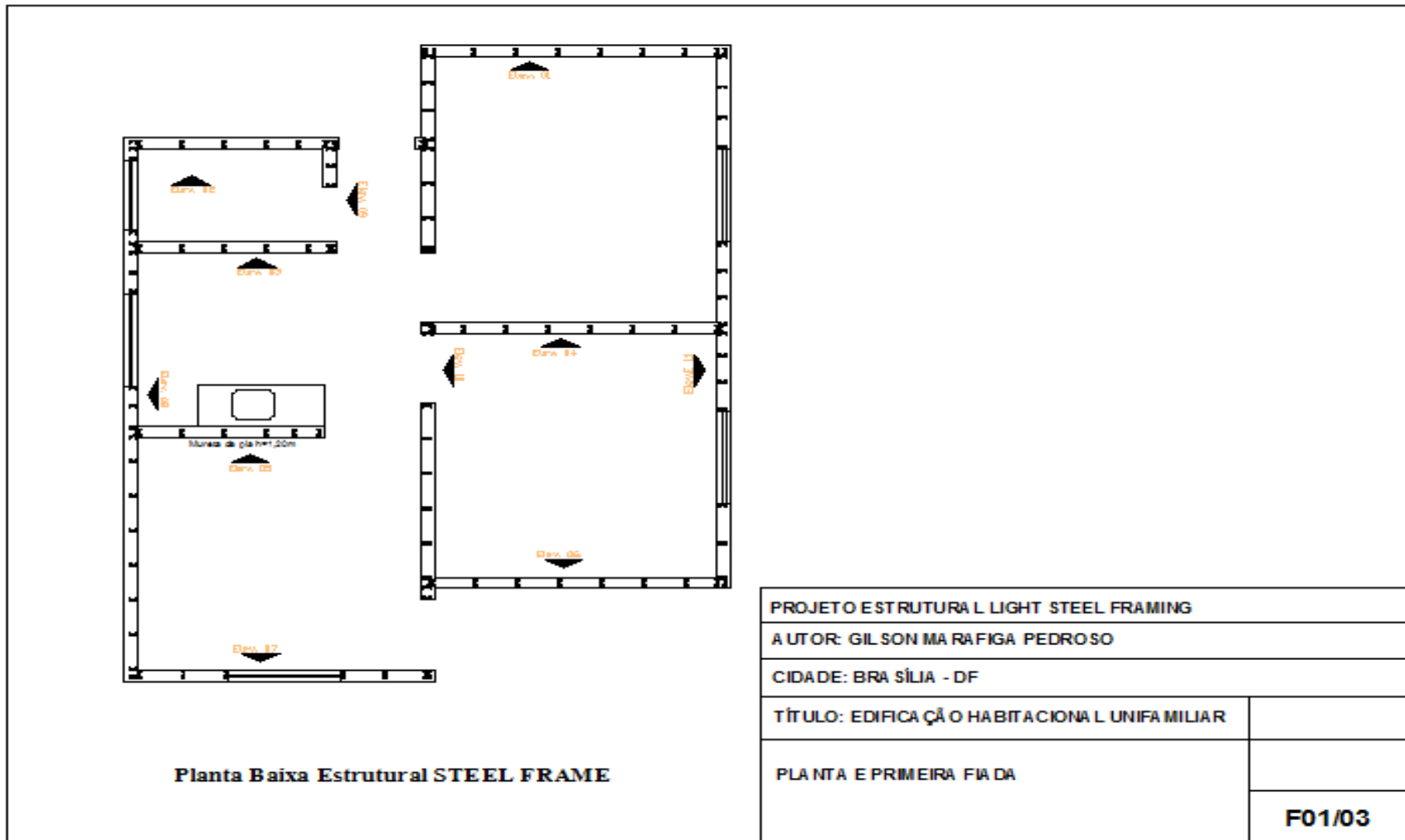


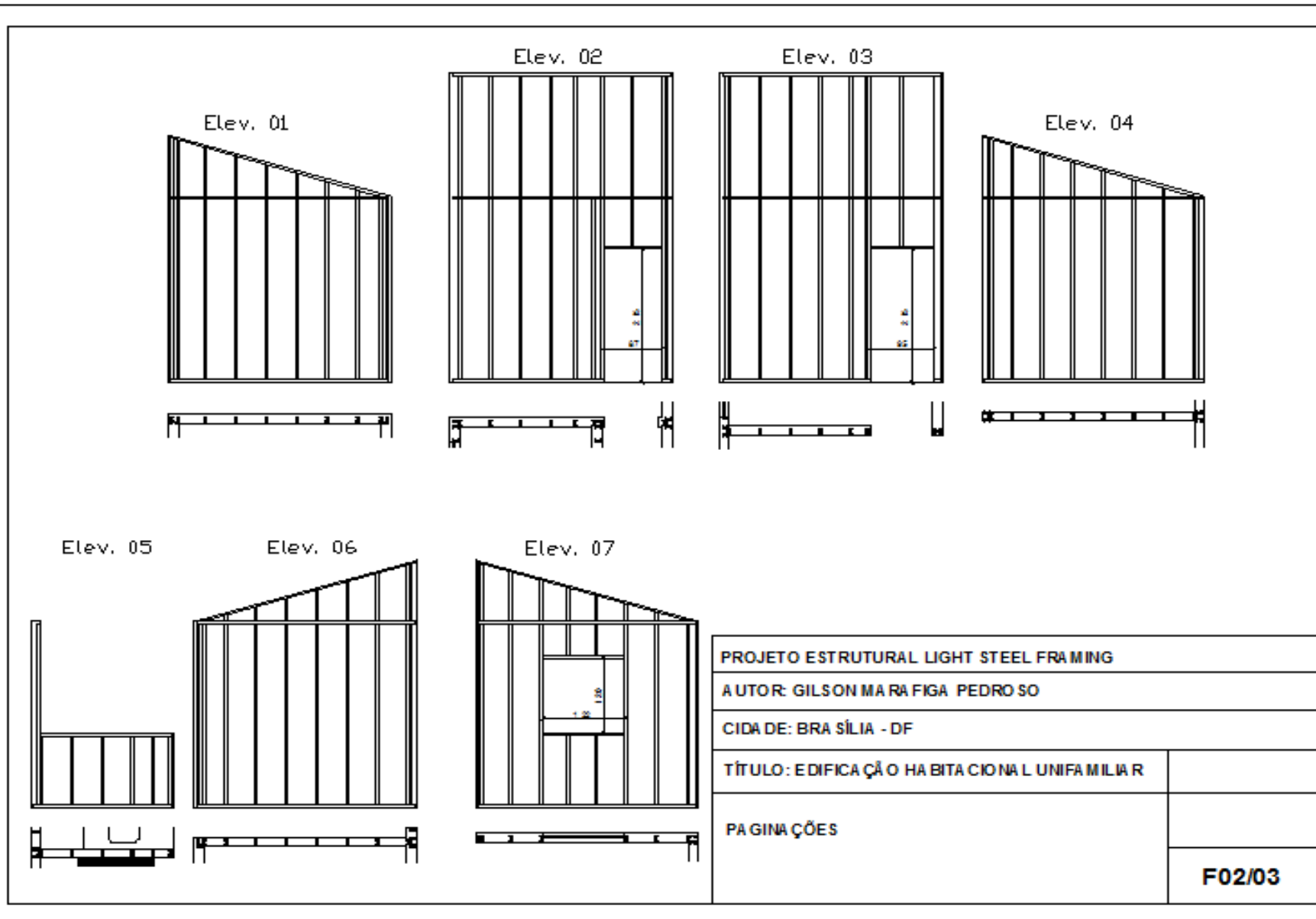
P 1=P3=P 4=P5=P 6=P7=P 8=P9=P 10=P11 P 2



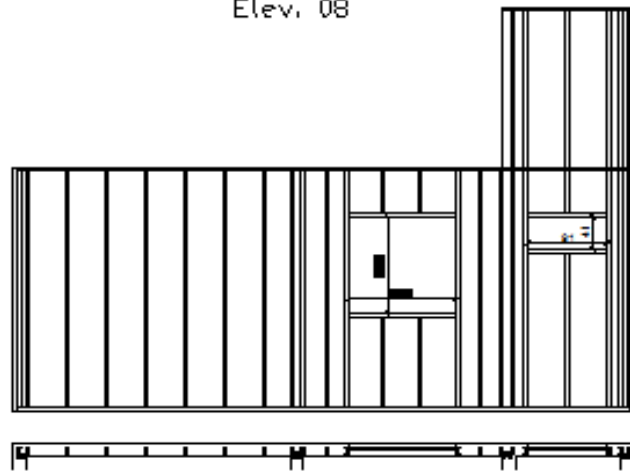
PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO	
AUTOR: GIL SON MARAFIGA PEDRO SO	
CIDADE: BRASÍLIA - DF	
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR	
PROJETO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO	F10/10

ANEXO D – PROJETO DO SISTEMA DE LIGHT STEEL FRAMING

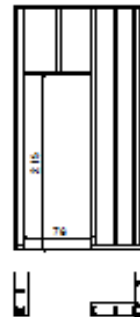




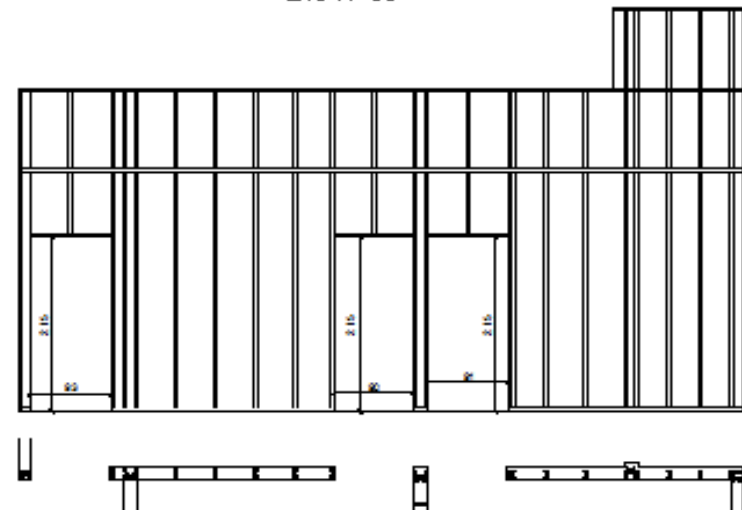
Elev. 08



Elev. 09



Elev. 10



Elev. 11



PROJETO ESTRUTURAL LIGHT STEEL FRAMING	
AUTOR: GILSON MARAFIGA PEDROSO	
CIDADE: BRASÍLIA - DF	
TÍTULO: EDIFICAÇÃO HABITACIONAL UNIFAMILIAR	
PAGINAÇÕES	
	F03/03