**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

MARIA INÊS TAVARES DE MATOS TEODORO

**ENERGIA EMBUTIDA NA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO
BRASIL: CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE
POLÍTICAS PÚBLICAS A PARTIR DE UM ESTUDO DE CASO EM
MATO GROSSO DO SUL**

**SÃO PAULO
2017**

MARIA INÊS TAVARES DE MATOS TEODORO

ENERGIA EMBUTIDA NA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL:
CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS A
PARTIR DE UM ESTUDO DE CASO EM MATO GROSSO DO SUL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências .

Orientador: Prof. José Goldemberg

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

São Paulo
2017

Pesquisa financiada por Bolsa de Investigação no âmbito do QREN - POPH - Tipologia 4.1 - Formação Avançada, compartilhado pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do MEC

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

FICHA CATALOGRÁFICA

Teodoro, Maria Inês Tavares de Matos

Energia embutida na construção de edificações no Brasil: contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul / Maria Inês Tavares de Matos Teodoro; orientador, José Goldemberg – São Paulo, 2017.

234 f.: il.; 30 cm

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Energia. 2. Sustentabilidade. 3. Ciclo de vida - avaliação I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: TEODORO, Maria Inês Tavares de Matos

Título: Energia Embutida na construção de edificações no Brasil: contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul.

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Tese defendida e aprovada em 4 de Dezembro de 2017 pela seguinte comissão julgadora:

Prof. Dr. José Goldemberg – PPGE-IEE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof^a Dr^a Virgínia Parente – PPGE-IEE/USP

Prof. Dr. Roberto Lamberts – UFSC

Prof. Dr. Gil Anderi da Silva – EP/USP

Prof. Dr. Ivan Marques de Toledo - UNB

*Aos meus pais, Graça e José,
À minha irmã, Joana,
Ao Pedro,
À minha filha Isabel*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha família por ser a minha maior motivação. Aos meus pais pelo valores que recebi e por sempre terem acreditado nas minhas capacidades. À minha irmã Joana pelas partilhas sempre compreendidas. Ao Pedro pelo apoio incondicional em todos os momentos e por ter partilhado este desafio comigo desde o início. À minha querida filha Isabel pela sua alegria e pelos seus sorrisos que sempre me inspiram a querer ser uma pessoa melhor.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. José Goldemberg, pelas conversas inspiradoras e por ter acreditado nas minhas capacidades para realizar este trabalho.

Agradeço à Prof^a. Virgínia Parente pelos incentivos, contribuições e conhecimentos transmitidos.

Um agradecimento especial à Luciana e ao Hoover da Plano A, sem os quais este trabalho não poderia ter sido feito.

Agradeço à Thaís Franco pelos esclarecimentos.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro.

Por fim agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Teodoro, Maria Inês Tavares de Matos. **Energia Embutida na construção de edificações no Brasil: contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul.** 234f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

O consumo de energia embutida nas edificações acontece ao longo do seu ciclo de vida nas atividades relacionadas com a construção e manutenção. Trata-se de um consumo de cálculo complexo uma vez que o seu valor está contabilizado em outros setores econômicos como o setor industrial de produção de materiais construção e o setor de transportes. A contribuição da energia embutida nas edificações do Brasil chega a 40% do seu ciclo de vida energético. Para além disso as necessidades de infraestrutura no país, em particular no setor residencial, deverão resultar em elevados consumos energéticos para a sua construção, contribuindo para pressionar as necessidades de expansão dos sistemas de oferta de energia. Neste contexto, o objetivo central desta pesquisa é calcular a energia embutida na construção de um condomínio residencial na cidade de Campo Grande no Estado de Mato Grosso do Sul. Para tal foi utilizada uma metodologia baseada em Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) tendo sido considerados dois cenários que diferem quanto à eficiência energética na etapa do transporte. Obteve-se um consumo de energia embutida inicial por unidade de área de 4,99 GJ/m² para o cenário 1 e 5,52 GJ/m² para o cenário 2, com participações de energia não renovável de 61,2% e 64,2%, respectivamente. No cenário 1 a etapa de fabricação dos materiais respondeu por 96,1% do consumo de energia embutida, o transporte contribuiu com 3,2% e a construção com 0,7%. Já no cenário 2, a participação de cada etapa foi de 86,8%, 12,6% e 0,6% respectivamente. Os resultados do estudo de caso apresentado e o panorama elaborado sobre a energia embutida nas edificações brasileiras realizado nesta tese reforçam a necessidade de incluir a energia embutida como critério de eficiência energética no desenvolvimento de políticas públicas que contribuam para reduzir o consumo de energia no setor de edificações.

Palavras chave: Energia Embutida; Energia incorporada; Avaliação de Ciclo de Vida Energético; Eficiência Energética; Edificações; Políticas Públicas.

ABSTRACT

Teodoro, Maria Inês Tavares de Matos. Embodied Energy in the construction of Buildings in Brazil: contributions to public policy development based on a case study in Mato Grosso do Sul. 234f. Dissertation (Doctor of Science) – Graduate Program of Energy, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

The embodied energy in buildings is an energy consumption that happens throughout its life cycle in the activities related to construction and maintenance. Embodied energy calculation is a complex process since its value is accounted for in other economic sectors such as the manufacture of building materials and transportation. The contribution of embodied energy in Brazilian buildings reaches 40% of its energy consumption life cycle. In addition, infrastructure needs in the country, particularly in the residential sector, should result in high energy consumption for its construction, contributing to put pressure on the expansion needs of the energy supply system. In this context, the main objective of this research is to calculate the embodied energy in the construction of a residential condominium in the city of Campo Grande in the State of Mato Grosso do Sul. A methodology based on Life Cycle Energy Assessment (LCEA) was used considering two scenarios that differ in terms of energy efficiency at the transportation stage. Initial Embodied Energy per unit area was 4.99 GJ/m² for scenario 1 and 5.52 GJ/m² for scenario 2, with a non-renewable energy share of 61.2% and 64, 2%, respectively. In scenario 1, the material manufacturing stage accounted for 96.1% of the initial embodied energy value, transportation contributed with a share of 3.2% and the construction stage with 0.7%. In scenario 2, the share of each stage was 86.8%, 12.6% and 0.6%, respectively. The results of the presented case study and the elaborated panorama on the embodied energy in Brazilian buildings carried out in this thesis reinforce the need to include embodied energy as a criterion of energy efficiency in the development of public policies that contribute to reduce energy consumption in the building sector.

Keywords: Embodied Energy; Life Cycle Energy Assessment; Energy Efficiency; Buildings; Public Policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia da pesquisa.....	22
Figura 2 – Ciclo de Vida das Edificações.....	25
Figura 3 – Fronteiras de análise do ciclo de vida das edificações.....	28
Figura 4 – Perfil de Energia Embutida num m ² de edificação em Espanha.....	41
Figura 5 – Energia embutida por partes da edificação.....	41
Figura 6 – Tempo médio para substituição de componente e equipamentos em edifícios residenciais.....	54
Figura 7 – Níveis para Análises Energéticas.....	68
Figura 8 – Estrutura de uma ACV.....	73
Figura 9 – Comparação de energia embutida em estudo de caso de edifício residencial de acordo com diferentes métodos de inventário.....	91
Figura 10 – Processos em um sistema energético de produção de eletricidade a partir de um combustível.....	97
Figura 11 – Participação das diferentes fontes energéticas na produção de energia em diferentes países.....	99
Figura 12 – Composição setorial do Consumo final de energia no Brasil.....	108
Figura 13 – Evolução do consumo final de energia no Brasil 1970-2016.....	109
Figura 14 – Composição setorial da Consumo de Eletricidade.....	109
Figura 15 – Evolução do consumo final de energia elétrica no Brasil 1970-2016.....	110
Figura 16 – Fontes de energia no setor residencial.....	111
Figura 17 – Fontes de energia no setor comercial e público.....	111
Figura 18 – Setores com maior participação no consumo de energia do setor industrial como um todo.....	114
Figura 19 - Participação de fontes não renováveis no consumo do setor industrial.....	115
Figura 20 – Distribuição modal da matriz de transportes regionais de cargas em 2011 (com e sem minério de ferro).....	116
Figura 21 – Evolução da frota estimada de veículos pesados por categoria.....	118
Figura 22 - Taxa de crescimento da frota de veículos em circulação.....	118
Figura 23 – Evolução do consumo nacional de diesel no transporte rodoviário por categoria de veículos.....	119
Figura 24 – Oferta Interna de Energia por Fonte 2016.....	121
Figura 25 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	122
Figura 26 – Fronteira de análise para cálculo da Energia Embutida no estudo de caso.....	152
Figura 27 - Localização da Cidade de Campo Grande no Brasil.....	154
Figura 28 - Localização do Condomínio Residencial The Capital.....	155
Figura 29 – Planta do Condomínio residencial The Capital.....	155
Figura 30 - Planta dos apartamentos final 1.....	156
Figura 31 – Fotografia do Caminhão caçamba com basculante utilizado para transporte de arenito na etapa de terraplanagem.....	172
Figura 32 – Caminhão betoneira e caminhão bomba em utilização na obra na execução de serviços de concretagem.....	173
Figura 33 – Caçamba com entulho retirado da obra.....	175
Figura 34 – Valor total de EEi em cada cenário e participação de fontes não renováveis.....	182
Figura 35 – Contribuição do consumo de energia embutida de cada etapa para o valor da energia embutida inicial.....	183
Figura 36 – Participação de energia não renovável em cada etapa.....	183

Figura 37 – Energia embutida inicial por unidade de área.....	184
Figura 38 – Energia embutida de acordo com a fronteira de análise	184
Figura 39 – Comparação dos resultados obtidos com os valores dos estudos brasileiros revisados.....	186
Figura 40 – Perfil da contribuição individual dos materiais avaliada em massa	187
Figura 41 – Perfil da contribuição individual dos materiais para a EEi.....	188
Figura 42 – Perfil da distância percorrida pelos materiais de construção de acordo com tipo de transporte.....	189
Figura 43 – Estados produtores dos materiais comprados para a obra do condomínio residencial The Capital..	190
Figura 44 – Contribuição dos diferentes tipos de transporte avaliada em termos de consumo de energia.....	191
Figura 45 – Contribuição de cada material para o consumo de energia com o transporte	192
Figura 46– Contribuição da etapa de transporte para a energia embutida de alguns materiais no cenário 1.....	193
Figura 47 – Contribuição da etapa de transporte para a energia embutida de alguns materiais no cenário 2.....	193
Figura 48 – Contribuição do consumo energético de atividades na etapa da construção.....	194
Figura 49 – Entrada do Condomínio	214
Figura 50 – Fachada dos blocos	214
Figura 51- Fachada dos blocos.....	215
Figura 52- Fachada dos blocos.....	215
Figura 53– Área externa - guarita da entrada.....	216
Figura 54 – Área externa - estacionamento.....	216
Figura 55 – Execução das fundações do tipo Strauss	217
Figura 56 – Fundações do tipo Strauss	217
Figura 57 – Estrutura em concreto armado - Baldrame	218
Figura 58 – Laje treliçada com enchimento cerâmico	218
Figura 59 – Alvenaria de blocos cerâmicos	219
Figura 60 – Detalhe da execução da alvenaria	219
Figura 61 – Detalhe do uso de blocos cerâmicos e tijolo comum na alvenaria	219
Figura 62 – Blocos de cerâmica de 8 furos e tijolos comuns	219
Figura 63 – Execução do reboco nas paredes externas.....	220
Figura 64 – Detalhe da textura da parede exterior.....	220
Figura 65 – Acabamento das paredes internas e rodapé cerâmico.....	221
Figura 66 – Piso cerâmico rejuntado e soleira de granito	221
Figura 67 – Esquadria.....	222
Figura 68 - Esquadria	222
Figura 69 – Revestimento cozinha e área de serviço.....	223
Figura 70 - Tanque	223
Figura 71 – Bancada do banheiro geral	223
Figura 72 – Louças sanitárias.....	223
Figura 73 - Churrasqueira.....	224
Figura 74 - Porta	224
Figura 75 – Blocos de vidro no banheiro.....	224
Figura 76 – Porta de entrada de apartamento.....	224

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de Energia Embutida em materiais de construção	36
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de cada modal de transporte	44
Tabela 3 – Valores de consumo energético específico para diferentes modais de transporte.....	44
Tabela 4 – Comparação do consumo de energia por tkm para diferentes modais de transporte de carga. Dados válidos para Holanda, 2005	45
Tabela 5 – Agentes de degradação que atuam em termos de natureza e classe.....	51
Tabela 6 – Vida útil de projeto mínima sugerida para componentes	53
Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP)*	54
Tabela 8 – Durabilidade de materiais de construção e fatores de acréscimo de EE – ciclo de 50 anos	55
Tabela 9 – Normas ISO 14000 relacionadas com a ACV	70
Tabela 10 – Normas da ABNT relacionadas com ACV	71
Tabela 11 – Categorias de impacto comuns nos estudos de avaliação de impacto de ciclo de vida.....	79
Tabela 12 – Normas para a avaliação ambiental de edifícios e produtos.....	85
Tabela 13 - Normas do CEN TC350 relacionadas com avaliação ambiental de edifícios e produtos da construção	86
Tabela 14 – Comparação de valores de energia embutida em materiais de construção com diferentes métodos de inventário.....	92
Tabela 15 – Eficiência de algumas tecnologias de conversão de biomassa	98
Tabela 16 – Valores de Requisitos energéticos da energia de nível 2 para diferentes combustíveis consumidos nos usos finais.....	102
Tabela 17 – Perdas nos materiais de construção	113
Tabela 18 – Participação relativa de cada modal no sistema de transportes de diferentes países.....	119
Tabela 19 – Estudos brasileiros que avaliam energia embutida mas não apresentam valores.....	124
Tabela 20 – Estudos brasileiros de EE com foco em Materiais de Construção.....	126
Tabela 21 – Estudos brasileiros de EE com foco em sistemas construtivos.....	128
Tabela 22 – Estudos brasileiros de EE com foco nos Edifícios.....	132
Tabela 23 – Valores de EE _i nos trabalhos brasileiros revisados.....	136
Tabela 24 – Valor de Energia embutida em edifícios em estudos internacionais.....	138
Tabela 25 – Estudos referidos como fontes de intensidade energética do transporte rodoviário nos trabalhos brasileiros revisados	140
Tabela 26 – Distribuição dos trabalhos revisados por universidade	140
Tabela 27 – Classificação dos requisitos mínimos exigidos pelo SICV	146
Tabela 28 – Áreas do Condomínio Residencial The Capital.....	157
Tabela 29 – Características construtivas do condomínio Residencial The Capital.....	158
Tabela 30 – Coeficientes de Energia Embutida utilizados no estudo de caso	162
Tabela 31 – Dados utilizados para cálculo do valor de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 1	167
Tabela 32 – Valores de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 1	168

Tabela 33– Dados utilizados para cálculo do valor de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 2	169
Tabela 34 – Valores de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 2	169
Tabela 35 – Consumo Energético Específico de cada categoria de veículo de carga de acordo com o tipo de transporte para os Cenários 1 e 2	170
Tabela 36 – Equipamentos utilizados na obra.....	171
Tabela 37 - Dados para cálculo do consumo energético do caminhão caçamba com basculante utilizado para transporte de arenito na etapa de terraplanagem	173
Tabela 38 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão betoneira utilizado nos serviços de concretagem.....	174
Tabela 39 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão bomba utilizado nos serviços de concretagem.....	174
Tabela 40 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão caçamba com guindaste utilizado retirar o entulho da obra.....	175
Tabela 41 – Mix de fontes de energia consumidas no setor industrial brasileiro	176
Tabela 42 – Fatores de Conversão para Energia Primária	177
Tabela 43 – Fatores de conversão para energia primária e participação de fontes renováveis em cada etapa da EEi	178
Tabela 44 – Descrição das colunas da planilha desenvolvida para cálculo da EEi no condomínio residencial The Capital	179
Tabela 45 – Levantamento de Coeficientes de Energia Embutida em materiais de construção brasileiros	225
Tabela 46 - Consumo de energia elétrica na obra.....	229
Tabela 47 – Teor de umidade de equilíbrio da madeira na base seca em função da umidade relativa e da temperatura para a maioria das capitais dos estados brasileiros	233
Tabela 48 – Densidade das madeiras consumidas na construção do condomínio residencial The Capital	234

LISTA DE SIGLAS

ABCV – Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ACV – Avaliação de Ciclo de Vida
ACV-m – Avaliação de Ciclo de Vida Modular
ACVE – Avaliação de Ciclo de Vida Energético
BEN – Balanço Energético Nacional
CAGR – Taxa de Crescimento Anual Composta
CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CNT – Confederação Nacional do Transporte
DAP – Declaração Ambiental de Produto
EE – Energia Embutida
EEi – Energia Embutida Inicial
EE_R – Energia Embutida Recorrente
ELCD – European Life Cycle Database
EO – Energia Operacional
EUA – Estados Unidos da América
HIS – Habitação de Interesse Social
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IEA – International Energy Agency
IFIAS - International Federation of Institutes of Advanced Studies
ICE – Inventory of Carbon and Energy
ICV – Inventário de Ciclo de Vida
ILCD – International Reference Life Cycle Data System
ISO – International Standardisation Organization
JRC – Joint Research Centre
PBACV – Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida
PCI - Poder Calorífico Inferior
PCS – Poder Calorífico Superior
RBE – Requisitos Brutos de Energia
REE – Requisitos Energético da Energia
REP – Requisitos Energéticos do Processo
RLE – Requisitos Líquidos de Energia
SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry
TCPO - Tabelas de Composições e Preços para Orçamentos
UNEP – United Nations Environmental Program
VUP – Vida Útil de Projeto

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1 Justificativa do Tema	16
1.2 Objetivos Gerais e Específicos	19
1.3 Hipóteses.....	20
1.4 Metodologia	21
1.5 Estrutura Capítular	23
2. Energia Embutida no Ciclo de vida das edificações	24
2.1 Consumo de Energia no Ciclo de Vida das Edificações	24
2.2 Consumo de Energia Embutida das Edificações	33
2.2.1 Etapa de Fabricação de Materiais	34
2.2.2 Etapa do Transporte	42
2.2.3 Etapa da Construção.....	47
2.2.4 Energia Embutida na fase de uso do edifício.....	48
2.2.5 Fase Pós uso do edifício	57
2.3 Metodologias de cálculo de energia embutida	61
2.3.1 Análise Energética	65
2.3.2 Avaliação de Ciclo de Vida	70
2.3.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida no ambiente construído.....	81
2.3.3 Avaliação de Ciclo de Vida Energético.....	86
2.3.4 Metodologias de Inventário:	87
2.3.5 Energia final e Energia primária	95
2.4. Estratégias de redução de energia embutida.....	104
3. Energia embutida nas edificações brasileiras.....	107
3.1 Consumo de energia pelas Edificações Brasileiras	107
3.2 Consumo de energia nos setores ligados à construção civil.....	114
3.3 Consumo de energia no transporte de cargas.....	116
3.4 Matriz Energética Brasileira.....	120
3.5 Estudos brasileiros de energia embutida	122
3.6 Iniciativas no brasil relacionadas com energia embutida	141
3.6.1 Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida.....	142
3.6.2 Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACV-m)	147
4. Estudo de Caso	151
4.1 Método de cálculo.....	151
4.2 Condomínio Residencial – The Capital	154
4.2.1 Apresentação do Condomínio.....	154
4.2.2 Características construtivas	158
4.3 Processo de coleta de dados.....	158

4.3.1 Energia Embutida nos Materiais	159
4.3.2. Energia Embutida no transporte dos Materiais de Construção até à obra	165
4.3.3 Energia Embutida na obra	170
4.3.4 Fator de Conversão para Energia Primária e Consumo de energia não renovável.....	176
5. Apresentação e Discussão de Resultados	179
6. Considerações finais.....	199
REFERÊNCIAS.....	202
APÊNDICES	214
ANEXOS	232

1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, de natureza introdutória, serão apresentados a justificativa e a relevância do tema escolhido, os objetivos gerais e específicos a que se propõe a presente pesquisa, as hipóteses que se pretende testar, a metodologia escolhida para conduzir o estudo e por fim a estrutura capitular da tese.

1.1 Justificativa do tema

A energia tem representado um papel de destaque no desenvolvimento dos países pelo seu papel no crescimento económico e na melhoria de vida das populações. Os serviços energéticos permitem satisfazer diversas necessidades humanas como por exemplo a necessidade de um ambiente confortável (aquecido ou resfriado), a necessidade de produtos materiais e as necessidades de deslocamento (BLOK; NIEUWLAAR, 2017). Contudo, a forma como a energia é produzida e utilizada está na origem de muitos dos impactos ambientais que testemunhamos, com destaque para as mudanças climáticas em consequência do aumento da concentração de gases de efeito de estufa resultantes da queima de fontes de energia fósseis.

Seja no Brasil ou no mundo como um todo, verifica-se que a sustentabilidade do atual paradigma de desenvolvimento depende cada vez mais da capacidade de conceber sistemas energéticos capazes de, por um lado, atender à crescente demanda por serviços energéticos por parte das populações e, por outro lado, minimizar os impactos ambientais adversos e os pesados investimentos tradicionalmente associados à expansão da oferta de energia.

As edificações destacam-se como grandes consumidores de energia. Com efeito, em 2015 os edifícios (residenciais, comerciais e públicos) foram responsáveis por 30,0% do consumo final de energia no mundo (IEA, 2017a). Já no Brasil, em 2016, a participação das edificações no consumo final de energia e de energia elétrica foi de 14,6% e 51,1%, respectivamente (EPE, 2017). Com o objetivo de reduzir e minimizar o consumo energético no sector de edificações, em especial a partir das crises do petróleo da década de 70, os países, entre os quais o Brasil, têm vindo a adotar instrumentos de regulação energética com foco no chamado consumo energético operacional. Este inclui a energia consumida diretamente para proporcionar conforto aos usuários do edifício (aquecimento, resfriamento, ventilação e

iluminação artificial) e para a realização das atividades que acontecem dentro dos edifícios como cocção, aquecimento de água, e uso de aparelhos eletrodomésticos.

Contudo, para além dos consumos operacionais, durante o ciclo de vida das edificações ocorrem consumos energéticos para construção e manutenção da edificação, designados por energia embutida ou incorporada. No conceito de energia embutida cabem os consumos resultantes das atividades necessárias à fabricação e transporte de materiais de construção, e da construção propriamente dita, quer na construção de novos edifícios quer na reforma de edificações existentes. Com base em Yokoo e Yokoyama (2016), a energia embutida resultante da construção de edifícios é responsável por 20% de toda a energia consumida no mundo sendo que esta porcentagem fica entre 5 e 10% nos países desenvolvidos e entre 10 e 30% nos países em desenvolvimento. Desta forma, a contribuição das edificações para o consumo energético dos países é superior aos valores publicados para os setores residencial, comercial e público na medida em que a sua construção e manutenção está na origem de consumos energéticos contabilizados no setor da construção civil e transportes.

O elevado crescimento populacional dos últimos séculos, associado ao fato de praticamente todas as atividades humanas necessitarem de um ambiente construído, quer seja para habitação quer seja para o desenvolvimento de atividades econômicas, tem resultado no crescimento sem precedentes do ambiente construído no mundo. O setor da construção civil é apontado como o maior causador de impactos ambientais no planeta, com destaque para o consumo de recursos naturais, a geração de resíduos, o consumo de energia, o consumo de água e a poluição ambiental (AGOPYAN; JOHN, 2011). O setor produtivo e de transformação de materiais e componentes da construção é responsável pela extração de cerca de 50% de recursos primários da natureza em massa (CIB; UNEP-IETC, 2002), sendo que o concreto de cimento Portland é o material artificial de maior consumo pelo homem (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Paralelamente, o setor da construção civil tem uma enorme participação na economia dos países, em particular na economia brasileira. De acordo com CBIC (2017), a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2014 a participação da Indústria da Construção Civil para o PIB nacional (avaliado como a soma dos valores adicionados brutos) a preços constantes no Brasil foi de 6,2%. Este valor sobe para 26,4% quando avaliada a sua contribuição para a geração de riqueza na indústria. Relativamente à geração de emprego, novamente referindo CBIC (2017) com base em dados do IBGE, em

2014 o setor da construção civil contribuiu com 8,7% dos empregos das pessoas ocupadas no Brasil.

Assim, por um lado o setor da construção civil está na origem de impactos ambientais importantes mas, por outro, a sua mitigação não pode esquecer o papel do setor na melhoria de vida das populações enquanto provedor de infraestrutura e habitação e como um importante gerador de empregos e de riqueza para ao país. Conforme destacam Agopyan e John (2011), a minimização dos impactos ambientais adversos na construção civil deverá ter em conta o conceito de sustentabilidade no seu sentido amplo, conciliando aspectos ambientais com os econômicos e os sociais.

De acordo com Agopyan e John (2011), no Brasil, à semelhança de outros países emergentes, a demanda por um ambiente construído maior e de melhor qualidade – condição para uma sociedade justa – vai exigir um acentuado crescimento do setor da construção civil que deverá dobrar de tamanho até 2022¹. Em particular no que respeita às edificações cabe referir o elevado déficit habitacional no país avaliado em 6,068 milhões de unidades em 2014 (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2016). As necessidades de construção de novas moradias no Brasil deverão resultar no consumo de energia não só para a sua operação mas também para a sua construção e manutenção. As edificações são produtos com elevada vida útil pelo que as opções tomadas na sua construção terão consequências durante um longo período de tempo. Desta forma, atender às necessidades de infraestrutura, em particular de residências, minimizando os impactos ambientais adversos no seu ciclo de vida e a pressão sob os sistemas de oferta de energia constitui um importante desafio que se coloca ao Brasil.

Ao contrário dos impactos da energia operacional, os impactos embutidos não são regulados na maioria dos países (YOKOO; YOKOYAMA, 2016). Conforme destacam Yohanis e Norton (2002), projetar uma edificação realmente eficiente em termos energéticos requer considerar o impacto das características da edificação quer ao nível do consumo operacional quer da energia embutida. Nesse sentido, os programas habitacionais de combate ao déficit de moradias e as políticas públicas voltadas à melhoria da eficiência energética das edificações deverão adotar uma visão de ciclo de vida.

O desenvolvimento de políticas públicas apresenta-se como um processo complexo já que deverá ter em conta um elevado número de variáveis e fatores que contribuem para o seu sucesso, em particular o conhecimento acurado sobre a realidade que pretendem influenciar.

¹ Estimativa obtida do estudo FGV Projetos, LCA consultoria. Construbusiness 2010 – Brasil 2022: planejar, construir, crescer. São Paulo: Fiesp, 2010.

Enquanto o consumo energético operacional é tipicamente publicado em estatísticas oficiais, o consumo de energia embutida nos países, em particular no Brasil, é uma grandeza difícil de estimar por contabilizar consumos de diferentes setores da economia. Um ponto de partida é o cálculo da energia embutida em estudos de caso particulares que contribuam para a caracterização do tema no Brasil e que sirvam de base ao desenvolvimento de políticas públicas efetivas.

Com base na revisão da literatura, a energia embutida nas edificações brasileiras é um tema que começa a ganhar relevância no meio acadêmico em particular através de estudos de casos de impacto ambiental das edificações e do seu consumo de energia com base em metodologias de avaliação de ciclo de vida. Neste contexto o presente trabalho pretende contribuir para a caracterização do panorama brasileiro no que respeita à energia embutida nas edificações através da realização de um estudo de caso, definindo-se como objetivo principal deste trabalho o cálculo da energia embutida na construção de um condomínio residencial na cidade de Campo Grande em Mato Grosso do Sul.

Quanto às particularidades deste trabalho cabe destacar em primeiro lugar o fato da informação relativa aos materiais de construção consumidos ter sido obtida a partir das notas fiscais de compra o que corresponde a uma avaliação do edifício com base nas quantidades compradas, por oposição a estimativas de projeto e orçamentárias. Em segundo lugar escolheu-se uma edificação em Campo Grande no estado de Mato Grosso do Sul, cidade longe dos grandes centros urbanos e parques industriais do país. Dessa forma, pretende-se avaliar eventuais variações face aos valores publicados na literatura que resultem do fato de terem sido utilizadas no cálculo da energia embutida as quantidades efetivamente consumidas (incluindo o real desperdício) e apurar fatores específicos de localidades longe dos grandes centros urbanos brasileiros.

1.2 Objetivos gerais e específicos

A pesquisa tem como objetivo principal calcular a energia embutida na fase pré-operacional do ciclo de vida de um condomínio residencial na cidade de Campo Grande em Mato Grosso do Sul.

Para concretizar o objetivo apresentado definem-se como objetivos específicos:

- Fazer um levantamento dos fatores que influenciam o consumo de energia embutida no ciclo de vida de uma edificação;
- Elencar as metodologias existentes para cálculo do consumo de energia embutida em edificações;
- Fazer um levantamento dos principais estudos sobre energia embutida no Brasil e das iniciativas existentes;
- Compilar dados brasileiros sobre energia embutida em materiais de construção;
- Estimar o consumo de energia no transporte rodoviário de cargas no Brasil;
- Calcular a contribuição para o consumo de energia embutida inicial das diferentes etapas que constituem a fase pré-operacional do ciclo de vida de uma edificação, em particular a fabricação dos materiais de construção, o seu transporte e a construção do edifício;
- Estimar a participação de energias não renováveis na Energia Embutida inicial das edificações brasileiras;
- Propor medidas com vista à inclusão da energia embutida como critério de eficiência energética na construção das edificações brasileiras;

1.3 Hipóteses

O trabalho de pesquisa realizado e apresentado nesta tese procurou testar as seguintes hipóteses:

Hipótese 1: A energia embutida inicial das edificações é mais elevada quando as quantidades consumidas dos materiais de construção são determinadas a partir das quantidades compradas por oposição a estimativas orçamentárias.

Hipótese 2: A contribuição do transporte para o consumo de energia embutida inicial dos edifícios brasileiros é superior aos valores publicados na literatura para edifícios situados longe dos grandes centros urbanos e industriais.

1.4 Metodologia

A pesquisa apresentada no presente trabalho tem uma abordagem quantitativa, uma vez que o seu objetivo principal é calcular o valor da energia embutida inicial em um condomínio residencial ou seja, os seus resultados são quantificados. Quanto à natureza da pesquisa pode-se classificar como aplicada, já que o seu objetivo é gerar conhecimento para aplicação prática, dirigido à solução de um problema específico. Os seus objetivos são do tipo descritivo tendo como foco um estudo de caso.

Relativamente a procedimentos de pesquisa utilizados cabe dividir o trabalho em duas fases. Na primeira fase da pesquisa procurou-se contextualizar o tema e levantar o estado da arte no que respeita à energia embutida em edificações bem como levantar informações que permitam fazer um panorama do tema no Brasil. Nesta fase foram utilizados como procedimentos a pesquisa bibliográfica e a pesquisa documental. A pesquisa bibliográfica com base em livros e artigos científicos permitiu caracterizar os consumos energéticos ao longo do ciclo de vida dos edifícios, distinguindo consumo operacional de energia embutida, levantar os fatores que contribuem para o consumo de energia embutida nas edificações nas diferentes etapas do seu ciclo de vida, descrever as metodologias existentes para o seu cálculo no ambiente construído e elencar algumas estratégias de redução de energia embutida em edifícios. Ainda com base em pesquisa bibliográfica foram revisados um conjunto de estudos brasileiros onde são calculados valores da energia embutida em edificações, em materiais de construção ou em sistemas construtivos. Quanto à pesquisa documental, foram analisados documentos publicados no Brasil a nível governamental que permitiram coletar informações sobre o consumo de energia nos setores de edifícios, industrial e transportes, caracterizar a matriz energética do país e levantar as principais iniciativas brasileiras no que respeita a energia embutida em edificações.

Na segunda fase da pesquisa foi feito um estudo de caso com vista ao cálculo da energia embutida inicial em um condomínio residencial na cidade de Campo Grande no Estado de Mato Grosso do Sul. O método de cálculo utilizado baseia-se nas metodologias levantadas, em particular em Avaliação de Ciclo de Vida Energético, e a sua descrição é feita no capítulo 4 desta tese. Para a coleta dos dados necessários à aplicação do método ao condomínio residencial em estudo utilizaram-se como procedimentos: pesquisa bibliográfica e documental, para levantamento de coeficientes de energia embutida em materiais de construção brasileiros e coleta de dados para estimativa do consumo de energia no transporte

rodoviário de cargas no país; análise de documentos como notas fiscais da empresa construtora com o objetivo de quantificar os materiais utilizados na obra e os serviços contratados para execução da obra; entrevistas informais com os proprietários e funcionários da empresa construtora, a fim de obter dados relativos às características construtivas do edifício e ao processo de construção, como equipamentos utilizados na obra; entrevistas informais com funcionários das lojas e empresas onde foram comprados e/ou produzidos os materiais de construção bem como consulta de sites das empresas produtoras para obtenção de dados sobre peso unitário dos produtos e localização da fábrica; entrevistas informais com funcionários das empresas contratadas para prestar serviços na obra com o objetivos de coletar dados sobre consumo energético de equipamentos.

Os resultados do estudo de caso foram discutidos tendo em conta o embasamento teórico obtido relativamente ao consumo de energia embutida em edificações e o panorama brasileiro levantado, e foram comparados com os objetivos estabelecidos para a pesquisa.

Na figura 1 apresenta-se um esquema com as etapas da pesquisa e procedimentos utilizados.

Figura 1 – Metodologia da pesquisa

Fonte: Elaboração própria.

1.5 Estrutura capitular

A presente tese está dividida em 6 capítulos. O primeiro, de natureza introdutória apresenta a justificativa do tema, os objetivos principal e secundários a que se propõe o trabalho, as hipóteses testadas ao longo do estudo efetuado, a metodologia aplicada para concretizar a pesquisa e a organização capitular do trabalho.

Os capítulos 2 e 3 correspondem à revisão bibliográfica efetuada para contextualização do tema e levantamento do panorama brasileiro quanto à energia embutida nas suas edificações. Especificamente no capítulo 2, apresenta-se a definição de energia embutida com base nas etapas do ciclo de vida energético das edificações nela incluídas, faz-se a distinção entre energia embutida inicial e energia embutida recorrente e caracterizam-se os fatores que explicam o consumo de energia embutida até à construção da edificação, durante o seu uso e nas etapas de fim de vida. Ainda no capítulo 2 enumeram-se as metodologias existente para cálculo da energia embutida em edificações referindo-se as principais características de cada uma. Termina-se o capítulo com um levantamento de estratégias de redução de energia incorporada no ciclo de vida dos edifícios.

Quanto ao capítulo 3, a informação nele apresentada tem como objetivo reunir dados que contribuam para elaborar um panorama da energia embutida na construção de edificações no Brasil, tais como os consumos energéticos dos setores de edificações, industrial e transportes e a caracterização da matriz energética brasileira. O levantamento de informações sobre a energia embutida no Brasil segue com uma revisão de estudos publicados no meio acadêmico e em revistas científicas sobre o tema e termina com referência às principais iniciativas públicas relacionadas com o consumo de energia embutida das edificações no país.

No capítulo 4 descreve-se o estudo de caso, em particular listam-se as principais características do condomínio residencial estudado, e o método aplicado para cálculo da energia embutida inicial, descrevendo-se o processo de coleta de dados e cálculos intermédios efetuados.

O capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados obtidos face aos objetivos propostos. Termina-se este trabalho com um capítulo de considerações finais onde se destacam os principais resultados e sugerem-se temas para futuras pesquisas.

2. ENERGIA EMBUTIDA NO CICLO DE VIDA DAS EDIFICAÇÕES

Neste primeiro capítulo de revisão bibliográfica, apresenta-se em primeiro lugar a definição de energia embutida no consumo energético de ciclo de vida das edificações. No ponto seguinte caracteriza-se a energia embutida nas edificações apresentando os fatores que contribuem para o seu consumo. Por fim, descrevem-se as metodologias referidas na literatura para cálculo da energia embutida e listam-se algumas estratégias para redução do seu consumo nas edificações.

2.1 Consumo de Energia no Ciclo de Vida das Edificações

As edificações têm como principal função abrigar o homem nas suas diversas atividades proporcionando conforto, segurança e satisfação. Os edifícios consomem energia para providenciar bem estar e conforto aos seus ocupantes, em particular para manter condições ambientais adequadas, operar diferentes equipamentos e para cocção. Tratam-se de consumos energéticos que acontecem por uso do edifício e que são publicado nos balanços energéticos nacionais devidamente atribuídos aos setores residencial, comercial e público.

Porém, para além destes consumos energéticos, podemos falar de outros consumos das edificações que não são visíveis como tal, uma vez que a sua contabilização nas estatísticas energéticas dos países surge incluída em outros setores de atividade. É o caso da energia consumida em atividades como a fabricação de materiais de construção, transporte até ao local de construção, construção da edificação no seu local de implantação, manutenção e reforma do edifício, entre outras.

A fim de captar todos os consumos energéticos relacionados com as edificações é necessário adoptar uma visão de ciclo de vida que considere toda a vida útil do edifício. Os edifícios têm um longo período de vida útil durante o qual são alvo de constantes mudanças envolvendo um grande número de pessoas no seu projeto, construção e uso. Por essa razão o ciclo de vida de um edifício não corresponde aos de outros produtos de consumo. Conforme definido por European Commission (2010), distinguem-se as seguintes etapas no ciclo de vida genérico de um produto: extração de matérias primas, manufatura, montagem, venda, uso e fim de vida. Quando falamos especificamente do ciclo de vida das edificações, verifica-se que diferentes autores dividem-no em diferente número de etapas. Com base em Yokoo e Yokoyama (2016), Tavares (2006), Sartori e Hestnes (2007) e Dixit, Culp, Fernandez –Solís

(2013), apontam-se 3 grandes fases no ciclo de vida das edificações, subdivididas em etapas nas quais acontecem diferentes processos, conforme pode ser visualizado na figura 2.

Figura 2 – Ciclo de Vida das Edificações

Fonte: Elaboração própria.

A. Fase de Pré-Use

Na fase de pré-uso (ou fase pré-operacional) incluem-se todas os processos até à conclusão da construção do edifício, de acordo com as seguintes etapas:

A1 Extração e Processamento de Matérias-Primas

A2 Transporte das Matérias Primas

A3 Manufatura dos Materiais de Construção

A4 Transporte dos Materiais de Construção

A5 Construção do edifício

B. Fase de Uso

Na fase de uso (também chamada fase operacional) incluem-se todos os consumos que acontecem durante o uso do edifício em particular os consumos de energia pelos usuários do edifício e a energia despendida nos processos de manutenção e reforma do edifício:

B1 Uso do Edifício

B2 Manutenção, reparos e reformas do edifício

C. Fase de Pós-Uso

Na fase de pós-uso (ou pós-operacional) incluem-se o consumo de energia nas etapas de fim de vida do edifício:

C1 Desconstrução e/ou Demolição

C2 Transporte de resíduos

C3 Disposição Final

Em cada etapa do ciclo de vida acontecem processos com fluxos de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*). Quanto aos *inputs*, muitos materiais são requeridos para produzir um produto distinguindo-se recursos primários, pré-produtos, consumíveis e materiais operacionais², energéticos, entre outros (CRAWFORD, 2011). A maioria destes materiais passam por processos de preparação e manufatura a montante do processo central (os chamados processos *upstream*) que resultam no uso de mais materiais e energia. Também a jusante do processo central (processos *downstream*) acontecem gastos energéticos e de materiais que passaram por processos de preparação e manufatura. Desta forma, ao longo do ciclo de vida de um edifício, estabelece-se uma longa cadeia de *inputs* e *outputs* com impactos ao nível do ambiente. Boustead e Hancock (1979) estabelecem como fronteira natural o ponto para qual as matérias primas são derivadas do meio ambiente. Com base em Koning et al. (2010), cabe distinguir uma fronteira espacial e temporal. No estudo ciclo de vida completo, a fronteira espacial estabelece-se na fronteira com a natureza, e a fronteira temporal deverá incluir todas as etapas do ciclo de vida desde a produção ao fim de vida. A figura 2 apresenta a fronteira de análise de uma edificação incluindo a integração horizontal, no sentido de incluir todas as etapas de ciclo de vida, e a integração vertical para incluir os processos *utpstream* e *downstream* de cada processo do ciclo de vida do edifício.

² Materiais que são consumidos no processo mas não irão fazer parte do produto final.

Na avaliação do consumo energético de uma edificação, nem sempre a fronteira de análise integra todos os processos dos ciclo de vida seja por razões relacionadas ao problema em estudo ou por uma questão de disponibilidade de informação. Consoante as etapas do ciclo de vida consideradas, definem-se diferentes fronteiras de análise que podem ser visualizadas na figura 3 (YOKOO; YOKOYAMA, 2016):

- Berço ao Portão (*cradle-to-gate*) – análise que inclui apenas a fase de produção levando em consideração a extração de matérias primas, o transporte e o processo de manufatura do produto;
- Berço ao local de construção (*cradle-to-site*) – análise que inclui todas as etapas da fase de produção (extração de matérias primas, transporte e processo de manufatura) e acrescenta o transporte até ao local de construção;
- Berço à entrega (*cradle-to-handover*) – análise que inclui todas as etapas da fase de produção (extração de matérias primas, transporte e processo produtivo), o transporte até ao local de construção e o processo de construção e montagem do edifício;
- Berço ao fim do uso (*Cradle-to-end-of-use*) – análise que acrescenta à fronteira anterior a etapa de uso, onde se inclui o processo de manutenção e reparos (incluindo a produção e instalação de produtos substitutos e a disposição final de produtos substituídos);
- Berço ao túmulo (*Cradle-to-grave*) - inclui todas as etapas da fase de produção (extração de matérias primas, transporte e processo produtivo), o transporte até ao local de construção, o processo de construção e montagem do edifício, a etapa de uso onde se inclui o processo de manutenção e reparos (incluindo a produção e instalação de produtos substitutos e a disposição final de produtos substituídos) e o fim de vida onde se inclui o processo de demolição, transporte, processamento de resíduos e disposição final.

De acordo com a revisão da literatura, os consumo energéticos que acontecem em cada fase do ciclo de vida dos edifícios podem ser classificados em Energia Operacional (EO) ou Energia Embutida (EE) também chamada de energia incorporada. No consumo operacional, que corresponde à etapa B1 da figura 2, cabem os consumo energéticos que resultam do uso do edifícios pelos seus usuários. Dentro desta definição cabem serviços energéticos como o condicionamento ambiental (aquecimento e resfriamento), iluminação,

aquecimento de água, cocção e consumo de energia por aparelhos eletrônicos, tais como geladeiras, aspiradores, ferro de passar, secador de cabelo, televisão e DVD, computadores, entre outros (DIXIT et al., 2010).

Figura 3 – Fronteiras de análise do ciclo de vida das edificações

Fonte: Elaboração própria a partir de Yokoo e Yokoyama, 2016.

Já o conceito de Energia Embutida apresenta variabilidade na literatura. Autores como Dixit et al. (2012), Yokoo e Yokoyama (2016) e Haynes (2010) referem-se à energia embutida como a energia consumida no ciclo de vida de um edifício em etapas não operacionais. Nesta definição cabem as etapas da Fase Pré-Us do edifício (A1 a A6 na figura 2), as etapas relacionadas com a manutenção e reforma do edifício durante a Fase de Uso (B2 na figura 2) e as etapas de fim de vida do edifícios (C1 a C3 da figura 2). Outros autores como Sartori e Hestnes (2007), Hammond e Jones (2008) e Crawford (2012) incluem na EE a energia consumida por todos os processos associados com a produção e manutenção de um edifício desde a extração e processamento de recursos primários à manufatura, transporte e entrega do produtos (A1 a A6 e B2). A diferença entre as duas abordagens estaria na inclusão dos consumos de energia de fim de vida na fronteira de análise para cálculo de energia embutida.

Conforme destacam Dixit et al. (2012), outro tema não consensual na literatura diz respeito ao tipo de energia incluída nos cálculos de EE, sendo que autores como Hegner³ (2007 apud. Dixit et al., 2012) e Upton et al.⁴(2008 apud Dixit et al., 2012) defendem que apenas a energia disponível em quantidades limitadas (originada em recursos não renováveis) deve ser considerada como energia incorporada. Com base no tratamento dado às fontes de energia renovável, Yokoo e Yokoyama (2016) apresenta três definições de EE:

- Energia embutida é a demanda acumulada de energia primária não renovável (com exceção da energia nuclear) para todos os processo relacionados com a criação de um produto, a sua manutenção e fim de vida;
- Energia embutida é a demanda acumulada de energia primária não renovável para todos os processo relacionados com a criação de um produto, sua manutenção de fim de vida;
- Energia Embutida é a demanda acumulada de energia primária (renovável e não renovável).

As definições de EE de Yokoo e Yokoyama (2016) reforçam que a energia consumida no ciclo de vida de uma edificação deverá ser quantificada em termos de energia primária e não em termos de energia consumida. Quando quantificada em termos de energia primária, o consumo de energia numa perspectiva de ciclo de vida associado ao conhecimento da matriz de produção de energia do país pode constituir um indicador das emissões de gases de efeito de estufa atribuíveis ao edifícios e como tal do seu impacto no ambiente (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

A partir da comparação entre EE e EO é possível calcular o Retorno Energético de determinado edifício que expressa o tempo necessário para o consumo operacional igualar a energia embutida consumida até à construção do edifício (TAVARES, 2006). A revisão da literatura com foco no consumo energético das edificações numa perspectiva de ciclo de vida coloca em evidência o fato do peso da EO ser em geral muito superior quando comparado ao da EE. Cabe referir o trabalho de Ramesh, Prakash e Shukla (2010), baseado em 73 casos de

³ HEGNER, S. Embodied energy for energy efficiency measures, an assessment of embodied energy's relevance for energy saving in the Swiss residential building sector. Diploma Thesis. Department of Environment Science, ETH, Zurich, Switzerland; 2007.

⁴UPTON et al. The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. Biomass and Bioenergy 2008; 32(1):1–10.

estudo distribuídos por 13 países e considerando tanto edifícios residenciais quanto edifícios comerciais, segundo o qual o peso da EO varia entre 80-90% do total de consumo de energia no ciclo de vida da edificação e o da EE entre 10-20%. Também Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) com base em uma revisão de literatura aponta valores entre 10-20% para a contribuição dos consumos energéticos relacionados com os materiais nos chamados edifícios convencionais.

Contudo alguns fatores parecem explicar diferentes pesos para os dois consumos energéticos no ciclo de vida da edificação. Sartori e Hestnes (2007) constataram que as estimativas de valores de energia embutida parecem variar muito de país para país dependendo das fonte de energia que estão disponíveis, do processo de transformação que gerou essa fonte a partir do recurso primário e a eficiência do processo industrial e do sistema econômico que produziu os materiais. Nebel, Alcorn e Wittstock⁵ (2008 apud DIXIT et al., 2012) acrescenta que o peso da EE face à EO depende também da localização geográfica e do clima: em climas onde prevalecem as necessidades de aquecimento, a EE representa uma porcentagem relativamente pequena do consumo da edificação no ciclo de vida, o que pode já não ser verdade para climas moderados ou com necessidades de resfriamento, onde o consumo de EO é menor. Segundo Tavares (2006), pesquisas desenvolvidas na Austrália, por Pullen (1995⁶ apud Tavares, 2006), e nos Estados Unidos da América por Blanchard e Reppe (1998⁷ apud Tavares, 2006), indicam que os consumos associados aos equipamentos de climatização naqueles países representam 40% e 80% respectivamente do total de energia na fase operacional da vida da edificação. Silva (2012) destaca ainda a influência da estabilidade econômica e do nível de poder aquisitivo da população na elevada participação da EO no ciclo de vida das edificações pelo acesso a eletrodomésticos e outros aparelhos consumidores de eletricidade. Bastos, Batterman e Freire (2014) referem que a maioria dos estudo de ACV de edifícios foram desenvolvidos em países desenvolvidos e em regiões de climas frios o que vai de encontro à elevada contribuição da EO tipicamente referida n literatura.

Os resultados do estudo de Tavares e Lamberts (2005) parecem confirmar a influência do clima e do poder aquisitivo da população na relação entre consumo operacional e energia

⁵ Nebel B, Alcorn A, Wittstock B. Life cycle assessment: adopting and adapting overseas LCA data and methodologies for building materials in New Zealand. New Zealand: Ministry of Agriculture and Forestry; 2008.

⁶ PULLEN, S.F. Embodied Energy of Building Materials in Houses. Masters thesis, University of Adelaide, Adelaide, p. 227. 1995.

⁷ BLANCHARD, S; REPPE, P. Life cycle analysis of a residential home in Michigan - Report No 1998-5. University of Michigan. USA. Setembro, 1998.

embutida das edificações: a contribuição da energia embutida para o consumo de energia no ciclo de vida das edificações brasileiras é da ordem dos 40%, valor acima dos valores tipicamente apresentados pelos chamados países desenvolvidos, o que pode ser consequência por um lado do clima brasileiro ser em geral mais quente (com menores necessidades de condicionamento ambiental) e, por outro, da população ter em média um menor poder aquisitivo.

A grande contribuição da EO para o consumo de energia total no ciclo de vida das edificações tem justificado que os esforços de redução de consumo energético se concentrem tradicionalmente na fase de uso, em particular no consumo energético para aquecimento nos países com invernos frios. Desde a década de 70, os países chamados desenvolvidos, que apresentam na sua maioria invernos rigorosos, têm desenvolvido e implementado instrumentos de regulação no sentido de minimizar o consumo de energia nas suas edificações. Em resultado de tais esforços, com o aumento da eficiência energética na fase operacional dos edifícios, verifica-se que a contribuição da energia embutida para o consumo de ciclo de vida tem aumentado. De acordo com a revisão bibliográfica efetuada por Sartori e Hestnes (2007), nos chamados edifícios de baixo consumo energético⁸ o peso da energia embutida variou entre 9 e 46% enquanto que em edifícios convencionais o seu valor ficou entre 2 e 38%. Também Thormark (2007) se refere ao fato de nos edifícios de baixo consumo o valor da energia embutida apresentar um valor significativo no seu consumo energético de ciclo de vida, estimando um valor entre 40-60%.

O aumento do peso da EE no consumo energético de ciclo de vida das edificações eficientes resulta de dois fatores: por um lado o fato do consumo total ser inferior por redução do consumo operacional; e, por outro, pelo fato das estratégias de redução da demanda por energia operacional implicarem o aumento no uso de materiais, em especial de materiais intensivos em energia tanto na envoltória do edifício quanto nas instalações técnicas (WINTHER; HESTNES; 1999; SARTORI; HESTNES, 2007; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Assim, apesar dos estudos demonstrando a existência de uma relação quase linear entre o consumo de EO e o consumo total de energia no ciclo de vida (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010), para edifícios muito eficientes em termos de consumo energético operacional torna-se crítico ponderar até que ponto é atrativo em termos

⁸ Edifício construído de acordo com critérios de projeto voltados para a minimização do consumo operacional de energia do edifício (SARTORI; HESTNES (2007).

energéticos o investimento em medidas e tecnologias que impactam no aumento da EE do edifício, para que não haja risco de aumentar o consumo total de energia por aumento da EE. Com a redução da energia necessária para operação do edifício torna-se mais importante prestar atenção aos fatores que influenciam a EE (THORMARK, 2006). Assim, para projetar uma edificação realmente eficiente em termos energéticos é necessário considerar o impacto das características da edificação quer ao nível do consumo operacional quer da energia embutida ou seja, requer avaliar a sua eficiência energética numa perspectiva de ciclo de vida.

De acordo com Yokoo e Yokoyama (2016), nos anos 90 os estudos sobre energia embutida e seus impactos ainda eram reduzidos. Durante os anos 2000 a taxa de publicação de trabalhos sobre o tema foi aumentando gradualmente com aumento expressivo a partir de 2007. Com efeito, o aumento do número de publicações com foco no cálculo da energia embutida nas edificações reflete o aumento do interesse no assunto por diferentes stakeholders a diferentes níveis desde a esfera governamental a projetistas das edificações, produtores de materiais de construção e investidores.

No contexto da crescente importância dos impactos da EE nas edificações, os métodos que permitem a sua estimativa vão ganhar importância no futuro. Ao contrário do que acontece com o consumo de EO, o consumo de EE não é regulado na maioria dos países. Dixit et al. (2010) conclui da sua pesquisa que medir a EE é um processo complexo e que, embora já tenham sido desenvolvidos vários métodos para computar EE nas edificações e nos materiais de construção, não existe um método de aceitação geral que seja preciso e consistente resultando em grandes variações e incompatibilidade de resultados. A compatibilidade dos valores de EE a nível mundial e a confiabilidade são qualidades vitais que estes devem apresentar para o sucesso na implementação de instrumentos de regulação ambiental (DIXIT et al., 2012). Yokoo e Yokoyama (2016) refere que a situação atual de cálculo de energia embutida em termos de métodos e condições varia muito dependendo do país e do pesquisador, resultando em grande variabilidade de resultados. Os autores concluem pela necessidade de padronização e de documentos e orientações que abordem os métodos para reduzir a energia embutida.

2.2 Consumo de Energia Embutida das Edificações

Conforme visto na seção anterior, não há um consenso na literatura sobre a definição de EE ou incorporada no que respeita às etapas de ciclo de vida incluídas e ao tipo de energia contabilizada quanto à sua renovabilidade. Alguns autores incluem na EE todos os consumos energéticos não operacionais, enquanto outros excluem da EE as etapas de fim de vida. Em termos de origem da energia contabilizada, estudos na literatura defendem a inclusão apenas das fontes não renováveis, enquanto outros contabilizam toda a energia consumida qualquer que seja a fonte que lhe deu origem.

Dentro do conceito de EE, distingue-se Energia Embutida Inicial (EE_i) de Energia Embutida Recorrente (EE_R) ou de Manutenção. Energia embutida inicial é o valor resultante do consumo energético nas etapas até ao final da construção do edifício (etapas identificadas como EE_i na figura 1). Já a Energia Embutida Recorrente corresponde aos consumos de energia embutida na etapa de uso (identificada como EE_R na figura 1). A EE_R inclui os consumos necessários para produzir e transportar os materiais que serão utilizados na manutenção e reforma do edifício e os consumos energéticos nos processos de manutenção e reforma. Os resultados de Tavares (2006) avaliam o retorno energético de uma moradia residencial em 23 anos quando se considera apenas a EE_i , valor que sobe para 32 anos quando se considera a EE_i e a EE_R .

Cada edificação apresenta características que a tornam única e, como tal, cada etapa do seu ciclo de vida apresenta uma contribuição diferente para a sua energia embutida. Contudo, com base na revisão da literatura efetuada é consensual apontar a etapa de produção dos materiais de construção como a de maior contribuição, com valores da ordem dos 90%. Relativamente ao transporte, com base em Tavares (2006) a sua contribuição situa-se, entre 5-6% da EE_i . Já a etapa da construção apresenta uma contribuição para a energia de ciclo de vida tipicamente reduzida mas também variável. Adalberth⁹ (1996 apud WINTHER; HESTNES, 1999) conclui que a energia consumida na construção do edifício no local de implantação constitui 7% da energia embutida nos materiais. Nos estudos de Sharma et al. (2011), a fase de construção responde por 0,4-11% do consumo de energia no ciclo de vida da edificação e segundo Yokoo e Yokoyama (2016) o seu peso na energia embutida do edifício

⁹ ADALBERTH K. (1996) Energy demand during the life cycle of a building. In *Proceedings of the International Symposium of CIB W67*, Panzhauser E. (Ed), pp. 343–348. Vienna, Austria.

situa-se entre 7-12%. Sartori e Hestnes (2007) concluíram que nos casos de estudo que consideram as fases de construção, demolição e transporte, estas são negligenciáveis já que a sua contribuição não vai além de 1% do consumo energético no ciclo de vida do edifício.

A energia embutida nas edificações apresenta enorme variabilidade de valores resultante da metodologia de cálculo utilizada (em particular no que respeita à fronteira de análise definida e ao método de coleta de dados de inventário), de fatores relacionados com o projeto (tais como as tecnologias construtivas e as quantidades de materiais empregues) e com o país onde se realizou o estudo (com destaque para a tecnologia e eficiência das indústrias de manufatura de materiais de construção, para os meios de transporte de carga utilizados e para a matriz energética).

A coleta de dados relativos à EE em edifícios é extremamente complexa uma vez que resulta da consolidação de informações de diversos setores, tais como: do setor da construção civil; dos setores industriais relacionados com a produção de materiais de construção (como o cimento e o aço); de uma parcela do setor dos transportes associada com o deslocamento de materiais de construção; e parte do consumo de energia do setor energético que corresponde ao processo de produção, conversão e fornecimento de energia consumida nos processos que fazem parte do ciclo de vida dos edifícios.

As metodologias de cálculo de energia embutida serão abordadas na seção 2.3 deste capítulo. Nos próximos pontos caracterizam-se os consumo energéticos de cada etapa do ciclo de vida das edificações e a sua contribuição para a energia embutida.

2.2.1 Etapa de Fabricação de Materiais

A EE em materiais de construção, apesar de ser classificada como um consumo indireto por não resultar da atividade da construção civil propriamente dita, representa a maior parcela da EE dos edifícios. A contribuição de cada material para a energia embutida de um edifício específico pode ser calculada multiplicando o coeficiente de energia embutida do material pela quantidade utilizada do material na construção do edifício. Com base em Sperb (2000), define-se coeficiente de energia embutida (também chamado de índice energético) como a quantidade de energia consumida durante a extração de matérias primas e manufatura do material por unidade de massa do material, ou seja, como a energia consumida no seu ciclo de vida numa abordagem berço ao portão. Os valores são normalmente apresentados em unidade energéticas (avaliadas em Joules) por unidade do material - MJ/kg e MJ/m³ - ou

unidades energéticas por unidade de área - MJ/m² quando se comparam elementos construtivos como fachadas, pisos ou coberturas (TAVARES, 2006).

Atendendo à definição apresentada conclui-se que a energia embutida em um material depende fortemente do seu processo produtivo (em particular da tecnologia empregue e da eficiência do processo) e das fontes de energia consumidas pela indústria que o produziu. A indústria de manufatura inclui todas as empresas que produzem bens materiais a partir de matérias primas ou de produtos intermediários, entre eles os materiais consumidos pela indústria da construção civil. Uma parte substancial da energia consumida na indústria de manufatura é usada pelas chamadas indústrias energo-intensivas, definidas como indústrias onde o consumo de energia por unidade de valor acrescentado é elevado, com os custos energético a atingirem proporções superiores a 3% dos custos totais de produção (BLOK; NIEUWLAAR, 2017). Grande parte dos materiais de construções são produzidos por setores energo-intensivos em particular: Ferro e Aço, metais não ferrosos (dos quais o alumínio é o mais importante), químicos básicos e minerais não metálicos como cimento, tijolos e ladrilhos, vidro, etc. (BLOK; NIEUWLAAR, 2017).

A utilização da energia nestes setores acontece devido a processos de conversão de materiais que em grande parte dos casos acontecem a temperaturas elevadas (800°C-1500°C) por razões relacionadas com o equilíbrio químico da reação, com a favorabilidade da cinética da reação, e com a facilidade de separação dos produtos. O fornecimento de energia acontece num grande número de vezes através da queima de um combustível sendo que em alguns casos o próprio combustível participa da reação e fornece calor. Nos processos em que a transformação química é feita por eletrólise, a eletricidade é utilizada como fonte de energia. Para além de ser usada nos grandes processos de conversão, a energia nestes setores industriais é também consumida para o pré-tratamento das matérias primas ou para separação e tratamento de materiais intermediários (BLOK; NIEUWLAAR, 2017).

É importante destacar que o impacto do consumo de energia por um material deve ser avaliado não só com base na quantidade de energia consumida na fábrica. Para além do valor de consumo energético é necessário conhecer as fontes energéticas e processos de conversão utilizados para fornecer a energia consumida no processo industrial, já que o impacto ambiental de um consumo energético depende do recursos primário e do processo de conversão utilizados na sua cadeia de suprimento. Nesse sentido, a matriz energética da indústria de um país e de um setor produtivo em particular é crítica para a avaliação do

impacto ambiental de um material de construção. A questão da conversão de energia secundária para energia primária será aprofundada na seção 2.3.5 deste trabalho.

Na tabela 1 apresentam-se valores de energia embutida (em MJ) por unidade de massa (kg) em alguns dos materiais de construção mais comuns de acordo com diferentes fontes consultadas.

Tabela 1 – Coeficientes de Energia Embutida em materiais de construção

Material	Energia Embutida (MJ/kg)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Aço – Chapa Galvanizada	33,80			28,50
Aço – Chapa Dobrada	30,00			
Aço – Laminado CA 50A	30,00			
Aço – Reciclado	12,50		8,60	
Aço- Reforçado		24,30	31,30	
Aço Inoxidável			74,80	56,70
Acrílico	80,00			
Água	0,02			
Alumínio		136,80	192,00	155,00
Alumínio Lingote	98,20			
Alumínio Anodizado	210,00			
Alumínio Reciclado – Extrudado	17,30			
Alumínio Reciclado - Anodizado	42,90			
Alumínio Reciclado			9,00	
Areia	0,05			0,0081
Argamassa Mistura	2,10	2,20		1,33
Asfalto	51,00			
Batente – Madeira Aparelhada	3,50			
Borracha Natural – látex	69,00			73,38
Borracha Sintética	135,00			95,88
Brita	0,15			5,3
Cal Virgem	3,00			
Carpete	50,00			
Cera	52,00			
Cerâmica – Azulejo	6,20	15,60	6,70	12,0
Cerâmica – 8 furos	2,90	3,60	2,70	3,0
Cerâmica – Branca	25,00			29,0
Cerâmica – piso esmaltado	5,00			
Cerâmica – revestimento biqueima	6,20			

Continua

Continuação

Material	Energia Embutida (MJ/kg)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Cerâmica – revestimento monoqueima	5,10			
Cerâmica - Porcelanato	13,00			
Cerâmica – Refratária	32,40			
Cerâmica Telha	5,40	4,60		
Chapa de Compensado	8,00			
Chumbo lingote	21,00			
Cimento Portland	4,20	4,20	6,20	5,50
Cobre	75,00	35,60		42,00
Cobre Reciclado			2,40	
Concreto Armado	3,10			0,74
Concreto Bloco	1,00		0,90	
Concreto Reforçado		1,80		
Concreto Simples	1,20	1,10	0,90-1,40	
Concreto - Telha		2,70		
Cortiça - Prancha		51,50	97,60	
Dobradiça – ferro	40,00			
Fechaduras	55,00			
Ferro Fundido	32,80			25,0
Fibra de Celulose		10,50		
Fibra de Vidro	24,00			28,00
Fibrocimento – Telha	6,00	9,50	11,40	
Fio termoplástico	83,00			
Gesso	4,00			
Gesso cartonado	6,10		7,40	
Granito	2,00			
Lã Mineral	19,00			
Lã de Madeira		20,30		
Lã de Rocha		26,40		
Lã de Vidro			32,10	
Latão	80,00			80,00
Madeira – aparelhada seca forno	3,50			
Madeira – aparelhada seca ar livre	0,50			
Madeira – Pinheiro seco			3,00	
Madeira – Pinheiro seco a gás			9,70	
Madeira laminada			13,60	9,50

Continua

Conclusão

Material	Energia Embutida (MJ/kg)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Madeira laminada – colada	7,50			12,00
Madeira – MDF	9,00			11,00
Mármore	1,00			
Marmorite	0,48			
Palha	0,24			
Papel	18,54			
Papel Kraft	37,70			
Papel de Parede	36,40			
Placa de Gesso	4,50			6,75
Poliamida – nylon	125,00			120,55
PVC		73,20	60,90	77,20
Poliestireno expandido	112,00	105,50	58,40	76,70
Polietileno de alta densidade	95,00			
Polipropileno	83,80			
Poliuretano – espuma	74,00	103,80		102,10
Porta – madeira aparelhada	3,50			
Prata	128,20			
Selante – formaldeído	80,00			88,00
Solo-cimento –bloco	0,60			
Solvente – tolueno	67,90			
Telha de vidro	23,13			
Tinta Acrílica	61,00			
Tinta Óleo	98,10			
Tinta PVA Látex	65,00			
Torneiras e Registros	95,00			
Tubo - PVC	80,00			
Tubo de Ferro Galvanizado	33,80			
Vermiculita	1,37			
Vidro Plano	18,50	15,50	15,90	15,00
Vidro Blindex	26,20			
Vinil	47,00			
Zinco	51,00			72,00

Fonte: (1) Bribrián, Capillas e Usón (2011), (2) Alcorn, (2003), (3) Tavares (2006)¹⁰, (4) Hammond e Jones (2011).

¹⁰ Boustead e Hancock (1979), Brasil 1982, Guimarães, 1985, Alcorn, 1996, Lawson, 1996, Andersen, 1993, Blanchard, 1998, Scheuer e Reppe, 2003, Finep/PCC/USP, Agopyan et al. 1998, INcropera (1992), VanVlack, (1970)) apud Graf e Tavares (2010).

Com base nos valores apresentados pode afirmar-se que existe uma grande variabilidade nos valores de EE nos materiais encontrados na literatura. Silva (2013) usou uma ferramenta de cálculo para determinar a energia embutida inicial de uma edificação em um estudo de caso considerando os valores mínimos e máximos de energia embutida nos materiais encontrados na literatura: quando usou os valores máximos a EE resultante foi 30 vezes superior ao resultado quando usou os valores mínimos.

A variabilidade dos valores encontrados para a energia embutida nos materiais de construção é explicada por um conjunto de fatores. Com base em Tavares (2006) e Agopyan e John (2011) a dificuldade de obter números precisos para EE nos materiais de construção pode ser atribuída a fatores como:

- A variação dos processos industriais e atividades econômicas entre países no que respeita às tecnologias empregues e sua eficiência;
- A variação na eficiência do consumo de energia entre fábricas modernas (geralmente mais econômicas energeticamente) e antigas;
- Variações na matriz energética dos países;
- A coleta de dados ser feita a partir de processos produtivos específicos ou com base em análise estatística onde os dados são apresentados de forma agregada para o setor;
- As diferenças no material relativamente aos fornecedores de matérias primas com diferentes políticas de tratamento de resíduos e níveis de reciclagem;
- Variações na composição da peça.

Atendendo aos fatores apresentados, pode concluir-se que os valores de energia embutida nos materiais estão muito associados ao fornecedor do material, em particular à sua localização, à idade dos dados, metodologia de coleta de dados em termos da sua agregação, diferenças nas matérias primas e variações no próprio produto. Desta forma, os valores entre fornecedores podem ser consideravelmente diferentes e variar significativamente face à média do setor.

Relativamente à escolha de materiais para a construção de edifícios é importante destacar que o coeficiente de energia embutida não pode ser utilizado por si só como indicador de sustentabilidade dados os fatores de variabilidade. Para além disso a sua avaliação isoladamente pode levar a escolhas erradas na medida em que materiais com

valores de energia incorporada por unidade mais alta podem desempenhar a mesma função com menor massa. Assim, na avaliação da energia embutida nos materiais, é preciso considerar as quantidades consumidas para uma edificação em particular.

As quantidades consumidas de cada material no processo de construção dependem em primeiro lugar do design da edificação. Para além do projeto específico de cada edifício é necessário considerar a questão do desperdício. Com base em Silva (2013), o desperdício de materiais na etapa da construção pode ter duas causas: o emprego de materiais para além do estritamente necessário (de que são exemplos a utilização de espessuras de revestimento e de concreto com resistência maiores do que a necessária) e que podem ter origem no próprio projeto ou na execução; materiais que são danificados durante a construção pela má atuação da mão de obra ou pela omissão, como por exemplo o armazenamento incorreto.

Yokoo e Yokoyama (2016) apresenta percentuais de desperdício na obra para alguns materiais comuns:

- 4% do concreto in-situ é desperdiçado;
- 20% dos tijolos são desperdiçados devido a erros de compra (quantidade a mais) e mau manuseio do material;
- 10% dos metais ou madeira são desperdiçados no local da construção.

Atendendo às considerações feitas, podemos concluir que a contribuição de cada material para a energia embutida inicial de uma edificação deverá resultar do coeficiente de energia embutida considerado e das quantidades empregues na construção. A figura 4 extraída do estudo de Bribián, Capillas e Usón (2011) apresenta o perfil de energia embutida num metro quadrado (m^2) de edificação em Espanha, de acordo com os materiais. Destacam-se a cerâmica, o aço e o cimento com peso total de 58,7% e pesos individuais de 21,5%, 25,5% e 11,7%, respectivamente. Outros tipos de materiais com peso significativo incluem as argamassas e o alumínio (9,1% e 7,7% respectivamente). No estudo de Tavares e Lamberts (2006) relativo à energia embutida numa edificação brasileira, também o cimento, cerâmica (tijolo de 8 furos) e aço se destacam como principais responsáveis pela energia embutida numa edificação com peso total de 80% e particular de 45%, 19% e 16%, respectivamente. Verifica-se que nos dois estudos, três materiais (aço, cerâmica e cimento) foram responsáveis por uma participação na energia embutida das edificações acima dos 50%. Analisando os coeficientes de energia embutida sugeridos na tabela 1 atrás apresentada, constata-se que o

aço é um material com um coeficiente de energia embutida de valor mediano e que a cerâmica e o cimento são materiais com valores de energia embutida por unidade de peso relativamente baixos. Conclui-se então que a sua elevada participação na energia embutida da edificação resulta da sua utilização em grandes quantidades na construção dos edifícios.

Figura 4 – Perfil de Energia Embutida num m² de edificação em Espanha

Fonte: Bibrián, Capillas e Usón, 2011.

Outra análise interessante é verificar a contribuição de cada parte da edificação para a energia embutida avaliada em termos da energia embutida nos materiais que a constituem. De acordo com os resultados de Tavares e Lamberts (2006) apresentados na figura 5, destaca-se a participação da cobertura, alvenaria e pisos.

Ainda sobre a contribuição dos materiais para a energia embutida das edificações, alguns estudos consideram a contribuição da energia necessária para fornecer a água consumida na obra bem como a contribuição da energia embutida dos móveis e equipamentos do edifício.

Figura 5 – Energia embutida por partes da edificação

Fonte: Tavares e Lamberts, 2006

2.2.2 Etapa do Transporte

Os sistemas de transporte contribuem para integrar as regiões dentro de um país e os países entre si, permitindo o escoamento de produtos e a locomoção de passageiros. No que respeita especificamente ao transporte de carga, o seu papel é fundamental no crescimento da economia dos países na medida em que permitem ligar áreas produtoras a mercados consumidores, quer internamente quer externamente através das importações e exportações.

O transporte é uma atividade que acontece em diversos pontos do ciclo do vida das edificações e contribui para a EE com os seguintes processos:

- Transporte das matérias-primas até às indústrias de manufatura de materiais de construção;
- Transporte dos materiais de construção desde o local de fabrico até aos pontos de distribuição e venda;
- Transporte dos materiais de construção desde o ponto de venda até ao local de construção do edifício (quer na etapa da construção quer na etapa de manutenção e reforma durante o uso);
- Transporte de resíduos resultantes do processo de construção e de reforma;
- Transporte de resíduos e materiais resultantes do processo de demolição.

Na etapa de construção há estudos que consideram o consumo energético do transporte da mão-de-obra que trabalha na obra, contudo a sua contabilização na EE não é consensual e o seu valor é de difícil apuração.

Conforme referido, a contribuição do transporte para a EEi situa-se tipicamente entre 5-6%. Venkatarama Reddy e Jagadish (2003) e Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) destacam que a contribuição dos gastos energéticos no transporte torna-se especialmente importante para materiais com baixa EE ou seja para materiais com pouco processamento tais como areia e pedra.

A quantificação da energia embutida resultante do transporte pode ser feita a partir do consumo de energia específico dos modais de transporte utilizados e das distâncias percorridas em cada etapa. De acordo com EPE (2012), a atividade no setor de transporte de cargas é representada pelo indicador tonelada-quilômetro (tkm) transportado que representa o trabalho relativo ao deslocamento de uma tonelada de carga por uma distância de um quilômetro.

A distância percorrida por um material até chegar ao local de construção de uma edificação é diferente de edifício para edifício em função do fornecedor, sendo que areias e materiais cerâmicos em geral viajam distâncias menores que o cimento, cujas fábricas são geralmente em menor quantidade e como tal encontram-se, em média, a distâncias maiores (VENKATARAMA REDDY; JAGADISH, 2003). Para além disso há que considerar o impacto da dimensão do país já que em países de maiores dimensões podem ocorrer distâncias maiores entre centros produtores (muitas vezes concentrados em torno dos principais centros urbanos) e centros consumidores.

Relativamente ao consumo específico dos modais de transporte, o seu valor está relacionado com o tipo de transporte de carga. Distingue-se transporte rodoviário (carros, caminhões, caminhonetas, etc.), ferroviário (trem), aquaviário (barco) – marítimo ou fluvial – dutos e aéreo (avião). A sua utilização depende de um conjunto de fatores tais como o tipo de produto a ser transportado, a distância, características topográficas do caminho, entre outros. Os diferentes modais de transporte distinguem-se no que diz respeito a temas como consumo energético, fonte de energia, capacidade de carga, investimentos em infraestrutura, flexibilidade física de acesso aos locais de carga e descarga, tempo de transporte, entre outros. A partir de Soares e Ribeiro (2014 apud NOVO, 2016), apresentam-se na tabela 2 vantagens e desvantagens dos modais rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo.

A análise energética dos modais de transporte deve ter em conta índices de eficiência, tais como a quantidade de energia consumida por unidade de massa transportada (MJ/tkm). Também a fonte de energia é importante, em especial na determinação do impacto ambiental dos diferentes modais. Barcos distinguem-se enquanto modais para transporte de mercadorias pela sua elevada capacidade de carga que resulta em valores de energia por unidade de massa transportada relativamente baixos quando comparados com outros modais tais como o rodoviário e o aéreo. Porém a sua utilização está restringida aos mares e à presença de grandes rios navegáveis, tornando-se inviável, na maioria dos casos, para transportes dentro dos países e em curtas distâncias.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de cada modal de transporte

Modal	Vantagens	Desvantagens
Rodoviário	Mais rápido, favorecendo entregas rápidas e curta distância; adequado para embarque de pequenos lotes; flexibilidade; frete baixo	Maior custo operacional; intensidade energética elevada, menos capacidade de carga; provoca congestionamento nas estradas; desgasta prematuramente a infraestrutura de malha rodoviária
Ferroviário	Capacidade para grandes volumes de mercadorias; terminais privados junto às unidades produtoras; fretes baixos crescentes de acordo com o volume transportado; baixo consumo energético; provê estoques em trânsito	Tempo de viagens demorado; custo elevado quando há necessidade de transbordos; depende da disponibilidade de material rodante; baixa flexibilidade de rotas
Aquaviário	Flexibilidade em relação ao tipo de carga (não-perecível); menor custo por tkm, menor intensidade energética; menos impactos ao meio ambiente	Apresenta o maior tempo de entrega; pouco flexível em relação às entregas
Aéreo	Rede diversificada de aeroportos em grandes metrópoles; veloz; eficiente; confiável	Menor capacidade em peso e volume de carga; custo de capital e frete elevados; restrições a cargas perigosas; maior intensidade energética

Fonte: Soares e Ribeiro, (2014¹¹ apud NOVO, 2016)

Nas tabelas 3 e 4 apresentam-se valores de consumo energético associados a meios de transporte de acordo com duas referências encontradas na literatura:

Tabela 3 – Valores de consumo energético específico para diferentes modais de transporte

Meio de Transporte	MJ/tkm
Navio de carga em hidrovias	0,93
Navio de carga oceânico	0,13
Van de entrega (<3,5t)	11,10
Caminhão, 16t	5,17
Caminhão, 28t	3,56
Caminhão, 40t	2,54
Carro de passeio	5,15
Trem de carga	1,50

Fonte: IFIB¹² (1995 apud TAVARES, 2006).

¹¹ SOARES, J. B. C., RIBEIRO, I. O. C. A. Transporte ferroviário: a solução para a produção de soja de Mato Grosso sentido Porto de Santos. Negócios em Projeção 5 (1): 15 2014.

¹² FIB, Institut für Industrielle Bauproduktion. Baustoffdaten – Ökoinventare. Universität Karlsruhe; Lehrstuhl Bauklimatik und Bauökologie, Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB) Weimar; Institut für

Tabela 4 – Comparação do consumo de energia por tkm para diferentes modais de transporte de carga. Dados válidos para Holanda, 2005

Modal	Consumo (MJ/tkm)	Comentários
Van	11,0	Diesel; capacidade de 1,5t; fator de ocupação de 35%; 61% das viagens produtivas
Caminhão (<10t)	2,8	Diesel; capacidade representativa de 4 toneladas; fator de ocupação de 36%; 74% das viagens produtivas
Caminhão (>20t)	0,8	Diesel; capacidade representativa de 27 toneladas; fator de ocupação de 42%; 67% de viagens produtivas
Trem (elétrico)	0,07	Eletricidade
Trem (Diesel)	0,18	Diesel
Aéreo	8,0	>3000 km; transporte de carga
Barco (fluvial)	0,15-0,7	Diesel; capacidade de 350 a 12000 toneladas; fator de ocupação de 66%; 78-98% km produtivos
Barco (marítimo)	0,1-0,6	Diesel; capacidade de 4000 a 73000 toneladas; fator de ocupação de 60-100%; 50-98% km produtivos

Fonte: Den Boer, Brouwer e Van Essen ¹³(2008 apud Blok; Nieuwlaar, 2017).

Observa-se que, tirando os valores para o transporte aéreo, o transporte rodoviário apresenta sempre o valor mais alto para o consumo energético por carga transportada, embora seja de referir que os caminhões de elevada capacidade apresentam uma eficiência no transporte muito superior face a caminhões de baixa capacidade e vans.

O transporte rodoviário é um modal de transporte crítico para o transporte de cargas e com elevada participação no consumo de energia do setor de transportes. Em termos mundiais, o setor de transportes consome 29% de toda a energia mundial, dos quais 32% corresponde ao consumo do transporte de cargas (IEA, 2017b).

O transporte rodoviário de cargas inclui uma gama variada de tipos de veículos cuja função depende do seu tamanho, peso e potência bem como de fatores regionais tais como o nível de desempenho económico, geografia e participação dos diferentes setores produtivos na economia (mineração, silvicultura, manufatura, entre outros). IEA (2017b) divide os tipos de veículos rodoviários de transporte de cargas em três grupos: comerciais leves com peso bruto abaixo das 3,5 toneladas; caminhões médios com peso bruto entre 3,5 e 15 toneladas; e

Energietechnik (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich; M. Holliger, Holliger Energie Bern: Karlsruhe / Weimar / Zürich. 1995.

¹³ DEN BOER, L.C.; BROUWER, F.P.E.; VAN ESSE, H.P. STREAM Studie naar Transport Emissies van Alle Modaliteiten, CE, Delft, 2008.

caminhões pesados com peso bruto acima das 15 toneladas. De acordo com a referida fonte, cada país tem um esquema próprio para classificação de veículos rodoviários de carga e que em geral a divisão é feita tendo em conta mais categorias.

Em termos de combustíveis consumidos, os derivados de petróleo respondem por 97% da demanda do setor rodoviário de cargas mundial, dos quais 84% é relativo ao consumo de diesel. O consumo de diesel pelo transporte rodoviário de cargas responde por 50% da demanda mundial do combustível. Os combustíveis alternativos apresentam uma pequena contribuição em torno de 2,2% sendo 1,6% correspondente ao Biodiesel, 0,6% ao etanol e menos de 0,01% ao biometano (IEA, 2017b).

Tradicionalmente, os combustíveis são consumidos pelos veículos rodoviários em um motor de combustão interna que transforma a energia química contida no combustível em energia mecânica. Os veículos rodoviários podem apresentar motor do tipo Otto – no qual a ignição é feita por faísca – e motor Diesel – na qual a ignição é feita por compressão. Com base em Blok e Nieuwlaar (2017) a eficiência do motor é determinada por dois fatores: a eficiência térmica que corresponde à fração da energia do combustível que é convertida em trabalho através do movimento dos pistões (e que é determinada pelas características termodinâmicas do ciclo); a eficiência mecânica que corresponde à fração do trabalho que é repassada pelo motor para o veículo. Ainda com base em Blok e Nieuwlaar (2017), no ciclo Otto a eficiência térmica de acordo com o estado da arte dos motores é de 38% (baseada no Poder Calorífico Inferior- PCI), à qual se junta uma eficiência mecânica de cerca de 90% em plena carga, mas que na média não passa de 50% (para cargas inferiores). Desta forma, a eficiência total típica para motores com ciclo Otto não passa de 20% . Os motores a Diesel têm melhor desempenho.

Para além da eficiência energética do motor, o consumo energético no transporte rodoviário está relacionado também com outros fatores tais como a idade do veículo, as condições de manutenção do motor, o emprego de tecnologias e equipamentos auxiliares poupadores de energia, as condições de pavimentação, e o tipo de condução. Quanto à condução, IEA¹⁴ (2012 apud NOVO, 2016) define *eco-driving* como uma forma de condução mais consciente em relação ao consumo de combustível (que inclui técnicas como evitar paragens e partidas bruscas) e com a qual é possível ganhos de eficiência de 10% ou mais,

¹⁴ IEA. 2012. “Technology Roadmap: Fuel Economy of Road Vehicles”. Paris, France: International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf>.

valores que incentivam os operadores logísticos a criarem programas de treinamento para os condutores de veículos.

O consumo energético por unidade de massa de produto transportado depende não só dos requisitos energéticos do veículo para a distância mas também da carga (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979). CNT (2015) destaca que a eficiência energética do transporte está fortemente ligada à utilização completa da capacidade dos veículos. De acordo com NOVO (2016) apontam-se duas justificativas para que os caminhões de transporte de carga não circulem com aproveitamento total da capacidade: a eventualidade de um caminhão percorrer trajetos sem carga após a realização de entregas e o fato de, em determinados casos, o veículo estar no seu limite de capacidade em termos de volume de mercadorias mas não em termos de massa. Relativamente à circulação de veículos sem carga, CNT (2015) refere como opção para aumentar a ocupação dos caminhões a adoção de sistemas de compartilhamento de veículo (também chamado de transporte colaborativo) no qual caminhões de uma empresa passam a transportar carregamentos de empresas parceiras.

Considerando a cadeia *upstream* dos sistemas de transporte, o consumo energético dos meios de transporte inclui não só o conteúdo energético dos combustíveis consumidos diretamente pelo veículo mas também a energia necessária para produzir e distribuir o combustível, a energia necessária para construção e manutenção do veículo bem como a energia necessária para construir a infraestrutura necessária à circulação do veículo (ex. estradas para o transporte rodoviário, carris para o transporte ferroviário, etc.) (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

2.2.3 Etapa da Construção

Com base em Yokoo e Yokoyama (2016), a energia embutida na etapa da construção resulta do consumo de energia (eletricidade e combustíveis) nas seguintes atividades: preparação do local, instalação da estrutura, instalação dos sistemas elétricos e mecânicos, acabamentos, bem como os gastos energéticos no transporte de resíduos da construção para disposição final ou tratamento. De acordo com Tavares (2006), alguns estudos consideram no consumo energético da etapa da construção o transporte dos trabalhadores da obra mas conforme referido na seção relativa ao transporte, a sua contabilização na energia embutida não é consensual e o seu valor é de difícil apuração.

O valor dos consumos energéticos referidos deve ser determinado a partir do levantamento de todas as atividades previstas e uso dos respectivos equipamentos tais como betoneiras, serras, elevadores, entre outros. O seu cálculo deve basear-se no número de horas de funcionamento de cada equipamento multiplicado pelo consumo de energia horário de cada equipamento (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

Quanto ao transporte de resíduos resultantes do processo de construção, o seu valor será maior em função da quantidade de resíduos gerados e da distância entre o local da obra e o ponto de disposição final dos resíduos. Com base na revisão da literatura feita por Marques (2014), estimativas de geração de resíduos da construção no Brasil apontam para valores de 0,470 t/m² no caso de reformas e 0,05- 0,150 t/m² para construções novas. De acordo com Monahan e Powell (2011) a redução da quantidade de resíduos do processo de construção passa pelo aumento da utilização no edifício de elementos construtivos produzidos *off-site*. A produção em fábrica de elementos construtivos pode reduzir significativamente os recursos necessários como input e reduzir o desperdício como *output* quando comparada com a produção *onsite*. Ainda com base em Monahan e Powell (2011), a substituição de métodos tradicionais por sistemas pré-fabricados resulta na redução entre 20-40% do desperdício na construção. É importante destacar que a redução do desperdício resulta no menor consumo de energia no transporte de resíduos mas tem o seu maior impacto pela redução no consumo de materiais, e com isso da energia embutida resultante da produção dos mesmos, conforme destacada na seção 2.2.1.

2.2.4 Energia Embutida na fase de uso do edifício

Conforme já referido, na etapa de uso do edifício ocorrem consumos de EE relacionados com a manutenção, reparos e reformas do edifícios, designados por Energia Embutida Recorrente (EE_R) ou Energia de Manutenção. Com base em Tavares (2006), a EE_R corresponde ao total de insumos energéticos necessários para fabricar e instalar novos materiais, incluindo o desperdício e transporte, para reposição de materiais e manutenção da edificação ao longo do seu ciclo de vida. Ainda atendendo a Tavares (2006), a necessidade de substituição de materiais pode resultar da sua degradação natural ou das condições de uso, ou ainda pelo senso estético do usuário.

Desta forma, o consumo de EE_R está diretamente relacionada com a vida útil e durabilidade da edificação e dos materiais e componentes nela utilizados. Santos (2010) define durabilidade como sendo a “capacidade de um edifício ou de uma parte de um edifício de desempenhar a sua função durante um determinado intervalo de tempo, sob a ação dos agentes presentes em serviço”, acrescentando que “esta não é uma propriedade intrínseca de um produto ou componente, mas sim uma característica que depende das condições a que está sujeito, em serviço”. Para John e Sato (2006) a durabilidade pode ser definida como uma função do desempenho. Os autores descrevem a durabilidade como a variação do desempenho ao longo do tempo, ou seja, como a capacidade do produto em atender às demais necessidades dos usuários varia ao longo do tempo.

Já a vida útil é definida pela norma ISO 15686-1 (ISO, 2011) como o período de tempo, após a instalação, durante o qual o edifício ou suas partes atingem ou excedem os requisitos de desempenho, sendo estes o nível mínimo aceitável de uma propriedade crítica. Por interpretação da definição apresentada, a vida útil é o período durante o qual um produto tem o desempenho igual ou superior ao mínimo requerido, ou seja, o período durante o qual as necessidades dos usuários são atendidas. A vida útil é portanto uma quantificação da durabilidade em determinadas condições (JOHN; SATO, 2006).

Com base em Yokoo e Yokoyama (2016) aponta-se um estudo no qual quando considerados os requisitos mínimos de vida útil dos materiais e componentes, obteve-se uma EE_R correspondente a 23% do valor da EE_i , já no caso em que foi maximizada a vida útil dos materiais e componentes, a EE_R desceu para 1,9% do valor da EE_i . Os resultados do estudo apresentado colocam em evidência a importância da durabilidade dos materiais, componentes e equipamentos utilizados na edificação para a sua sustentabilidade, pois, ao considerar o uso de materiais com baixa durabilidade, aumentam as necessidades de reparos e, conseqüentemente, o consumo de energia. Yokoo e Yokoyama (2016) destaca a necessidade de avaliar o que designa por “*trade-off* de durabilidade” segundo o qual, em termos de consumo energético total no ciclo de vida pode compensar aumentar a EE_i a favor de edifícios mais duráveis.

Dada a importância da questão da durabilidade no contexto do ambiente construído, existem normas internacionais e nacionais que oferecem orientação técnica sobre o assunto. Em termos internacionais vale referir a norma ISO 15686 dividida em dez partes dedicadas a diferentes assuntos relacionados com o planejamento da vida útil de edifícios e construções em geral. Já no Brasil, o tema é tratado pela norma da ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013), a

chamada norma de Desempenho, que na sua parte 1 apresenta requisitos dos usuários para edifícios habitacionais e seus sistemas quanto ao seu comportamento em uso.

Atendendo à norma ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2013), a durabilidade de um produto acaba quando o mesmo deixa de atender às funções que lhe forem atribuídas, o que pode acontecer pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, ou por obsolescência.

De acordo com Koning et al. (2010), o envelhecimento ou degradação dos materiais de construção pode ser descrito como a perda ou redução das suas propriedades físicas (capacidade de carga, estanqueidade ao ar e água, elasticidade, transparência, entre outras) resultante da ação de influências físicas, químicas e biológicas como as da água e outros líquidos, vapor de água, calor e frio, sais em solução, vibrações, luz, processos microbiológicos, catástrofes naturais ou de causa humana e acidentes. Definem-se como agentes ou fatores de degradação tudo aquilo que age sobre os materiais ou componentes de uma construção provocando a sua alteração com redução do seu desempenho (JOHN; SATO, 2006; ABNT, 2013).

As influências físicas, químicas e biológicas que explicam a degradação a que um edifício está sujeito resultam do ambiente em que o mesmo está inserido, distinguindo-se ambiente físico e ambiente operacional. O ambiente físico em torno do edifício ou componente inclui: o macroclima, ou seja as condições meteorológicas, o mesoclima, relacionado com o terreno e local de implantação, e o microclima, as condições na proximidade da superfície do material. O ambiente operacional ou a “cultura do utilizador” resulta do nível e extensão da utilização do edifício pelos ocupantes (SANTOS, 2010).

A tabela 5 retirada da norma ISO 15686-1 (ISO, 2011) apresenta a lista de agentes ou fatores de degradação que atuam sobre edifícios e elementos construtivos. As origens dos agentes de degradação são variadas. Com base em John e Sato (2006) os agentes de degradação podem ter origem no meio ambiente (clima, poluição, ventos, componentes do ar como ozônio), no carregamento da construção (cíclico ou contínuo), biológica (fungos, bactérias, roedores, vegetais), podem ser produzidos pelo uso da construção (como o desgaste por abrasão, impactos), por incompatibilidade química ou física entre materiais (corrosão eletrolítica), ou entre fases de um mesmo material (a reação alcali-agregado no concreto).

Tabela 5 – Agentes de degradação que atuam em termos de natureza e classe

Natureza	Classe	Exemplos
Agentes Mecânicos	Gravidade	Neves, chuvas
	Forças e deformações impostas ou contidas	Gelo, expansão e contração, Deslizamento de terras, fluência
	Energia cinética	Impactos, tempestade de areia
	Vibrações e barulhos	Vibração do tráfego e eletrodomésticos
Agentes Eletromagnéticos	Radiação	Radiação solar ou ultravioleta, radiação radioativa
	Eletricidade	Radiações eletrolíticas, raios
	Magnetismo	Campos magnéticos
Agentes Térmicos	Níveis extremos ou alterações rápidas de temperatura	Calor, gelo, choque térmico, fogo
Agentes Químicos	Água e solventes	Umidade do ar, lençol freático, álcool
	Agentes oxidantes	Oxigénio, desinfetante, água sanitária
	Agentes redutores	Amónia, agentes de combustão
	Ácidos	Ácido carbónico, vinagre
	Bases	Cal, hidróxidos
	Sais	Nitratos, Fosfatos, cloretos
	Quimicamente neutros	Calcário, óleo, tinta, gordura
Agentes Biológicos	Vegetais e microbianos	Bactérias, fungos, raízes, mofos
	Animais	Roedores, térmitas, vermes, pássaros

NOTA - Esta tabela é retirada da ISO 6241, que tem exemplos adicionais. Os agentes estão classificados de acordo com a sua natureza. Em geral, no exterior do edifício, a origem dos agentes é a atmosfera ou o solo, enquanto que internamente a origem é a ocupação, o projeto ou as instalações.

Fonte: ISO 15686-1 (ISO, 2011).

Contudo, na decisão de demolição ou de renovação de um edifício entram outros fatores para além da durabilidade física do edifício e dos seus componentes e materiais, já que a decisão de demolição de uma construção pode resultar não só do seu grau de degradação mas também de mudanças nas exigências do utilizador, casos em que se fala de

obsolescência. Na ISO 15686-1 obsolescência é definida como a perda de aptidão de um determinado item para desempenhar satisfatoriamente as suas funções devido a mudanças nas exigências de desempenho. De acordo com Santos (2010) pode ser considerada como a vida útil de serviço definida socialmente.

Com base na referida norma distinguem-se três tipos de obsolescência nos edifícios: a funcional, a tecnológica e a econômica. Já Koning et al. (2010) distingue cinco tipos de obsolescência com base nas causas que estão na sua origem:

- Obsolescência Funcional – quando os edifícios apresentam características que não lhes permitem desempenhar novas funções;
- Obsolescência Física – nos casos em que falta de manutenção pode levar a um estado de deterioração a partir do qual a reforma não é mais compensatória;
- Obsolescência Técnica – explica a demolição de edifícios que deixam de estar de acordo com os padrões técnicos, e nos quais os sistemas prediais ou os componentes construtivos estão de tal forma ligados ao edifícios que a sua substituição não é possível;
- Obsolescência Regulatória – quando os edifícios não podem ser melhorados para cumprir com exigências legais tais como requisitos de isolamento térmico e de som, contaminação por amianto ou requisitos de acesso para pessoas com deficiência;
- Obsolescência Econômica – acontece nos casos em que o rendimento resultante do edifício é inferior ao retorno se fosse dado outro uso ao terreno. É a razão mais comum para demolição de edifícios;
- Obsolescência de Estilo – quando o edifício não está de acordo como o “gosto” da época.

A principal motivação para estimar a vida útil de um edifício foi a necessidade de prever e controlar custos do proprietário ao longo da vida útil do edifício, incluindo o investimento na sua aquisição e os custos de manutenção. Atualmente, à motivação econômica juntam-se as preocupações de sustentabilidade na sua vertente ambiental. Com efeito, a estimativa de vida útil de um produto nas condições de uso é um dos requisitos para a realização de uma análise de ciclo de vida de produto.

A norma ISO 15686-1 (ISO, 2011) define vida útil de projeto como sendo a vida útil considerada pelo projetista como base para as suas especificações. Ainda na mesma norma é definido planejamento da vida útil como um processo de projeto que procura garantir que a vida útil de um edifício seja igual ou superior à vida útil de projeto, tendo em conta os custos globais (do ciclo de vida) do edifício. John e Sata (2006) explicam com base na definição apresentada que planejar a vida útil de um edifício implica estimar a vida útil de cada parte do edifício e planejar as substituições das partes que tenham vida útil menor que a projetada para a construção como um todo. A relação entre a vida útil de um material ou componente e a vida útil do edifício determina o número de vezes que é preciso substituí-lo ao longo da vida útil do edifício (KOTAJI; SCHUURMANS; EDWARDS, 2003).

O planejamento da vida útil de um edifício deverá ser integrado ao processo de construção do edifício desde o início da fase de projeto já que todos os elementos da equipe projetista deverão ter conhecimento e orientar as seus projetos para o cumprimento dos requisitos de desempenho estabelecidos no que respeita à vida útil esperada para o edifício.

As tabelas 6 e 7 apresentam alguns valores de duração mínima de projeto sugeridos pela norma ISO 15686-1 (ISO, 2011) e pela norma 15575-1 (ABNT, 2013).

Tabela 6 – Vida útil de projeto mínima sugerida para componentes

Vida útil de projeto do edifício	Componentes estruturais ou inacessíveis	Componentes com substituição cara ou difícil	Componentes substituíveis	Sistemas prediais
Ilimitada	Ilimitada	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Nota 1 - Componentes facilmente substituídas podem ter vidas úteis de projeto de 3 a 6 anos.

Nota 2 - Um vida de projeto ilimitada deve ser raramente utilizada já que reduz significativamente as opções de projeto.

^a Incluindo componente para drenagem de subsolo

Fonte: ISO, 2011.

Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP)*

Sistema	VUP mínima em anos
Estrutura	≥ 50 conforme ABNT NBR 8681
Pisos Internos	≥ 13
Vedação Vertical Externa	≥ 40
Vedação Vertical Interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

*Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.

Fonte: ABNT, 2013.

De acordo com IEA (2013), considerando a amostra dos países membros da Agência Internacional de Energia, os edifícios residenciais têm ciclos de renovação que duram 30 a 40 anos para a envoltória do edifício e entre 10 a 15 anos para os sistemas de condicionamento de ar. Já os edifícios não residenciais são renovados a cada 15 a 20 anos. Na figura 6 apresentam-se os tempos médios para substituição de componentes e equipamentos em edifícios residenciais.

Figura 6 – Tempo médio para substituição de componentes e equipamentos em edifícios residenciais

Fonte: IEA, 2013.

Com base na mesma publicação, os ciclos de renovações das edificações são motivados pela necessidade de melhoria da eficiência operacional do edifício, da qualidade de

vida dos usuários, do nível de conforto, da aparência e para valorização do imóvel. Tendo em conta a vida útil da edificação e dos diferentes componentes que a constituem, Tavares (2006) define um conjunto de fatores de acréscimo à EE_i como forma de estimar a EE_R numa edificação, apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Durabilidade de materiais de construção e fatores de acréscimo de EE – ciclo de 50 anos

Materiais	Anos	Fator
Estrutura de aço para coberturas	100	1,00
Estacas de madeira, laje de concreto	73	1,00
Painéis, isolamentos, argamassas	69	1,00
Placas de piso e pavimentação	68	1,00
Reboco de exteriores	60	1,00
Placas de fibrocimento*	50	1,00
Parquet de madeira e tacos	50	1,00
Esquadrias, portas e janelas	46	1,09
Painéis de madeira	45	1,11
Tubos de PVC*	45	1,11
Tubos de Cobre	42	1,18
Telhas de fibrocimento*	40	1,25
Telhas metálicas em aço	38	1,30
Fiação, interruptores e tomadas	38	1,31
Telhas de concreto	34	1,46
Luminárias	30	1,67
Instalações de cozinha	30	1,67
Conexões para instalações sanitárias	30	1,67
Piso cerâmico	30	1,68
Suportes de toalhas e papel higiénico	25	2,00
Calhas e tubos de queda em PVC	23	2,14
Fornos e chapas elétricas	20	2,46
Mobília	19	2,63
Pisos vinílicos	18	2,73
Carpete sintético	17	2,89
Freezer e refrigeradores	15	3,26
Forno de microondas	15	3,29
Tubulação em ferro galvanizado	15	2,78
Carpete de tecido	15	3,44
Máquina de lavar roupas	13	3,75
Aquecedor de água	13	3,75
Pinturas de interiores	12	4,17
Pintura de telhado	11	4,76

Continua

Conclusão

Materiais	Anos	Fator
Papel de parede	10	5,00
Pintura de exteriores	8	6,52
Cortinas	8	6,60
Lâmpadas fluorescentes*	5	10,00
Lâmpadas incandescentes*	2	25,00

*Informação dos fabricantes

Fonte: Tavares (2006).

Estimar a vida útil de um edifício é a tarefa chave do planeamento da sua vida útil (ISO, 2011). De acordo com a revisão da literatura efetuada por Santos (2010), os principais métodos utilizados para a estimativa da vida útil de um edifício ou componente pertencem a um de três tipos: determinísticos; probabilísticos; e métodos de engenharia. O Método Fatorial, proposto pela ISO 15686, e incluído na classe dos métodos determinísticos, é aquele que tem maior aceitação na comunidade científica e aplicação prática pela sua elevada operacionalidade: partindo de uma duração da vida útil de referência, esperada em condições padrão, obtém-se uma estimativa da vida útil para as condições particulares pretendidas através da multiplicação da vida útil de referência por uma série de fatores relacionados com diversos aspectos determinantes para a durabilidade. A equação abaixo apresentada representa a fórmula para estimar a vida útil de determinado componente de uma construção através do Método Fatorial (JOHN; SATA, 2006; SANTOS, 2010):

$$VUEC = VURC \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$$

Onde:

VUEC - vida útil estimada do componente;

VURC - vida útil de referência do componente;

A-G – fatores modificadores:

- Fator A – qualidade do material ou componente;
- Fator B – nível de qualidade do projeto;
- Fator C – nível de qualidade da execução;
- Fator D – características do ambiente interior;
- Fator E – características do ambiente exterior;

- Fator F – características do uso;
- Fator G – nível de manutenção.

O valor de VURC deve ser fornecido pelo fabricante do componente como resultado de estudos de previsão de vida útil, mas na sua ausência apontam-se como fontes alternativas de dados a experiência ou observações anteriores de materiais de construção semelhantes ou utilizados em condições semelhantes, avaliações de durabilidade feitas em processo de concessão de certificados de Aprovação Técnica, dados publicados na literatura e códigos de obras (JOHN; SATA, 2006).

Quanto ao tema da durabilidade nas construções no contexto brasileiro, para finalizar esta seção sobre vida útil das edificações, cabe referir que, no tópico catorze da referida norma ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2013), a durabilidade do edifício e dos seus sistemas é apresentada como um requisito econômico do usuário pois está diretamente associado ao custo global do bem imóvel, não havendo referência à durabilidade do edifício enquanto critério de sustentabilidade ambiental. É requisito da norma em causa que o projeto especifique o valor teórico para a vida útil de projeto de cada um dos sistemas que compõem o edifícios sendo que os mesmos não podem ser inferiores aos valores apresentados na tabela 9, e o edifício e seus sistemas devem apresentar durabilidade compatível com a vida útil de projeto assim estabelecida.

2.2.5 Fase Pós uso do edifício

Na fase pós uso do edifício acontecem as etapas de demolição do edifício, o transporte dos resíduos e sua disposição final. A energia consumida no processo de demolição resulta do consumo energético das máquinas e equipamentos tais como retroescavadeiras, martelos pneumáticos, tratores, entre outros, e respectivo tempo de utilização, de acordo com o método de demolição empregue. No Brasil, as Tabelas de Composições e Preços para Orçamentos - TCPO informam os valores de consumo energético e o tempo necessário para as operações de demolição e transporte por m³ de material demolido (TAVARES, 2006). Relativamente à etapa de transporte de resíduos, conforme visto na seção 2.2.2, o consumo de energia deverá ser calculado a partir das distâncias percorridas pelos resíduos entre o local do edifício e o ponto de disposição final e o consumo específico do meio de transporte utilizado. A

disposição final dos resíduos inclui a disposição em aterro ou o seu reaproveitamento como matéria prima. De acordo com Thormark (2002) definem-se três tratamentos para reaproveitamento dos materiais após demolição como alternativa à disposição em aterro sanitário:

- Reuso – opção na qual o material é usado para a mesma função que no edifício antes da demolição e que pode implicar algum tipo tratamento do material para melhoria ou renovação;
- Reciclagem – opção em que o material sofre tratamento e é utilizado como matéria prima para um novo material (reciclagem em ciclo aberto) ou para produzir o mesmo material que lhe deu origem (reciclagem em ciclo fechado);
- Combustão com recuperação de energia (Incineração) – os materiais são incinerados e o calor produzido é utilizado na produção de energia elétrica.

Zhang et al. (2004) aponta taxas de reaproveitamento de materiais de construção após demolição de 90% para os metais, 50% para os tijolos, 20% para a madeira e 10% para o cimento.

A possibilidade de reaproveitamento dos materiais representa um potencial de redução do consumo energético dos materiais de construção com redução do consumo de novos recursos primários. A produção de materiais de construção a partir de recursos primários em geral implica um consumo de energia mais elevado quando comparado ao processo produtivo a partir de materiais secundários já que é necessário um elevado consumo no processo de extração a partir do minério (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

Para que o reuso e reciclagem de materiais de construção sejam possíveis é necessário que os métodos de demolição permitam a separação dos diferentes materiais, ou seja é preciso aplicar a chamada desconstrução ou demolição seletiva. Pedroso e Sposto (2015) definem desconstrução como o processo de desmontagem do edifício com possibilidade de recuperação dos materiais e de partes da construção de modo a possibilitar o seu reuso. Na desconstrução aplicam-se métodos não destrutivos.

Com base em Koning et al. (2010), o objetivo estratégico de toda a desconstrução deverá ser assegurar o nível máximo de reuso subsequente para todos os componentes, a minimização das perdas durante a desconstrução, o transporte e a reinstalação, e controlar o risco do processo de demolição. Com esse objetivo deverá ser elaborado um plano de desconstrução que considere questões operacionais tais como: a sequência dos trabalhos no

local, a estimativa para a sua duração, o tipo, quantidades e o momento para disponibilização dos recursos (humanos e de equipamentos) no local da desconstrução bem como os custos de desconstrução e disposição final associados.

Um ponto de partida importante para definir o processo de desconstrução é o conhecimento dos materiais e respectivas quantidades e pesos que compõem o edifício. Para tal pode ser necessária a realização de um diagnóstico durante o qual os materiais do edifício são identificados, medidos e avaliados, com especial atenção para partes contaminadas que são difíceis de dismantelar e cuja identificação permite limitar os seus efeitos nocivos. Em alguns casos, o projeto de uma edifício pode incluir um plano integrado de desconstrução e reciclagem que deverá resultar em materiais de construção secundários de maior qualidade. O plano deve procurar a coordenação entre o processo de desconstrução e o processamento dos resíduos: o objetivo deverá ser desenvolver cadeias de reciclagem regionais ligadas às atividades de desconstrução no local (KONING et al., 2010).

Koning et al. (2010) define a seguinte hierarquia de dismantelamento:

- Uso subsequente ao nível de elementos construtivos (ex. as janelas);
- Uso subsequente ao nível dos materiais (ex. tijolos);
- Reciclagem de material ao nível mais elevado possível (minimizar o *downcycling*);
- Reciclagem térmica (ou incineração);
- Disposição em aterro.

Nesse sentido é necessário que se promova uma mudança radical no projeto dos edifícios a favor do dismantelamento dos materiais de construção no fim da vida útil. Para este fim, as juntas entre os diferentes materiais deverão tornar-se reversíveis, tal como já acontece na indústria automobilística (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011). Thormark (2000) e Ramesh, Prakash e Shukla (2010), destacam que através da adaptação das construções à reciclagem pelo menos 50% da energia usada para produção de materiais pode ser poupada.

A desconstrução das edificações possibilita a preservação da energia incorporada investida na produção dos materiais e elementos construtivos, reduzindo o consumo de uma nova energia no seu processamento ou manufatura (PEDROSO; SPOSTO, 2015). De acordo com Ramesh, Prakash e Sukla (2010) não é consensual a contabilização da energia consumida

ou produzida no tratamento dado aos materiais após a demolição na energia total de ciclo de vida, pois tal procedimento significa atribuir a energia poupada ao edifício demolido. Com base em Adalberth (1997), a redução de energia embutida nos materiais reaproveitados ou reciclados pode ser contabilizado nas novas edificações que se utilizarem destes materiais. O benefício de reaproveitamento dos materiais pode ainda ser considerado através do cálculo do potencial de reciclagem e reuso dos materiais utilizados no ciclo de vida da edificação e uso desse valor como um fator a ser considerado juntamente com a EO e EE em uma tomada de decisão sobre eficiência energética (THORMARK, 2002; TAVARES, 2006).

Em Thormark (2002), o Potencial de Reciclagem é definido como a quantificação da energia embutida que é “reaproveitada” por reciclagem dos materiais após a demolição do edifícios, representado pela seguinte expressão:

$$R_{\text{pot}} = \sum_{i=1}^n EE_i * \text{Vida útil restante } i - E_{\text{reci}}$$

Onde:

- EE_i – energia embutida do material para o qual o produto reciclado será um substituto;
- i – número do material;
- n – número total de materiais;
- Vida útil restante i - vida útil restante do material reciclado, como parte (%) da vida útil prevista do material para o qual o material reciclado será um substituto;
- E_{reci} – energia utilizada para o processo de reciclagem e melhoramento, incluindo energia adicional para desmantelamento necessária para tornar a reciclagem futura ou reuso possíveis e energia para transporte.

De acordo com Agopyan e John (2011) a reciclagem no Brasil ainda é incipiente. Contudo, um primeiro passo no sentido de promover o aproveitamento dos resíduos da construção como matérias primas secundárias foi a Resolução Conama 307 de 2002 (CONAMA, 2002) que tem como objetivo “Estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais”. Com base no referido documento, define-se resíduos da construção civil como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições

de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras. Ainda atendendo ao referido documento, os resíduos da construção civil podem ser classificados de acordo com as classes A, B, C e D:

- Os resíduos classe A são aqueles reutilizáveis ou recicláveis como agregados, onde estão inseridos componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto provenientes de construção, demolição, reformas e reparos de edificações;
- Os resíduos classe B são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Os resíduos classe C são aqueles para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e recuperação;
- Os resíduos classe D são aqueles perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados, provenientes de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros

2.3 Metodologias de cálculo de energia embutida

Conforme visto na seção anterior, o cálculo do consumo energético, em particular da energia embutida, é um processo complexo que implica a avaliação de um elevado número de fluxos de entrada em inúmeros processos que compõem o ciclo de vida de uma edificação. A utilização de métodos de cálculo permite estruturar grande quantidade de dados complexos, facilita a comparação entre produtos alternativos e possibilita o benchmarking. Para tal, um método deve por um lado ser de fácil entendimento, transparente e de fácil interpretação, e, por outro, deve permitir chegar a resultados num tempo e custo razoáveis (YOKOO; YOKOYAMA, 2016). A revisão bibliográfica sobre metodologias de cálculo de energia embutida permite distinguir três metodologias para o cálculo da energia embutida: Análise

Energética, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE).

Conforme destacam Boustead e Hancock (1979) a filosofia subjacente às análises energéticas não é nova. Já no século XIX os engenheiros se interessavam pelo consumo energético das máquinas por eles construídas. Historicamente, o seu foco era apenas o desempenho em termos energéticos das máquinas e fábricas associadas a um processo produtivo. Contudo, a partir dos anos 60 do século XX, e em especial com as crises do petróleo em 1973 e 1979, as análises energéticas expandiram-se para incluir não apenas o consumo de energia na manufatura mas também os processos e serviços auxiliares necessários aos processos produtivos. De acordo com Boustead e Hancock (1979) três fatores tiveram uma contribuição decisiva para tal desenvolvimento: o aumento de consciência da população relativamente às questões ambientais, em particular a poluição causada pelos processos industriais e pelos veículos rodoviários, a consciência da natureza finita dos recursos energéticos fósseis e o aumento do preço da energia.

O aumento do número de instituições e pesquisadores a realizar análises energéticas resultou na necessidade de padronização. As metodologias e convenções para a realização de Análises Energéticas foram definidas pela primeira vez por IFIAS¹⁵ – sigla em inglês da Federação Internacional de Institutos de Estudos Avançados (International Federation of Institutes of Advanced Studies) em dois workshops. O primeiro teve lugar em Estocolmo em Agosto de 1974 e consistiu num workshop internacional com o objetivo de definir as regras básicas para calcular o conteúdo energético de mercadorias e serviços. O segundo workshop aconteceu também em Estocolmo em Junho de 1975 e teve como foco o interface entre análise energética e economia, em particular foram discutidos temas como: o papel da análise energética na avaliação de tecnologias; a comparação de eficiência energética e eficiência económica; e a integração da informação física com relações de comportamento económico (IFIAS, 1978).

Na teoria económica designam-se por externalidades “os impactos das ações de uma pessoa sobre o bem-estar de outras que não tomam parte na ação” (MANKIW, 2008, pg.11). Um exemplo clássico de externalidade é a poluição, causada, por exemplo, por um processo produtivo, mas cujo custo não é considerado para efeitos dos custos do processo que lhe deu origem, ou seja é um custo externo e indireto ao processo. Durante a década de 70, não só as

¹⁵ A IFIAS foi criada em 1972 sob a orientação das Fundações Nobel e Rockefeller como uma instituição para cooperação internacional e promoção de transdisciplinaridade nas ciências físicas, biológicas, sociais e humanas.

análises energéticas se expandiram para incluir os consumo indiretos de energia nos processos, como também o escopo das análises foi-se alargando a novos fluxos que não apenas os energéticos. Os impactos indiretos das atividades econômicas começaram a ser identificados gradualmente e foram ganhando relevância, entre eles a depleção de recursos e a poluição (SORENSEN, 2011). Para além disso, conforme destaca Sorenson (2011) tornou-se claro que a avaliação de tais impactos indiretos poderia ser feita ao nível de produtos individuais, tecnologias de forma genérica e até mesmo para sistemas de grande dimensão como cadeias de suprimentos energético. As análises foram-se se aproximado do que viria a ser designado por Avaliação de Ciclo de Vida.

De acordo com a revisão da literatura, o marco apontado por diversos autores como o primeiro estudo de ACV foi encomendado pela Coca-Cola em 1965 ao Midwest Research Institute (MRI) - para estimar os efeitos ambientais do uso de dois tipos diferentes de embalagens para refrigerantes. Entre as décadas de 1970 e 1990 iniciou-se o processo de harmonização das primeiras metodologias ACV nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa, designadas por Klopffer (2014) como proto¹⁶-ACV. O referido autor destaca que estas primeiras proto-ACV já apresentavam as duas características que considera mais importantes nas ACVs: comparação de sistemas com base na unidade funcional e a fronteira temporal estabelecida do berço ao túmulo. Tais métodos consistiam em Inventários de Ciclo de Vida por vezes seguidos de formas rudimentares de avaliação de impactos e o seu principal foco era a poupança de energia e a conservação de recursos.

Durante as décadas referidas desenvolveram-se focos de pesquisa em vários países como EUA, Alemanha, Inglaterra, Suíça, França, Japão e países da Escandinávia (KLOPFFER, 2014). O estado da Califórnia foi o primeiro a exigir uma avaliação de ciclo de vida como parte dos processo de aprovação de novos produtos e instalações industriais. Ficou evidente que os resultados de tais avaliações diferiam muito para o mesmo produto consoante a entidade que o promovia (indústria produtora ou entidade pública), não só pelas diferenças metodológicas mas também pelos interesses defendidos (SORENSEN, 2011). Seguiu-se então um período de pressão para o desenvolvimento de normas para a realização de análises de ciclo de vida.

Neste contexto, duas organizações tiveram um papel de destaque: a Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) e a International Standardisation Association (ISO). A SETAC foi criada em 1979 na América do Norte com o objetivo de

¹⁶ Como protótipos de estudos de ACV.

formar um grupo que permitisse a comunicação interdisciplinar entre cientistas de diversas áreas de conhecimento, gestores e engenheiros interessados em tópicos relacionados com o ambiente e atuando em diferentes esferas – indústria, academia e governo (SETAC, 2017). O trabalho de harmonização das metodologias de ACV pela SETAC teve o seu expoente máximo entre 1990 e 1993 e culminou com a publicação intitulada “Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice”, na qual a estrutura de uma ACV já compreendia quatro fases: Definição de Objetivos e Escopo (Goal Definition and Scoping); Análise de Inventário (Inventory Analysis); Avaliação de Impacto (Impact Assessment); Avaliação para Melhoria (Improvement Assessment) (KOPFFLER, 2014).

Quanto ao trabalho desenvolvido pela ISO cabe referir a criação em 1993 de um sub comitê técnico (TC 207) dedicado aos temas relacionados com Gestão Ambiental e com o objetivo de desenvolver as normas da família 14000. A primeira norma internacional ISO 14040 com os princípios e estrutura de uma ACV foi publicada em 1997 e trouxe como alteração à estrutura estabelecida pela SETAC a substituição da última fase por uma de interpretação (KOPFFLER, 2014). O sucesso da norma ISO 14040 suplantou o “Code of Practice” da SETAC e todas as outras tentativas de padronização de ACV definindo a estrutura de análise aceite até hoje. A primeira série de normas da família incluía as normas 14040, 14041, 14042 e 14043. Em 2006 a mesma foi revista e condensada em duas normas 14040 e 14044.

Udo de Haes e Heijungs (2007), destacam ainda a atuação da Nações Unidas através do seu Programa Ambiental (UNEP) desde o final dos anos 90 pelo papel ativo no campo de ACV. Em 2002, a organização começou um programa de cooperação com a SETAC intitulado UNEP/SETAC Life-Cycle Initiative cujo o principal objetivo é colocar em prática a ACV e outras abordagens de ciclo de vida. A iniciativa consiste de três programas: um programa de avaliação de ciclo de vida, um programa de avaliação de impactos de ciclo de vida e um programa dedicado à gestão de ciclo de vida. Quanto aos dois primeiros programas o seu foco é o desenvolvimento das práticas recomendadas no contexto da ACV estimulando a sua aplicação e promovendo o desenvolvimento de métodos simplificados e bases de dados públicas. O terceiro programa tem um escopo mais alargado incluindo o estudo e aplicação de outros instrumentos e abordagens que sirvam de suporte à gestão de produto e serviços durante o ciclo de vida. Um forte incentivo da UNEP para apoiar a iniciativa apresentada é reforçar o uso de abordagens de ciclo de vida pelos “stakeholders” nos países em desenvolvimento.

Mais recentemente cabe referir as iniciativas da Comissão Europeia através do Institute of Environment and Sustainability do Joint Research Centre (JRC) da qual resultou a publicação do International Reference Life Cycle Data System (ILCD) em 2010. A publicação inclui um conjunto de documentos alinhados com as normas ISO 14040 e 14044 e cujo objetivo é fornecer orientações, regras e recomendações na realização de uma ACV. As normas da ISO fornecem uma estrutura metodológica mas deixam escolhas importantes ao critério de quem executa a ACV, pelo que as orientações do ILCD procuram garantir uma maior confiabilidade e comparabilidade nos resultados de ACV (JRC, 2017). No âmbito da iniciativa do JRC cabe referir o lançamento em 2006 da European Life Cycle Database que inclui dados de inventário de ciclo de vida produzidos por organizações europeias sobre materiais, fontes de energia, transporte e gestão de resíduos.

Conclui-se esta introdução histórica sobre as metodologias de cálculo de energia embutida frisando que, conforme se percebe pelo desenvolvimento histórico das mesmas, que as metodologias de cálculo de energia embutida foram evoluindo e não existe uma linha clara de divisão entre elas. As análises energéticas precederam as avaliações de ciclo de vida e foram evoluindo por expansão do escopo de análise até às metodologias ACV. Atualmente, na tentativa de simplificar os métodos de cálculo observa-se a redução do escopo nas avaliações de ACV que remetem para as análises energéticas. Udo de Haes e Heijungs (2007) preveem que as análises energéticas e as metodologias de ACV continuarão a amadurecer de forma convergente. Nos próximos pontos desta tese caracterizam-se as três metodologias referidas para cálculo de energia embutida.

2.3.1 Análise Energética

Das discussões realizadas no contexto dos workshops promovidos por IFIAS na década de 70, resultou a definição de Análise Energética como a determinação da energia sequestrada no processo de fabricação de um produto ou serviço de acordo com um conjunto de convenções. O termo sequestrado é utilizado para indicar que a energia associada a um produto pode resultar não só da energia utilizada para realizar trabalho no processo produtivo mas também da energia contida no próprio produto (IFIAS, 1978).

Para além da definição de análise energética foram produzidas um conjunto de definições, convenções e padrões que constituem recomendações na execução de análises energéticas (IFIAS, 1978):

- Sistema - porção do universo selecionada para análise que deve ser definida através da especificação da sua fronteira;
- Fronteira do sistema - separa as atividades que fazem parte da questão a ser analisada das atividade que não serão analisadas porque têm presumidamente um impacto negligenciável na questão em estudo;
- Níveis de análise ou níveis energéticos - resultam da definição da fronteira do sistema e respondem à questão de quais as entradas no sistema que serão consideradas;
- Unidade energética – deverá ser preferencialmente o joule (megajoules por quilo), não sendo recomendadas unidades como o BTU, kWh e todas as medidas baseada em consumo de um material e como tal de valor variável tais como “tce” (tons of coal equivalent), “toe” (tons of oil equivalent) e “bbl” (barrels of oil);
- Requisitos de Energia – são o fluxos de energia associados ao sistema em causa. Termo que deve ser usado para evitar a confusão com custo energético que pode ser interpretado como o custo monetário dos combustíveis usados no sistema.

Relativamente aos requisitos de energia, o relatório do workshop (IFIAS, 1978) refere que os mesmos podem ser apresentados de acordo com quatro medidas:

- Mudanças termodinâmicas na entalpia (ΔH) e na energia livre de Gibbs (ΔG) de todos os processos químicos e físicos que ocorrem dentro da fronteira do sistema. A sua avaliação é feita enumerando todas as transformações químicas e físicas (combustões, redução química de óxidos de minério, evaporação), somando as contribuições de cada uma;
- Requisitos Energéticos do Processo (REP) - Consiste no somatório da energia de combustíveis fornecidos para executar todas as etapas do processo dentro da fronteira do sistema;

- Requisitos Brutos de Energia (RBE) - Consiste no valor de REP mais o poder calorífico superior dos inputs que têm usos alternativos como combustíveis. Os RBE são expressos em energia primária, ou seja dizem respeito ao consumo ao nível de recursos energéticos. Contudo, nos usos finais são tipicamente consumidas energias secundárias, formas de energia que sofreram algum tipo de conversão. No contexto de análises energéticas define-se a relação entre a energia primária e a energia secundária como Requisitos Energéticos da Energia (REE)¹⁷ – traduzido do inglês *Energy Requirement for Energy (ERE)*. O valor dos REE é sempre maior ou igual a 1 e o seu inverso expressa a eficiência energética do processo de conversão de energia.
- Requisitos Líquidos de Energia (RLE) – é obtido subtraindo ao valor de RBE o poder calorífico superior dos produtos. Esta quantidade reflete a quantidade líquida de energia requerida pelo processo quando os produtos finais são utilizados como combustíveis.

Os REP, RBE e RLE são medidas de quanto extraímos dos estoques de combustíveis enquanto os requisitos de energia termodinâmica e requisitos de energia livre incluem as mudanças totais na energia usável.

Quanto aos níveis de energia, foi definido no workshop um esquema de análise dividido em quatro níveis descritos com base em IFIAS (1978) e em UN-HABITAT (1991) e apresentado na figura 7:

- Nível 1 - corresponde ao consumo de energia direta no processo (combustíveis e eletricidade) e tipicamente representa até 50% da energia total do processo, informação geralmente insuficiente para a tomada de decisões;
- Nível 2 - diz respeito à energia consumida para produção dos materiais e para produção da energia direta consumida no nível 1 (extração, conversão e distribuição). Juntamente com o nível 1 representa cerca de 90% da energia total do processo;
- Nível 3 - o terceiro nível foca nos requisitos energéticos relativos à produção dos bens de capital (maquinário, instalações e meios de transporte) utilizados no processo central e à primeira regressão das entradas no nível 2 (entradas

¹⁷ Também chamado de Fator de Energia Primária ou Fator de correção conforme considerações apresentadas no item 2.3.5.

a análise até ao nível 2 ou nível 3. Frequentemente uma análise até a nível 2 inclui 90 a 95% dos requisitos energéticos determinados até ao nível 4, ou seja as análises até ao nível 2 são representações úteis. Por tal razão e atendendo a que os níveis 3 e 4 têm uma contribuição pequena para o valor do RBE, UN - Habitat (1991) refere como forma de viabilizar a análise restringir o escopo da análise aos níveis 1 e 2, argumentando que o resultado final seria uma boa aproximação do REB real. De forma a permitir a comparação entre diferentes análises, IFIAS (1978) enfatiza a importância de especificar o nível de análise e a fronteira do sistema.

Outra forma de reduzir a complexidade do processo de cálculo é recorrer a estimativas e métodos agregados. Salvo exceções que podem acontecer, IFIAS (1978) sugere que incrementos aos requisitos energéticos totais por unidade de produto tendem a diminuir em magnitude à medida que se atingem níveis de análise mais elevados (mesmo com o aumento do número de inputs com o aumento do nível). Desta forma, é frequentemente apropriado usar métodos aproximados e agregados à medida que se leva em consideração níveis mais elevados de análise.

Uma análise energética contabiliza os requisitos de energia em toda a cadeia de fornecimento de um produto incluindo não só os consumo diretos de energia no processo produtivo mas também os consumos indiretos tal como requisitos energéticos para extração e transporte de matérias primas e dos bens de capital (máquinas, equipamentos e instalações utilizados na manufatura do produto mas que não são incorporados nele) (WILTING, 1996). Desta forma, a um mesmo produto podem ser associados vários valores de RBE dependendo da tecnologia utilizada no seu processo de manufatura e do momento no tempo. A definição inequívoca de um valor de REB implica na definição de um sistema e respectiva fronteira de análise (BOUSTED; HANCOCK, 1979). A comparação do valor de REB de diferentes alternativas para um produto permite selecionar a alternativa que resulta num menor consumo de energia. Desta forma, análises energéticas podem ser utilizadas para avaliar se investimentos em conservação de energia são atrativos em termos de energia.

De acordo com Hammond and Jones (2008) uma análise energética pode ser executada seguindo quatro métodos no que respeita à compilação de dados: Análise de Processo que segue uma abordagem técnica; Análise de Insumo Produto que segue uma abordagem econômica; Análise Híbrida que combina os dois métodos anteriores e Análise Estatística. As diferentes abordagens são descritas no item, 2.3.4.

2.3.2 Avaliação de Ciclo de Vida

Conforme referido, as normas ISO 14040 constituem a família de normas de maior aceitação para condução de uma Avaliação de Ciclo de Vida. Na tabela 9 apresentam-se as normas da família ISO 14000 – Gestão Ambiental – relacionadas com Avaliação de Ciclo de Vida atualmente em vigor

Tabela 9 – Normas ISO 14000 relacionadas com a ACV

Norma	Título
ISO 14040: 2006	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and framework
ISO 14044:2006	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines
ISO 14045:2012	Environmental Management –Eco-efficiency Assessment of product systems – Principles, requirements and guidelines
ISO 14046:2014	Environmental Management – Water Footprint – Principles, requirements and guidelines
ISO 14047:2012	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations
ISO 14048:2002	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Data documentation format
ISO 14049:2012	Environmental Management – Life Cycle Assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis
ISO 14071:2014	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to 14044: 2006
ISO 14072:2014	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment

Fonte: ISO, 2017.

Algumas das referidas normas encontram-se transpostas para o marco regulatório brasileiro através das normas apresentadas na tabela 10, publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) descreve os princípios e a estrutura de uma ACV. Conforme declarado no prefácio da mesma, trata-se de uma adoção idêntica em conteúdo técnico, estrutura e redação à ISO 14040: 2006. A norma abrange os estudos de ACV e os estudos de Inventário e Ciclo de Vida (ICV). A ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) detalha os requisitos para a condução de uma ACV.

Tabela 10 – Normas da ABNT relacionadas com ACV

Norma	Título
ABNT NBR ISO 14040:2009 versão corrigida:2014	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – princípios e estrutura
ABNT NBR ISO 14044:2009 versão corrigida:2014	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – requisitos e orientações
ABNT NBR ISO 14049:2014	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário
ABNT NBR ISO 14047:2016	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto

Fonte: ABNT, 2017.

ACV é definida na própria norma como uma “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ABNT, 2009a, pg. 2). Fala-se em impactos ambientais potenciais devido à incerteza inerente à modelagem de impactos ambientais e ao fato de alguns impactos ambientais serem previsões de acontecimentos futuros.

As aplicações de uma ACV são diversas e dependem da amplitude dos dados levantados e da sua interpretação. Com base em ABNT (2009a), Crawford (2011), Carnegie Mellon University Green Design Initiative (2003) e Tavares (2006) apontam-se alguns exemplos:

- Identificar oportunidades de melhoria no desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida;
- Identificar os impactos ambientais de dois produtos alternativos que satisfaçam a mesma função;
- Subsidiar os processos de tomada de decisão nas organizações (planejamento estratégico) e na esfera governamental (desenvolvimento de políticas públicas);
- Fornecer informação para o design de produtos com vista à sua sustentabilidade;
- Avaliação de desempenho ambiental para efeitos de marketing (ex. elaboração de uma declaração ambiental de produto);
- Determinação da energia embutida de um produto.

A realização de uma ACV segue os seguintes princípios apresentados na norma (ABNT, 2009a):

- Perspectiva de ciclo de vida - a ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até à disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de cargas ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e possivelmente evitada;
- Foco ambiental – metodologia que foca os aspectos e impactos ambientais de um sistema de produto. Os aspectos e impactos econômicos e sociais estão, tipicamente, fora do escopo da ACV. Outras ferramentas podem ser combinadas com a ACV para avaliações mais abrangentes;
- Abordagem relativa e unidade funcional – a unidade funcional define o que está sendo estudado e todas as análises subsequentes são relativas aquela unidade funcional;
- Abordagem iterativa – as fases individuais de uma ACV utilizam os resultados das outras fases. Essa abordagem iterativa entre fases contribui para a completeza e consistência do estudos e dos resultados relatados.

Com base na norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) definem-se quatro fases num estudo de ACV que se relacionam conforme apresentado na figura 8 extraída da norma:

- a) Definição de objetivo e escopo
- b) Análise de Inventário
- c) Avaliação de Impacto
- d) Interpretação

Figura 8 – Estrutura de uma ACV

Fonte: ABNT, 2009a.

a) Definição do objetivo e escopo

O objetivo e escopo de uma ACV devem ser consistentes com a aplicação pretendida. No objetivo deverá ser declarada a aplicação pretendida, as razões para realização do estudo, o público alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Já no escopo deverão ser descritos de forma clara os seguintes tópicos: o sistema de produto a ser estudado e as suas funções, a unidade funcional, a fronteira do sistema, procedimentos de alocação, a metodologia de avaliação de impacto utilizada e quais os impactos selecionados, requisitos de dados, pressupostos e limitações do estudo, tipo de análise crítica (se aplicável) e tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

De acordo com ABNT (2009a) define-se unidade funcional como o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência. O papel da unidade funcional é servir de referência à qual as entradas e saídas são relacionadas, ou seja serve de base para a normalização dos dados no sentido matemático. Esta referência é necessária para assegurar que os resultados de ACV podem ser comparados. A unidade funcional escolhida deve ser consistente com o objetivo e escopo do estudo e deverá ser claramente definida e mensurável.

Outro ponto crítico na realização de uma ACV é a definição da fronteira do sistema. Conforme destacado na seção 2.1, o ciclo de vida de um produto é constituído por uma cadeia de processos quer ao longo do ciclo de vida quer na integração dos processos *upstream* e *downstream* necessários às entradas e saídas do ciclo de vida. Conforme destaca Koning et al. (2010), levado ao limite poderia estabelecer-se uma ligação entre todos os processos numa grande rede à escala global. No entanto isto impossibilitaria de chegar a uma conclusão dada a quantidade de dados e informação que teriam de ser coletados. Desta forma é necessário definir qual a fronteira de análise ou seja quais processos do ciclo de vida fazem parte do sistema de produto analisado. Rastrear todas as fases a montante de um produto é uma tarefa difícil pois elas não estão na esfera imediata de influência do produtor. Em geral pode dizer-se que quanto mais distante face ao processo central está um processo, e quanto menor é a sua contribuição para esse processo, menor em geral é a sua influência no resultado da ACV (KONING et al., 2010). Neste sentido, definem-se critérios de corte ou de truncamento procurando-se evitar uma sobrecarga na avaliação com dados cujas contribuições para os resultados da ACV podem ser consideradas irrelevantes.

Com base na norma 14044 (ABNT, 2009b), podem estabelecer-se critérios de corte baseados na massa, energia e significância ambiental para decidir que entradas serão consideradas na avaliação:

- Massa – uma decisão apropriada ao utilizar massa como critério de corte seria a inclusão no estudo de todas as entradas cuja contribuição cumulativa supera uma percentagem definida da entrada de massa total do sistema de produto que está sendo modelado;
- Energia – de forma semelhante, uma decisão apropriada ao utilizar energia como critério requer a inclusão no estudo daquelas entradas cuja contribuição cumulativa supere uma percentagem definida da entrada total de energia no sistema de produto;
- Significância ambiental - Convém que decisões sobre critérios de corte sejam tomadas no sentido de incluir entradas que contribuam com mais do que uma parcela adicional definida da contribuição estimada de dados individuais do sistema de produtos que são selecionados especificamente em função de sua relevância ambiental.

Koning et al., (2010) apresenta como exemplo as regras definidas pela organização alemã que certifica produtores de materiais de construção para emissão de Declaração Ambiental de Produto¹⁸ ao nível de processo:

- Todos os fluxos entrada do sistema de produto que são superiores a 1% do total de massa de fluxos ou que contribuem com mais de 1% para o consumo de energia devem ser considerados na avaliação, sendo permitido estimativas desde que devidamente justificadas;
- Todos os fluxos de materiais que deixam o sistema (emissões) cujo o efeito ambiental é superior a 1% do total de efeitos de uma categoria de efeito devem ser considerados;
- A soma da massa dos fluxos de materiais desconsiderados não deve exceder 5% do produto em consideração.

A norma europeia sobre Declarações Ambientais de Produto de materiais de construção (EN15804) permite negligenciar contribuições de energia ou massa inferiores a 1% desde que o total de exclusões avaliadas em massa ou energia seja inferior a 5% (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

Crawford (2011) faz uma classificação dos tipos de ACV em função do escopo que pode ser adaptado para servir objetivos e necessidades individuais de projetos:

- ACV padrão (*Baseline LCA*) - A ACV padrão ou ACV convencional é utilizada para avaliar um produto, sistema ou processo com o objetivo de identificar áreas para potenciais melhorias no seu desempenho ambiental. Os resultados de uma ACV convencional são tipicamente utilizados para objetivos internos de organizações (como por exemplo indústrias) nos processos de desenvolvimento de produtos e sua melhoria, e para apresentar ao mercado qualidades e forças ambientais particulares de um produto;
- ACV Comparativa - Tem como objetivo comparar impactos ambientais de dois ou mais produtos ou processos que desempenham a mesma função. Para a realização de uma ACV Comparativa é essencial que seja selecionada a mesma unidade funcional na avaliação de cada produto ou processo de forma que os resultados sejam comparáveis. Este tipo ACV é útil para tomadores de decisão quando é necessário avaliar dois ou mais produtos ou processos para a mesma função;

¹⁸ Definição apresentada no item 2.3.4.

- ACV simplificada - Por vezes o objetivo de um estudo de ACV é avaliar apenas uma gama limitada de impactos ambientais ou apenas alguma(s) etapas do ciclo de vida de um produto ou processo. No caso em que o escopo é limitado na fronteira de análise ou nos fluxos quantificados, a ACV é designada por ACV simplificada. As razões para redução do escopo de análise e a adequabilidade de usar uma abordagem simplificada deverão ser apresentadas e explicadas nos objetivos e escopo da ACV.

Para finalizar o tópico sobre a definição de escopo num estudo de ACV refere-se a importância da qualidade dos dados para a avaliação da confiabilidade dos resultados e a sua adequada interpretação. Requisitos de qualidade dos dados estão relacionados a temas como: cobertura temporal; cobertura geográfica; cobertura tecnológica, precisão, completeza, representatividade, consistência, reprodutibilidade, fontes dos dados e incerteza da informação (ABNT, 2009b).

b) Análise de Inventário de Ciclo de Vida

Atendendo à definição apresentada por ABNT (2009a) a Análise de Inventário corresponde à fase da ACV na qual é feita a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Os dados de entrada e saída podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos do sistema de produto, ou podem ser obtidos e calculados a partir de outras fontes. No caso em que os dados são obtidos diretamente nos locais de produção falamos de dados primários. Já no caso em que os dados são obtidos através de outros estudos (ex. revisão da literatura) os dados são do tipo secundário. Na prática, todos os dados podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados.

Conforme já referido, a coleta de dados deverá levantar todos fluxos de entrada e saída de todos os processos do sistema de produto considerado: entradas de recursos primários, pré-produtos, consumíveis e materiais operacionais, energéticos e saídas de produtos, co-produtos e resíduos, emissões atmosféricas, descargas para a água e solo e outros aspectos ambientais. Na ACV a energia embutida é umas das muitas componentes a serem calculadas para determinar o impacto ambiental de um determinado produto ou processo.

Partindo dos dados coletados são necessários procedimentos de cálculo a fim de garantir que todos os fluxos de entrada e saída do sistema de produto estão correlacionados com os processos elementares, com os fluxos de referência e com a unidade funcional selecionada, ou seja é preciso gerar os resultados do inventário para o sistema específico em estudo. Todos os procedimentos de cálculo devem ser documentados de forma explícita e os pressupostos utilizados devem ser claramente declarados e justificados (ABNT, 2009b).

Em particular no que respeita aos fluxos de energia, o cálculo deverá levar em consideração os diferentes combustíveis e fontes de energia elétrica utilizados. Relativamente à eletricidade, devem ser contabilizadas as diferentes fontes de energia, a eficiência da queima de combustíveis e as perdas na conversão, transmissão e distribuição. Quanto à entrada e saídas de combustíveis, os seus valores podem ser transformados em entradas ou saídas de energia multiplicando-os pelos respectivos calores de combustão. Neste caso, deve ser relatado se foi utilizado o poder calorífico superior ou inferior.

Caso o sistema de produto inclua processos compartilhados com outros sistema de produto e/ou quando a etapa de fim de vida considera reuso e reciclagem de materiais, deverão ser considerados procedimentos adequados de alocação das entradas e saídas.

A análise de inventário, em particular o processo de coleta de dados, é umas das fases do estudo de ACV mais onerosa e que consome mais tempo. Nesse sentido é um ponto crítico garantir que escopo do estudo esteja adequadamente definido, evitando o consumo de tempo e recursos para obter dados que estão para além dos necessários dado o objetivo do estudo. A coleta de dados para elaboração de um inventário de ACV pode seguir uma de três abordagens: Análise de Processo, Análise Inpu-Output e Análise Híbrida. Maiores detalhes sobre abordagens para coleta de dados de inventário são dados na 2.3.4.

c) Avaliação de Impactos

Trata-se da fase da ACV que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto. Os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço estão relacionados com os inputs e outputs do sistema de produto levantados e quantificados na fase de inventário. Na avaliação de impacto, os dados de inventário são associados com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando dessa forma quantificar tais impactos.

Com base na norma 14044 (ABNT, 2009b) a fase de avaliação de impactos compreende as seguintes etapas obrigatórias:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados de inventário às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Como etapas opcionais podem ainda ser incluídas na análise as seguintes etapas:

- Normalização – cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência;
- Agrupamento – Agregação e possível hierarquização das categorias de impacto;
- Ponderação – conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impactos utilizando fatores numéricos baseados em escolha de valores; convém que os dados anteriores à ponderação permaneçam disponíveis;
- Análise da quantidade de dados – melhor entendimento da confiabilidade da coleção de resultados dos indicadores.

A seleção de categorias de impacto deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto em estudo, levando em consideração o objetivo e escopo. Na tabela 11 apresenta-se um exemplo de classificação para algumas categorias de impacto frequentemente selecionadas.

Tabela 11 – Categorias de impacto comuns nos estudos de avaliação de impacto de ciclo de vida

Categoria de Impacto	Definição
Aquecimento global	Aumento da temperatura média do planeta Terra
Depleção de minerais e combustíveis fósseis	Consumo de energia não renovável ou de recursos minerais
Oxidação Fotoquímica (smog)	Emissão de substâncias (Compostos Orgânicos Voláteis, óxidos de nitrogénio) para o ar
Toxicidade Humana	Exposição humana à crescente concentração de substâncias tóxicas no ambiente
Depleção da camada do ozônio	Aumento no buraco da camada do ozônio
Eutrofização	Aumento na concentração de nutrientes químicos na água e na terra
Consumo de água	Consumo de água
Uso da terra	Mudanças no uso da terra
Acidificação	Emissão de substâncias ácidas para o ar e água
Ecotoxicidade	Emissão de substâncias orgânicas e químicas para o ar, água e terra

Fonte: Crawford, 2011.

d) Interpretação

A última fase da avaliação do ciclo de vida tem como objetivo a avaliação dos resultados de inventário e/ou da avaliação de impacto face ao objetivo e escopo definidos, a fim de se chegar a conclusões ou recomendações.

Para terminar as considerações sobre a norma ISO 14040 e 14044 cabe destacar que as mesmas não se destinam a ser utilizadas com finalidades contratuais ou regulatórias nem para registro ou certificação”, ou seja, o seu caráter é voluntário não existindo documentos legais que obriguem sua adoção pelas empresas.

Conforme se conclui pelas informações apresentadas, a condução de uma ACV com base nas normas ABNT NBR 14040 e ABNT NBR 14044 deixa várias decisões ao critério de quem a executa com destaque para a definição das fronteiras dos sistema a ser analisado, a seleção das fontes de dados de inventário e a ponderação das diversas categorias de impacto. Pode então concluir-se que não existe um método único para se conduzir uma ACV e as organizações têm a flexibilidade para implementar uma ACV de acordo com a aplicação

pretendida e com os requisitos de cada organização. A subjetividade de tais decisões é apontada como Crawford (2011) como uma das limitações das metodologias ACV e uma causa de variabilidade nos seus resultados.

Com base em Agopyan e John (2011), as metodologias ACV são as mais confiáveis para determinar a totalidade de energia embutida num material, porém, a sua adoção em massa enfrenta algumas barreiras. Atendendo à revisão bibliográfica apontam-se as seguintes limitações aos estudos de ACV (CRAWFORD, 2011; DIXIT et al., 2010; DIXIT et al., 2012; BUYLE; BREAT; AUNDENAERT, 2013):

- Metodologia onerosa em termos de custo e tempo em resultado da dificuldade e extensão do processo de coleta de dados;
- Metodologia que considera apenas impactos ambientais não considerando o desempenho do processo em termos sociais e económicos como subsídio à tomada de decisões;
- Falta de uma metodologia de avaliação de impactos de aceitação geral que seja consistente e precisa a traduzir os resultados de inventários em impactos ambientais potenciais específicos;
- A subjetividade na definição da fronteira do sistema e a escolha da unidade funcional;
- Pouca disponibilidade de dados de inventário que é muitas vezes ultrapassada pelo uso de médias nacionais ou dados de diferentes regiões e países que aumentam a incerteza quanto aos resultados de um processo específico;
- Qualidade dos dados de inventário que depende da representatividade geográfica (se o seu uso é adequado para a localidade ou fábrica do processo em estudo), da idade dos dados e da correspondência em termos de tecnologia.

Os quatro últimos pontos são tipicamente apontados como causa da variabilidade encontrada nos resultados dos estudos de ACV. No sentido de ultrapassar algumas das questões apresentadas, Klopffer (2014) destaca os seguintes pontos como tendência futuras relativamente aos estudos de ACV:

- Simplificar e flexibilizar a metodologia de cálculo;
- Reduzir a avaliação de impacto a uma categoria;

- Expandir a metodologia de ACV ambiental para uma avaliação de sustentabilidade no ciclo de vida, ou seja acrescentar a avaliação económica e social.

2.3.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida no ambiente construído

Os edifícios constituem produtos com características muito particulares. O elevado impacto ambiental dos edifícios, em particular pelo consumo energético e de recursos primários, faz com que a sustentabilidade das edificações seja um tema com participação crescente quer ao nível académico quer em termos governamentais (através de regulamentos) e de mercado (pelos sistemas de certificação). Contudo, Buyle, Breat e Audenaert (2013) e Dixit et al. (2012) referem que a ACV no setor de construção é muito menos padronizada que em outras indústrias e que carece de estudos adicionais para que seus resultados ganhem confiabilidade.

Atendendo às especificações do setor, Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) refere que a aplicação da ACV em edifícios e no setor da construção tem evoluído como uma área específica dentro das aplicações da ACV, não só pela complexidade do setor mas devido a um conjunto de fatores que o tornam único mesmo quando comparado com outros produtos complexos:

- Os edifícios têm longos períodos de vida útil, geralmente acima de 50 anos o que torna difícil a previsão de ciclo de vida na abordagem do berço ao túmulo;
- Durante o ciclo de vida as edificações podem passar por transformações no que respeita à sua forma e função. A facilidade com que tais transformações são realizadas e a oportunidade de minimizar os efeitos ambientais dessas mudanças são em parte funções do projeto original;
- Muitos dos impactos ambientais de um edifício ocorrem durante o seu uso (consumo de energia e água). Um projeto adequado e a seleção de materiais são pontos críticos para minimizar estas cargas ambientais no uso;
- Um setor onde atuam muito atores, o projetista que decide o resultado final e os requisitos de desempenho não é quem constrói nem quem produz os componentes para construir;
- Cada edifício é único não havendo muita padronização o que faz com que cada caso em particular precise de escolhas específicas e dados específicos;

- Tipicamente os profissionais de ACV focam-se em materiais e produtos específicos enquanto que a avaliação do edifício fica a cargo de projetistas com pouco conhecimento sobre o assunto.

A realização de ACV nos edifícios reflete as referidas especificidades em particular no que respeita à modelação do produto, à modelação do seu ciclo de vida e definição da fronteira de análise e da unidade funcional.

Conforme referido, cada edifício é único com tipos de materiais, respectivas quantidades e técnicas construtivas específicos do seu design. De forma a lidar com essa complexidade, Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) sugere 3 pontos para organizar a realização de uma ACV com foco em edifícios:

1. Modelação do seu ciclo de vida e definição da fronteira de análise em função das etapas incluídas (de acordo com o objetivo e escopo do estudo);
2. Descrição do edifício em termos de materiais e componentes que o constituem;
3. Realização das ACV relativas aos materiais e componentes do edifício cujos resultados vão permitir montar a ACV do edifício como um todo.

Em relação à fronteira de análise, Yokoo e Yokoyama (2016) sugerem usar a abordagem do berço ao túmulo sempre que possível e que, quando tal não for possível, deve ser utilizado pelo menos a fronteira do tipo berço à entrega do edifício que corresponde ao cálculo da energia embutida inicial.

Quanto ao ponto 2 cabe referir que alguns estudos procuram incluir na avaliação o impacto da infraestrutura necessária para o edifícios mas que não pertence ao edifício tais como estradas e rede de saneamento, mas tal procedimento não é uma prática consensual (OTAJI; SCHUURMANS; EDWARDS, 2003).

Atendendo ao último ponto, podemos referir que Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) distingue dois níveis de ACV no ambiente construído:

- ACV de componentes construtivos. Elementos construtivos são constituídos por combinações de materiais. Os resultados de ACV de componentes construtivos recorrem às ACVs individuais dos materiais, produtos e serviços necessários ao seu processo produtivo. O objetivo deste tipo de estudo é

identificar oportunidades de melhoria relativamente aos aspectos ambientais do produto e do seu processo produtivo que sirvam à tomada de decisões (como por exemplo o redesign do processo). Este tipo de estudos é utilizado na indústria para efeitos internos de melhoria de processo e planeamento ou são usados para comunicar informação externamente tendo como alvo o próximo ator na cadeia produtiva, o projetista de uma edificação, posicionamento do produto no mercado permitindo comparações com outros produtos por parte dos compradores e para efeitos de marketing e elaboração de políticas públicas;

- ACV do Edifício como um todo. Os resultados da ACV de um edifício recorrem às ACVs dos componentes construtivos que constituem o edifício. Tipicamente o objetivo deste tipo de estudos é melhorar o design do edifício no sentido de minimizar o seu impacto ambiental no ciclo de vida e são direcionados para projetistas, administradores e seus clientes (investidores, proprietários, ocupantes, etc.).

Pode então dizer-se que a ACV do edifício resulta da adição dos resultados das ACV particulares de cada material ou componente. Para tal as ACV de cada material e componente têm que ser consistentes em termos de fronteira de análise e completude dos dados e é preciso garantir que os materiais e componentes considerados descrevem a totalidade do edifício.

Dada a longa vida útil do edifício, quando é efetuado um estudo de ACV, a avaliação das fases até à entrega do edifício é tipicamente certa na medida em que resulta de dados reais sobre o ciclo de vida. Já os dados sobre as fases de fim de vida são previsões relativamente ao que é mais provável sob circunstâncias típicas. Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) e Yokoo e Yokoyama (2016) sugerem que em um estudo de ACV de edifício sejam apresentados os resultados parciais de cada etapa do ciclo de vida, quer ao nível dos componentes e materiais, quer ao nível do edifício para que os executantes da ACV possam usar os resultados de acordo com os seus requisitos.

Quanto à unidade funcional em termos de ACV do edifício, cabe referir que a mesma deve relacionar-se com uma característica de desempenho (como por exemplo a vida útil ou clima interior) ou outras medidas tais como m^2 de área construída, m^2 de área útil, m^3 , por ocupante, por domicílio. Já em termos de ACV de componentes a unidade funcional escolhida deverá relacionar-se com a unidade funcional do edifício como um todo e deverá permitir a

comparação entre materiais concorrentes para a mesma função. São exemplos de unidades funcionais para componentes construtivos: 1 m² de parede com determinado valor de resistência térmica; 1 m² de piso com determinada vida útil; massa do componente por m² de área construída. Crawford (2011) exemplifica a importância de considerar a unidade funcional do componente com o desempenho do edifício como um todo com a escolha de materiais para piso: comparar carpete e piso cerâmico com base em m³ de material não é aceitável pois os mesmos podem ter diferentes espessuras e densidades, pelo que sugere usar como unidade o m² de piso para ser usado durante determinado tempo, unidades que se relacionam mais com a função de uso do material.

A pesquisa realizada por Bastos, Batterman e Freire (2014) destaca a importância da unidade funcional na comparação de diferentes tipos de edifícios já que diferentes unidades funcionais induziram diferentes conclusões: quando os resultados são apresentados em termos de área (por m²) os edifícios maiores apresentam menor consumo de energia e menores emissões de gases de efeito de estufa face aos edifícios menores; quando os resultados são apresentados por ocupante os edifícios maiores são os maiores consumidores de energia e maiores emissores de gases de efeito de estufa.

Para concluir este ponto sobre AVC no ambiente construído, com base em Koning et al. (2010) e Evangelista et al. (2014) listam-se alguns fatores que têm impossibilitado uma maior aceitação da Avaliação de Ciclo de Vida no setor da construção:

- A indisponibilidade de dados adequados para uma completa descrição dos edifícios;
- A falta de consistência nos dados que geram grande variabilidade e incerteza nos resultados;
- O esforço envolvido para fazer a completa descrição do edifício é muito elevado para convencer o mercado das vantagens de uma ACV;
- Resistência dos fornecedores em fornecer dados sobre os seus processos produtivos por receio de concorrência, plágio e vinculação de imagem negativa à sua empresa em consequência dos dados obtidos e divulgados;
- Dificuldade em determinar quantitativos de impactos ambientais gerados, nomeadamente durante as fases de construção e demolição, em particular pela diversidade e composição química de materiais utilizados no setor da construção civil e própria dinâmica de modificações e renovação das construções.

A questão da redução da energia embutida nos edifícios é praticamente desconsiderada em termos de regulação específica. Contudo cabe referir a existência de um conjunto de esquemas de certificação (não obrigatórios), bases de dados e instrumentos desenvolvidos em diferentes países (YOKOO; YOKOYAMA, 2016). Com efeito, contam-se um conjunto de normas publicadas em diferentes países que podem ser utilizadas para o cálculo da energia embutida como parte do indicador “Consumo Acumulado de Energia Primária” utilizado para descrever o consumo de recursos.

Conforme destacado por Yokoo e Yokoyama (2016), a nível internacional contam-se as normas da ISO apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 – Normas para a avaliação ambiental de edifícios e produtos

Norma	Título
ISO 21931-1:2010	Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works – Part 1: Buildings
ISO 21929 -1:2011	Building Construction Sustainability in Building Construction – Sustainability indicators. Part 1: Framework for the development of indicators for building and core indicators
ISO 21930:2007	Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products
ISO 14025:2006	Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures

Fonte: Yokoo e Yokoyama, 2016.

As Declarações Ambientais de Produto (DAP), foco da norma ISO 14025 são descritas no tópico 2.3.4 deste trabalho.

Na Europa em particular, estão em vigor as normas de carácter voluntário sobre Avaliação Ambiental de materiais de construção e edifícios desenvolvidas pelo comité TC350 do Centro Europeu de Normalização (CEN) que descrevem uma metodologia harmonizada para avaliar o desempenho ambiental, económico e social no ciclo de vida dos edifícios. Do conjunto de normas do CEN apresentadas na tabela 13 destacam-se a norma EN 15978:2011, que é a norma europeia para calcular a energia embutida nos edifícios, e a norma EN 15804:2011 que é a norma para calcular indicadores ao nível de produtos de construção. A norma EN 15804 é utilizada pelos países europeus para a emissão de certificações ambientais de produtos tipo III – DAP – relativas aos produtos da construção formando um mercado comum, no qual se eliminam as barreiras técnicas, por meio da harmonização das legislações nacionais dos países da União Europeia para requisitos essenciais (MILLER, 2015).

Tabela 13 - Normas do CEN TC350 relacionadas com avaliação ambiental de edifícios e produtos da construção

Norma	Título
EN 15643-2:2011	Sustainability of construction works: Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance
EN 15978:2011	Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings – calculation method
CEN/TR 15941:2010	Sustainability in building construction – Environmental product declarations – methodology for selection and use of generic data
EN 15942:2011	Sustainability in building construction – Environmental product declarations – Communication format business-to-business
EN15804:2012	Sustainability in building construction – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products

Fonte: Yokoo e Yokoyama, 2016.

2.3.3 Avaliação de Ciclo de Vida Energético

Nos edifícios, os impactos ambientais no ciclo de vida são tipicamente dominados pelo consumo de energia na fase de uso (KOTAJI; SCHUURMANS; EDWARDS, 2003). Por esta razão, uma abordagem simplificada que considera apenas os impactos relacionados com a energia é muito comum nas ACV que estudam edifícios, designando-se por Avaliação de Ciclo de Vida Energético - ACVE (CRAWFORD, 2011). Na seção 2.3.2 definiu-se ACV simplificada como um estudo com redução de escopo em termos de fronteira de análise e/ou fluxos avaliados. A aplicação da metodologia ACV para cálculo da energia embutida nas edificações acontece por redução do escopo de análise uma vez que as entradas a serem inventariadas dizem respeito apenas aos consumo de energia no ciclo de vida da edificações, por oposição à sua versão completa que considera a totalidade de fluxos de entrada (materiais e energia). Desta forma, a ACVE baseia a sua estrutura metodológica em uma ACV, em particular nas recomendações das normas ABNT NBR 14040 e 14044 mas para efeitos de entradas são inventariados apenas os consumos energéticos.

Embora não aplique o conceito de multi-análise característico de uma ACV, uma ACVE permite avaliar impactos ambientais importantes como a emissão de gases do efeito estufa, e, por ter uma estrutura mais simples do que uma ACV completa, demanda menos

custos e tempo na sua execução (TAVARES, 2006). Oliveira, L.S., (2015) acrescenta que a redução nos fluxos a serem avaliados torna viável inventariar um maior número de processos, o que se interpreta pela possibilidade de integrar um maior número de processos *upstream* e *downstream* na análise das etapas de ciclo de vida da edificação.

Crawford (2012) destaca que a proposta de uma ACVE não é substituir um método de análise ambiental amplo como uma ACV, mas facilitar a tomada de decisão relativamente à eficiência energética e impactos associados ao consumo de energia no ciclo de vida de um produto. O cálculo do consumo energético nas etapas de ciclo de vida do edifício permite determinar potenciais de eficiência energética e consequentes estratégias de conservação, comparar o consumo de energia de edifícios com tipologias diversas, ou demonstrar os benefícios de uma estratégia ao nível de projeto para otimizar energia operacional (CRAWFORD, 2012).

Oliveira, L.S. (2015) refere a possibilidade combinar estudos de ACV simplificada em termos de etapas do ciclo de vida incluídas e de fluxos analisados e, desta forma, ampliar progressivamente o inventário de uma ACV de escopo reduzido, tornando-a gradativamente mais completa.

Na realização de uma ACVE e atendendo à discussão sobre unidade funcional realizada no tópico relativo a ACV no ambiente construído, as unidades funcionais mais aceites apresentam unidades de energia avaliadas em Joule, ou seja: GJ/m² de área útil, GJ/m² área construída, GJ/m³, GJ/domicílio, GJ/ocupante.

2.3.4 Metodologias de Inventário:

A etapa de levantamento e quantificação dos fluxos de entrada e saída do sistema é uma fase crítica nas metodologia de cálculo de energia embutida, não só pelo custo em termos de tempo e financeiros mas também porque dos seus resultados saem as avaliações de impactos. A escolha da metodologia depende dos objetivos e escopo do estudo, dos requisitos quanto ao nível de detalhe, dos níveis aceitáveis de incerteza e dos recursos disponíveis (dados, recursos humanos, know how e orçamento) (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

Com base na revisão da literatura distinguem-se quatro métodos para compilar dados de inventário. Os métodos com maior referência na literatura são: Análise de Processo, Análise Input-Output e Análise Híbrida (CRAWFORD, 2011; IFIAS, 1978; YOKOO;

YOKOYAMA, 2016). Hammond e Jones (2008) e Baird, Alcorn e Haslam (1997) acrescentam ainda a Análise Estatística.

Nos próximos tópicos apresentam-se as principais características de cada abordagem, seus benefícios e limitações:

- Análise de Processo

De acordo com Crawford (2011) a análise de processo combina informações específicas de um processo, produto e localização para obter as cargas ambientais e respectivos impactos de um sistema de produto. Os dados são medidos a partir de um produto ou processo particular com base em registros internos de uma empresa tais como faturas de consumo de energia e água, ou relatórios elaborados para auditoria interna ou exigências regulatórias externas (ex. comunicação de emissão de poluentes). Trata-se de uma abordagem do tipo *bottom-up*.

A obtenção de dados relativos a um determinado processo pode implicar significativamente em termos de tempo e custo já que os mesmos podem ser de difícil obtenção ou podem mesmo não existir no formato necessário. Em tais casos é necessário dedicar tempo analisando o processo produtivo para coletar os dados em falta ou utilizar dados genéricos coletados para processos e produtos similares. A última abordagem permite reduzir o tempo de análise mas levanta questões de adequabilidade e confiabilidade dos dados. Como vantagem do método de análise de processo é tipicamente referido o fato de ser mais preciso e significativo para o estudo de processos e produtos específicos mas por outro lado apresenta a desvantagem de ser muito exigente em termos de tempo e recursos de coleta de dados. Para além disso apresenta necessariamente uma incompletude dada a representação do sistema de produto com uma fronteira finita, para fora da qual os fluxos são desconsiderados (CRAWFORD, 2011).

- Análise Input-Output (I-O)

A ACV baseada numa análise de Insumo-Produto recorre à análise da matriz insumo produto aplicada na economia para coleta e quantificação de dados relativos a entradas e saídas de um processo. Para cada setor, a matriz de insumo produto descreve os requisitos de

entradas (expressas em transações monetárias) vindas de cada outro setor da economia de forma a produzir uma determinada quantidade de produto. A abordagem adotada baseia-se no fato das atividades econômicas estarem fortemente inter-relacionadas, sendo que cada atividade produtiva tem um papel duplo: por um lado como fornecedor vendendo o seu produto para outras indústrias e para compradores finais; por outro lado como comprador de insumos, comprando insumos de outras atividades produtivas aos quais se juntam o trabalho, recursos naturais, materiais importados, entre outros. O valor do produto inclui o valor dos materiais e serviços comprados de outros setores mais o valor dos insumos primários utilizados diretamente no processo produtivo (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY GREEN DESIGN INITIATIVE, 2003).

Para que a matriz input-output seja utilizada em análises ambientais é necessária a sua integração com dados ambientais de cada setor tais como consumo de energia, água, matérias primas, produção de resíduos e emissões poluentes. A integração entre dados econômicos e quantidades faz-se calculando os coeficientes de requisitos ou rejeitos por unidade monetária (ex. toneladas CO₂ por real) de produto obtidos pela divisão entre o consumo total de um recurso por um setor medido em quantidades pelo valor monetário total do output desse setor (ou a produção total de um rejeito por um setor medida em quantidades pelo valor monetário total do output desse setor). Sabendo o valor destes coeficientes, é possível calcular qualquer quantidade associada com uma transação monetária de qualquer setor da economia, incluindo os inputs indiretos de mercadorias e serviços que suportam a produção ou fornecimento de um output (CRAWFORD, 2011). Trata-se de uma abordagem do tipo *top-down*.

Com base em Crawford (2011) o maior problema, comum a todas as aplicações da análise I-O é a complexidade de obter apenas os requisitos indiretos. Os coeficientes de requisitos ou rejeitos incluem requisitos diretos e indiretos em um mesmo valor para cada setor. O cálculo dos requisitos indiretos resulta da subtração dos requisitos diretos dos requisitos totais, procedimento que se torna extremamente oneroso em termos de tempo em função do número de transações na cadeia upstream, deixando ao critério do avaliador escolher quais os processos significativos para a análise (na impossibilidade de analisar todos). Outra questão apontada pela literatura como desvantagem da abordagem I-O é os valores resultantes representarem médias dos setores o que reduz a relevância dos resultados quando aplicados a determinado produto ou região, já que os mesmos dificilmente são representativos de um fornecedor e de um processo específicos.

Yokoo e Yokoyama (2016) apontam ainda como desvantagens as variações de preços, inflação e variações em taxas de câmbio que causam variações nos resultados sem que estas representem variações ao nível dos fluxos do processo. A questão das importações e a sua demanda energética também é uma questão complexa nas análise I-O já que implica rastrear *upstream* para os dados do país de origem, as fontes energéticas utilizadas e as distâncias de transporte (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

A maior vantagem deste método é a completude que permite face à fronteira do sistema de produto.

- Análise Híbrida

O método de análise híbrida procura combinar as vantagens dos métodos de análise de processo e análise input-output. Em um exemplo de combinação dos dois métodos apresentado em Crawford (2011) baseado no exemplo de Suh e Huppes (2002)¹⁹ os requisitos diretos e *downstream* (para produção, uso e fim de vida) e alguns níveis baixos na cadeia *upstream* da unidade funcional são avaliados a partir de um análise de processo detalhada, enquanto os requisitos de elevada ordem na cadeia *upstream* (na extração de matérias primas e manufatura) são obtidos por análise I-O, que o autor designa por abordagem híbrida baseada em processo. Neste caso, faz-se uma combinação da especificidade do método de análise de processo com a completude do processo de análise input-output. Treloar (1997²⁰; 2007²¹ apud CRAWFORD, 2011) usa outra abordagem híbrida que parte da matriz I-O para investigar um produto e identificar as entradas e saídas mais significativas que são posteriormente descritas exaustivamente por análise de processo, concentrando os esforços nos fluxos significativos para a análise. Este último caso é designado por análise híbrida baseada na análise I-O.

¹⁹ SUH, S.; HUPPES, G. (2002) Missing inventory estimation tool using input-output analysis, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(3):134-40.

²⁰ TRELOAR, G.J (1997) Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method, *Economic Systems Research*, 9(4): 375-91.

²¹ TRELOAR, G.J. Environmental Assessment using both financial and physical quantities *Proceedings of the 41st Annual Conference of the Architectural Science Association ANZASA*, Geelong, November: 247-55.

- Análise Estatística

Baird, Alcorn e Haslam (1997) definem um quarto método designado por análise estatística que utiliza estatísticas para determinar a energia utilizada por uma determinada indústria. Hammond e Jones (2008) referem que é um método dependente da disponibilidade de estatísticas ao nível da economia como um todo e ao nível dos setores económicos e do seu nível de desagregação. De acordo com os autores o método fornece estimativas razoáveis do custos dos produtos em termos de energia primária mas não permite avaliar consumo indiretos de energia nem distinguir diferentes *output* de uma mesma indústria. Tavares (2006) acrescenta que se trata de uma método rápido e prático mas cujos resultados podem carecer de consistência e confiabilidade.

Crawford (2011) faz uma comparação entre as abordagens de inventário a partir de um caso de estudo em que é calculada a energia embutida de um edifício residencial aplicando uma abordagem de processo, abordagem I-O, abordagem híbrida baseada em processo e abordagem híbrida baseada na análise I-O. Os resultados apresentados no gráfico da figura 9 revelam diferenças muito significativas no valor de energia embutida em função da abordagem de coleta de dados adotada.

Figura 9 – Comparação de energia embutida em estudo de caso de edifício residencial de acordo com diferentes métodos de inventário

Fonte: Crawford, 2011.

De acordo com o autor, os resultados fornecem uma indicação da significância das falhas dos diferentes métodos. Os resultados demonstram que a abordagem de inventário híbrida baseada na análise I-O devolve o valor de energia embutida mais elevado, correspondendo ao método com maior cobertura enquanto que a abordagem de processo devolve o valor mais baixo. Crawford (2011) refere que a magnitude dos erros de truncamento nas análises de processo depende do tipo de produto e processo mas pode atingir 50% para produtos de complexidade média e 87% para produtos mais complexos, o que significa que de acordo com o referido autor, em uma análise de processo não é possível reduzir o erro de truncamento para níveis aceitáveis dada a exigência que tal objetivo trataria em termos de coleta de dados. Ainda relativamente aos resultados do caso de estudo apresentado por Crawford (2011), cabe destacar que o valor de energia embutida calculado por abordagem de processo é 26,5% do valor quando é utilizada a abordagem híbrida baseada na análise I-O, ou seja o valor deste última é 3,78 vezes superior. Os resultados aqui apresentados colocam em evidência a variabilidade dos valores de energia embutida em função do método de coleta de dados escolhido. Para ilustrar esta variabilidade apresenta-se ainda na tabela 14 valores de EE em materiais de construção obtidos com diferentes métodos. Mais uma vez observa-se que os valores de EE obtidos por abordagem de processo são inferiores (com exceção do tijolo e do plástico) e com diferenças significativas face aos valores obtidos por outras abordagens.

Tabela 14 – Comparação de valores de energia embutida em materiais de construção com diferentes métodos de inventário

Material	Baseada em Processo (MJ/kg)	Híbrida (MJ/kg)	I-O (MJ/kg)
Alumínio	154,3	252,0	378,0
Tijolo	8,2	3,3	5,4
Carpete	74,4	288	212,0
Azulejos cerâmicos	9,0	22,0	32,0
Telha cerâmica	6,5	20,0	17,0
Concreto	1,1	1,8	2,4
Pavimento de concreto	2,0	3,2	3,2
Bloco de concreto	2,0	4,8	4,5
Porta (sólida)	23,0	74,0	74,0

Continua

Conclusão

Material	Baseada em Processo (MJ/kg)	Híbrida (MJ/kg)	I-O (MJ/kg)
Vidro	13,5	168,0	83,0
Tinta	80,0	284,0	194
Plástico	87,0	64,0	163,4

Fonte: Yokoo e Yokoyama (2016).

A disponibilidade e acessibilidade de dados sobre EE de materiais de construção é o requisito mais importante para a avaliação da Energia Embutida do edifício (YOKOO; YOKOYAMA, 2016). A fim de simplificar a avaliação do consumo de energia embutida registram-se várias iniciativas no sentido de montar bases de dados com valores relativos não só aos materiais mas também a outras etapas do ciclo de vida como o transporte. Com base em Yokoo e Yokoyama (2016) referem-se como exemplo a Inventory Carbon and Energy (ICE) do Reino Unido, a Athena LCI do Canada, a Okobau.dot da Alemanha, a Ecoivent da Suíça e a European Life Cycle Database (ELCD). No anexo A apresenta-se uma lista mais completa de bases de dados com referência a algumas características tais como a fronteira de análise e a metodologia utilizada na coleta de dados.

Yokoo e Yokoyama (2016) apresenta uma lista com os requisitos mínimos para a criação de uma base de dados confiável:

- Materialidade – a base de dados com valores de inventário deve cobrir os materiais de construção e as tecnologias mais significativas em termos de custo, massa e impactos ambientais esperados. Dentro do inventário de ciclo de vida, os fluxos de *inputs* e *outputs* relevantes têm que ser considerados;
- Consistência - a análise de inventário dos materiais de construção segue sempre os mesmos princípios em termos de modelos, consideram a mesma fronteira e os mesmos critérios de corte;
- Transparência – uma base de dados de confiança deverá providenciar acesso aos dados de processo permitindo ao utilizador verificar independentemente a qualidade dos dados, por analogia às práticas já existentes em relatórios financeiros;
- Temporalidade – a idade da informação em uma base de dados é determinante para a sua qualidade. Contudo não existe um número fixo de “idade” que

indique se um dado pode ou não ser usado. Em princípio tal valor vai depender da velocidade de desenvolvimento tecnológico de cada setor;

- Confiabilidade – os dados incluídos devem ser de uma fonte confiável, passar por processos críticos e ser comparados com dados de outros processos;
- Controlo de Qualidade – os dados incluídos devem passar por verificação externa e independente ou revisão crítica baseada em protocolo de revisão.

Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) conclui pela revisão de estudos de caso na literatura que os resultados de uma ACV de edifícios são muito sensíveis à mudança de base de dados como origem de dados de inventário. Crawford (2011) refere que valores de inventário disponibilizados em bases de dados e ferramentas de aplicação de ACV são geralmente resultantes da agregação de dados de um conjunto de fornecedores dos produtos e que como tal raramente fornecem um cenário preciso e completo sobre os inputs, outputs e impactos associados com produtos ou processos específicos. A adoção de um valor médio, típico da simplificação baseada na utilização de dados secundários, baseia-se na hipótese de que “rotas tecnológicas” iguais levam a impactos ambientais que podem ser comparados (JOHN et al. 2014). Tal abordagem gera alguns problemas (JOHN et al., 2014):

- O valor médio do produto tende a tornar-se uma verdade e passa a ser associado pelo consumidor (e até pelo fabricante) como sendo uma característica daquele produto;
- Ao igualar todos os fornecedores, o valor médio retira o incentivo do consumidor em reduzir impactos ambientais através da escolha do fornecedor e não alerta os fornecedores sobre o potencial de melhoria dos processos produtivos;
- A publicação de um valor único para todos os fornecedores protege as empresas com valores superiores à média e desincentiva as empresas comprometidas com a proteção ambiental já que estas têm que arcar com um custo extra de mostrar o seu desempenho.

Como alternativa pode divulgar-se faixas de impacto ambiental que mostram ao fabricante o potencial de diminuição de impactos no seu setor e tecnologia. Para além disso,

ao não “rotular” um produto como tendo determinado impacto, ela facilita ao fabricante a tarefa de informar seus próprios impactos (JOHN et al. 2014).

Ainda sobre o uso de bases de dados em estudos de ACV, Macedo (2011) destaca que nos chamados países desenvolvidos, a rotulagem ambiental baseada na ISO 14025 é responsável pelo abastecimento de boa parte dos bancos de dados de ACV de materiais utilizados como fontes de informação para avaliação de edifícios no seu ciclo de vida. A norma ISO 14025- *Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures* define os princípios e especifica os procedimentos para o desenvolvimento de programas de declaração ambiental e desenvolvimento de Declarações Ambientais de Produto (DAP). De acordo com a norma, a família de normas ISO 14040 deverá ser utilizada na avaliação das características ambientais dos produtos para emissão de DAP.

A DAP é um documento que resume o perfil ambiental de um componente, um produto acabado ou um serviço numa abordagem de ciclo de vida, elaborada de forma padronizada e objetiva. O uso das DAPs na cadeia produtiva da indústria da construção tem como objetivo encorajar a demanda e o fornecimento de materiais e produtos que causem menor prejuízo ao meio ambiente por meio da comunicação de informações precisas e confiáveis sobre os aspectos ambientais destes materiais e produtos. Para além disso, a utilização de um método padronizado permite que o perfil ambiental de determinado produto seja comparável com o de outros, independentemente da região ou país. Brito (2017) chama a atenção para o fato de que, embora forneça informações objetivas a DAP não é um rotulo de qualidade ambiental, uma vez que a sua emissão não define exigências ambientais específicas ou seja não é avaliado se o produto obedece a um determinado nível de desempenho.

Conclui-se que o uso de bases de dados como fontes de informação para análises de ACV, em particular para o cálculo de EE, são uma forma de tornar o processo mais exequível em termos de tempo, mas que pode ter impacto ao nível da representatividade dos resultados face a um estudo particular.

2.3.5 Energia final e Energia primária

Por cada consumo de energia nos chamados usos finais (consumos diretos contabilizados nos setores residencial, comercial, transportes, industrial, entre outros)

acontece um consumo energético indireto já que, para a energia ser entregue nos pontos de consumo, acontecem processos de conversão e transporte com eficiência inferior a 100%. Neste contexto cabe distinguir energia primária e energia secundária. A energia primária corresponde aos recursos energéticos extraídos da natureza e inclui o carvão mineral, petróleo, gás natural, materiais fósseis, biomassa, energia potencial hídrica, energia solar, energia eólica, energia geotermal e energia maremotriz e das ondas (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). A energia secundária resulta da transformação da energia primária e é a energia efetivamente consumida pelo homem para satisfazer as suas necessidades e nela incluem-se a eletricidade, combustíveis e biocombustíveis e calor (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

Para calcular o uso de energia primária é preciso analisar o sistema energético que forneceu a energia secundária consumida no uso final. Um sistema energético é constituído pelos processos *upstream* que ligam um consumo de energia até ao recurso primário que lhe deu origem (BLOK; NIEUWLAAR, 2017; LOUREIRO et al., 2015):

- Extração de fontes de energia - como por exemplo a mineração de carvão e urânio, extração de petróleo e gás natural, cultivo de biomassa para fins energéticos;
- Conversão da energia primária em secundária - quando a energia contida na fonte primária não pode ser diretamente consumida nos usos finais (são exemplos a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis e o refino do petróleo bruto para produção de nafta, querosene, gasolina, diesel entre outros);
- Sistema logístico - que garante que a energia está disponível no local de consumo e no momento da demanda e que inclui as atividades de transporte, armazenamento e distribuição para que a energia chegue ao consumidor final;
- Construção da infraestrutura necessária para os processos de conversão e transporte - corresponde à energia consumida para construir e manter as usinas onde ocorrem os processo de conversão e para construir os meios de transporte e correspondente infraestrutura como estradas e carris);
- Processos de limpeza ou disposição de resíduos.

Em termos genéricos, de acordo Boustead and Hancock (1979) podemos definir a eficiência de um sistema energético como a divisão entre o total de energia entregue no uso final e o total de energia que entrou no sistema, conforme representado na seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{E_F}{E_i + E_p}$$

Onde:

E_F – energia entregue no uso final

E_i – Conteúdo energético do recurso primário que entra no sistema

E_p - Energia consumida no processamento e transporte da energia até ao ponto de consumo

Conforme referido, um sistema energético inclui uma sequência de processos, sendo que cada um apresenta uma eficiência específica. A partir das eficiências individuais de cada processo é possível determinar a eficiência do sistema energético como um todo de acordo com a seguinte expressão apresentada em Boustead e Hancock (1979):

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$$

Na figura 10 apresenta-se esquematicamente um sistema energético para produção de eletricidade a partir de um combustível:

Figura 10 – Processos em um sistema energético de produção de eletricidade a partir de um combustível

Fonte: Elaboração própria a partir de Boustead e Hancock, 1979.

Com base na revisão da literatura, o inverso da eficiência geral do sistema de fornecimento de energia chama-se Fator de Energia Primária (LOUREIRO et al., 2015), fator de Correção (PEDROSO, 2015) ou Requisitos Energético da Energia (IFIAS, 1978). O cálculo do consumo de energia primária resulta da multiplicação do consumo final de energia pelo respectivo fator.

A conversão de energia pode significar uma perda substancial de energia que depende da fonte primária e da tecnologia disponível para a sua conversão em energia secundária. Se um uso final consome energia produzida a partir de diversas fontes, o cálculo da energia primária deverá ter em conta o mix de processos de conversão, transporte e distribuição de cada fonte. Cabe referir o exemplo do cálculo da energia primária correspondente à eletricidade consumida nos edifícios (tipicamente produzida de forma centralizada e entregue ao edifício pelos sistemas de transmissão) que deverá ter em conta a matriz de fontes primárias para produzir eletricidade do país ou região em questão. Dadas as diferentes formas de produzir eletricidades cada uma com uma eficiência específica, a eficiência média da produção e distribuição de eletricidade em um país depende das quantidades produzidas por cada tecnologia e fonte primária (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

A título exemplificativo, apresenta-se na tabela 15 com base em Turkenburg²² (2012 apud BLOK; NIEUWLAAR, 2017) algumas eficiências de produção de energia a partir de biomassa.

Tabela 15 – Eficiência de algumas tecnologias de conversão de biomassa

Tecnologia	Rota de produção	Eficiência de Conversão (LHV)
Combustão	Conversão de Biomassa sólida em eletricidade	25-40%
	Conversão de biomassa sólida em calor	80-90%
Gasificação	Conversão de biomassa sólida em gás de síntese	~80%
Gasificação e Síntese de Fischer Tropsch	Conversão de biomassa sólida em combustíveis para motores	35-45%
Produção de etanol	Conversão de açúcar de cana em etanol	35-40%
	Conversão de milho, trigo, açúcar de beterraba em etanol	50-55%
	Conversão de biomassa sólida em etanol (via enzimática)	30-50%
Digestão anaeróbia	Conversão de matéria orgânica em biogás.	50-85%

Fonte: Turkenburg (2012 apud BLOK; NIEUWLAAR, 2017).

²² TURKENBURG, W.C (convening lead author): Renewable Energy. In Global Energy Assessment: Towards a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012.

Kotaji, Schuurmans e Edwards (2003) destaca que na impossibilidade de usar dados regionais para determinar a eficiência do sistema energético, uma aproximação é determinar o mix de tecnologias específico da região mas a informação de inventário para cada tecnologia ser nacional ou internacional. Na figura 11 apresenta-se a contribuição das diferentes fontes para a produção de energia elétrica nos diferentes países.

Figura 11 – Participação das diferentes fontes energéticas na produção de energia elétrica em diferentes países

Fonte: Yokoo e Yokoyama, 2016.

Relativamente ao transporte e distribuição de energia, Blok e Nieuwlaar (2017) destaca que representam uma parte importante dos sistemas de energia em especial para sistemas que funcionam em rede, em particular a eletricidade e o gás natural. Quanto à eletricidade, esta é geralmente produzida a baixas voltagens mas precisa ser transformada para altas voltagens para reduzir as perdas de energia na transmissão cuja função é transferir a eletricidade desde os pontos de produção até aos pontos de consumo. No processo de transporte de eletricidade a mesma é perdida nos transformadores e nas linhas de transmissão, sendo que, para sistemas bem concebidos os valores típicos de perdas situam-se em: 1% para transmissão em alta voltagem, 2% para transmissão em média voltagem e 5% para transmissão em baixa voltagem. Em sistemas bem concebidos com elevada densidade as perdas médias situam-se em torno dos 4 -5%, mas em determinadas situações, estes valores podem atingir os 15-20% (BLOK; NIEUWLAAR, 2017). Para além das perdas técnicas no sistema de distribuição, ocorrem perdas também devido a problemas nos equipamentos de

medição, ligações ilegais e outras formas de roubo e não pagamento. Em alguns países as perdas podem significar 20% da eletricidade gerada.

No que respeita ao gás natural, o transporte ocorre a pressão elevada. Para o uso em áreas urbanas, a pressão é reduzida e o gás natural é introduzido na rede de distribuição. Em geral as perdas no transporte e distribuição de gás são baixas exceto para transportes a longa distância (através de continentes) (BLOK; NIEUWLAAR, 2017).

A partir dos valores das eficiências de conversão e perdas no transporte apresentados, conclui-se que a demanda total por energia primária em um edifício pode ser muito superior ao valor quando se considera apenas o consumo direto de energia, em particular na avaliação de fluxos de consumo de eletricidade.

Blok e Nieuwlaar (2017) referem que na análise de um sistema energético para avaliação do consumo de energia primária a partir do consumo de energia final, a fronteira de análise deverá ser definida em função do nível de completude requerido, e define os seguintes níveis de análise:

- Nível 0 – corresponde ao total de energia final consumida;
- Nível 1 – são contabilizadas as entradas de combustíveis juntamente com as de eletricidade tendo em conta as perdas de conversão na geração de eletricidade. De acordo com os autores este é o mínimo de precisão que deverá ser atingido e o seu erro geralmente é inferior a 20%;
- Nível 2- são contabilizadas todas as perdas de conversão e transporte da energia para todos os energéticos. O erro face ao valor total situa-se nos 5%;
- Nível 3 – são incluídas todas as perdas referidas anteriormente mais a energia necessária para construir a infraestrutura onde acontecem os processos de conversão e transporte (ex. energia consumida para construir os navios que transportam crude até às refinarias). A inclusão deste nível baixa o erro para 1-2%. Contudo, os erros relacionados com a alocação e incerteza de dados geram erros superiores, pelo que os autores referem que o nível 3 fornece uma boa aproximação do valor real.

Para estimar o consumo de energia primária no nível 1, Blok e Nieuwlaar (2017) fornecem a seguinte expressão:

$$E_P = E_{iF} + E_{FE}/\eta$$

E_P – energia Primária

E_{iF} – Conteúdo energético dos combustíveis consumidos

E_{FE} – Eletricidade consumida nos usos finais

η – Eficiência de conversão do sistema de produção de eletricidade

O consumo energético dos combustíveis é dados pelo poder calorífico multiplicado pela massa. Blok e Nieuwlaar (2017) definem combustível como uma substância que é predominantemente utilizada como fonte de energia. O conteúdo energético de um combustível é determinado medindo o calor gerado na sua combustão quando os produtos são trazidos para as condições de referência (temperatura de 25°C e pressão de 1atm). Um dos produtos da combustão é a água, que nas condições de referência pode encontrar-se na forma líquida ou gasosa. Esta ambiguidade levou a duas definições de conteúdo energético: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). Ambos representam o calor gerado na combustão completa do combustível mas a diferença entre os dois é que no PCS está incluído o calor de condensação da água que é produto da combustão. O PCS fornece o melhor valor para utilização máxima do combustível já que fornece a totalidade do calor que pode ser gerado pela sua combustão. O racional para uso do PCI é que em muitos casos não é exequível a utilização do calor de condensação do vapor de água que está presente nos gases de combustão de um combustível (BLOK; NIEUWLAAR, 2017).

Já para a estimativa do nível 2, Blok e Nieuwlaar, (2017) fornecem fatores que deverão ser multiplicados aos valores de nível 1 dos combustíveis e que representam os consumos energéticos indiretos médios no fornecimento dos combustíveis (extração e transporte). Apresentam-se na tabela 16 os referidos fatores.

Tabela 16 – Valores de Requisitos energéticos da energia de nível 2 para diferentes combustíveis consumidos nos usos finais

Combustível	REE (MJ energia primária por MJ entregue)	Contribuições de consumo indiretos	Comentários
Carvão	1,04-1,14	1-3% extração 0-10% transporte 1-2% armazenamento	O transporte é baixo se o carvão é utilizado logo perto da mina
Derivados de petróleo	1,12-1,24	1-3% extração 1-5% transporte 2 % armazenamento 5-15% refinarias	Produtos leves como a gasolina tipicamente requerem mais energia no processo de refino que produtos pesados como o óleo combustível
Gás Natural	1,04-1,25	0,7-4% extração 0-20% transporte 2-3% distribuição	Depende principalmente da distância de transporte (valores não válidos para gás natural liquefeito)

Nota – os valores de REE apresentados na coluna dois não resultam da simples adição dos valores na coluna 3 uma vez que certas combinações não existem.

Fonte: Blok e Nieuwlaar (2017)

Ainda relativamente à expressão de Blok e Nieuwlaar (2017) para estimar o consumo de energia primária, algumas considerações podem ser feitas quanto à eficiência de conversão do sistema de produção de eletricidade (η). Uma vez que o sistema de produção de eletricidades dos países é tipicamente constituído por muitas usinas é preciso determinar um valor que o represente. Os autores apontam duas abordagens:

- Abordagem de valor médio na qual é determinada a eficiência de conversão média do sistema de produção de eletricidade a partir do valor total de eletricidade produzida dividido pelo valor total de combustíveis consumidos;
- Abordagem de valor marginal na qual a eficiência é calculada a partir da quantidade adicional de combustível que é consumida para produzir uma quantidade adicional de eletricidade, ou seja o valor depende de qual tipo de usina é acionado para produzir mais eletricidade.

Para estudos de ACV os autores sugerem utilização da abordagem de valor médio.

Pedroso (2015) chama a atenção para a falta de uniformidade de uso de dados de energia primária e energia de uso final na contabilização da EE já que nem todos os autores

referem a utilização de fator de correção de energia de uso final para primária, fato que gera incerteza e variabilidade entre os dados.

A energia primária expressa a real carga de uma edificação no ambiente já que o mesmo consumo final de energia num edifício pode representar impactos ambientais diferentes pela energia primária em função do uso de diferentes fontes de energia e diferentes tecnologias com diferentes eficiências para fornecer a energia consumida nos usos finais (SARTORI e HESTNES, 2007). Para além da contabilização da energia embutida em energia primária, Yokoo e Yokoyama (2016) destaca a importância da distinção entre fontes de energia renováveis e não renováveis na avaliação de sustentabilidade do consumo de energia de um edifício. As fontes são chamadas de Não Renováveis quando a natureza não tem condições de as repor em um horizonte de tempo compatível com o seu consumo pelos seres humanos. Cabem neste grupo as chamadas fontes fósseis (carvão mineral, petróleo, gás natural) e as fontes nucleares (materiais fissíveis como o urânio). As fontes renováveis são aquelas para as quais as condições naturais permitem a sua reposição em um curto horizonte de tempo tais como a energia solar, maremotriz e das correntes marinhas, geotermal, energia potencial hídrica, energia eólica e biomassa (lenha, carvão vegetal, resíduos orgânicos, produtos agrícolas) (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). É preciso cautela relativamente ao conceito de renovável já que a renovabilidade de algumas fontes, como a lenha, depende da velocidade do consumo do recurso face à velocidade com que o mesmo pode ser repostado. O exemplo clássico é a lenha obtida por desmatamento de florestas que o meio não tem condições de repor a uma velocidade compatível com o consumo humano não sendo por isso garantida a sua renovabilidade.

De acordo com Goldemberg e Lucon (2008), o consumo de energia é a principal origem de grande parte dos problemas ambientais, tanto ao nível global como regional e local, entre os quais: poluição do ar, chuvas ácidas, aquecimento global, perda de biodiversidade, desertificação entre outras. Contudo, o impacto das diferentes fontes de energia e suas tecnologias não é igual. Com base nos referidos autores, a queima de combustíveis fósseis para produção de eletricidade e transporte seria o maior foco do problema pela elevada contribuição para a emissão de poluentes: dióxido de carbono (75%), enxofre (85%), chumbo (41%), material particulado (35%), hidrocarbonetos (35%), compostos de nitrogénio (30%), metano (18%), entre outros. Apesar das fontes de energia renovável não serem isentas de impactos ambientais, são vistas como uma alternativa no desafio de minimizar o aquecimento

global. Desta forma, o conhecimento do tipo de energia primária consumida pelos edifícios é um indicador importante na avaliação da sua sustentabilidade ambiental.

2.4. Estratégias de redução de energia embutida

Conforme visto nos itens anteriores deste trabalho, avaliar EE é um processo complexo já que o seu valor depende de um número elevado de fatores relacionados com as diferentes etapas do ciclo de vida das edificações, e as metodologias de cálculo existentes carecem de padronização e aperfeiçoamento no sentido de reduzir variabilidades e incertezas.

Quando avaliada em termos de energia primária, em particular pelo conhecimento do mix de fontes de energia, a energia embutida funciona como indicador de impacto ambiental das diferentes etapas do ciclo de vida das edificações. Apesar dos impactos ambientais decorrentes da produção e consumo de energia justificarem a adoção de medidas para a sua minimização, ao contrário dos impactos operacionais, os impactos embutidos não são regulados na maioria dos países e existem poucos documentos com orientações nesse sentido (YOKOO;YOKOYAMA, 2016).

Com base em Yokoo e Yokoyama (2016) apontam-se algumas estratégias para minimização da energia embutida nas edificações:

- Usar materiais naturais que geralmente apresentam métodos de produção simples e com baixo consumo de energia (ex. madeira²³);
- Usar materiais e componentes reciclados ou reutilizados desde que devidamente avaliado o impacto relativamente à qualidade do material reciclado, a acessibilidade das plantas de reciclagem e à eventual necessidade de estruturas ou processos adicionais pelo uso de componentes recicláveis;
- Usar materiais inovadores tais como compósitos de madeira e concreto de alto desempenho para os quais estudos apresentam resultados com contribuições positivas para a redução da energia embutida;

²³ Uma ressalva deve ser feita para a forma como é feita a contabilização do carbono embutida que altera significativamente os resultados.

- Promover a construção de edifícios com estrutura leve que têm como objetivo reduzir o uso total de recursos (potencial de redução da energia embutida ao nível da estrutura chega a 21%);
- Incentivar a reutilização da estrutura do edifício por oposição à demolição e reconstrução;
- Estudar o impacto da forma do edifício já que resultados de pesquisas mostram que edifícios mais compactos podem reduzir a energia embutida e respectivas emissões;
- Promover uma arquitetura que privilegie a flexibilidade e adaptabilidade do edifício para diferentes usos;
- Projetar edifícios com baixa necessidade de manutenção;
- Projetar edifícios com elevada vida útil do edifício e dos seus componentes - construir tendo em conta a durabilidade dos materiais e o aumento da sua vida útil contribui para a redução da necessidade de extrair novos recursos primários e para uma menor produção de resíduos. Esta medida pode provocar um aumento inicial de energia embutida mas, em geral reduz o valor total de energia embutida no ciclo de vida;
- Reduzir os impactos da etapa de construção através da adoção de medidas de gestão no canteiro de obras.

Às estratégias listadas acrescentam-se:

- Incentivar a escolha de fornecedores próximos ao ponto de consumo no sentido de minimizar o consumo energético com transporte;
- Promover o projeto de edifício que sejam fáceis de desmantelar de forma a facilitar o reuso e reciclagem de materiais no fim da vida útil, em especial em edifício projetados com caráter mais temporário.

Conforme se conclui pelas estratégias apresentadas e tal como destacado por MIC CETEC MG (1982), o projeto de uma edificação é um poderoso instrumento para promover a sustentabilidade da edificação na medida em que nele ficam definidos grande parte dos fatores que terão influência direta e indireta no seu consumo energético tanto operacional como de energia embutida. O impacto de cada estratégia de redução de energia embutida

deverá ser avaliado no ciclo de vida da edificação quer individualmente quer em conjunto com as outras estratégias para apurar impactos correlacionados e dessa forma determinar a conjugação de estratégias que minimizam a energia embutida do edifício (YOKOO; YOKOYAMA, 2016). Os resultados deverão ser considerados tendo em conta que algumas estratégias baseiam-se em estimativas de cenários futuros e como tal têm uma inerente incerteza já que é difícil prever o que vai acontecer em termos de desenvolvimento e surgimento de novas tecnologias.

3. ENERGIA EMBUTIDA NAS EDIFICAÇÕES BRASILEIRAS

O capítulo 3 deste trabalho tem como objetivo fazer um levantamento de dados e indicadores que contribuam para caracterizar o panorama do consumo de energia embutida nas edificações brasileiras. Nesse sentido, no primeiro item é apresentada uma descrição do consumo energético nas edificações de acordo com estatísticas oficiais públicas. Os itens 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam dados relativos a outros setores econômicos com impacto ao nível da energia embutida nos edifícios, tais como dados do setor industrial e de transportes e relativos à matriz energética brasileira. No ponto 3.5 são apresentados os resultados de uma revisão bibliográfica de estudos brasileiros publicados com foco na energia embutida ou nos quais a energia embutida é uma das grandezas quantificadas. Por fim, no item 3.6 são descritas algumas iniciativas no Brasil relacionadas com o tema.

3.1 Consumo de energia pelas Edificações Brasileiras

Conforme definido no capítulo 2 deste trabalho, o consumo energético dos edifícios ao longo do seu ciclo de vida classifica-se de acordo com dois tipos de consumo: energia operacional e energia embutida. O primeiro é um consumo de natureza ocupacional e operacional uma vez que está relacionado com o conforto térmico dos seus ocupantes, iluminação, cocção, aquecimento de água e funcionamento de equipamentos. Já a energia embutida diz respeito aos consumo de energia relacionados com a construção e manutenção da edificação.

Relativamente à EO, apresenta-se uma caracterização com base nos dados publicados no Balanço Energético Nacional (BEN) em particular a participação do setor no consumo de energia primária e de energia elétrica no Brasil, a evolução do consumo nos últimos anos e a matriz de consumo no que respeita a fontes de energia. Quanto à coleta de dados, cabe referir que o consumo operacional da totalidade dos edifícios é resultante do consumo dos setores Residencial, Comercial e Público, onde os gastos energéticos ocorrem majoritariamente como consequência do uso dos edifícios.

No gráfico da figura 12 apresenta-se a composição setorial do consumo final de energia no Brasil em 2016. Observa-se que o setor com maior contribuição para o consumo nacional é o setor industrial com 33,0% seguido do setor dos transportes com 32,4%. Quanto

aos dados dos setores residencial e serviços, o seu consumo teve uma contribuição de 9,7% e 4,9% respectivamente, o que no conjunto resulta numa participação dos edifícios de 14,6% correspondendo ao terceiro setor com maior consumo de energia no país.

Figura 12 – Composição setorial do consumo final de energia no Brasil

Fonte: EPE, 2017

Ao analisarmos a evolução do mesmo indicador, apresentada no gráfico da figura 13, verifica-se que os setores industrial e de transportes são responsáveis pela maior parcela do consumo energético desde o final da década de 1970. Com efeito, os referidos setores apresentaram crescimento quase contínuo durante o período analisado (com exceções pontuais tais como a crise econômica mundial de 2009 que provocou um recuo no setor industrial) o que reflete o contínuo processo de industrialização no Brasil bem como o aumento do número de veículos em circulação. Os valores da Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) para o setor industrial e de transportes no período analisado foram de 3,6% e 4,2% respectivamente.

No que respeita aos setores relativos aos edifícios, observa-se que o consumo do setor residencial apresentou ligeiro decréscimo até aos anos 1990, voltando a crescer nas últimas décadas, o que fica claro pela CAGR entre 2006 e 2016 que registrou um valor de 1,3%. Já no que respeita ao setor de serviços cabe referir que embora a sua participação no consumo nacional seja relativamente baixa, o valor do consumo energético no setor tem crescido a uma CAGR expressiva de 4,5% entre 2006 e 2016.

Figura 13 – Evolução do consumo final de energia no Brasil 1970-2016

Fonte: EPE, 2017

Fazendo a mesma avaliação, agora com base no consumo de eletricidade para o ano de 2015, apresentado na figura 14, verifica-se que o setor industrial continua a ser o maior consumidor com uma participação de 37,6%, seguido do setor residencial com 25,1% e do setor comercial com 17,5%. Quando avaliado o consumo das edificações como um todo a sua participação situa-se em 50,8%, o que significa que os edifícios são o setor com maior contribuição, consumindo aproximadamente metade de toda a eletricidade consumida no Brasil.

Figura 14 – Composição setorial da Consumo de Eletricidade

Fonte: EPE, 2016.

Quanto à evolução do consumo de energia elétrica nos diferentes setores nas últimas décadas, apresentada no gráfico da figura 15, observa-se que de um modo geral todos os

setores apresentaram crescimento no período analisado sempre com maior participação do setor industrial seguido dos setores relativos às edificações (residencial, comercial e público). O setor residencial apresentou uma CAGR de 3,0% na última década (2006-2016) enquanto que no setor comercial este valor ficou em 5,0%. São de registrar alguns pontos de decréscimo, em particular em 2001 devido à crise do “apagão” seguida de racionamento de energia elétrica e nos últimos dois anos devido ao contexto de crise econômica que se faz sentir no Brasil em particular nos setores industrial e comercial.

Figura 15 – Evolução do consumo final de energia elétrica no Brasil 1970-2016

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2017.

Relativamente às fontes de energia consumidas pelos edifícios, conforme apresentado no gráfico da figura 16, cabe referir que as fontes mais consumidas são a eletricidade com uma contribuição de 45,2%, o GLP com 26,2% e a lenha 25,4%. As fontes destacadas revelam o perfil de usos finais do setor já que a eletricidade corresponde ao consumo de equipamentos (eletrodomésticos e ar condicionado) e aquecimento de água²⁴, e o GLP e a lenha são consumidos para cocção.

²⁴ O Brasil é um país com elevada penetração do chuveiro elétrico como equipamento para aquecimento de água.

Figura 16 – Fontes de energia no setor residencial

Fonte: EPE, 2016.

O cenário para o setor comercial e público apresentado no gráfico da figura 17 revela a predominância da eletricidade como fonte de energia (91,8%) em razão dos usos finais do setor, dominados pelo condicionamento ambiental e equipamentos elétricos.

Figura 17 – Fontes de energia no setor comercial e público

Fonte: EPE, 2016.

Quanto à renovabilidade das matrizes de consumo dos edifícios no Brasil, considerando uma participação de 75,5% de fontes de energia renováveis na matriz de energia elétrica, o setor residencial registra uma participação de fontes renováveis de 61,4% enquanto que no setor comercial e público esta participação é de 70,7% (EPE, 2016).

Relativamente ao consumo de EE, a coleta de dados é extremamente complexa uma vez que resulta da consolidação de informações de diversos setores, nomeadamente: do setor da construção civil em particular dos setores industriais relacionados com a produção de

materiais de construção (como o cimento e o aço); de uma parcela do setor dos transportes associada com o deslocamento de materiais de construção e matérias primas; e parte do consumo de energia do setor energético que corresponde ao processo de produção, conversão e fornecimento da energia consumida nos edifícios.

Para além dos indicadores que podem ser obtidos a partir da caracterização do consumo de energia em outros setores económicos, outros dados relativos ao setor de edifícios e à indústria da construção civil podem ser referidos como contribuições para a descrição do cenário nacional quanto à EE em edificações, em particular o déficit habitacional e as necessidades de novas moradias e o desperdício no setor da construção civil.

Atendendo à definição de EE já apresentada, podemos relacionar o consumo de energia incorporada com necessidades de infraestrutura na medida em que novas construções irão necessariamente implicar em consumos de EE. Neste sentido, as previsões de construção de moradias associadas aos Programas Habitacionais no Brasil, constituem previsões de consumo de energia embutida.

A Fundação João Pinheiro, em parceria com Ministério das Cidades, Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), realiza regularmente um estudo sobre o setor habitacional no país e a evolução de seus indicadores, considerando a falta ou inadequação do estoque urbano de moradias no Brasil, para unidades da Federação e regiões metropolitanas selecionadas. No estudo são sistematizadas as informações relativamente ao déficit habitacional e à inadequação dos domicílios. De acordo com Fundação João Pinheiro (2016), o conceito de déficit habitacional indica a necessidade de construção de novas moradias em dado momento, incluindo quer a necessidade de incremento de estoque de moradias quer a necessidade de reposição de estoque. Quanto à inadequação de domicílios, por sua vez, o seu conceito está relacionado com as especificidades dos domicílios que prejudicam a qualidade de vida de seus moradores em particular a carência de infraestrutura, adensamento excessivo de moradores em domicílios próprios, problemas de natureza fundiária, cobertura inadequada, ausência de unidade sanitária domiciliar exclusiva ou em alto grau de depreciação.

De acordo com o estudo da Fundação João Pinheiro (2016), em 2014 o déficit habitacional no país perfazia um total de 6,068 milhões de unidades, com destaque para a região sudeste que concentra 40,0% deste valor. Ainda de acordo com a referida fonte, no biênio 2013-2014, Mato Grosso do Sul, onde se localiza o estudo de caso da presente pesquisa, apresentava um déficit habitacional relativo de 8% abaixo da média nacional que se

situava nos 9%. A distribuição em termos de renda familiar do déficit habitacional revelou que para Mato grosso do Sul, 76,7% do valor corresponde a famílias com até 3 salários mínimos de renda mensal, 16,4% é relativo a famílias entre 6 e 10 salários mínimos, 5% é de famílias entre 6 e 10 salários mínimos e 1,9% é para famílias do último escalão acima de 10 salários mínimos.

FGV Projetos (2014) estima que, atendendo ao déficit habitacional no Brasil e ao crescimento populacional, até 2024 o país terá o desafio de proporcionar habitações adequadas para mais de 20 milhões de famílias das quais 10 milhões com renda familiar entre um e três salários mínimos. Se os programas habitacionais, como o programa “Minha Casa Minha Vida”, atenderem pelo menos 51% dessas famílias, será preciso construir 11,2 milhões de habitações sociais ou 1,1 milhão por ano até 2024.

Um outro tema impactante na energia embutida nas edificações pela sua consequência ao nível do aumento da quantidade de materiais de construção consumidos, é a geração de resíduos e desperdício da indústria da construção civil. Relativamente a este tema, destaca-se o estudo “*Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obra*” descrito em Agopyan et al. (2003), no qual foi aplicada uma metodologia para a medição das perdas de materiais, em cerca de 100 canteiros de obra em 12 estados brasileiros. Com base nos resultado do estudo, Silva et al. (2015) compilou os valores de perdas por tipo de material de acordo com os valores medianos, apresentados na tabela 17. Observa-se que os valores de perdas variam de material para material mas são, em geral, significativos e não desprezáveis.

Tabela 17 – Perdas nos materiais de construção

Materiais	Perdas (%)
Areia	44
Cimento	56
Cal	36
Concreto	9
Tijolos e Blocos	13
Aço	11
Eletrodutos	15
Condutores	27
Tubos de PVC	15
Revestimento Cerâmico	14
Gesso	30
Brita	38

Fonte: Elaborado por Silva et al. (2015) com base em Agopyan et al. (2003).

3.2 Consumo de energia nos setores ligados à construção civil

Atendendo às considerações feitas no ponto 2.2.1 do presente trabalho, a EE nos materiais de construção depende por um lado das quantidades de material consumidas e por outro do coeficiente de energia embutida, cujo valor está diretamente relacionado com o processo produtivo. Dessa forma, o impacto do setor industrial na energia embutida das edificações dá-se pelo consumo de energia na produção dos materiais de construção, em particular através da tecnologia empregue no processo produtivo, da eficiência do processo e das fontes de energia consumidas.

O setor industrial como um todo foi responsável pela maior parcela de consumo de energia no Brasil em 2016 com uma participação de 33,0% e um valor absoluto de consumo de 84,2 Mtep (EPE, 2017). No que respeita à participação dos diferentes setores no consumo energético industrial, de acordo com os dados do BEN apresentados no gráfico da figura 18, observa-se que seis dos dez setores com maior participação para contribuição para o consumo da indústria estão relacionados com a produção de materiais de construção, nomeadamente: cimento, ferro gusa e aço, mineração e pelletização, não ferrosos e outros metalúrgicos, químico, e cerâmico. A participação deste seis setores em conjunto (identificados no referido gráfico com cor laranja) representou 49,1% do consumo de energia consumida na indústria em 2015.

Figura 18 – Setores com maior participação no consumo de energia do setor industrial

Fonte: Elaborado a partir de EPE (2016).

Para além de contribuírem com uma parcela muito significativa do consumo de energia na indústria, os setores responsáveis pela produção de materiais de construção têm um

impacto ambiental elevado pelo consumo de fontes de energia não renováveis no seu processo produtivo. No gráfico da figura 19 apresenta-se, com base em EPE (2016), a participação das fontes não renováveis no Brasil, no setor industrial e nos dez setores industriais mais consumidores de energia em 2015. Verifica-se que apesar do setor industrial como um todo apresentar uma participação de fontes fósseis inferior à matriz energética do Brasil – 50,5% contra 58,3%, dos seis setores industriais mais consumidores de energia relacionados com a construção civil (identificados com a cor laranja), cinco apresentam uma participação de fontes de energia não renováveis acima do valor do setor, nomeadamente: cimento (83,6%), Ferro Gusa e Aço (75,8%), mineração e pelletização (75,3%), Não ferrosos e outros metalúrgicos (68,9%) e Químico (76,7%).

Figura 19 - Participação de fontes não renováveis no consumo energético do setor industrial

Nota - considerou-se uma participação de fontes não renováveis na eletricidade consumida pela indústria de 75,5% correspondente à participação deste tipo de fontes na matriz de energia elétrica brasileira para o ano em causa.

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2016.

Ainda relativamente à indústria de produção de materiais de construção no Brasil, Sombrio (2015) destaca a grande informalidade como um problema frequente pois empresas informais, além de sonegarem impostos, não se submetem às legislações ambientais e trabalhistas, nem às normas técnicas nacionais e internacionais.

3.3 Consumo de energia no transporte de cargas

Conforme visto no ponto 3.1, o setor de transportes foi responsável por 32,4% da energia primária consumida no Brasil em 2016, logo atrás do setor industrial com uma contribuição de 33%, com um valor de consumo em termos absolutos de 82,7 Mtep (EPE, 2017). De acordo com EPE (2012), em 2010, o transporte de cargas contribuiu com 41,6% deste consumo, o que corresponde a cerca de 13,5% do consumo de energia primária nacional.

A elevada contribuição do transporte de cargas no consumo energético do país está relacionada com os meios de transporte utilizados. O transporte de cargas no Brasil vem crescendo 4,6% ao ano desde a década de 1960, atingindo um valor de 1115,2 bilhões de tkm em 2010 (EPE, 2012). Por observação do gráfico da figura 20 onde se apresenta a participação dos diferentes modais no transporte de cargas no Brasil avaliado em tkm (tonelada-quilômetro), percebe-se a predominância do transporte rodoviário responsável por 52% de toda a carga transportada no país em 2011 valor que sobe para 68% quando retirada participação do minério de ferro que acontece por transporte ferroviário (MT 2012).

Figura 20 – Distribuição modal da matriz de transporte de cargas em 2011 (com e sem minério de ferro)

Fonte: MT, 2012.

Conforme visto na revisão da literatura do capítulo 2.2.2, o transporte rodoviário é um meio de transporte com baixa eficiência no uso da energia e as fontes energéticas consumidas são quase na totalidade de origem fóssil resultando num elevado consumo energético com

elevado impacto ambiental. Com efeito, o transporte rodoviário de cargas é responsável por 81,3% do óleo diesel consumido no setor de transportes e por 64,2% de todo o óleo diesel consumido no país (EPE, 2012; EPE, 2016).

De acordo com MT (2012) o investimento na infraestrutura rodoviária teve início com a crise de 1929 e com a Segunda Guerra Mundial que marcaram a crescente industrialização do Brasil em paralelo com o fortalecimento do mercado interno que trouxe a necessidade de construir estradas para distribuir os produtos fabricados na região Sudeste, principalmente em São Paulo. Mas foi a expansão da indústria automobilística a partir da segunda metade da década de 1950 que consolidou o transporte rodoviário no Brasil. Ainda com base em MT (2012) entre 1940 e 1970 a rede rodoviária foi expandida de 185 mil quilômetros para 1,5 milhões de quilômetros (incluindo vias pavimentadas e não pavimentadas). Cabe destacar que durante esse período, a rede ferroviária foi reduzida de 38 mil para 30 mil quilômetros, sendo que menos de 10% dessa rede estava eletrificada, cenário que se mantém até aos dias de hoje. Mais recentemente, a malha rodoviária pavimentada continuou sendo incrementada, e aumentou 43% entre 1996 e 2011.

Para além dos dados relacionados com a infraestrutura, também a evolução do número de veículos constitui um bom indicador do domínio do transporte rodoviário no país. Atendendo a MMA (2011), as estimativas da frota brasileira de veículos rodoviários mostram um crescimento constante desde 1980, atingindo um volume entre 35 e 40 milhões de veículos. Relativamente ao transporte de cargas, apresenta-se o gráfico da figura 21 com a evolução da frota estimada de veículos pesados por categoria entre 1980 e 2008 onde se observa a predominância dos veículos para transporte de cargas (caminhões leves, médio e pesados) quando comparados com o número de ônibus. Ainda no mesmo gráfico, vale destacar o aumento da participação dos caminhões pesados a partir do final da década de 1980 que apresentaram uma expansão constante especialmente entre 2008 e 2012, em contraponto, a um menor crescimento da frota de caminhões médios nos últimos anos. Em 2009 os veículos de transporte de carga representavam 81,0% do número de veículos pesados (32% caminhões pesados, 16% caminhões médios e 33% caminhões leves).

Figura 21 – Evolução da frota estimada de veículos pesados por categoria

Fonte: MMA, 2011.

MT (2012) destaca as taxas de crescimento da frota de veículo entre 2007 e 2011, apresentadas no gráfico da figura 22 em particular dos caminhões cujo crescimento no período foi de 34,4% equivalente a taxas médias de crescimento anuais de 7,0%. Esses altos índices de crescimento dão a dimensão do tamanho do fenômeno nacional de motorização.

Figura 22 - Taxa de crescimento da frota de veículos em circulação

Fonte: MT, 2012.

O crescimento do número de veículo pesados tem sido acompanhado por um expressivo aumento no consumo de Diesel pelo setor de transportes, conforme ilustrado no gráfico da figura 23. Observa-se que a participação de caminhões pesados no consumo de diesel do transporte rodoviário mais que triplicou entre os anos 1980 e 2007.

Figura 23 – Evolução do consumo nacional de diesel no transporte rodoviário por categoria de veículos

Fonte: MMA, 2011.

Ainda no que respeita à participação do modal rodoviário no transporte de cargas, EPE (2012) observa que o Brasil possui forte dependência deste modal se comparado a outros países também com grandes dimensões territoriais. Na tabela 18 apresenta-se a comparação da participação relativa para cada modal que demonstra o relativo desequilíbrio da matriz brasileira de transportes de cargas, quando comparada a de outros países de grandes dimensões territoriais (como Rússia, Estados Unidos e Canadá).

Tabela 18 – Participação relativa de cada modal no sistema de transportes de diferentes países

Países	Rodovia (%)	Ferrovia (%)	Hidrovia (%)
Rússia	8	81	11
EUA	32	43	25
Canadá	43	46	11
Áustria	49	45	6
Austrália	53	43	4
México	55	11	34
Brasil	58	25	17
Alemanha	71	15	14
França	81	17	2

Fonte: EPE, 2012.

Um último tema que cabe destacar relativamente à eficiência do transporte rodoviário no transporte de cargas é a ocupação dos caminhões nas suas viagens. De acordo com um estudo efetuado por CNT (2015) sobre a eficiência energética no transporte rodoviário de cargas no Brasil, 82,5% das empresas entrevistadas afirmam que em algum momento os seus veículos circulam sem carga, sendo que 16% apontam para 30% das distância percorrida sem carga e 19,2% apontam para 50% da distância do mês sem carga. No seu trabalho de pesquisa sobre o consumo de combustível no transporte de carga no Brasil, Novo (2016) estima um fator de ocupação de 38% que significa que os caminhões percorrem os seus trajeto com apenas 38% da sua capacidade utilizada.

Para terminar este ponto sobre consumo de energia no transporte de cargas, cabe realçar que o Brasil é um país de dimensões continentais, e como tal, em função da localização do ponto de produção e do ponto de consumo, algumas mercadorias percorrem grandes distâncias. Desta forma, no cenário logístico nacional, conjugam-se grandes distâncias com a predominância de um modal de transporte de elevada intensidade energética.

3.4 Matriz Energética Brasileira

No ponto 3.1 deste trabalho, apresentou-se a contribuição de cada setor para o consumo de energia no Brasil. Conforme visto na revisão da literatura, o impacto ambiental da energia está diretamente relacionado com as fontes de energia consumidas, pelo que se considera relevante caracterizar também o consumo de energia no Brasil em termos de fontes energéticas consumidas. Na figura 24 apresenta-se um gráfico com a contribuição de cada fonte energética para a Oferta Interna de Energia em 2016. Observa-se que a fonte de energia mais consumida é o petróleo e seus derivados (36,5%), consumo fortemente relacionado com o setor dos transporte, seguida da biomassa de cana (17,5%) consumida na indústria e na produção de energia elétrica, e da energia hidráulica (12,6%) consumida na produção de energia elétrica. Atendendo ao perfil apresentado, cabe destacar a elevada participação de fontes de energia renováveis que em 2016 totalizou 43,5% valor muito acima da média mundial que se situa em 13,4% segundo dados de 2014 (EPE, 2017).

Figura 24 – Oferta Interna de Energia por fonte no Brasil em 2016

Fonte: EPE, 2017

O valor da Oferta Interna de Energia em 2016 foi de 288,3 Mtep e do consumo final foi de 255,4 Mtep (EPE, 2017). A diferença entre os dois valores corresponde a perdas nas quais se inclui as perdas na transformação (23,9 Mtep) (EPE, 2017).

Relativamente à energia elétrica cabe referir que o seu consumo correspondeu a 17,5% do consumo final no Brasil em 2016 (EPE, 2017). No gráfico da figura 25 apresenta-se a Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte, da qual se destaca a elevada participação das energia hidráulica com um valor de 68,1%. Mais uma vez cabe destacar a elevada participação das energias renováveis que na produção de energia elétrica representaram 81,7% em 2016, mais uma vez um valor muito acima da média mundial que em 2014 ficou em 21,2% (EPE, 2017).

Figura 25 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte no Brasil em 2016

Fonte: EPE, 2017.

Ainda no que respeita à produção e consumo de energia elétrica cabe referir que a Oferta Interna de Energia Elétrica foi de 619,7 TWh e que o consumo final de eletricidade foi de 520,0 TWh sendo que a diferença (99,7 TWh ou 16,1%) corresponde a perdas comerciais e técnicas em grande parte relacionadas com a transmissão (EPE, 2017).

3.5 Estudos brasileiros de energia embutida

No presente ponto apresenta-se uma revisão bibliográfica de estudos sobre energia embutida no Brasil. O levantamento efetuado não pretende esgotar os trabalhos publicados no país sobre o tema mas sim contribuir para a descrição e compreensão do cenário brasileiro no que respeita ao tema. A pesquisa bibliográfica foi realizada entre Abril de Agosto de 2017.

Os trabalhos analisados incluem dissertações de Mestrado, teses de Doutorado e artigos publicados em revistas e anais de congressos obtidos a partir das seguintes bases de dados:

- Scielo – A Scientific Electronic Library Online é uma biblioteca eletrônica que abrange uma coleção selecionada de periódicos científicos brasileiros e cujo objetivo é contribuir para o desenvolvimento da pesquisa científica por meio do aperfeiçoamento e da ampliação dos meios, infraestruturas e capacidades de comunicação e avaliação dos seus resultados veiculados por periódicos de

qualidade crescente do Brasil publicados em acesso aberto. Trata-se do resultado de um projeto de pesquisa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) em parceria com o Centro Latino-Americano e do Caribe de Informação em Ciências da Saúde - BIREME e com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);

- InfoHAB – Sigla para o Centro de Referência e Informação em Habitação. Trata-se de um projeto liderado pela Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) e financiado por recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), do Programa RHAE-CNPq e da Caixa Econômica Federal. Entre os seus objetivos destacam-se a contribuição para a difusão das informações tecnológicas, proporcionando a integração entre a área acadêmica e os setores técnicos e produtivos da Construção Civil, e a manutenção de uma fonte atualizada de informações para os atuantes em setores ligados ao processo produtivo das construções e ao seu desenvolvimento tecnológico;
- Banco de Teses e Dissertações da CAPES;
- Banco de Dados do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT).

Como palavras chave para a pesquisa foram considerados os termos: Energia Incorporada; Energia Embutida; ACVE e ACV.

Conforme visto na revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, o cálculo da energia embutida pode ser feito com base em um conjunto de metodologias e o seu valor depende de inúmeros fatores. Na revisão bibliográfica efetuada procurou-se sistematizar as principais características metodológicas, fontes de dados e resultados dos trabalhos realizados no Brasil. No total foram analisados 40 estudos dos quais 9 com foco em materiais (22,5%), 20 com foco em sistemas construtivos (50,0%) e 11 com foco no edifício como um todo (27,5%). Dos 40 estudos analisados que incluem avaliação de consumo de energia embutida no ambiente construído, apenas 32 apresentam detalhe para os valores de consumo energético. Nos restantes trabalhos, apresentados na tabela 19, a energia é um dos fluxos analisados e o foco é o impacto ambiental pelo que nem sempre são publicados valores quanto ao consumo de energia apesar de ele estar contemplado no estudo.

Tabela 19 – Estudos brasileiros que avaliam energia embutida mas não apresentam valores

Estudo	Objetivo
Santos e Pereira, 2008	Comparação por meio de ACV do impacto ambiental provocado por dois sistemas de fachada utilizados em edifícios comerciais com foco no consumo de energia até à etapa de construção: Alvenaria cerâmica e vidro com estrutura de alumínio
Sansão, 2011	Análise Ambiental de envoltórias para HIS composta por painéis de blocos de concreto ou cerâmicos com desempenhos térmicos similares Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais
Macedo, 2011	Propor uma metodologia de avaliação ambiental de sistemas construtivos utilizando o SimaPro: estudo de caso sobre sistema estrutural em aço Dissertação e Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais
Campos, 2012	Realização de ACV para comparar vedações estruturais do tipo painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais
Cunha, 2012	Realização de ACVE para quantificação de CO ₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes sistemas de vedação: alvenaria e, blocos cerâmicos, alvenaria de blocos de solo cimento, alvenaria de blocos de concreto Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Rio Grande do Sul
Condeixa, 2013	Realização de ACV para comparar sistemas de vedação do tipo drywall e alvenaria de tijolo cerâmico Dissertação e Mestrado – Universidade Federal Fluminense
Sombrio, 2015	Aplicar a metodologia ILCD em sistemas de vedação vertical utilizados no Distrito Federal para construção de HIS: painel pré-moldado de blocos cerâmicos e concreto armado Dissertação de Mestrado da Universidade de Brasília
Trajano, 2010	Realizar uma ACV da produção de blocos de concreto para aplicação em HIS com a finalidade de avaliar os tipos de emissão poluente Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco

Fonte: Elaboração própria.

Relativamente às questões de metodologia, apresentam-se de seguida três tabelas com os 32 trabalhos divididos de acordo com o foco da pesquisa: materiais (tabela 20), sistemas construtivos (tabela 21) ou edifício como um todo (tabela 22). Para os trabalhos com foco nos materiais de construção e em sistemas construtivos apresenta-se detalhe para os seguintes itens: objetivo, metodologia, fronteira, unidade funcional, local, resultados em energia primária (ou não) e resultados da pesquisa. Já para os trabalhos que focam os edifícios na sua totalidade acrescentam-se aos itens anteriores informação sobre o tipo de edifício e vida útil considerada.

Em primeiro lugar no que respeita aos trabalhos com foco em materiais, cabe referir que a indústria mais visada é a indústria de materiais cerâmicos. Quanto à fronteira de análise 2 trabalhos incluíram todo o ciclo de vida do material (“berço ao túmulo”) enquanto os outros

6 focaram apenas a fase de produção. As unidades funcionais registradas incluem 1 kg, 1 peça, 1 pallet com 60 telhas, 1 m² piso, 1 m² fachada, 0,19 m³ brita e 1 m² de área construída. O caso das telhas revela a perspectiva da indústria, e os casos em que a unidade funcional é uma unidade de piso ou de fechada o foco é na função do material. Apenas no estudo de Oliveira, L.S (2015) fica claro que o resultado final corresponde a energia primária. Considera-se ainda interessante destacar o estudo de Oliveira, L.S (2015) na medida em que se baseou numa amostra de 33 fábricas cobrindo cerca de 50% do mercado nacional o que sugere uma boa representatividade do setor. Para além disso os resultados são apresentados através de uma faixa de valores o que fornece indicação das diferenças tecnológicas e de eficiência entre as empresas produtoras de blocos de concreto.

Em segundo lugar, quanto aos trabalhos com foco em sistemas construtivos, cabe destacar que o sistema de vedação é o mais visado sendo avaliado em 17 dos 20 trabalhos analisados. Os sistemas de vedação mais avaliados são Steel Frame, alvenaria de blocos de concreto e alvenaria de blocos cerâmicos. Observa-se que em 5 estudos analisados procura-se relacionar a energia embutida nas vedações com o desempenho térmico do edifício. Com base nos estudos apresentados na tabela 19, observa-se que a fronteira de análise considerada com mais frequência é a fase de pré-uso (54 % dos trabalhos) que corresponde à produção do sistema construtivo, sendo que apenas dois trabalhos consideraram todo o ciclo de vida do produto. As unidades funcionais dos estudos analisados foram 1 m² de área construída, 1 m² de fachada, 1 m² de cobertura, 1 m² de projeção de cobertura e 1 peça.

Relativamente à avaliação de sistemas construtivos, Santos e Pereira (2008) enfatizam que os resultados de comparações de sistemas de vedação deverão ser considerados com cautela na medida que apenas uma avaliação considerando todo o ciclo de vida e toda a edificação poderá indicar qual o sistema menos impactante no perfil ambiental do edifício. Os autores dão como exemplo o impacto que cada sistema de vedação tem ao nível das necessidades do sistema estrutural e o impacto em termos de consumo de energia operacional. No seu estudo, os resultados mostram que o impacto da vedação de alvenaria na E_{Ei} é significativamente menor do que a vedação em vidro com estrutura de alumínio, impacto que chega a ser 5 vezes menor no caso do consumo de energia. Contudo, o sistema em alvenaria pode implicar em um sistema estrutural com propriedades diferentes do sistema de vidro que é mais leve e o edifício com sistema de vidro pode implicar num consumo operacional menor para iluminação e maior para condicionamento artificial comparando as propriedades físicas do vidro em comparação com o tijolo cerâmico.

Tabela 20 – Estudos brasileiros de EE com foco em Materiais de Construção

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Primária	Resultados
Manfredini, 2003	Um dos objetivos é estimar a EE na indústria cerâmica vermelha em RS Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Rio Grande do Sul					
	ACV	Berço ao Portão	1 kg			2,82 MJ/kg
Pereira, 2004	Avaliação ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina					
	ACV	Fabricação	1 m ² de piso cerâmico	SC		Empresa A – 191,0 MJ Empresa B – 123,7 MJ
Taborianski, Simoni e Prado, 2008	Discutir a elaboração de inventário de consumo de energia dos principais materiais utilizados em edificações no Brasil e levantamento de dados de consumo de matérias primas e energia de materiais de construção utilizados em fachadas de escritório					
	ACVE	Fabricação dos materiais	1 m ² fachada			
Alves, Melchiades e Boschi, 2007	Levantamento inicial de aspectos energéticos relacionados com a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos					
		Fabricação	1 kg			Resultados resultantes do valor médio para o consumo térmico dos fabricantes para via úmida ou via seca mais o valor elétrico Via seca – 631,41 kcal/kg Via úmida – 1063,60 kcal/kg
Morais e Sposto, 2010	Avaliar o desempenho ambiental de revestimento cerâmico e de pedra (granito) com foco na energia incorporada					
	ACVE	Fabricação dos materiais e transporte ate obra	1 kg			Valores sem transporte Granito para revestimento –0,78-1,27 MJ/kg Revestimento cerâmico via seca – 2,43-2,67 MJ/kg Revestimento Cerâmico via úmida – 3,87-5,12 MJ/kg

Continua

Conclusão

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Primária	Resultados
Rossi, 2013	Avaliar o Desempenho ambiental por meio de indicadores quantitativos do ciclo de vida da brita na produção de concretos Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos					
	ACV	Berço ao túmulo	0,19 m³ de brita			9,04 MJ/0,19 m³ de brita
Marques, 2014	Levantar aspectos ambientais de ciclo de vida de telhas de fibrocimento (com amianto e com polipropileno) Dissertação Mestrado - Unisinos					
	ACV	Berço ao túmulo	1 Pallet com 60 telhas			542,1 kWh/60 telhas com amianto 13172 kWh/60 telhas com polipropileno
Oliveira, L.S.,2015	Estimar faixas de consumo de matérias primas, água, energia, emissões e resíduos na produção de blocos de concreto considerando os usos mais significativos no mercado brasileiro (estruturais, vedação e pavimento) Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo					
	ACV Simplificada	Produção de Materiais e transporte de insumos	1m² bloco concreto (pavimento) 1 peça (blocos estruturais e vedação)		Sim	Intervalor de valores de EE Blocos Pavimento Retangular - 6 cm 40,7 - 120,2 MJ/m Blocos Pavimento Retangular - 8 cm 53,4-158,4 MJ/m² Blocos Pavimento Retangular - 10 cm 65,8-161,8 MJ/m² Bloco Pavimento 16 faces - 6 cm 40,7-103,1 MJ/m² Bloco Pavimento 16 faces - 8 cm 52,9-156,3 MJ/m² Bloco Pavimento 16 faces - 10 cm 63,9-177,7 MJ/m² Bloco Estrutural (14x19x39) - 4 MPa 2,4-9,3 MJ/bloco Bloco Estrutural (14x19x39) - 6 MPa 2,4-9,6 MJ/bloco Bloco Estrutural (14x19x39) - 8 MPa 2,8-10 MJ/bloco Bloco Estrutural (14x19x39) - 10 MPa 2,8-10,7 MJ/bloco Bloco Estrutural (14x19x39) - 12 MPa 3,4-12,5 MJ/bloco Bloco de Vedação (espx14x39) - 14 cm 1,9-6,8 MJ/bloco Bloco de Vedação (espx14x39) - 9 cm 1,5-6,0 MJ/bloco

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 21 – Estudos brasileiros de EE com foco em sistemas construtivos

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Prim	Resultados
Sperb, 2000	Comparar 5 tipologias habitacionais presentes na Vila Tecnológica na cidade de Porto Alegre em termos de impactos ambientais relacionados com o ciclo de vida de materiais de construção selecionados Dissertação Mestrado – Universidade Federal Rio Grande do Sul					
		Pré-Uso	1 m ² área construída 1m ² parede 1 m ² de projeção de cobertura	Porto Alegre (RS)		EE _T variou entre 0,779 e 1,869 GJ/m ² com peso do transporte entre 1,19%-19,33% EE _T paredes variou entre 0,251 e 0,504 GJ/m ² parede EE _T para cobertura variou entre 0,124 e 0,362 GJ/m ² de projeção de cobertura
Nabut Neto (2011)	Avaliar EE e emissões de CO ₂ como critérios de sustentabilidade na comparação entre um modelo de fachada em Steel frame e um modelo de fachada convencional (blocos cerâmicos com argamassa de revestimento e placas cerâmicas) Dissertação Mestrado Universidade de Brasília					
		Pré-Uso	1 m ² fachada	Brasília		EEi fachada em Steel Frame – 1,104 GJ/m ² EEi fachada convencional – 0,9 GJ/m ²
Graf, 2011	Investigar a existência de um ponto ótimo entre transmitância térmica e energia incorporada da envoltória em edificações residenciais usualmente construídas no Brasil (Dissertação Mestrado - Universidade Federal do Paraná)					
	ACVE	Pré-Uso	1m ² área construída	Curitiba		3,1 GJ/m ² de área de piso
Carminatti Junior, 2012	Quantificar a energia embutida por unidade de área construída dos materiais e componentes em uma HIS, comparação de sistemas de vedação: Light Steel Frame, alvenaria estrutural de blocos de concreto alvenaria estrutural de blocos cerâmicos Dissertação Mestrado – Universidade Federal de São Carlos					
	ACVE	Fabricação materiais e transporte até à obra	1 m ² de área construída			Light Steel Frame 3,9 GJ/m ² Alvenaria de blocos de concreto 6,6 GJ/m ² Alvenaria de blocos cerâmicos 3,0 GJ/m ² Peso do transporte 0,7%-2,5%

Continua

Continuação

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Prim	Resultados
Kalbusch e Ghisi, 2012	Comprar o consumo energético de ciclo de vida de dois modelos de torneira convencional e com fechamento hidromecânico					
	ACVE	Berço ao túmulo	1 peça			Resultados para fronteira Berço ao portão: Torneira Convencional – 48,05 MJ/peça Torneira Economizadora – 49,74 MJ/peça
Palácio, 2013	Determinar e comparar a Energia Embutida de vedações para HIS considerando o cumprimento do desempenho térmico de acordo com a norma ABNT NBR 15575: Light Steel Frame (LSF) e Blocos Cerâmicos estruturais Dissertação Mestrado – Universidade de Brasília					
	ACVE	Pré-Uso	1 m ² vedação	Luziânia (GO)		LSF + Placa gesso e EPS 824,28 MJ/m ² LSF + Placa gesso e Lã Mineral 821,19 MJ/m ² LSF + Placa Cimentícia e EPS 865,98 MJ/m ² LSF + Placa Cimentícia e Lã mineral 862,9 MJ/m ² LSF + Placa Cimentícia 855,00 MJ/m ² Blocos cerâmicos Estruturais 577,48 MJ/m ²
Maciel, 2013	Comparação do consumo de EE e desempenho térmico de 3 tipologias de fachada ventilada Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília					
		Pré Uso e Uso	1 m ² fachada	Brasília	Sim	EE _i e EE _R Fachada Ventilada Placas Pétras 560,73 MJ/m ² EE _i e EE _R Fachada Ventilada Porcelanato 878,65 MJ/m ² EE _i e EE _R Fachada Ventilada de Alumínio Composto 905,44 MJ/m ²
Herrera, 2013	Correlacionar as variáveis de ciclo de vida energético da edificação: energia incorporada da envoltória e consumo energético pelo comportamento térmico Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo – São Carlos					
	ACVE	Fabricação dos materiais e fase de Uso	1m ² área construída	São Carlos e Belém do Pará		Cenário (GJ/m ²) Parede Blocos Cerâmico e Telhado Cerâmico Parede Blocos de concreto e Telhado Cerâmico Parede Blocos Cerâmicos e Telhado de Fibrocimento Parede Blocos de concreto e telhado de Fibrocimento
						EE _i EE _R EE _T 2,80 2,38 5,18 2,77 2,38 5,15 2,48 1,80 4,28 2,48 1,76 4,24

Continuação

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Prim	Resultados
Tavares et al., 2014	Comparar sistemas de telhados tradicionais comuns no Brasil com sistemas de telhado verde no que respeita à emissão de CO ₂ e energia embutida					
		Fabricação de materiais com transporte de matérias primas	1 m ² de cobertura			Sistema de Cobertura MJ/m ²
						laje pré-moldada com telhado em telha cerâmica 1,41
						laje pré-moldada sombreada com argila expandida 2,35
						telhado com estrutura em madeira, cobertura em telha cerâmica e forro em madeira 0,49
						telhado verde com sistema hexa 1,40
						telhado verde com sistema modular 1,33
						telhado verde com sistema vernacular 1,27
						telhado verde com sistema vernacular sobre laje pré-moldada 2,39
Monteiro, 2015	Comparar a energia incorporada de dois sistemas de fechamento vertical tendo em conta o atendimento aos requisitos de desempenho térmico: painéis de aço isotérmico e blocos cerâmicos revestidos com argamassa					
	Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília					
	ACVE baseada em Tavares (2006)	Fabricação Materiais mais fase de uso	1 m ² (fachada? área construída)			EEi painéis de aço isotérmico – 22,1 GJ/m ² EEi Blocos Cerâmicos 8,36 GJ/m ²
Pedroso, 2015	Estudar a EE de sistemas de vedação interna e externa em HIS em cumprimento com o desempenho térmico e vida útil das normas ABNT NBR 15575 e ABNT 15220					
	Tese Doutorado – Universidade de Brasília					
	ACVE	Berço ao túmulo	1m ² área construída	São Sebastião (DF)		Vedação em concreto moldado no local 1,60 GJ/m ²
						Vedação em Steel Frame 3,90 GJ/m ²
						Vedação em alvenaria estrutural de blocos de concreto 1,21 GJ/m ²
						Vedação em alvenaria convencional de blocos cerâmicos 2,02 GJ/m ²

Continua

Conclusão

Estudo	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Local	Energia Prim	Resultados				
Pedroso e Sposto (2015)	Levantar a energia incorporada durante a fase de desconstrução para um projeto padrão considerando diferentes sistemas de vedação									
		Desconstrução	1m ² área construída		Sim	Vedação em concreto moldado no local		0,0043 GJ/m ²		
						Vedação em Steel Frame		0,0029 GJ/m ²		
						Vedação em alvenaria estrutural de blocos de concreto		0,0034 GJ/m ²		
						Vedação concreto armado		0,0083 GJ/m ²		
Caldeira, 2016	Verificar se as telhas temoacústicas com núcleo de poliestireno extrudido apresentam melhor eficiência energética em relação às telhas cerâmicas									
	Dissertação Mestrado – Universidade de Brasília									
	ACVE	Fase pré uso e fase de uso	1 m ² de cobertura	Brasília		Cenário	Valor	Mat	Transp	Constu
						Telha Termoacústica sem forro	0,859	96,6%	2,5%	0,7%
						Telha temoacústica com forro	1,798	88,1%	2,1%	9,7%
						Telha cerâmica sem forro	0,407	93,5%	4,7%	1,7%
	Telha cerâmica com forro	1,459	85,5%	2,3%	12,1%					

Fonte: Elaboração própria

Tabela 22 – Estudos brasileiros de EE com foco nos Edifícios

Estudos	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Tipo Edifício	Vida Útil (anos)	Local	Energia Primária	Resultados
MIC-CETEC-MG, 1982	O documento tem como objetivo específico o dimensionamento dos consumo energéticos diretos e indiretos das edificações e o levantamento dos conteúdos energéticos dos materiais de construção e da energia elétrica na operação							
		Fabricação dos materiais e transporte	1 m ² área construída	2 moradias residenciais e um edifício comercial				Moradia Residencial com técnicas construtivas comuns 2,1 GJ/m ²
								Moradia residencial com técnicas construtivas inovadoras 1,0 GJ/m ²
								Ed. Comercial com padrão arquitetônico internacional 1,5 GJ/m ²
Pietrobon et al. 1995	Analisar aspectos energéticos e custos envolvidos na produção de materiais de construção							
		Fabricação dos materiais	1 m ² área construída	24 tipologias residenciais de vários padrões construtivos *				H1* 3,24 GJ/m ² H4* 2,84 GJ/m ² H8* 2,75 GJ/m ² H12* 2,66 GJ/m ²
Tavares e Lamberts, 2004	Determinar o consumo energético no ciclo de vida de uma edificação residencial brasileira típica							
	ACVE	Pré –Uso e Uso	1 m ² área construída	Residencial H1-2B*	50 anos			Ettotal – 20,23 GJ/m ² EEi – 3,5 GJ/m ² EER – 2,33 GJ/m ²
Tavares e Lamberts, 2006	Detalhar a EE em um edificação residencial típica brasileira discriminado a contribuição dos materiais mais significativos							
	ACVE	Fase pré-uso	1 m ² área construída	Residencial H1-2B*				EEi – 3,94 GJ/m ²

Continua

Continuação

Estudos	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Tipo Edifício	Vida Útil (anos)	Local	Energia Primária	Resultados			
Tavares, 2006	Quantificar o consumo energético no ciclo de vida de habitações brasileiras e as emissões de CO ₂ Tese Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina										
	ACVE	Berço ao túmulo	1 m ² área construída	5 modelos residenciais frequentes no Brasil	50 anos		Sim	Modelo	EE _i	EE _R	E _{total}
								Unifamiliar baixa renda	4,63	2,44	24,17
									19,17%	10,10%	
								Multifamiliar baixa renda	4,10	2,35	18,12
									22,63%	12,97%	
								Multifamiliar média renda	4,90	2,42	15,01
									32,64%	16,12%	
Multifamiliar média renda	4,56	2,27	20,90								
	21,80%	10,88%									
Unifamiliar Alta renda	4,12	1,62	18,55								
							22,22%	8,73%			
Bohadana, 2007	Avaliar a sustentabilidade de uma HIS construída com fardos de palha, terra e cobertura verde Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Rio Grande do Sul										
		Fabricação materiais e transporte	1m ² área construída	Residencial HIS		Sentinel a do Sul (RS)		0,690 GJ/m ² (Materiais com baixa EE, fornecedores locais e projeto simples, desconsideração de sistema elétrico e hidráulico)			
Lobo, 2010	Desenvolver uma ferramenta de inventário de energia embutida e emissões equivalentes de CO ₂ por meio de análise energética de uma planilha de composição de serviço e obras Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Paraná										
	Análise Energética	Pré-Uso	1m ² área construída	Edifício Público		Pranchi ta	Sim 2ºnível de energia	4,23 GJ/m ²			
Graf e Tavares, 2010	Desenvolver o cálculo de energia incorporada dos materiais da edificação por metro quadrado de construção para um projeto-padrão brasileiro estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.										
		Fabricação materiais	1m ² área construída	R1-A*				5,7 GJ/m ² (edifício de alto padrão)			

Continua

Conclusão

Estudos	Metodologia	Fronteira	Unidade Funcional	Tipo Edifício	Vida Útil (anos)	Local	Energia Primária	Resultados		
Silva, 2012	Estudar o ciclo de vida energético de HIS produzida na região de Porto Alegre identificando os principais fatores que contribuem para o impacto negativo no meio ambiente Dissertação Mestrado – Universidade Federal Rio Grande do Sul							EET com valores entre 25,91 e 31,83 GJ/m ² EEi com valores entre 2,77 e 3,42 GJ/m ² Participação do transporte na EEi entre 4,41% e 16,64%		
	ACVE com base em Tavares (2006)	Berço ao túmulo	1m ² área construída	5 tipologias de HIS	50 anos	Porto Alegre				
Silva, 2013	Construção de uma ferramenta que possibilita calcular as emissões de CO ₂ e o consumo de energia primária nas primeiras fases do ciclo de vida das edificações Dissertação de Mestrado – IEE Universidade de São Paulo							EEi de 20,41 GJ/m ² (mínimo de 3,41 GJ/m ² e máximo de 103,15 GJ/m ²) Materiais 93,3%; Construção 4,2%; transporte de resíduos 2,5%		
		Pré-Uso sem transporte	1m ² área construída	Residencial Multifamiliar alto padrão		São Paulo	Sim			
Oliveira, L.B., 2015	Verificar se um sistema de manta viva de uma edificação residencial em clima tropical pode reduzir os gastos de energia operacional e total na vida útil Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Paraná							(GJ/m ²) Base Com Manta Viva em todas as fachadas		
	ACVE com base em Tavares (2006)	Fabricação dos materiais e fase de Uso	1m ² área construída	Edifício Residencial R1-B*	50 anos	Curitiba		EEi	EE _R	EE _T
								3,69	1,45	5,14
								3,92	2,21	6,13

* ABNT NBR 12721

Fonte: Elaboração própria

No que respeita ao último grupo de estudos com foco na totalidade do edifício, apresentados na tabela 22, a fronteira de análise mais frequente é novamente a fase do pré-uso (7 estudos), embora com variações já que apenas dois destes estudos incluem todas as etapas de pré-uso. Contabilizam-se dois estudos que analisaram todas as etapas do ciclo de vida das edificações e dois estudos que analisaram a EE inicial e a EE_R na fase de uso. Em todos os casos foi apresentado detalhe para a EE inicial uma vez ser esse o foco da presente tese. Quanto às unidades funcionais variaram entre 1 m² de área construída e o edifício como um todo, embora só se apresentem valores com base em 1 m² para facilitar a comparação dos resultados.

Quanto ao tipo de edificação avaliadas nos trabalhos analisados, destaca-se o setor residencial, em particular as Habitações de Interesse Social (HIS) foco de 6 dos trabalhos revistos. Quanto à metodologia, é interessante destacar que, com base na revisão da literatura efetuada, não se encontrou nenhum estudo brasileiro sobre energia embutida que tenha recorrido à abordagem I-O para coleta de dados de inventário. Para concluir a análise relativa a aspectos metodológicos, observa-se que apenas 19% trabalhos apresentados nas tabelas declaram que os seus resultados são apresentados em Energia Primária enquanto que nos restantes trabalhos o assunto não é referido.

Nos próximos pontos tecem-se alguns comentários relativamente aos resultados dos estudos revisados. Em primeiro lugar, atendendo ao objetivos da presente tese e de forma a permitir a comparação dos resultados dos estudos analisados, apresenta-se na tabela 23 os resultados dos estudos da tabela 22 restringindo a fronteira de análise à Fase pré-uso e com valores apresentados por unidade de área construída.

Os resultados apresentados na tabela apresentam valores entre 0,6 e 20,4 GJ/m². Contudo, cabe referir que 77% dos valores situam-se no intervalo entre 2,5-5 GJ/m². Os valores mais altos registrados (5,7 e 20,4 GJ/m²) correspondem a padrões construtivos voltados para famílias com elevado rendimento (GRAF; TAVARES, 2010; SILVA, 2013). Quanto aos valores identificados como HIS ou moradia para famílias com baixa renda, o valor médio situa-se em 3,08 GJ/m², valor que sobe para 3,6 GJ/m² quando se retira o estudo de Bohadana (2007) que utiliza técnicas construtivas e materiais pouco usuais (palha e terra). Os resultados de Pietrobon et al., 1995 e de Tavares (2006) sugerem que, mantendo o padrão construtivo, edificações com área maior apresentam menor valores de consumo por unidade de área.

Tabela 23 – Valores de EE_i nos trabalhos brasileiros revisados

Fonte	EE _i (GJ/m ²)	Tipo de Edifício	Observações
MIC CETEC MG, 1982	1,0	Residencial	Apenas materiais e transporte
	1,5	Residencial	
	2,1	Comercial	
Pietrobon et al. 1995	3,2	Residencial H1*	Apenas materiais
	2,8	Residencial H4*	
	2,8	Residencial H8*	
	2,7	Residencial H12*	
Tavares e Lamberts, 2004	3,5	Residencial H1-2B*	
Tavares e Lamberts, 2006	3,9	Residencial H1-2B*	
Tavares, 2006	4,6	Moradia baixa renda	
	4,1	Multifamiliar baixa renda	
	4,9	Moradia média renda	
	4,6	Multifamiliar média renda	
	4,1	Moradia alta renda	
Bohadana, 2007	0,6	Residencial HIS	Apenas materiais e transporte sem sistema hidráulico nem elétrico
Lobo, 2010	4,2	Público	
Graf e Tavares, 2010	5,7	Residencial R1-A*	Materiais
Silva, 2012	3,1	Moradia padrão baixo	
	3,4	Moradia padrão baixo	
	3,4	Moradia padrão baixo	
	3,4	Moradia padrão baixo	
	3,4	Multifamiliar 5 pavimentos	
	3,1	Multifamiliar 5 pavimentos	
	2,8	Moradia técnica construtiva alternativa	
Silva, 2013	20,4 (3,41-103,2)	Residencial 2 torres alto padrão	Materiais e construção
Oliveira, L.B., 2015	3,7	Residencial R1-B*	Materiais

*Norma ABNT NBR, 12721

Fonte: Elaboração própria.

Ainda no que respeita aos resultados dos estudos analisados, cabe referir que a EE_i apresentou contribuições entre 60,0% e 84,5%% face ao total de energia embutida (excluindo fase pós uso) (TAVARES, 2006; TAVARES; LAMBERTS, 2004, OLIVEIRA, L.B., 2015 e

SILVA, 2012). Quanto ao peso das diferentes etapas consideradas na fase de pré-uso (EE_i), Silva (2013) aponta para um peso dos materiais da ordem de 93,3% e Silva (2012) apresenta contribuições entre 4,41 e 16,64% para a etapa do transporte. Com base nos dois estudos que avaliaram todo o ciclo de vida dos edifícios, o peso da EE (EE_i mais a EE_R) face ao consumo de energia total no ciclo de vida representou entre 13,3% e 19,4% em Silva (2012) e entre 29,3 e 48,8% em Tavares (2006) ambos para períodos de vida útil dos edifícios de 50 anos.

Quanto a especificidades de alguns estudos, cabe destacar que Silva (2013) avaliou o contributo da água para o consumo de energia na EE_i . Monteiro (2015) e Silva (2012) incluíram o consumo energético resultante do transporte da mão-de-obra na fase de construção, enquanto em Tavares (2006) esse consumo é avaliado mas considerado separadamente. Monteiro (2015) considerou o potencial de reciclagem no consumo energético no ciclo de vida do edifício.

Relativamente aos materiais, sendo a fase que mais contribui para a EE_i , considera-se interessante destacar as contribuições individuais de cada material. Em Silva (2013), os resultados apresentam um perfil de participação dos materiais nos quantitativos em massa do tipo: concreto (60%); areia (16%), brita (11%), cerâmica vermelha (4%), cimento (3%), gesso (1%). Já quando considerado o perfil em termos de contribuição para o consumo de energia primária, as participações alteram-se para: concreto (68%); água (18%); tinta (7%), gesso (3%), Cimento (1%) e Madeira (1%). Com base em Silva (2012), os resultados para as 7 tipologias avaliadas mostram que os materiais com maiores contribuições para a EE_i são o cimento Portland, cerâmica vermelha, “massa, texturas e tintas”, aço e telha de fibrocimento. A autora destaca que 12 materiais respondem por 91,1% de toda a EE dos materiais. Já em Tavares e Lamberts (2004), o cimento Portland, tijolos e aço respondem por 70,1% de toda a energia incorporada nos materiais. Ainda de acordo com os resultados de Tavares (2006) a tinta merece atenção especial pois além de ser o quarto em energia inicial é o material que mais acumula energia ao final do ciclo de vida.

Para efeitos de comparação, apresenta-se na tabela 24 os resultados da revisão de literatura de Ding (2004, DIXIT et al., 2010) quanto ao valor de energia embutida por unidade de área em edificações internacionais em diversos estudos. Observa-se que os valores apresentados são, na sua maioria, superiores aos valores apresentados para as edificações brasileiras. Contudo seria preciso confirmar as fronteiras de análise em cada estudo para apurar diferenças entre os valores brasileiros e os valores resultantes de estudos estrangeiros.

Tabela 24 – Valor de Energia embutida em edifícios em estudos internacionais

Energia Embutida (GJ/m ²)	Tipo de Edificação	Fonte
3,6	Residencial	Hill (1978)
3,9	Residencial	Edwards et al. 1994
4,3 - 5,3	Residencial	D’Cruz et al. (1990)
4,9	Residencial	Pullen (1995)
5,0	Residencial	Lawson (1992)
5,9	Residencial	Pullen (2000)
6,0	Residencial	Balantyne et al. (2000) (citado por Pullen)
6,8	Residencial	Treloar (1998)
8,8	Residencial	Treloar (1996b)
3,4 – 6,5	Comercial	Honey and Buchanan (1992)
4,3 – 5,1	Comercial	Cole e Kernan (1996)
5,5	Comercial	Oppenheim and Treloar (1995)
8,0 – 12,0	Comercial	Oka et al. (1993)
8,2	Comercial	Tucker and Treloar (1994)
10,5	Comercial	Yohanis e Norton (2002)
18,6	Comercial	Stein et al. (1976)
19,0	Comercial	Tucker et al. (1993)

Fonte: Ding²⁵ (2004 apud Dixit et al., 2010)

Tal como referido no início desta seção, outro ponto avaliado nos estudos revisados foi as fontes de dados utilizadas. Uma vez que o foco deste trabalho é a fase de pré-uso do edifício, concentrou-se a análise na etapa de fabricação dos materiais, transporte e construção.

Em primeiro lugar quanto aos materiais, cabe referir que as quantidades de material consideradas nos estudos são tipicamente avaliadas a partir do projeto, da TCPO, e da Norma ABNT NBR 12721. Em nenhum dos trabalhos revisados as quantidades foram avaliadas a partir do “as built” do edifício, sendo sempre uma estimativa do consumo de materiais. Relativamente aos coeficientes de energia embutida dos materiais, a maioria dos estudos utiliza dados secundários (48,1%) ou uma mistura de dados primários e secundários (25,6%).

²⁵ DING, G. The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, Ph.D. Thesis, University of technology, Sydney, Australia, 2004.

Quanto a estudos feitos a partir de dados primários o seu foco é o ciclo de vida de materiais. Relativamente às fontes de dados secundários, observa-se que 35,4% dos trabalhos referem Tavares (2006) como referência. Cabe referir que alguns trabalhos, apontam os dados de Tavares (2006) como uma fonte de valores nacionais, contudo os coeficientes de energia embutida em materiais listados em Tavares (2006) compilam valores primários obtidos por análise estatística, valores secundários de referência brasileiras e valores secundários resultantes de médias de referências internacionais. Quanto a bases de dados, a mais referida é a Ecoinvent, disponível a partir de alguns softwares. Ainda relativamente aos coeficientes de energia embutida em materiais cabe destacar o trabalho de Silva (2013) no qual, na ausência de valores nacionais, é feita uma adaptação dos dados internacionais relativamente à matriz de fontes energética de forma a melhorar a representatividade do valor face ao cenário nacional.

Em segundo lugar quanto ao transporte, alguns trabalhos consideram distâncias reais, enquanto outros simulam distâncias percorridas pelos materiais assumindo um valor médio por material ou estabelecendo uma localização fictícia para a edificação escolhendo os fornecedores mais próximos. Em todos os trabalhos avaliados foi considerado que os materiais de construção são transportados por meios de transporte rodoviário, em particular caminhões. Quanto ao consumo energético por unidade de carga transportada apontam-se diversas fontes, apresentadas na tabela 25. Mais uma vez a fonte mais referida é Tavares (2006). Ainda em relação ao transporte, cabe referir que apenas Moraes e Sposto (2010) consideram um incremento de 50% no consumo de energia no transporte pela volta vazia dos caminhões.

Quanto à etapa da construção, ela é avaliada por dados primários em Tavares (2006) e Silva (2013).

Tabela 25 – Estudos referidos como fontes de intensidade energética do transporte rodoviário nos trabalhos brasileiros revisados

Fonte	Valor
MIC CETEC MG (1982)	1,469 MJ/tkm
Guimarães (1985 ²⁶ apud Moraes e Sposto, 2010)	0,0384 l/tkm (1,363 MJ/tkm)
Reis (1999 ²⁷ apud Sperb, 2000)	0,843 MJ/tkm fora da região metropolitana das cidades e 1,127 MJ/tkm dentro das cidades
Tavares (2006)	1,62 MJ/tkm calculado a partir de Pereira (2004)
Nabut Neto (2011)	0,0137 l/tkm (0,486 MJ/tkm)
Campos (2012)	0,006-0,022 l/tkm (0,213 -0,781 MJ/tkm)

Fonte: Elaboração própria

Por último, considera-se interessante destacar que a distribuição por universidades dos 26 trabalhos acadêmicos analisados, apresentada na tabela 26, sugere alguns focos de pesquisa sobre ACV e EE no Brasil com destaque para Universidade de Brasília enquanto contribuição individual (23%) e o Sul enquanto região (39%). Cabe destacar mais uma vez que a revisão aqui apresentada não pretende esgotar os trabalhos acadêmicos brasileiros sobre o tema, pelo que os números referidos dizem respeito apenas à amostra avaliada nesta tese.

Tabela 26 – Distribuição dos trabalhos revisados por universidade

Universidade	Participação
Universidade Federal de Santa Catarina	8%
Universidade de Brasília	23%
Universidade Federal de São Carlos	8%
Universidade de São Paulo	12%
Universidade Federal do Paraná	12%
Universidade Federal de Minas Gerais	8%
Universidade Federal de Rio Grande do Sul	19%
Outras	11%

Fonte: Elaboração própria

²⁶ GUIMARÃES, G. D. Análise energética na construção de habitações. Dissertação de mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, 1985.

²⁷ REIS, Neto Gonçalves. [Comunicação pessoal], mar. 1999

3.6 Iniciativas no Brasil relacionadas com energia embutida

Conforme visto no capítulo 2 deste trabalho, as metodologias ACV são atualmente a ferramenta mais disseminada para cálculo da EE. Nos chamados países desenvolvidos, as metodologias de avaliação de ciclo de vida começaram a ser aplicadas na década de 70 e atualmente são utilizadas pela academia, governo e indústrias. Em países em desenvolvimento os estudos vêm sendo realizados principalmente pela academia. De acordo com Sombrio (2015), os primeiros artigos nacionais sobre a avaliação do ciclo de vida dos produtos foram publicados no Brasil na década de 90, impulsionados pelo tema do desenvolvimento sustentável que ganhou destaque no país após a realização da Conferência ECO 92 no Rio de Janeiro. Foi também na década de 90 que foi criado o subcomitê da ABNT que passou a integrar o Comitê técnico da ISO que trabalhou na elaboração das normas da família ISO 14000. Em 2001 foi publicada a primeira versão da norma ABNT ISO 14040 em português e mais tarde em 2009 a norma foi revista junto com a publicação da norma ABNT ISO 14044.

Em 2002 foi criada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) com o objetivo de juntar pessoas e empresas com interesse no desenvolvimento e aplicação da ACV promovendo atividades como o estímulo ao ensino e à pesquisa, a aproximação dos especialistas brasileiros e internacionais por meio de conferências, mesas redondas, cursos, entre outros e intercâmbio com entidades ligadas direta ou indiretamente à ACV. Entre as suas ações cabe destacar a participação no comitê gestor do Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV), a participação como co-fundador da Rede Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida – ACV e a promoção de eventos como o Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida que contou com quatro edições (ABCV, 2017). Dois anos mais tarde, em 2004, a ACV tornou-se tema estratégico do Programa Brasileiro de Avaliação da Conformidade.

Nos itens 3.6.1 e 3.6.2 apresentam-se a descrição de duas iniciativas brasileiras que têm impulsionado o desenvolvimento da ACV no Brasil: O Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida e a Avaliação de Ciclo de Vida Modular.

3.6.1 Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida

Através da Resolução CONMETRO 04/2010 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO, 2010) foi aprovada em 2010 a criação do Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida. No referido documento são estabelecidas as diretrizes no âmbito do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro) para dar continuidade e sustentabilidade às ações de ACV no Brasil, com objetivo de apoiar o desenvolvimento sustentável e a competitividade ambiental da produção industrial brasileira e promover o acesso aos mercados interno e externo. Quanto aos objetivos do programa, destacam-se os seguintes pontos:

- Implantar no País um sistema reconhecido internacionalmente, capaz de organizar, armazenar e disseminar informações padronizadas sobre inventários do Ciclo de Vida da produção industrial brasileira;
- Disponibilizar e disseminar a metodologia de elaboração de inventários brasileiro;
- Elaborar os inventários base da indústria brasileira;
- Identificar as principais categorias de impactos ambientais para o Brasil;

O PBACV possui um Comitê Gestor atualmente presidido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e secretariado pelo Inmetro que inclui 29 membros representantes do governo, academia, setores produtivos, organizações afetas ao tema ACV e comitês assessores do Conmetro (INMETRO, 2017).

A operacionalização do programa é feita através do Plano de Ação Quadrienal que já vai na sua segunda versão. Aprovado pela resolução CONMETRO 01/2012, primeiro Plano de Ação Quadrienal 2012-2015, contou com 14 projetos estratégicos dos quais se dá destaque aos seguintes itens (CONMETRO, 2012):

- Implantação de um sistema de gestão, operação e manutenção do - Sistema Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil);
- Adaptação continuada dos documentos da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida (ILCD) ao contexto acadêmico e industrial brasileiro;
- Implementação e gestão de núcleos setoriais de inventários de ciclo de vida;

- Desenvolvimento de inventários de ciclo de vida para a caracterização setorial da indústria brasileira;
- Identificação das categorias de impactos e métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) de aplicação ampla ao Brasil e reconhecidos internacionalmente;
- Definição dos parâmetros brasileiros para as categorias de impactos regionais;
- Seleção dos modelos de caracterização de impactos regionais;
- Fortalecimento da interação entre agentes reguladores, setores produtivos, academia, órgãos estaduais e o PBACV;
- Desenvolvimento de programas de avaliação da conformidade e de rotulagem ambiental no Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (SBAC).

Conforme assumido no item 2 a metodologia do ILCD foi assumida como a metodologia padrão para a realização de ACV no Brasil. O Plano Quadrienal 2016-2019, aprovado pela resolução CONMETRO 06/2016 (CONMETRO, 2016) estabeleceu igualmente 14 planos estratégicos, reforçando os objetivos já assumidos no plano anterior e acrescentando os seguintes pontos:

- Continuar a adaptação e contextualização de documentos e metodologias relacionadas à gestão de dados de ACV reconhecidos internacionalmente ao contexto brasileiro, bem como estabelecer metodologias próprias aplicáveis ao Brasil;
- Integrar e compartilhar recursos com outros bancos internacionais de ACV a fim de criar redes de bancos de ACV, em particular a efetiva integração do Brasil ao sistema International Reference Life Cycle Data System (ILCD);

Considera-se relevante destacar dois temas nos objetivos estratégicos do PBACV: as ações relacionadas com o desenvolvimento e implementação do SICV Brasil e o desenvolvimento dos programas de de rotulagem ambiental no Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (SBAC).

a) Sistema Brasileiro de Inventários de Ciclo de Vida (SICV Brasil)

Conforme referido no capítulo 2, a adoção de soluções simplificadoras com base na ACV tradicional é uma imposição da realidade para tornar a metodologia das normas aplicável no cenário atual, tornando sua execução mais acessível à indústria. Elas podem ser realizadas pelo uso de dados secundários, redução dos fluxos de entrada e/ou saída avaliados e redução da fronteira do sistema analisado. O uso de dados secundários é uma alternativa que, além de reduzir o tempo de realização da ACV, torna a sua execução praticável em casos onde a cadeia de fornecedores não dispõe de informações próprias. Na prática é frequente a realização de inventários baseados unicamente em dados secundários, particularmente em trabalhos acadêmicos. No Brasil a execução de uma ACV tem como obstáculo a falta de uma base de dados secundários nacional. A indisponibilidade de bancos de dados no país exige a utilização de informações de bancos estrangeiros o que compromete a representatividade do resultados dos estudos ACV face à realidade brasileira (JOHN et al., 2014). A produção de um banco de dados nacional é de grande importância para a precisão dos resultados de ACV nacionais pois, conforme destacado no capítulo 2, na ACV são considerados diversos fatores específicos a cada local de produção, com destaque para as fontes de energia no caso do Brasil, pela elevada penetração de fontes renováveis na matriz de produção de energia elétrica.

Neste contexto, em 2006 o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) aprovou o projeto Inventário do Ciclo de Vida para Competitividade Ambiental da Indústria Brasileira que tem como objetivo desenvolver o banco de dados de inventário do ciclo de vida da indústria de base do Brasil. De acordo com Rodrigues et al. (2016) os benefícios do desenvolvimento do banco de dados nacional são múltiplos e em diferentes setores: na academia, pelo fato de os estudos de ACV se tornarem mais robustos, mais representativos e com maior aceitação da comunidade científica; no setor produtivo, pela possibilidade de comprovação de vantagem competitiva de produtos nacionais perante os concorrentes internacionais, além de melhorar a qualidade de dados para uso da ferramenta na gestão ambiental das empresas; no setor governamental, apoiando o desenvolvimento de políticas públicas sustentáveis de forma mais objetiva e adequada em relação à realidade brasileira.

No âmbito do SICV Brasil, o IBICT em parceria com universidades, associações da indústria e governo, desenvolveu uma infraestrutura básica de serviços técnicos especializados em Inventários do Ciclo de Vida, composta de banco de dados para

armazenamento de inventários brasileiros. Tais esforços culminaram com o lançamento do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) em Março de 2016 (IBCIT, 2017). O SICV Brasil é um banco de dados criado para abrigar Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) de produtos nacionais. A ferramenta é um sistema gerenciador de bases de dados que tem como missão manter e assegurar o acesso aos dados de inventários de produtos e processos da indústria brasileira, bem como validar as informações a serem inseridas.

O SICV Brasil utiliza o formato do International Reference Life Cycle Data System (ILCD) que conforme referido no capítulo 2 segue as normas ISO 14040 e 14044, e foi desenvolvido pela Joint Research Center (JRC) e financiado pela Comissão Europeia. Utilizando-se de tecnologias *open source*, o banco oferece os seus conjuntos de dados em formato aberto, favorecendo o recebimento, o armazenamento e a disponibilização dos conjuntos de dados para a comunidade interessada, atendendo à academia, ao setor produtivo e ao governo (RODRIGUES et al., 2016).

De forma a promover a interoperabilidade, coerência e qualidade dos dados de ACV, foram selecionados 42 requisitos para avaliação dos processos de submissão de dados. Distinguem-se requisitos obrigatórios, recomendados e opcionais (RODRIGUES et al., 2016):

- Obrigatório: informação que deve necessariamente ser declarada. A sua ausência implica a devolução do conjunto de dados ao provedor para complementação;
- Recomendado: informação que não é obrigatória, mas recomendada por melhorar a transparência e completude de informações do conjunto de dados;
- Opcional: informação que não é obrigatória nem recomendada, mas pode ser fornecida caso o provedor julgue pertinente, o que também confere maior transparência ao conjunto dos dados.

Na tabela 27 apresentam-se a lista de requisitos que são avaliados na submissão de dados ao SICV com referência à sua classificação.

Tabela 27 – Classificação dos requisitos mínimos exigidos pelo SICV

Tema	Número	Item	Classificação
Dados Gerais	1	Língua	Obrigatório
	2	Nome do conjunto de dados	Obrigatório
	3	Citações e referências	Obrigatório
	4	Campo de administração	Obrigatório
	5	Cobertura Temporal	Obrigatório
	6	Validade	Opcional
	7	Cobertura Tecnológica	Obrigatório
	8	Descrição da tecnologia	Obrigatório
	9	Cobertura Geográfica	Obrigatório
	10	Representatividade	Obrigatório
Métodos e Processos	11	Abordagem	Obrigatório
	12	Critério de corte	Obrigatório
	13	Agregação de dados	Obrigatório
	14	Sistema do produto	Obrigatório
	15	Conexões com base de dados	Obrigatório
	16	Multifuncionalidade	Obrigatório/ Recomendado
	17	Mudança de Uso da Terra (MUT)	Obrigatório
	18	Verificação de dados	Obrigatório
	19	Balanço de massa	Recomendado
	20	Balanço de água	Recomendado
	21	Balanço de energia	Recomendado
	22	Qualidade de dados	Obrigatório
Fluxos	23	Bens de capital	Obrigatório
	24	Nome de fluxos	Obrigatório
	25	Fluxo de referência	Obrigatório
	26	Unidades	Obrigatório
	27	Fluxo tecnológico	Obrigatório
	28	Compartimentos	Obrigatório
	29	Fluxos de água	Recomendado
	30	Materiais particulados	Recomendado
	31	COVs	Recomendado
	32	HAPs	Recomendado
	33	Dioxinas e Furanos	Recomendado
	34	Fontes de GEE	Obrigatório
	35	Emissões de longo prazo	Opcional
	36	Emissões de MUT	Obrigatório
	37	Transporte	Obrigatório
	38	Dados faltantes	Obrigatório
	39	Fonte dos fluxos	Obrigatório
	40	Incerteza	Obrigatório
Revisão	41	Revisão crítica	Obrigatório
	42	Relatório da revisão crítica	Recomendado

Fonte: Rodrigues et al. (2016).

Os dados de inventários depositados passam duas revisões, uma de qualidade e outra de dados antes de serem disponibilizados para acesso público.

b) Programa de Rotulagem Ambiental

Em Maio de 2016 o Inmetro lançou os requisitos gerais do primeiro programa nacional para avaliar o desempenho ambiental de produtos fabricados no Brasil, baseado na norma ABNT ISO 14025:2015 - *Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos*. O objetivo do programa é fazer com que a indústria brasileira use a Declaração Ambiental de Produto (DAP), para demonstrar para outros mercados o perfil ambiental dos seus produtos. Conforme já referido, a DAP é um documento que resume o perfil ambiental de um componente, um produto acabado ou um serviço, elaborada de forma padronizada e objetiva, baseada na ACV conforme ABNT ISO14040. (BRITO, 2017).

Brito (2017) chama a atenção para o fato de que, embora forneça informações objetivas a DAP não é um rotulo de qualidade ambiental, uma vez que a sua emissão não define exigências ambientais específicas ou seja não é avaliado se o produto obedece a um determinado nível de desempenho. É um documento que fornece uma descrição detalhada de características ambientais de produtos ao longo do seu ciclo de vida.

O Programa de Rotulagem Ambiental Tipo III - DAP do Inmetro pretende sistematizar no Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade o cadastro de DAPs elaboradas pelas organizações produtoras, segundo requisitos definidos em normalização internacional (ABNT NBR ISO 14025:2015) (BRITO, 2017).

O programa tem caráter voluntário. A declaração do impacto ambiental dos produtos brasileiros obtido com base em normas internacionalmente reconhecidas tem como objetivo promover a aceitação dos produtos brasileiros no mercado internacional.

3.6.2 Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACV-m)

De acordo com John et al. (2014) atualmente não existem para a quase totalidade dos setores, dados brasileiros baseados em ACV. Por uma lado, a ausência de dados para análise e

diagnóstico faz com que sejam utilizados dados internacionais para representar o cenário nacional, o que acarreta o risco de gerar um falso cenário, cuja utilização para tomada de decisão é equivocada e pode causar enormes impactos. Por outro lado, de acordo com Oliveira, L.S. (2015), há o entendimento por parte de organizações como o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) que a aplicação de uma ferramenta de ACV consiste numa exigência onerosa perante a informalidade da indústria da construção brasileira.

Neste contexto o CBCS lançou um projeto de Avaliação de Ciclo de Vida Modular ACV-m, uma versão simplificada de ACV que trabalha apenas com os aspectos ambientais mais críticos. A ACV-m é uma evolução da ACV. Trata-se de uma avaliação do ciclo de vida simplificada, realizada pela redução do escopo e uso de dados secundários, estes últimos referentes à energia incorporada e aos fatores de emissão dos insumos. A redução de escopo dá-se por avaliação de apenas alguns impactos ambientais críticos, sendo considerado como escopo mínimo a inclusão dos seguintes fluxos de entrada e saída: emissões de CO₂, energia, água, resíduos, uso de matérias primas. Com a redução do escopo, obtém-se uma redução de tempo e de custo e ao mesmo tempo mantém-se em conformidade com o método de ACV tradicional (JOHN et al., 2014). A ACV-m apresenta uma abordagem evolutiva, que permite que as empresas realizem a ACV em módulos que se complementam progressivamente, formando uma ACV completa. Por esse motivo o termo “modular” foi escolhido, para indicar continuidade e possibilidade de melhoria (OLIVEIRA, L.S 2015).

Algumas características da ACV-m são destacadas por John et al. (2014) como vantagens desta abordagem:

- Identificação dos impactos ambientais de um produto por faixas de valores em vez de associar um valor representativo. Tal abordagem permite mostrar à sociedade e ao fabricante o potencial de diminuição de impactos que existe dentro de uma tecnologia, e, ao não “rotular” um produto como tendo determinado impacto, facilita ao fabricante a tarefa de informar seus próprios impactos;
- A adoção de um escopo mínimo simplificado, reduz o tempo, custo e complexidade de execução de ACV o que viabiliza que pequenas e médias empresas realizem suas listas para o levantamento dos seus impactos ambientais. Além disso facilita a atualização contínua do inventário.

De acordo com CBCS a metodologias gera vários benefícios em diferentes níveis:

1. Ao fabricante:

- Introduzir a avaliação de impactos ambientais dos produtos;
- Comparar seu desempenho com o dos demais participantes, identificando oportunidades de melhorias e boas práticas;
- Controlar o processo produtivo com intervenções fundamentadas em critérios de sustentabilidade;
- Incorporar o olhar de sustentabilidade na sua equipe;
- Ter acesso ao manual de recomendações gerais para melhoria do processo, o que pode contribuir para a adoção de boas práticas pela empresa;
- Demonstrar a eficiência dos produtos junto aos consumidores, com medidas diretas, transparentes e reconhecidas pelas entidades envolvidas.

2. À cadeia produtiva:

- Contribuir com o diagnóstico e a implantação de estratégias de gestão ambiental em nível setorial;
- Responder aos pedidos do mercado sobre informações ambientais dos produtos usando dados gerados a partir de metodologia reconhecida.

3. Ao mercado consumidor

- Selecionar produtos e fornecedores por múltiplos critérios e superar a atual concorrência baseada unicamente em valor do produto;
- Incorporar parâmetros de sustentabilidade nos critérios de escolha;
- Possibilitar o estabelecimento de diretrizes de sustentabilidade mensuráveis em empreendimentos imobiliários;
- Fornecer informações para viabilizar a gestão da sustentabilidade na construção.

4. À sociedade

- Adotar medidas para melhorar a eficiência dos processos e a seleção de materiais e de fabricantes que ofereçam baixo impacto ambiental;
- Promover a sustentabilidade de acordo com critérios regionais relevantes;
- Contribuir com a preservação do meio ambiente pela redução da demanda por recursos naturais e de impacto pelo descarte dos materiais;
- Introduzir e popularizar o conceito de ACV e declaração ambiental de produto nas cadeias industriais.

Oliveira, L.S. (2015) destaca que a estratégia de implantação prevê que a avaliação dos impactos ambientais mínimos (módulo básico) seja realizado em simultâneo por um conjunto empresas de um mesmo setor, que podem trocar experiência. Os resultados assim obtidos permitem determinar um benchmark setorial, que colocará em evidência os potenciais de melhoria e fornecerá informações valiosas para órgãos governamentais e organizações setoriais planejarem políticas de produção ambientalmente mais limpas (Oliveira, L.S., 2015). O projeto de ACV-m foi colocado em prática em um projeto piloto no setor de blocos de concreto com foco em blocos de concreto para pavimento intertravado, retangular e dezasseis faces, e blocos de concreto para alvenaria, considerados os mais representativos do mercado consumidor no Brasil. O estudo resultou de uma parceria entre a CBCS, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e Bloco Brasil (JOHN et al. 2014).

O projeto ACV Modular (ACV-m) faz parte do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida, sendo responsável pelo inventário dos materiais e componentes de construção civil (JOHN et al., 2014).

4. ESTUDO DE CASO

Conforme apresentado no capítulo introdutório, o objetivo central desta pesquisa é calcular a energia embutida na fase pré-operacional do ciclo de vida de um condomínio residencial na cidade de Campo Grande em Matos Grosso do Sul. No presente capítulo é apresentado o estudo de caso, sendo que no primeiro ponto define-se o método de cálculo utilizado seguido de um tópico com a descrição do condomínio estudado. Por fim apresentam-se detalhes sobre o processos de coleta de dados com referência às fontes de dados utilizadas e a todas as especificidades de cada etapa do processo de aplicação do método de cálculo ao estudo de caso.

4.1 Método de cálculo

Conforme apresentado na revisão bibliográfica do capítulo 2 existem diferentes metodologias para cálculo da EE nas edificações e a definição da fronteira de estudo e escopo são explicativos de grande parte das diferenças encontradas entre os estudos. Atendendo às definições das metodologias apresentadas e ao objetivo da presente pesquisa, optou-se por aplicar um método baseado em ACVE para determinar a energia embutida em uma edificação nas etapas da fase de pré-uso do seu ciclo de vida.

Tal como visto anteriormente, o ciclo de vida de uma edificação divide-se em três fases, a fase de Pré-Uso, a fase de Uso e a fase de Pós-Uso que por sua vez se dividem em etapas. Na presente pesquisa optou-se por restringir a fronteira de análise à fase Pré-Uso do ciclo de vida de uma edificação que inclui todas as etapas necessárias até à conclusão da construção da edificação: fabricação dos materiais de construção, transporte dos materiais de construção e a construção propriamente dita da edificação. Na fase de fabricação dos materiais estão incluídos a extração, preparação e transporte de matérias primas, o seu transporte até à fábrica e o processo de manufatura dos materiais de construção. Já na fase de construção incluem-se os consumos com equipamentos na obra e o transporte de resíduos. A Energia Embutida assim calculada corresponde à Energia Embutida Inicial (EE_i).

A figura 26 apresenta as etapas do ciclo de vida das edificações incluídas na fronteira de análise do estudo de caso.

Figura 26 – Fronteira de análise para cálculo da Energia Embutida no estudo de caso

Fonte: Elaboração própria

A EE_i foi calculada com base na seguinte equação:

$$EE_i = EE_M + EE_{TM} + EE_C \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- EE_i é a Energia Embutida Inicial;
- EE_M é a Energia Embutida nos materiais de construção (etapas A1, A2, e A3 da figura 26);
- EE_{TM} é a Energia Embutida no transporte dos materiais de construção (etapa A4 da figura 26);
- EE_C é a Energia Embutida na obra (etapa A5 da figura 26).

O cálculo de cada parcela da EE_i pode ser descrito da seguinte forma:

1. Energia embutida nos materiais de construção resulta do somatório do produto entre a quantidade consumida de cada material (Q_{Mi}) e o seu respectivo Coeficiente de Energia Embutida (EE_{Mi}) para todos os materiais utilizados na construção do edifício;

$$EE_M = \sum_{i=1}^n Q_{Mi} \times EE_{Mi} \quad (\text{Equação 2})$$

2. Energia embutida no transporte dos materiais de construção resulta do somatório do produto entre a quantidade consumida de cada material em peso (Q_{Mi}), com a distância percorrida entre o local de fabricação e o local da obra (D_i) e o consumo energético específico do modal de transporte de carga utilizado em cada trecho do transporte (CE_{MT});

$$EE_{TM} = \sum_{i=1}^n Q_{Mi} \times D_i \times CE_{MT} \quad (\text{Equação 3})$$

3. Energia embutida na obra resulta do consumo específico de cada equipamento (CE_{Eqi}) utilizado no local da obra pelo tempo de utilização do mesmo (TU_{Eqi}) mais a energia consumida no transporte de resíduos que pode ser obtida pela multiplicação entre o consumo específico do modal de transporte (CE_{MT}) utilizado e a quantidade de resíduos transportada (Q_R). Não foi considerada a mão de obra;

$$EE_C = \sum_{i=1}^n CE_{Eqi} \times TU_{Eqi} + CE_{MT} \times Q_R \quad (\text{Equação 4})$$

Atendendo às equações 2, 3 e 4, a equação 1 é equivalente à equação 5 que discrimina o procedimento de cálculo utilizado na presente tese para determinar a energia embutida inicial de um condomínio residencial.

$$EE_i = \sum_{i=1}^n (Q_{Mi} \times EE_{Mi}) + \sum_{i=1}^n (Q_{Mi} \times D_i \times CE_{MT}) + \sum_{i=1}^n (CE_{Eqi} \times TU_{Eqi}) + CE_{MT} \times Q_R$$

(Equação 5)

Tendo em vista a revisão bibliográfica apresentada considerou-se que a unidade funcional mais adequada ao estudo de caso é $1m^2$ de área construída.

Recorreu-se a uma planilha de cálculo para organização dos dados coletados e realização dos cálculos.

4.2 Condomínio Residencial – The Capital

A descrição do condomínio apresenta no primeiro item informações relativas às áreas do condomínio e no segundo item enumeram-se as principais características construtivas.

4.2.1 Apresentação do Condomínio

Nome: Residencial The Capital;

Localização: Rua 2 de Setembro, Bairro Tiradentes, Campo Grande, MS;

Empresa Construtora: Plano A Construtora e Incorporadora S.A;

Período de Construção: A obra decorreu entre Abril de 2013 e Junho de 2016.

O condomínio em questão situa-se num bairro residencial que tem passado por expansão imobiliária nos últimos anos e encontra-se ainda em fase de venda, contando apenas com algumas unidades ocupadas. Atendendo ao preço de venda e às categorias de renda familiar definidas para financiamento no Programa Minha Casa Minha Vida através do Banco Caixa Econômica Federal o condomínio está direcionado para famílias de classe média. A construtora é uma empresa familiar responsável pelo projeto, financiamento e construção.

A figura 27 indica a localização da cidade de Campo Grande no Brasil e a figura 28 indica a localização do condomínio na cidade.

Figura 27 - Localização da Cidade de Campo Grande no Brasil

Fonte: Elaboração própria

Quanto aos apartamentos, todos têm a mesma tipologia (apresentando pequenas diferenças nas áreas em função da sua localização no bloco) e contemplam as seguintes áreas: sala, circulação, terraço com churrasqueira, cozinha com área de serviço, banheiro geral, dois quartos e uma suíte. A planta tipo dos apartamento pode ser visualizada na figura 30.

Figura 30 - Planta dos apartamentos final 1

Fonte: Plano A

A área construída contempla ainda as áreas comuns que incluem a guarita da entrada e a casa das máquinas. Na tabela 28 apresenta-se a descrição das áreas do condomínio:

Tabela 28 – Áreas do Condomínio Residencial The Capital

Área	Valor (m²)
Terreno	3371,62
Total Construída	3076,74
Total de cada Bloco	995,64
<i>Pavimento térreo</i>	335,54
<i>Pavimento 1</i>	330,05
<i>Pavimento 2</i>	330,05
Áreas comuns	
<i>Casa das máquinas</i>	80,22
<i>Guarita</i>	9,60
Apartamentos	
<i>Apartamentos final 1</i>	85,54
<i>Apartamentos final 2</i>	85,85
<i>Apartamentos final 3</i>	85,85
<i>Apartamentos final 4</i>	84,62
Áreas Apartamento final 1	
<i>Sala</i>	15,75
<i>Terraço</i>	6,45
<i>Cozinha</i>	7,21
<i>Área de Serviço</i>	2,52
<i>Suíte</i>	11,06
<i>Quarto 1</i>	9,39
<i>Quarto 2</i>	6,56
<i>Banheiro Geral</i>	2,75
<i>Banheiro Suíte</i>	2,74
<i>Circulação</i>	3,29

Nota – As áreas dos cômodos correspondem à área calculada a partir das medidas das paredes apresentadas em planta, ou seja, não incluem a espessura das paredes pelo que o seu somatório é inferior à área total apresentada do apartamento.

No apêndice A podem visualizar-se algumas fotografias da fachada e área externa no condomínio.

4.2.2 Características construtivas

Neste tópico apresentam-se as características construtivas de acordo com o memorial descritivo apresentado à Prefeitura Municipal de Campo Grande para aprovação de alvará. Na tabela 29 listam-se os diferentes sistemas construtivos com a respectiva descrição. Para cada sistema construtivos apresentam-se em apêndice fotografias que permitem a visualização do mesmo.

Tabela 29 – Características construtivas do condomínio Residencial The Capital

Sistema construtivo	Descrição	Apêndice com fotografias
Estrutura	Concreto armado. Fundações do tipo estaca strauss e lajes do tipo treliçadas com enchimento cerâmico. Forro de laje	Apêndice B
Vedações	Alvenaria Comum (Bloco cerâmico de 8 furos e tijolo comum)	Apêndice C
Cobertura	Cerâmica Comercial e Telha de Eternite	
Paredes Externas	Reboco e tinta látex, esmalte, silicone e verniz	Apêndice D
Paredes Internas	Reboco e revestimento interno em massa PVA com acabamento de tinta látex PVA e rodapé cerâmico	Apêndice E
Piso	Revestimento cerâmico com acabamento rejuntado e soleira de granito	Apêndice E
Tetos	Reboco e revestimento em massa PVA com acabamento de tinta látex PVA	
Esquadrias	Alumínio Comum	Apêndice F
Banheiros	Piso 35 - classe 2, piso 35 - classe 2, paredes 35- classe 3, louças 35 – classe 2, metais 35 classe 2	Apêndice G

Fonte: Plano A

No apêndice H apresentam-se mais algumas fotografias do Condomínio estudado com detalhe de alguns acabamentos.

4.3 Processo de coleta de dados

A quantificação das grandezas apresentadas na equação 5 para aplicação da metodologia de cálculo da energia embutida inicial ao estudo de caso apresentado exigiu o levantamento de dados e procedimentos de cálculo descritos nos tópicos seguintes. Para cada

variável da equação são apresentadas nos próximos itens as fontes de dados e são explicados eventuais processos de cálculos necessários para deixar a informação com as unidades corretas para uso na referida equação. As informações recolhidas foram introduzidas numa planilha de cálculo de forma a permitir a sua organização e uso nos cálculos. Agrupou-se a descrição das variáveis referentes a cada etapa do ciclo de vida em itens separados.

4.3.1 Energia Embutida nos Materiais

Conforme referido na metodologia de cálculo, a energia embutida nos materiais resulta do somatório do produto entre a quantidade do material utilizada na construção (Q_{Mi}) e o Coeficiente de energia embutida (EE_{Mi}) do respectivo material (conforme equação 2 atrás apresentada).

- *Cálculo de Q_{Mi}*

A empresa construtora não mantém informatizada a informação relativamente à compra e consumo dos materiais de construção utilizados na obra. Uma vez que a empresa constrói um empreendimento de cada vez, optou-se por coletar os tipos de materiais consumidos e respectivos quantitativos a partir das notas fiscais de compra de materiais de construção cujas datas de compra são coincidentes com o período de construção do empreendimento. Uma vez que os quantitativos dos materiais foram retirados das notas fiscais de compra, obtiveram-se quantitativos (Q_{Mi}) que incluem quer a quantidade efetivamente utilizada na construção quer a quantidade que acabou por resultar em desperdício ou material não utilizado, não tendo sido possível individualizar os três valores. Cabe também referir que os quantitativos levantados incluem os materiais consumidos na área externa do condomínio. Apesar da água ser um insumo fundamental para a construção civil, não foi possível quantificar o seu uso de forma a considerá-la no estudo de caso.

Para cada material de construção foi atribuído um material/produto acabado com respectivo valor de EE_{Mi} . Uma vez que os valores de energia embutida nos materiais geralmente são apresentados em unidades de energia por unidade de peso (MJ/kg) foi necessário converter as quantidades dos materiais de construção das notas fiscais para peso. As informações necessárias para realizar a conversão (peso específico, peso por peça, peso por metro, entre outros) foram obtidas a partir de diversas fontes tais como consulta do *site* ou

contato telefônico com a empresa produtora do material, visita ou contato telefônico com a loja vendedora do produto ou consulta de lojas virtuais de venda de materiais de construção.

Relativamente às madeiras compradas foi necessário proceder a cálculos específicos de forma obter as quantidades em peso. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) disponibiliza no seu site (IPT, 2017) informações técnicas sobre madeiras brasileiras e plantadas onde se apresenta a densidade aparente de diversas espécies de madeiras de acordo com o grau de umidade. A escolha do grau de umidade da madeira deverá ter em consideração que esta é higroscópica e irá absorver ou liberar umidade, dilatando-se ou contraindo-se, de modo a permanecer em equilíbrio com a umidade do ar circundante. Assim, para conversão das quantidades de madeira compradas (a maioria apresentada em metros cúbicos) para unidades de peso foram utilizados, sempre que disponíveis, os valores de densidade aparente de madeira com 15% de grau de umidade, por este se aproximar dos valores que estão em equilíbrio com a umidade relativa na maioria das cidades brasileiras de acordo com tabela retirada de Zenid (2009), qual se apresenta no anexo B. Para dois casos específicos foi necessário utilizar o valor da densidade aparente para um grau de umidade de 12% por indisponibilidade de dados relativos ao grau de umidade de 15%. No anexo C apresenta-se a lista das madeiras utilizadas na construção do condomínio residencial em estudo e o valor de densidade aparente utilizado com a respectiva fonte.

- *Cálculo de EE_{Mi}*

Conforme referido, a energia embutida nos materiais resulta das etapas de extração de matérias primas, transporte de matérias primas até à fábrica e manufatura (A1, A2 e A3) da figura 26. Assim, procurou-se valores de EE_{Mi} obtidos em análises do tipo “berço ao portão”, que considera todas as etapas até ao produto estar pronto na saída da fábrica.

Os coeficientes de energia embutida nos materiais (EE_{Mi}) foram recolhidos de diversas fontes através de levantamento bibliográfico ou análise estatística. Para os valores obtidos a partir de pesquisa bibliográfica, sempre que possível, foram selecionados valores representativos da realidade brasileira. Para além disso procurou-se dados relativos não só a materiais individuais – tais como madeira, alumínio, cimento, etc. - mas a produtos acabados – tais como torneira, concreto, etc. - a fim de evitar tanto quanto possível a necessidade de discriminar a composição dos produtos em materiais para obter o valor de energia embutida a

partir da energia embutida de cada uma dos seus constituintes (ex. metais sanitários, produtos para instalações elétricas, concreto, etc.). Quando não foi possível obter o valor da energia embutida do produto optou-se por considerar todo o peso do produto como sendo do material ou dos dois materiais de maior participação na sua composição.

Na tabela 43 do apêndice I apresenta-se o levantamento de Coeficientes de Energia Embutida de materiais a partir de estudos brasileiros. No caso dos materiais para os quais não foi encontrada referência nacional de EE_{Mi} utilizou-se o valor da base de dados do Inventory of Carbon and Energy (ICE) (HAMMOND E JONES, 2011). Trata-se de uma base de dados sobre materiais de construção criada na Universidad de Bath no Reino Unido e cuja versão mais recente ICE v2.0 foi lançada em 2011 (utilizada neste trabalho). Os dados disponibilizados pelo ICE são dados secundários coletados na literatura nomeadamente em revistas científicas, resultados de estudos de ACV, livros e artigos de conferências, que cumprem com os requisitos de metodologias e normas aceites, como a ISO 14040 e ISO 14044. O ICE foi escolhido como fonte de dados para o presente estudo por ser de acesso gratuito, apresentar os dados em Energia Primária e a fronteira de análise dos dados ser do tipo berço ao portão que vai de encontro às necessidades deste estudo. Em termos de representatividade geográfica, o ICE dá preferência sempre que possível a dados do Reino Unido mas em alguns casos são adotados valores estrangeiros relativos à Europa ou médias mundiais.

Na tabela 30 apresentam-se os valores de EE_{Mi} considerados para cada material com a respectiva fonte. Como critérios de seleção foi definido que seriam escolhidos valores brasileiros sempre que disponíveis e tão recentes quanto possível. Apenas no caso do concreto foi utilizado o valor do ICE mesmo tendo uma fonte brasileira pois esta apresentava um valor muito alto quer na comparação com referência internacionais quer na comparação com produtos de concreto em referências nacionais. Nos casos em que estavam disponíveis vários valores para escolha optou-se por utilizar o valor médio dos mesmos.

Tabela 30 – Coeficientes de Energia Embutida utilizados no estudo de caso

Material	EE MJ/kg	Fonte	País
Aço	16,90	Arcelormittal (2016)	Brasil
Aço	20,80	EPE (2016)	Brasil
Aço Galvanizado	32,46	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Aço inox	56,70	ICE v2.0	UK e Europa
Acrílico	55,3	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Adesivo	78,40	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Aditivo Imperm. argamassa	4,53	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Aguarrás	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Algodão	146,4	ICE v2.0	UK e Europa
Alumínio	98,20	Tavares (2006)	Brasil + Internacionais
Areia	0,02	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Argamassa	0,64	Silva (2013)	Brasil + Internacionais
Borracha	16,00	Rippel e Bragança (2009 ²⁸ apud Silva, 2013)	Brasil
Brita	0,02	Taborianski, Simoni e Prado, 2008 e Rossi, 2013	Brasil
Bronze	69,34	ICE v2.0	UK e Europa
Cal Hidratada	5,00	Taborianski, Simoni e Prado, 2008	Brasil
Cerâmica Branca	10,00	ICE v2.0	UK e Europa
Cerâmica Branca - Azulejo	10,80	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Cerâmica Branca - Louça	29,00	ICE v2.0	UK e Europa
Cerâmica Branca - Piso	6,90	Média do intervalo de Morais e Sposto (2010)	Brasil
Cerâmica Vermelha - Lajota	2,90	Média dos estudos brasileiros	Brasil

Continua

²⁸ RIPPEL, M.M.; BRAGANÇA, F.C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 818-826, 2009.

Continuação

Material	EE MJ/kg	Fonte	País
Cerâmica Vermelha - Telha	3,01	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Cerâmica Vermelha - Tijolo	2,91	Média dos estudos brasileiros	Brasil
Cimento	3,26	Média dos estudos desde 2006	Brasil
Cobre	14,31	Simões e Bajay, 2010	Brasil
Cola	78,40	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Concreto	0,74	ICE v2.0	UK e Europa
Ferro	25,00	ICE v2.0	UK e Europa
Fibra de Vidro	28,00	ICE v2.0	UK e Europa
Fibrocimento	3,55	Guimarães (1985 ²⁹ apud Sperb, 2000)	Brasil
Fundo Preparador	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Gesso	0,70	Bajay e Santana (2010)	Brasil
Grafiato	60,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Granito	1,03	Média do intervalo de Morais e Sposto (2010)	Brasil
Lã Sintética	37,33	ICE v2.0	UK e Europa
Latão	44,00	ICE v2.0	UK e Europa
Madeira	3,34	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)	Brasil
Mármore Sintético	0,48	Bibrián, Capilla e Usón (2011)	Internacionais
Massa Corrida Acrílica	65,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Massa Corrida PVA	65,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Óxido de Ferro	31,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Papel	24,80	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico	80,50	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - ABS	95,30	ICE v2.0	UK e Europa

Continua

²⁹ GUIMARÃES, G. D. Análise energética na construção de habitações. Rio de Janeiro, 1985. Dissertação de mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE, UFRJ.

Conclusão

Material	EE MJ/kg	Fonte	País
Plástico - Nylon	120,50	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - PEAD	76,70	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - Poliacetato de Vinila PVA	80,50	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - Polietileno	83,10	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - Polietileno de baixa densidade	78,10	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - Polipropileno	99,20	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - Poliuretano	102,10	ICE v2.0	UK e Europa
Plástico - PVC	74,33	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)	Brasil + Internacionais
Plástico - Termoplástico	95,30	ICE v2.0	UK e Europa
Rejunte	0,05	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Removedor	87,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Resina Epoxi	137,00	ICE v2.0	UK e Europa
Resina Sintética	97,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Selador	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Silicone	98,00	Lobo, 2010	UK e Europa
Solvente	67,9	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Textura Acrílica	65,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Thinner - Solvente Tolueno	67,90	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Tinta	73,06	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)	Brasil
Tinta Esmalte	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Tinta Verniz	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Tinta Zarcão	98,00	Lobo, 2010	Brasil + Internacionais
Vidro	20,80	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Vidro - Tijolo	22,90	MIC CETEC MG, 1982	Brasil
Zinco	16,60	Simões e Bajay, 2010	Brasil

Fonte: Elaboração própria

Cabe referir que os estudos de Simões e Bajay (2010) e Bajay e Santana (2010) apresentam dados obtidos por análise estatística de setores de Metais não ferrosos e Cal e Gesso. Também os dados relativos ao cimento e aço obtidos a partir do BEN para o ano de 2015 e do aço extraídos do relatório de sustentabilidade da Arcelor Mittal (2016) são valores resultantes de análise estatística.

Ainda relativamente aos dados de EE_{Mi} selecionados, considera-se relevante destacar que no caso do alumínio, da borracha e do cobre optou-se por assumir os valores de referências brasileiras apesar de apresentarem diferenças significativas para os valores internacionais. Considerou-se que a madeira para a cacharia não é reutilizada ou seja, o valor da sua energia embutida foi considerado na sua totalidade para este estudo.

4.3.2. Energia Embutida no transporte dos Materiais de Construção até à obra

Tal como atrás apresentado o valor da energia embutida no transporte depende da quantidade consumida do material (Q_{Mi}), da distância por ele percorrida (D_i) e o consumo de energia específico por modal de transporte de cargas (CE_{MT}).

- *Cálculo de Q_{Mi}*

Os procedimentos de cálculo e coleta de dados para determinar a quantidade consumida de cada material (Q_{Mi}) já foram explicados no tópico anterior.

- *Cálculo de D_i*

Relativamente à distância percorrida pelos materiais (D_i) cabe referir que a mesma resulta de dois trechos: distância entre a fábrica e o ponto de venda (D_{FVi}) e a distância entre o ponto de venda e a obra (D_{VOi}). Para determinar o valor de D_{FVi} foi necessário fazer o levantamento do local de fabricação dos materiais de construção utilizados na obra. Para tal foram efetuadas consultas aos *sites* ou contato telefônico para as empresas produtoras dos materiais. Uma vez obtida a lista de localidades de fabricação dos materiais, as distâncias das fábricas às localidades dos pontos de venda foram obtidas utilizando a ferramenta *Google*

Maps uma vez que a mesma calcula distâncias correspondentes a caminhos reais e não a distância em linha reta entre as localidades. Nos casos em que foi apresentada mais que uma opção de rota foi sempre considerada a mais rápida. Já no que respeita ao valor de D_{VOi} para cada material foi necessário identificar os pontos de vendas dos materiais de construção tendo-se assumido que os mesmos correspondem à localidade do endereço apresentado nas notas fiscais. Para os casos em que a localidade de venda é diferente da localidade da obra, a distância foi determinada utilizando mais uma vez a ferramenta *Google Maps*. Para os materiais com ponto de venda em Campo Grande (que correspondem a 93% dos materiais consumidos na obra) determinou-se através da ferramenta *Google Maps* a distância exata até à obra para os dez principais vendedores (responsáveis pela venda de 77% dos itens vendidos em Campo Grande) e para os restantes vendedores considerou-se um valor de 6,65 km correspondente à distância média dos dez principais vendedores à obra.

- *Cálculo de CE_{MT}*

Quanto ao consumo energético específico por modal de transporte de carga, conforme visto na revisão bibliográfica trata-se de uma grandeza apresentada em unidades energéticas por carga transportada (ex. MJ/tkm). Atendendo à predominância do transporte rodoviário na matriz de transporte de cargas no Brasil conforme visto na revisão bibliográfica e à localização da cidade de Campo Grande considerou-se que o transporte dos materiais de construção quer entre o local de venda e a obra, quer entre a fábrica e o ponto de venda foi realizado apenas por transporte rodoviário.

A estimativa para o valor de consumo de energia por carga transportada no transporte rodoviário no Brasil foi feita de acordo com dois cenários:

- Cenário 1: teve como dados de partida as eficiências de consumo de energia apresentadas no Inventário de Emissões por Veículos Rodoviários (MMA, 2014);
- Cenário 2: teve como base o consumo de energia no setor de transportes publicado no BEN.

Cabe referir que a necessidade do segundo cenário resultou do fato dos valores obtidos no cenário 1 terem-se revelado muito inferiores aos valores considerados nos estudos

brasileiros e apresentados na tabela 25 (item 3.5 desta tese). Nos próximos parágrafos apresenta-se detalhes dos cálculos efetuados para cada cenário.

- *Cenário 1*

A partir dos valores de consumo de Diesel por 100 km para cada categoria de veículos de carga³⁰ publicados em MMA (2014) e dos valores de Densidade e PCI do Diesel publicado em EPE (2016) determinou-se o consumo de energia por quilômetro (MJ/km) para cada categoria. Para chegar ao valor pretendido de consumo de energia por tonelada-quilômetro dividiu-se os valores de consumo de energia por quilômetro pela lotação média dos caminhões da categoria, determinada a partir de uma lista de modelos de caminhão em circulação publicada por GT (2017) onde são apresentados os valores de lotação³¹. Aos valores obtidos foi aplicado um fator de ocupação de 38% de acordo com Novo (2016). Na tabela 31 apresentam-se os dados utilizados e as respectivas fontes.

Tabela 31 – Dados utilizados para cálculo do valor de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 1

Grandeza	Valor	Fonte
Consumo específico de Diesel :	$L_{\text{Diesel}}/100\text{km}$	MMA (2014)
<i>Comerciais Leves</i>	9,01	
<i>Caminhões Semi-leves</i>	9,01	
<i>Caminhões Leves</i>	5,6	
<i>Caminhões Médios</i>	5,6	
<i>Caminhões Semi-pesados</i>	3,4	
<i>Caminhões pesados</i>	3,4	
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)

Continua

³⁰ Categorização feita com base no Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Combinado (PBTC) dos veículos. De acordo com o Código de Transito Brasileiro (BRASIL, 1997) define-se Peso Bruto Total como peso máximo que o veículo transmite ao pavimento, constituído da soma da tara mais a lotação e Peso Bruto Total Combinado peso máximo transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão-trator mais seu semi-reboque ou do caminhão mais o seu reboque ou reboques.

³¹ Lotação - carga útil máxima, incluindo condutor e passageiros, que o veículo transporta, expressa em quilogramas para os veículos de carga, ou número de pessoas, para os veículos de passageiros (BRASIL, 1997)

Conclusão

Grandeza	Valor	Fonte
PCI Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)
Fator de Ocupação	38%	Novo (2016)
Lotação Média dos caminhões	kg	GT (2017)
<i>Comerciais Leves</i>	1800	
<i>Caminhões Semi-leves</i>	2250,5	
<i>Caminhões Leves</i>	4853,9	
<i>Caminhões Médios</i>	9088,7	
<i>Caminhões Semi-pesados</i>	14325,1	
<i>Caminhões pesados</i>	19403,4	

Fonte: Elaboração Própria

Na tabela 32 apresentam-se os valores obtidos por categoria do veículo. Conforme referido, os valores apresentados, nomeadamente para os caminhões médios, semi-pesados e pesados, são significativamente inferiores aos valores encontrados nos estudos brasileiros sobre energia embutida (mesmo considerando o fator de ocupação incluído apenas em um dos estudos revisados).

Tabela 32 – Valores de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 1

Categoria de Caminhão	CE _{Mi} (MJ/tkm)
<i>Comerciais Leves</i>	4,81
<i>Caminhões Semi-leves</i>	3,74
<i>Caminhões Leves</i>	1,08
<i>Caminhões Médios</i>	0,58
<i>Caminhões Semi-pesados</i>	0,22
<i>Caminhões pesados</i>	0,16

Fonte: Elaboração Própria

- *Cenário 2*

Neste cenário considerou-se o consumo de Diesel no setor rodoviário publicado no BEN e a quantidade de carga transportada no Brasil avaliada em tkm. A quantidade anual de toneladas-quilômetro movimentadas no Brasil foi retirada de EPE (2012) para o ano de 2010. Quanto ao consumo de Diesel, obteve-se o valor da quantidade consumida no transporte rodoviário total (cargas e passageiros) para 2010 em EPE (2011). De forma a calcular o consumo de Diesel apenas no transporte de cargas, utilizou-se os dados encontrados em EPE (2012) relativos ao consumo de Diesel no transporte de passageiros. Para as conversões entre litros de Diesel e respectiva energia foram utilizados os valores de densidade e PCI publicados por EPE (2016). Na tabela 33 apresentam-se os dados utilizados e as respectivas fontes.

Tabela 33– Dados utilizados para cálculo do valor de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 2

Grandeza	Valor	Fonte
Toneladas – quilometro transportadas 2010	634 bilhões tkm	EPE (2012)
Consumo de Diesel no transporte Rodoviário em 2010	32,639 milhões tep	EPE (2011)
Consumo de Diesel no transporte rodoviário de passageiros em 2010	6,1 milhões de tep	EPE (2012)
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)
PCI Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)

Fonte: Elaboração Própria

Na tabela 34 apresentam-se os valores obtidos.

Tabela 34 – Valores de consumo energético específico por categoria de veículo rodoviário de carga no cenário 2

Categoria de Caminhão	CE _{Mi} (MJ/tkm)
<i>Comerciais Leves</i>	1,76
<i>Caminhões Semi-leves</i>	1,76
<i>Caminhões Leves</i>	1,76
<i>Caminhões Médios</i>	1,76
<i>Caminhões Semi-pesados</i>	1,76
<i>Caminhões pesados</i>	1,76

Fonte: Elaboração Própria

A atribuição de cada tipo de veículo às distâncias D_{VOi} e D_{FVi} foi feita com base na classificação de cada distância de acordo com um de quatro tipos de transporte:

- Entrega urbana - distâncias entre pontos de venda e obra dentro da cidade Campo Grande;
- Transporte Regional Cidade - distâncias entre ponto de venda e ponto de produção dentro da mesma cidade;
- Transporte Regional - distâncias entre localidades dentro de um mesmo estado;
- Transporte Interestadual - distâncias entre localidades situadas em diferentes estados;

A relação entre as categorias de caminhões e os tipos de transporte definidos foi feita de acordo com a tabela 35. Nos tipos de transportes para os quais foi considerado mais que uma categoria de veículo, o valor de CE_{Mi} é a média dos CE_{Mi} individuais calculados.

Tabela 35 – Consumo Energético Específico de cada categoria de veículo de carga de acordo com o tipo de transporte para os Cenários 1 e 2

Tipo de Transporte	Categorias de veículos de carga	CE_{Mi} Cen 1 (MJ/tkm)	CE_{Mi} Cen 2 (MJ/tkm)
Entrega Urbana	Comercial leve e Caminhão Semileve	4,27	1,76
Transporte Regional Cidade	Caminhão Semileve e Caminhão Leve	2,41	1,76
Transporte Regional dentro do mesmo estado	Caminhão médio	0,58	1,76
Transporte interestadual	Caminhão Semipesado e Pesado	0,19	1,76

Fonte: Elaboração Própria.

4.3.3 Energia Embutida na obra

Conforme visto na definição da metodologia de cálculo, a energia embutida na obra foi calculada considerando o uso de equipamentos e o transporte de resíduos.

Em primeiro lugar fez-se um levantamento dos equipamentos utilizados, informação que foi obtida através de entrevistas informais ao mestre de obras e aos proprietários da empresa Plano A. Para cada equipamento procurou-se identificar o tipo de energia consumida. A informação obtida encontra-se na tabela 36.

Tabela 36 – Equipamentos utilizados na obra

Etapas da Obra	Equipamento	Fonte de Energia	Propriedade
Terraplanagem	Caminhão caçamba com basculante	Óleo Diesel	Empresa Contratada I
Fundação do tipo Strauss	Bate-estacas Strauss	Energia Elétrica	Empresa Contratada II
	Caminhão betoneira	Óleo Diesel	Empresa Contratada III
	Caminhão bomba	Óleo Diesel	Empresa Contratada III
Lajes	Caminhão betoneira	Óleo Diesel	Empresa Contratada III
	Caminhão bomba	Óleo Diesel	Empresa Contratada III
Restantes etapas	Serra circular	Energia Elétrica	Plano A
	Betoneira	Energia Elétrica	Plano A
	Furadeira	Energia Elétrica	Plano A
	Martelete	Energia Elétrica	Plano A
	Lixadeira	Energia Elétrica	Plano A
	Máquina de solda	Energia Elétrica	Plano A
	Mangote (vibrador)	Energia Elétrica	Plano A
	Serra mármore Makita	Energia Elétrica	Plano A
	Guinchos	Energia Elétrica	Plano A
Todas as etapas	Caminhão caçamba com guindaste	Óleo Diesel	Contratada IV
Administração	Geladeira	Energia Elétrica	Plano A
	Freezer	Energia Elétrica	Plano A
	Pendentes	Energia Elétrica	Plano A
	Cerca elétrica	Energia Elétrica	Plano A
	Sensores	Energia Elétrica	Plano A

Fonte: Elaboração própria a partir de entrevista com mestre de obras e proprietários da empresa Plano A.

Para os equipamentos cuja fonte de energia é energia elétrica optou-se por coletar os consumos registrados pela concessionária durante o período da obra, ou seja entre Abril de 2013 e Junho de 2016. Os valores obtidos encontram-se listados na tabela do Apêndice J. Não foi possível obter o valor de consumo de energia dos dois primeiros meses. Os valores foram convertidos para MJ.

Conforme se observa na tabela 34, foram utilizados na obra quatro equipamentos cuja fonte de energia é o Diesel: caminhão caçamba com basculante; caminhão betoneira, caminhão bomba e caminhão caçamba com guindaste.

O caminhão caçamba com basculante foi utilizado na fase de terraplanagem para transporte de arenito usado para aterro. O mesmo pode ser visualizado na figura 31.

Figura 31 – Fotografia do Caminhão caçamba com basculante utilizado para transporte de arenito na etapa de terraplanagem

Fonte: Plano A.

O consumo de energia relativa transporte da areia para terraplanagem foi calculado com base nos dados obtidos junto da empresa que realizou o serviço, aqui designada por Empresa Contratada I. A empresa informou um intervalo de consumo em função do peso transportado pelo caminhão, tendo-se optado por considerar a média do intervalo. Na tabela 37 listam-se os dados utilizados para o cálculo do consumo de energia pelo caminhão caçamba com basculante.

Tabela 37 - Dados para cálculo do consumo energético do caminhão caçamba com basculante utilizado para transporte de arenito na etapa de terraplanagem

Informação	Valor	Fonte
Número de Viagens	71	Notas fiscais fornecidas pela Plano A
Combustível	Diesel	Empresa Contratada I
Consumo específico	1,5 a 9 km/L	Empresa Contratada I
Distância ao local de origem do arenito	20 km	Empresa Contratada I
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)
PCI do Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)

Fonte: Elaboração própria.

Na etapa de execução das fundações e das lajes a empresa construtora recorreu a uma outra empresa aqui designada por empresa contratada II para realizar os serviços de concretagem, onde foram utilizados como equipamentos o caminhão betoneira e o caminhão bomba. A figura 32 apresenta imagem da utilização do caminhão bomba durante a concretagem.

Figura 32 – Caminhão betoneira e caminhão bomba em utilização na obra na execução de serviços de concretagem

Fonte: Plano A

Os dados utilizados para cálculos do consumo energético do caminhão betoneira encontram-se na tabela 38. Relativamente ao número de viagens cabe referir que o valor foi estimado recorrendo ao somatório das quantidades de concreto referidas nas notas fiscais de

serviços de concretagem e à capacidade do caminhão betoneira utilizado pela empresa contratada II.

Tabela 38 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão betoneira utilizado nos serviços de concretagem

Informação	Valor	Fonte
Quantidade de concreto bombeado	451 m ³	Notas fiscais fornecidas pela Plano A
Capacidade do caminhão	8 m ³	Empresa Contratada II
Combustível	Diesel	Empresa Contratada II
Consumo específico	4 km/L	Empresa Contratada II
Distância da empresa contratada II até à obra	4,7 km	Google Maps
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)
PCI do Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)

Fonte: Elaboração própria.

Os dados utilizados para o cálculo do consumo do caminhão bomba encontram-se na tabela 39. Assumiu-se que a concretagem de cada elemento de cada bloco (fundações, baldrame e as três lajes) exigiu o funcionamento do equipamento durante um dia o que resultou em uma estimativa de 15 viagens do caminhão bomba à obra. O concreto utilizado para concretagem foi produzido nas instalações da empresa que executou o serviço. A empresa não soube informar o consumo por hora de bombeamento.

Tabela 39 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão bomba utilizado nos serviços de concretagem

Informação	Valor	Fonte
Combustível	Diesel	Empresa Contratada II
Consumo específico	2 km/L	Empresa Contratada II
Distância da empresa contratada II até à obra	4,7 km	Google Maps
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)
PCI do Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)

Fonte: Elaboração própria

Como último equipamento tendo o Diesel como fonte energética refere-se o caminhão caçamba com guindaste utilizado para transportar as caçambas necessárias para retirada do entulho da obra, serviço executado durante todo o período de duração da obra. Na figura 33 apresenta-se um exemplo de caçamba retirada da obra onde se observam diferentes tipos de materiais com destaque para embalagens de produtos.

Figura 33 – Caçamba com entulho retirado da obra

Fonte: Autora.

A tabela 40 apresenta detalhe dos dados utilizados para cálculo do seu consumo energético.

Tabela 40 – Dados para cálculo do consumo energético do caminhão caçamba com guindaste utilizado retirar o entulho da obra

Informação	Valor	Fonte
Número de Viagens	121	Notas fiscais fornecidas pela Plano A
Combustível	Diesel	Empresa Contratada IV
Consumo específico	2,5 km/L	Empresa Contratada IV
Distância ao aterro para disposição do entulho	26 km	Empresa Contratada IV
Densidade do Diesel	840 kg/m ³	EPE (2016)
PCI do Diesel	10100 kcal/kg	EPE (2016)

Fonte: Autora e EPE (2016)

4.3.4 Fator de Conversão para Energia Primária e Consumo de energia não renovável

Conforme referido na revisão bibliográfica, a energia embutida deverá ser avaliada em termos de energia primária pela relação das fontes de energia não renováveis com o impacto ambiental, nomeadamente no que respeita às emissões de gases de efeito de estufa e exploração de recursos primários.

Desta forma, foi necessário converter os dados quantificados em energia secundária para energia primária determinando os Fatores de Conversão que refletissem o mix de fontes de energia consumidas em cada etapa considerada para o cálculo da energia embutida.

Em primeiro lugar, fez-se um levantamento das fontes de energia consumidas em cada etapa da energia embutida. A partir dos dados do BEN (EPE, 2016), apresenta-se na tabela 41 o mix de fontes de energia consumidas no setor industrial brasileiro como um todo e nos setores relacionados com a produção de materiais de construção.

Tabela 41 – Mix de fontes de energia consumidas no setor industrial brasileiro

	Industrial	Cimento	Ferro Gusa e Aço	Mineração e Pelotização	Não Ferrosos e outros metalúrgicos	Químico	Cerâmica
Gás Natural	11,8%	0,2%	7,4%	19,6%	10,5%	33,1%	28,7%
Carvão vapor	4,6%	1,5%	12,9%	12,5%	12,2%	2,6%	1,3%
Lenha	8,8%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	50,1%
Produtos da Cana	18,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Primárias	8,3%	7,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	1,3%
Óleo Diesel	1,3%	1,3%	0,2%	11,8%	0,2%	0,3%	0,5%
Óleo Combustível	2,6%	0,2%	0,0%	5,0%	21,9%	2,6%	1,3%
GLP	1,1%	0,3%	0,2%	0,7%	0,6%	1,2%	3,7%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gás de Cidade	1,4%	0,0%	6,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque Carvão Mineral	9,3%	1,5%	45,0%	1,8%	4,3%	0,0%	0,0%
Electricidade	20,0%	13,0%	9,7%	32,7%	41,0%	28,9%	7,3%
Carvão Vegetal	3,9%	2,3%	16,9%	0,0%	0,2%	0,3%	0,0%
Outras Secundárias derivadas de petróleo	8,6%	71,3%	0,2%	15,9%	9,0%	29,1%	5,7%
Outras Primárias C. Min	0,1%	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: EPE, 2016.

Quanto ao transporte, conforme referido no ponto 4.3.2, considerou-se o transporte rodoviário de cargas cuja fonte de energia é o Diesel, sendo que no Brasil existe um percentual obrigatório de mistura de biodiesel atualmente fixado em 8%. Na fase da construção, foi consumida eletricidade e Diesel.

Em segundo lugar procurou-se dados sobre os requisitos energéticos da energia para as diferentes fontes energéticas consumidas no Brasil. Relativamente à energia elétrica, foi utilizado um valor médio do Fator de Conversão de eletricidade em energia primária para o Brasil considerando os anos 2011 a 2015, de acordo com Fagá et al. (2016³² apud RUPP; LAMBERTS, 2017). Para as restantes fontes energéticas foram utilizados os valores encontrados em Czachoski e Leslie (2009) e Boustead e Hancock (1979). A tabela 42 apresenta os valores assim compilados:

Tabela 42 – Fatores de Conversão para Energia Primária

Fonte de Energia	Fator de Conversão	Fonte
Gás Natural	1,07	Czachoski e Leslie (2009)
Carvão vapor	1,05	Czachoski e Leslie (2009)
Lenha	1,09	Czachoski e Leslie (2009)
Produtos da Cana	1,09	Czachoski e Leslie (2009)
Óleo Diesel	1,16	Czachoski e Leslie (2009)
Óleo Combustível	1,12	Czachoski e Leslie (2009)
GLP	1,09	Czachoski e Leslie (2009)
Querosene	1,16	Czachoski e Leslie (2009)
Gás de Cidade	1,39	Boustead e Hancock (1979)
Coque Carvão Mineral	1,15	Czachoski e Leslie (2009)
Eletricidade	1,60	Fagá et. al (2016 apud RUPP ; LAMBERTS, 2017)
Carvão Vegetal	1,09	Czachoski e Leslie (2009)
Outras Secundárias derivadas de petróleo	1,16	Czachoski e Leslie (2009)
Outras Primárias	1,13	Média sem eletricidade

Fonte: Czachoski e Leslie (2009), Fagá et. Al (2016)

³² FAGÁ, M.W.; DOS SANTOS, E.M.; FOSSA, A.J.; CROSO, T.; CHAGURI, J.J. Eficiência Energética em Edificações – Análise da Energia no Aquecimento de Água: Fatores de Energia Primária e Emissão de CO₂. Relatório atividade 5a – revisão 7. Novembro de 2016.

Considerando o mix de fontes de energia apresentados na tabela 41 e os fatores de conversão da tabela 42 determinaram-se novos fatores de conversão para cada etapa de cálculo da energia embutida. Atendendo ao mix de fontes de energia determinou-se também a participação de fontes não renováveis nos consumos energéticos de cada etapa. Os valores obtidos são apresentados na tabela 43.

Tabela 43 – Fatores de conversão para energia primária e participação de fontes renováveis em cada etapa da EEi

Etapa	Fonte	FC	% Fontes não renováveis
Construção	Diesel	1,16	92,0%*
	Eletricidade	1,60	24,5%
Transportes	Diesel	1,16	92,0%*
Industrial	Mix	1,21	50,5%
Cimento	Mix	1,21	83,6%
Ferro Gusa e Aço	Mix	1,18	75,8%
Mineração e Pelotização	Mix	1,27	75,3%
Não Ferrosos e outros metalúrgicos	Mix	1,31	68,9%
Químico	Mix	1,25	76,7%
Cerâmica	Mix	1,13	43,8%

* Valor que tem em conta a mistura de 8% de biodiesel

Fonte: Elaboração Própria

Os fatores de conversão determinados foram aplicados a todos os dados utilizados exceto para os Coeficientes de Energia Embutida dos materiais obtidos de ICE (HAMMOND e JONES, 2011) e Silva (2013) cujo valor já corresponde a Energia Primária.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Conforme definido, o objetivo geral deste trabalho é calcular a energia embutida na fase pré-operacional do ciclo de vida (Energia Embutida inicial) de um condomínio residencial na cidade de Campo Grande em Mato Grosso do Sul. No capítulo anterior fez-se a descrição do método de cálculo utilizado e dos procedimentos de coleta de dados. No presente capítulo apresentam-se os resultados do estudo de caso e discute-se a sua interpretação no contexto da energia embutida nas edificações brasileiras e face aos objetivos definidos para a pesquisa.

- *Coleta de dados*

Em primeiro lugar tecem-se alguns comentários ao processo de coleta de dados. Conforme referido, os dados coletados para cálculo da energia embutida no condomínio residencial The Capital foram introduzidas numa planilha com vista à sua organização e uso nas equações definidas no método de cálculo. Na tabela 44 apresentam-se as colunas da planilha de cálculo desenvolvida com a respectiva descrição da sua função na determinação do resultado. A sequência de colunas seguiu a ordem dos cálculos apresentados no método. A título de exemplo, no apêndice K apresenta-se a planilha com alguns registros preenchidos.

Tabela 44 – Descrição das colunas da planilha desenvolvida para cálculo da EEi no condomínio residencial The Capital

Coluna	Descrição
<i>Informações das notas fiscais</i>	
A	Fornecedor
B	Número da nota fiscal
C	Descrição material
D	Marca
E	Quantidade comprada
F	Unidades
<i>Cálculo de Q_{Mi}</i>	
G	Peso Unitário (kg) ou Peso específico (kg/m ³)
H	Q_{Mi}

Continua

Continuação

Coluna	Descrição
<i>Cálculo de EE_M</i>	
I	Material
J	Coefficiente de Energia Embutida do material CE_{Mi} (MJ/kg)
K	Fonte
L	Energia embutida no material EE_{Mi} (MJ)
M	Fator de Conversão
N	EE_{Mi} em Energia Primária (MJ)
O	EE_{Mi} em Energia Primária Não Renovável (MJ)
<i>Cálculo de EE_{TM}</i>	
P	Local da Obra
Q	Local da Venda
R	Local da Produção
S	Distância entre o local de venda e da obra D_{VOi} (km)
T	Tipo de Transporte D_{VOi}
U	Consumo específico do modal de transporte CE_{MT} (MJ/tkm)
V	Energia Embutida no transporte D_{VOi} (MJ)
W	Distância entre o local de produção e da venda D_{VOi} (km)
X	Tipo de Transporte D_{FVi}
Y	Consumo específico do modal de transporte CE_{MT} (MJ/tkm)
Z	Energia Embutida no transporte D_{FVi} (MJ)
AA	Energia embutida no transporte do material EE_{TMi} (MJ)
AB	EE_{TMi} em Energia Primária (MJ)
AC	EE_{TMi} em Energia Primária Não Renovável (MJ)

Fonte: Elaboração Própria.

Quanto à etapa da construção, os cálculos foram realizados em uma outra planilha uma vez que não dependem das quantidades de materiais consumidos.

Relativamente à completude dos dados coletados, cabe referir que dos quantitativos levantados a partir das notas fiscais foram introduzidos 2968 registros na planilha, sendo que em 111 casos (3,7%) não foi possível determinar a quantidade em peso por não ter sido encontrada informação sobre o peso unitário do produto. Contudo, 55 desses 111 registros dizem respeito a produtos do sistema elétricos tipicamente com baixa dimensão e baixo peso pelo que se estima que a contribuição dos itens em falta para o total do edifício avaliada em peso seja inferior a 5%. Ainda relativamente à falta de dados, em 98 dos registros (3,3%) não foi possível obter informação sobre o local de produção do material em causa pelo que o consumo de energia consumida no transporte nesses casos ficou incompleto. No total,

em 177 registros (6,0%) o consumo de energia nas etapas de fabricação dos materiais ou do transporte ficou incompleto.

- *Resultados Gerais*

Em segundo lugar apresentam-se os valores obtidos para a Energia Embutida inicial do condomínio residencial The Capital situado em Campo Grande no estado de Mato Grosso do Sul. Conforme explicado no capítulo anterior, foram criados dois cenários quanto ao consumo de energia específico no transporte rodoviário de cargas necessário para determinar o consumo de energia embutida na etapa do transporte de materiais de construção: o cenário 1 partiu das eficiências de consumo por tipo de veículo de transporte de cargas apresentadas no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários; o cenário 2 baseou-se no consumo anual de energia do setor de transportes e no total de carga transportada no Brasil. Dessa forma, os resultados vêm apresentados de acordo com dois cenários que diferem apenas no consumo de energia na etapa do transporte, sendo que nas restantes etapas os consumos considerados foram os mesmos.

No gráfico da figura 34 apresentam-se os valores de EEi total do condomínio residencial estudado: 15351 GJ para o cenário 1 e 16994 GJ para o cenário 2. O valor apresentado para o cenário 2 é 10,7% superior ao do cenário 1, diferença explicada pelo consumo na etapa do transporte. Ainda na figura 34 apresenta-se a participação das fontes energéticas no valor de EEi quanto à sua renovabilidade sendo que no cenário 1 a participação de energias não renováveis foi de 61,2% e no cenário 2 foi de 64,2%. É interessante destacar que tais valores são superiores à contribuição de energias não renováveis na matriz energética brasileira (58,3%) o que comprova que as atividades relacionadas com a construção apresentam elevado impacto ambiental no contexto econômico brasileiro.

Figura 34 – Valor total de EEi em cada cenário e participação de fontes não renováveis

Fonte: Elaboração própria

O valor de EEi apresentado resultou do somatório dos consumo energéticos em cada etapa até à conclusão da construção do condomínio estudado, nomeadamente fabricação de materiais, o transporte de materiais de construção e a construção propriamente dita. Cabe relembrar, conforme destacado no capítulo anterior, que no contexto do estudo de caso analisado, a etapa dos materiais inclui os consumos energético da extração de matérias primas, o transporte das matérias primas até à fábrica e a manufatura dos materiais de construção. Na figura 35, apresenta-se a contribuição de cada etapa para o valor de EEi. Observa-se que nos dois cenários a etapa de produção dos materiais foi a maior consumidora de energia com participações de 96,1% no cenário 1 e 86,8% no cenário 2. Quanto ao transporte, o seu peso na EEi variou consideravelmente entre os dois cenários, sendo 3,2% no cenário 1 e 12,6% no cenário 2. Em termos absolutos, o consumo de energia no transporte do cenário 2 foi cerca de 332% superior ao do cenário 1. Relativamente à etapa da construção, a sua contribuição foi pouco significativa com percentuais de 0,7% no cenário 1 e 0,6% no cenário 2. Cabe referir que o perfil apresentado está de acordo com o esperado tendo em conta a revisão bibliográfica feita no item 3.5 sobre estudos de energia embutida no Brasil.

Figura 35 – Contribuição do consumo de energia embutida de cada etapa para o valor da energia embutida inicial

Fonte: Elaboração própria

Também para as três etapas consideradas, apresenta-se na figura 36 o grau de não-renovabilidade da energia consumida. Verifica-se que a participação de fontes não renováveis em cada etapa foi de 60,9% nos materiais, 92,0% no transporte e 29,6% na construção. O consumo de energia não renovável na fabricação dos materiais reflete o mix de fontes de energia consumidas na indústria de manufatura de materiais de construção. Já no que respeita ao transporte o elevado valor é explicado pela dependência do transporte de cargas no Brasil em relação ao Diesel, fonte de energia fóssil. O baixo valor de consumo de energia não renovável na etapa da construção (em comparação às restantes etapas) é explicado pelo elevado consumo de eletricidade cuja matriz de oferta interna no Brasil apresenta uma elevada participação de fontes renováveis. Uma vez que as fontes de energia consumidas no transporte rodoviário de cargas são quase na totalidade de origem não renovável (92%), a maior participação do transporte no cenário 2 explica o maior consumo de energias não renováveis em termos totais neste cenário, conforme apresentado na figura 34.

Figura 36 – Participação de energia não renovável em cada etapa

Fonte: Elaboração própria

Para efeitos de comparação com outros estudos publicados na literatura apresenta-se no gráfico da figura 37 o valor de EEi por unidade de área. O valor do cenário 1 foi de 4,99 GJ/m² e do cenário 2 foi de 5,52 GJ/m².

Figura 37 – Energia embutida inicial por unidade de área

Fonte: Elaboração própria

Conforme sugerido em Yokoo e Yokoyama (2016) apresentam-se na figura 38 os valores discriminados para cada fronteira de análise tendo em conta as etapas incluídas do ciclo de vida do edifício incluídas: berço ao portão que inclui as etapas de fabricação dos materiais (4,80 GJ/m²); berço ao local que inclui para além da produção dos materiais a etapa de transporte dos materiais de construção até ao local da obra (4,96 GJ/m² no cenário 1 e 5,49 GJ/m² no cenário 2); e berço à entrega que inclui todas as etapas até à finalização da construção do edifício (4,99 GJ/m² no cenário 1 e 5,52 GJ/m² no cenário 2).

Figura 38 – Energia embutida de acordo com a fronteira de análise

Fonte: Elaboração Própria

No gráfico da figura 39 apresenta-se a comparação dos valores obtidos com os estudos brasileiros revisados no item 3.5. Os valores utilizados para comparação são os mesmos apresentados na tabela 23 e correspondem a uma restrição de fronteira de análise à fase de pré-uso e com unidades por área construída dos resultados dos trabalhos revisados de forma a permitir a sua comparação com o presente trabalho. Observa-se que apenas dois estudos apresentam valor de EEi superior ao valor calculado na presente tese – Graf e Tavares (2010) com um valor de 5,7 GJ/m² e Silva (2013) com um valor de 20,4 GJ/m². Cabe referir que tanto o valor de Graf e Tavares (2010) quanto de Silva (2013) dizem respeito edifícios residenciais de alto padrão e que o último estudo, apresenta os valores em consumo de energia primária. Assim apontam-se como possíveis razões para as diferenças apresentadas as técnicas construtivas e os materiais empregados, bem como os valores de Coeficientes de Energia Embutida selecionados. Com efeito, o padrão do edifício influencia o tipo e quantidade dos materiais empregados, em particular nos acabamentos. Para além disso, conforme visto na revisão bibliográfica existe enorme variabilidade nos valores de energia embutida por material publicados na literatura. Contudo, a apuração das razões que efetivamente explicam tal diferença requer um estudo mais aprofundado das referidas pesquisas.

Com exceção dos valores de Graf e Tavares (2010) e Silva (2013), os valores de EEi calculados neste trabalho são superiores aos restantes valores publicados por outros trabalhos brasileiros sobre o tema. Tal fato pode estar relacionado com um conjunto de fatores, nomeadamente:

- Os quantitativos de materiais no presente estudo foram obtidos a partir das quantidades efetivamente compradas o que corresponde às quantidades “as built” do edifício e ao desperdício real por oposição a quantidades projetadas e estimadas, tal como verificado nos restantes estudos;
- O emprego de técnicas construtivas diferentes, embora os materiais mais utilizados neste estudo correspondam ao padrão construtivo brasileiro (estrutura de concreto armado e alvenaria de blocos cerâmicos) utilizado também na maioria dos estudos revisados;
- Diferenças nos Coeficientes de Energia Embutida dos materiais considerados;
- O valor de EEi neste estudo foi avaliado em energia primária enquanto que, conforme visto no item no item 3.5, apenas três autores (Tavares (2006), Lobo

(2010) e Silva (2013)) declaram ter avaliado o consumo de energia embutida em energia primária, estudos que apresentaram valores mais próximos dos obtidos neste trabalho.

Cabe destacar que no presente estudo, a diferença dos valores de EEi avaliados em energia consumida e energia primária foi de aproximadamente 15%. Caso os resultados fossem apresentados em energia consumida, o cenário 1 teria valor de 4,3 GJ/m² e o cenário 2 seria 4,8 GJ/m², resultados que continuariam a ser superiores à grande maioria dos estudos. Assim, a comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados de outros estudos brasileiros, sugere que o fato de o presente estudo apresentar os resultados em Energia primária é um fator que contribui para explicar o seu maior valor face à maioria dos outros resultados, mas que outros fatores contribuem para esse fato. Contudo, seria preciso comparar os Coeficientes de Energia Embutida nos materiais utilizados neste trabalho com os dos outros estudos para determinar se as diferenças obtidas estão relacionadas com os dados de energia embutida nos materiais ou com a forma como os materiais foram quantificados. Desta forma não é possível concluir se o fato de a EEi neste trabalho ter sido calculada a partir de quantidades reais é um fator determinante para explicar o maior valor obtido face aos restantes trabalhos brasileiros publicados.

Figura 39 – Comparação dos resultados obtidos com os valores dos estudos brasileiros revisados

Fonte: Elaboração própria

- *Materiais*

Quanto à energia embutida nos materiais, conforme descrito, é um valor que resulta da multiplicação das quantidades de cada material pelo coeficiente de energia embutida respectivo. Tal como referido, usaram-se sempre que possível valores com cobertura geográfica nacional. Os resultados mostram que os valores brasileiros correspondem a 84,5% do valor de energia embutida calculada para a fase dos materiais (75,3% se avaliado em termos de massa). Ainda relativamente a esta etapa determinou-se os materiais com maior contribuição quer em termos de massa quer em termos de energia embutida. Na figura 40 apresenta-se o perfil de consumo de materiais em termos de massa. Observa-se que os materiais com maior contribuição foram a areia (31,8%), o concreto (24,5%) e a cerâmica vermelha (21,7%), cuja contribuição agregada foi de 78,0%.

Figura 40 – Perfil da contribuição individual dos materiais avaliada em massa

Fonte: Elaboração própria.

No gráfico da figura 41 apresentam-se agora os perfis de contribuição individual de cada material para o valor de EEi nos dois cenários. Observa-se que a contribuição dos diferentes materiais é muito diferente face à verificada no perfil de contribuição em termo de

massa. Com base no gráfico da figura 41 os três materiais com maior contribuição são a cerâmica vermelha (com 29,8% no cenário 1 e 32,2% no cenário 2), o cimento (com aproximadamente 13% nos dois cenários) e a massa corrida PVA (com 8,1% no cenário 1 e 7,3% no cenário 2). As diferenças entre os dois cenários não são significativas sendo que os 10 materiais mais consumidores de energia são os mesmos nos dois cenários. É interessante destacar que os 3 materiais que mais contribuem para o valor de energia embutida respondem por 50,9% de toda a EEi nos materiais no cenário 1 e 52,3% no cenário 2. Quando considerados os 10 materiais com maior contribuição, este valor sobe para 88,1% e 87,7% para o cenário 1 e cenário 2 respectivamente. Cabe referir que a exclusão do consumo para transporte não alterou o perfil significativamente.

Figura 41 – Perfil da contribuição individual dos materiais para a EEi

Fonte: Elaboração própria.

Ainda relativamente aos materiais, tecem-se alguns comentários aos valores de Coeficientes de Energia Embutida utilizados. Conforme definido nos objetivos, fez-se um levantamento de valores brasileiros que foram utilizados no estudo caso de forma a obter-se um boa representatividade geográfica do resultado desta pesquisa. Contudo cabe referir que é preciso mais estudos sobre energia embutida em materiais brasileiros, obtidos de diferentes unidades produtivas situadas em diferentes localidades, para que seja possível formar amostras de valores para cada material que representem o mercado dos setores de produção de

materiais de construção, cobrindo as diferenças entre unidades produtivas quanto ao emprego de tecnologias, eficiência de processo e localização.

- *Transporte dos materiais de construção*

Neste subitem discutem-se os resultados relativos à etapa de transporte dos materiais de construção. Conforme definido no capítulo do estudo de caso, o transporte foi calculado tendo em conta as distâncias percorridas por cada material e o consumo energético do modal de transporte utilizado, neste caso o transporte rodoviário de cargas.

Quanto às distâncias percorridas, o seu valor tem em conta a distância percorrida pelo material entre o ponto de produção e o ponto de venda e a distância percorrida entre o ponto de venda e a obra. No total, estima-se que os materiais de construção utilizados na obra do condomínio residencial The Capital tenham percorrido 2434752 km. Deste valor, 93,9% corresponde ao transporte dos materiais entre a fábrica e o ponto de venda. A distância percorrida pelos materiais foi ainda classificada de acordo com quatro categorias atendendo ao tipo de transporte: entrega urbana, transporte regional na cidade; transporte regional dentro do estado e transporte interestadual. No gráfico da figura 42, apresenta-se o perfil da distância percorrida de acordo com estas quatro categorias. Observa-se que a quase totalidade de quilômetros percorridos correspondem a percursos interestaduais o que demonstra a dependência do Estado de Mato Grosso do Sul face a outros estados relativamente ao fornecimento de materiais de construção, ou seja trata-se de um Estado com pouca presença de empresas produtoras de materiais de construção.

Figura 42 – Perfil da distância percorrida pelos materiais de construção de acordo com tipo de transporte

Fonte: Elaboração própria.

Com efeito, conforme se verifica por análise do gráfico da figura 43 onde se discrimina a distribuição dos locais de produção dos materiais de construção por estado, 19% dos materiais foram produzidos em Mato Grosso do Sul enquanto que os restantes foram fornecidos por outros estados com destaque para São Paulo (47%), Santa Catarina (10%) e Rio Grande do Sul (6%). Quanto aos materiais produzidos em Mato Grosso do Sul incluem-se o cimento, a pedra e a areia.

Figura 43 – Estados produtores dos materiais comprados para a obra do condomínio residencial The Capital

Fonte: Elaboração própria

Relativamente ao consumo energético do transporte, conforme já referido, o seu valor foi avaliado segundo dois cenários quanto ao valor do consumo energético por unidade de carga transportada (MJ/tkm) no transporte rodoviário (tabelas 32 e 34 do item 4.3.2). No gráfico da figura 44 apresenta-se a participação de cada tipo de distância agora avaliada em termos de contribuição para o valor do consumo energético do transporte. Observa-se que nos dois cenários o transporte interestadual é o que registra maior contribuição, mas os dois cenários apresentam valores muito diferentes: 37,7% no cenário 1 e 79,5% no cenário 2. Cabe relembrar que no cenário 1 estimou-se um valor de consumo por unidade carga transportada (MJ/tkm) diferenciado por tipo de transporte, com valores mais elevados para distâncias curtas feitas por veículos de baixa capacidade e valores mais baixos para caminhões, tanto mais baixo quanto maior a sua capacidade de carga. Já no cenário 2, atribui-se um valor único

de consumo de energia por unidade de carga transportada (MJ/tkm) para todos os tipos de veículos.

Figura 44 – Contribuição dos diferentes tipos de transporte avaliada em termos de consumo de energia

Fonte: Elaboração própria.

A comparação entre os dois cenários dá lugar a alguns comentários. A participação do transporte avaliada de acordo com o cenário 1 resulta numa participação desta etapa pouco relevante para a EEi da edificação (3,2%). Já no cenário 2 a contribuição do transporte resulta num valor significativo (12,6%). A estimativa de valores de consumo energético diferenciados em função da capacidade de carga é um ponto a favor do método de cálculo empregue no cenário 1. Contudo, os valores de consumo obtidos para os caminhões pesados são muito baixos quando comparados a todos os valores utilizados em estudos brasileiros sobre energia embutida nas edificações. Já o valor único obtido para o consumo específico do transporte rodoviário de cargas no cenário 2 aproxima-se dos valores utilizados nos estudos brasileiros revistos sobre o tema. Os resultados sugerem serem necessários mais estudos com foco no consumo energético por unidade de carga transportada no Brasil para se determinar qual o real impacto da etapa do transporte na construção de edificações. Porém, cabe destacar que assumindo o cenário 2 a localização do edifício parece ser um fator com influência significativa no consumo de energia embutida inicial das edificações.

Quanto à contribuição de cada material para o consumo de energia embutida com transporte, apresentado na figura 45, verifica-se que os dois cenários registram resultados diferentes. No cenário 1, os cinco materiais que mais contribuem para o valor total do

consumo do transporte são a cerâmica vermelha (28%), o cimento (18%), a areia (16%), o concreto (16%) e a brita (5%). Já no cenário 2, as maiores contribuições são da cerâmica vermelha (48%), cimento (12%), cerâmica branca (9%), aço (6%) e areia (5%). Mais uma vez a diferença entre os dois cenários está relacionada com o consumo de energia por unidade de carga dos veículos pesados que percorrem distância interestaduais, já que este valor é superior no cenário 2 resultando em uma maior contribuição dos materiais produzidos fora do estado de Mato Grosso do Sul (como é o caso de grande parte da cerâmica vermelha, a totalidade da cerâmica branca e do aço).

Figura 45 – Contribuição de cada material para o consumo de energia com o transporte

Fonte: elaboração própria.

Um último ponto que se considera relevante na etapa do transporte é a contribuição desta etapa por tipo de material, tal como apresentado na figura 46 para o cenário 1 e na figura 47 no cenário 2. Verifica-se que, no cenário 1, dez materiais apresentam um peso da etapa de transporte superior ao peso no valor final de EEi. Nos casos da brita, rejunte e areia este valor é superior a 50% o que significa que para estes materiais a etapa de transporte é mais significativa em termos de consumo de energia do que a etapa de produção. Quanto ao cenário 2, também dez materiais apresentam uma contribuição da etapa de transporte na sua energia embutida superior ao valor total de EEi e seis materiais apresentam uma contribuição da etapa de transporte superior a 50%: rejunte, gesso, brita, areia, granito e argamassa. Tais resultados confirmam a informação obtida na revisão bibliográfica de que a participação do

transporte na energia embutida de um material é tanto maior quanto menores as necessidades energéticas do seu processamento e produção.

Figura 46– Contribuição da etapa de transporte para a energia embutida de alguns materiais no cenário 1

Fonte: elaboração própria

Figura 47 – Contribuição da etapa de transporte para a energia embutida de alguns materiais no cenário 2

Fonte: elaboração própria

- *Construção*

Relativamente à etapa da construção, conforme referido na descrição do estudo de caso, foram considerados os consumos de energia com equipamentos elétricos, caminhão bomba e caminhão betoneira (para as atividades de concretagem), caminhão caçamba basculante (para transporte de areia na fase de aterro) e caminhão caçamba com guindaste (para transporte de caçambas com entulho). No gráfico da figura 48 apresentam-se a contribuição de cada um destes equipamentos para o consumo de energia embutida na construção. Verifica-se que a contribuição dos equipamentos elétricos foi a mais alta com 92,4% correspondendo à quase totalidade do consumo desta etapa.

Figura 48 – Contribuição do consumo energético de atividades na etapa da construção

Fonte: elaboração própria

- *Proposições para políticas públicas*

A energia embutida nas edificações, conforme visto na revisão bibliográfica é um tema com importância crescente à medida que as edificações se tornam mais eficientes no seu consumo operacional. No Brasil em particular, onde o consumo operacional com climatização é em geral baixo, a contribuição da energia embutida para o consumo energético no ciclo de vida dos edifícios assume maior destaque com valores que atingem quase 50%. Para além disso, o Brasil é um país em desenvolvimento com elevadas necessidades de investimento em infraestrutura, em particular no que respeita ao setor residencial. O desafio de prover habitação para baixar o elevado déficit habitacional brasileiro implicará na construção de um elevado número de moradias. Atendendo às estimativas de FVG Projetos (2014) até 2024 o

Brasil precisa construir anualmente cerca de 1,1 milhões de residências para famílias de baixa renda.

No sentido de avaliar em termos energéticos o desafio de fazer frente ao déficit habitacional brasileiro, calculou-se o consumo anual de energia embutida para construção dessas moradias. Para tal considerou-se um projeto padrão de HIS com área de 40 m² e um consumo de energia embutida de 3,6 GJ/m² conforme valor médio determinado na revisão de estudos brasileiros sobre o tema. Os resultados mostram que a construção de 1,1 milhões de residências por ano representa um consumo energético adicional de 3,78 Mtep que corresponde a 15,3% do consumo anual dos edifícios residenciais do Brasil (dados de 2016). A este valor junta-se, conforme os resultados desta pesquisa, o elevado consumo de fontes não renováveis nas etapas necessárias à construção de edifícios, particularmente em alguns setores industriais de produção de materiais de construção e no transporte.

Tais valores ajudam a dimensionar a importância de se considerar a energia embutida na avaliação da eficiência energética dos edifícios brasileiros, em particular na sua fase de projeto quando são definidas a maior parte das variáveis que vão definir o seu consumo de energia ao longo do ciclo de vida. Projetar uma edificação realmente eficiente em termos energéticos requer considerar o impacto das características da edificação quer ao nível do consumo operacional quer da energia embutida, só possível quando considerada uma perspectiva de ciclo de vida.

Com base em Goldemberg e Lucon (2008) apontam-se um conjunto de vantagens da eficiência energética: o custo de economia de energia é inferior ao de geração; aumento da segurança de fornecimento, com poupança de recursos que são finitos; aumento da disponibilidade de acesso a serviços de energia e redução dos impactos ambientais, em especial a emissão de gases poluentes e de efeito de estufa. O consumo operacional dos edifícios tem sido alvo de políticas públicas com vista à sua minimização em especial desde a década de 70 com as crises de petróleo. Já os impactos embutidos não são regulados na maioria dos países e existem poucos documentos com orientações nesse sentido (YOKOO; YOKOYAMA, 2016).

Minimizar o consumo de energia embutida em edificações é uma tarefa complexa na medida em que as edificações são por si só produtos de elevada complexidade cuja construção envolve atividades de diferentes setores da economia. Conforme referido na revisão bibliográfica a energia embutida pode ser calculada a partir de um conjunto de metodologias com destaque para as metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida, embora a enorme

quantidade de dados necessária à sua execução seja frequentemente apontada como uma barreira à sua disseminação. Nesse sentido estão a ganhar força versões simplificadas com redução de escopo de análise e recurso a dados secundários disponíveis em bases de dados.

Quanto ao panorama no Brasil, observou-se pela revisão bibliográfica o crescente interesse pelo estudo da energia embutida nas edificações expresso pelo aumento do número de estudos sobre o tema nos últimos anos. Para além do interesse no contexto acadêmico, cabe referir algumas iniciativas públicas brasileiras no âmbito do Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida que demonstram o reconhecimento da importância do tema, como o lançamento do SICV Brasil - Sistema Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida em 2016 e o desenvolvimento e implementação de um sistema de rotulagem ambiental tipo III baseado na norma ABNT ISO 14025 para emissão de Declarações Ambientais de Produto.

Atendendo aos resultados do estudo de caso realizado e ao panorama da energia embutida nas edificações no Brasil, apresentam-se no próximos parágrafos algumas sugestões para o desenvolvimento de políticas públicas que incluam a energia embutida nas edificações (em particular a energia embutida inicial) como critério de eficiência energética.

Em primeiro lugar referem-se medidas com potencial de redução da energia embutida nas edificações a nível nacional.

- Articulação entre o programa de rotulagem ambiental do tipo III, já aprovado pelo Inmetro, e os programas habitacionais federais. O desenvolvimento de um programa de rotulagem ambiental do tipo III para os materiais de construção pode fornecer informações de sustentabilidade ambiental dos materiais em particular o seu consumo de energia no ciclo de vida. Tal informação pode ser utilizada para selecionar materiais mais sustentáveis na construção de moradias de habitação social reduzindo o consumo de energia embutida para a sua construção (atrás estimado). Desta forma, nos programas para os quais o governo é responsável pela construção das moradias, sugere-se a exigência de apresentação da Declaração Ambiental de Produto por parte das empresas fornecedoras dos materiais;
- Articulação entre o Programa de Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações e o programa de rotulagem ambiental do tipo III já aprovado pelo Inmetro. Desde 2014, com a publicação da instrução normativa IN02/2014 é

obrigatório que as edificações públicas novas (ou em processo de reforma) sejam etiquetadas pelo Programa de Brasileiro de Etiquetagem de Edificações com obtenção de nível A. Sugere-se a introdução nos requisitos avaliados de critérios de sustentabilidade relacionados com o consumo de energia no ciclo de vida dos materiais de construção, comprovados por meio de Declarações Ambientais de Produto;

- Definição de benchmarks de consumo de energia para os produtos dos diferentes setores produtivos de materiais de construção e concessão de benefícios fiscais às empresas com desempenho acima do benchmark e às empresas construtoras que optem por comprar materiais com desempenho acima do benchmark. A comprovação de desempenho dos materiais deverá resultar de apresentação de Declaração Ambiental de Produto;

As duas primeiras medidas sugeridas focam o poder público como forma de dar o exemplo ao mercado e dar tempo às empresas produtivas para se adaptar a futuras exigências regulamentares.

Em segundo lugar, apresentam-se sugestões de medidas direcionadas para o Estado de Mato Grosso do Sul no sentido de reduzir a energia embutida nas suas edificações:

- Incentivar a instalação de empresas produtoras de materiais de construção no estado através de incentivos fiscais com vista à redução do consumo de energia na etapa de transporte de materiais de construção até à obra;
- Premiar através de benefícios fiscais as empresas construtoras que comprem materiais de construção produzidos no estado e que, dessa forma reduzam o consumo de energia necessário ao transporte desses materiais;

Relativamente ao desenvolvimento de políticas públicas com vista à redução da energia embutida nas edificações, cabe ressaltar que o seu potencial de poupança energética deverá ser avaliado em termos do ciclo da edificação, garantindo que o seu impacto ao nível da energia operacional continua resultando em poupança energética no ciclo de vida.

Como último tópico desta discussão de resultados destacam-se dois pontos. Em primeiro lugar a elevada demanda de dados para execução do método apresentado, o que constitui um entrave à sua aplicação direta para efeitos de política pública. Em segundo lugar a dificuldade de desenvolvimento de políticas públicas no setor da construção civil no Brasil dada a elevada informalidade do setor. Conforme destacam Agopyan e John (2011), em um país onde boa parte da economia é informal, o poder da influência das políticas públicas e da normalização é relativo uma vez que atinge apenas aqueles que escolhem trabalhar dentro da formalidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia embutida nas edificações constitui um consumo de energia importante no seu ciclo de vida energético, em particular em países com baixas necessidades de consumo operacional para climatização como é o caso do Brasil, onde este valor pode representar mais de 40% do consumo do edifício ao longo da sua vida útil. Para além da sua importância em termos do ciclo de vida de cada edificação, o tema assume especial relevância nos países emergentes tendo em conta as necessidades de infraestrutura que deverão resultar em elevados consumos de energia para a sua construção contribuindo para pressionar a expansão dos sistemas de oferta de energia. No presente trabalho estima-se que as necessidades anuais de construção de novas moradias para atender a cerca de 50% do déficit habitacional brasileiro até 2024 representa um consumo de energia adicional equivalente a 15,3% do consumo anual no setor residencial.

Neste contexto, o objetivo principal desta pesquisa foi calcular a energia embutida na fase pré-uso do ciclo de vida de um condomínio residencial localizado na cidade de Campo Grande no Estado de Mato Grosso do Sul. Para tal utilizou-se um método baseado na Avaliação de Ciclo de Vida Energético tendo em conta uma fronteira de análise do tipo “berço à entrega”, incluindo os consumos de energia nas etapas de fabricação de materiais construção, no seu transporte até ao local da obra e os consumos na obra propriamente dita. Os cálculos foram realizados tendo em conta dois cenários quanto às estimativas para o consumo de energia específico no transporte rodoviário de carga no Brasil. Face aos estudos brasileiros publicados na literatura o presente trabalho procurou avaliar o impacto de considerar as quantidades de materiais necessários para a construção a partir das quantidades compradas (incluindo os materiais incorporados ao edifício e o desperdício) por oposição a estimativas de projeto e orçamentárias, e o impacto das necessidades adicionais de transporte de materiais de construção em obras situadas longe dos grandes centros urbanos e industriais. Relativamente aos coeficientes de energia embutida nos materiais de construção foram considerados valores brasileiros sempre que possível.

No cenário 1, obteve-se um valor de consumo de energia embutida inicial por unidade de área de 4,99 GJ/m², sendo que 96,1% diz respeito ao consumo de energia na etapa de fabricação de materiais de construção, 3,2% à etapa do transporte dos materiais até à obra e 0,7% ao consumo de energia na obra. Já no cenário 2, o valor da energia embutida inicial foi de 5,52 GJ/m² com 86,8% deste valor resultante do consumo de energia na etapa de

fabricação de materiais de construção, 12,6% da etapa do transporte dos materiais até à obra e 0,6% do consumo de energia na obra. A participação de energias não renováveis nos valores de energia embutida inicial calculados é superior ao valor da matriz energética brasileira tendo-se obtidos participações de 61,2% no cenário 1 e 64,2% no cenário 2. Na comparação com outros estudos nacionais, os valores obtidos para a energia embutida inicial no condomínio residencial estudado são superiores à grande maioria dos valores publicados por estudos.

Quanto às hipóteses a serem testadas ao longo da pesquisa, cabe referir para a hipótese 1, que os resultados sugerem que o fato de se avaliar a contribuição da etapa de fabricação dos materiais a partir das quantidades realmente consumidas em um edifício resulta em valores de energia embutida inicial superiores face aos estudos que partem de estimativas com base nos projetos e orçamentos. Contudo a pesquisa não foi conclusiva na medida em que não se conseguiu isolar este impacto das eventuais diferenças entre os estudos resultantes do uso de diferentes coeficientes de energia embutida nos materiais. Relativamente à hipótese 2, assumindo o cenário 2 quanto ao consumo de energia específico para o transporte de cargas rodoviário, a localização do edifício, em particular a sua distância aos centros produtivos de materiais de construção, é um fator que aumenta significativamente a energia embutida na construção de edificações no Brasil.

Os valores obtidos para o estudo de caso e o panorama da energia embutida nas construções brasileiras resultante desta pesquisa reforçam a necessidade de incluir a energia embutida das edificações (em particular a energia embutida até à sua construção) como critério de eficiência energética no desenvolvimento de políticas públicas de promoção de eficiência energética nas edificações no Brasil. Neste contexto apresentaram-se no trabalho algumas sugestões para o desenvolvimento de políticas públicas com impacto ao nível da redução da energia embutida na construção de edifícios. Destaca-se o potencial de medidas como a articulação entre os programas habitacionais de combate ao déficit de moradias e o recém aprovado programa de rotulagem ambiental do tipo III como forma de promover a escolha de materiais de construção com menores consumo de energia no seu ciclo de vida, e a premiação através de incentivos fiscais das empresas construtoras que optem por utilizar materiais com menor consumo energético comprovado por rotulagem ambiental do tipo III.

Termina-se a presente tese fazendo referência a tópicos abordados que se considera merecedores de estudos mais aprofundado podendo constituir tema de futuras pesquisas: a eficiência energética do transporte rodoviário de cargas no Brasil a fim de se determinar o real

impacto desta etapa na energia embutida inicial nas construções; a energia embutida em materiais de construção com vista à criação de bases de dados que simplifiquem a avaliação da energia embutida nas edificações sem perda de confiabilidade; a inclusão da energia embutida como critério de eficiência energética em edificações no desenvolvimento de políticas públicas.

REFERÊNCIAS

ABCV – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CICLO DE VIDA. Disponível em: <http://www.abcvbrasil.org.br>. Acesso em: Agosto, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2006.

_____. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação de Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação de Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 15575. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. ABNT Catálogo. 2017. Disponível em:
<<http://abnt.org.br/pesquisas/?searchword=14040&x=0&y=0>>. Acesso em: Agosto, 2017.

ADALBERTH, K. Energy Use during the life cycle of building: a Method. **Building and Environment**, V. 32 (4), p. 317-320, 1997.

AGOPYAN, V. et al. FORMOSO, C.T (Ed); INO, A. (Ed). **Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obra**. Porto Alegre: Antac, 2003 (Coletânea Habitare v.2).

AGOPYAH, V.; JOHN, V.M.; GOLDEMBERG, J. (Coord). **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011. (Série Sustentabilidade).

ALCORN, A. **Embodied Energy and CO₂ Coefficients for NZ Building Materials**. Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington. New Zealand: March, 2003.

ALVES, H.J; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A.O. levantamento inicial do consumo de energias térmica e elétrica na indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, V.12 (1/2), p.17-21, 2007.

ARCELORMITTAL. Relatório de Sustentabilidade. 2016.

BAIRD, G.; ALCORN, A.; HASLAM, P. The energy embodied in building materials-updated New Zealand coefficients and their significance. **IPENZ Transactions**, Vol. 24, No. 1/CE, 1997.

BAJAY, S.V.; SANTANA, P.H.M. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: relatório setorial: cal e gesso**. Brasília: CNI, 2010.

BASTOS, J.; BATTERMAN, S.A.; FREIRE, F. Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. **Energy and Buildings**, V. 69, p. 344-353, 2014.

BERNI, M.D.; BAJAY, S.V.; GORLA, F.D. **Oportunidades de eficiência energética na indústria: relatório setorial: setor cerâmico**. Brasília: CNI, 2010.

BLOK, K.; NIEUWLAAR, E. **Introduction to Energy Analysis**. Second edition, London: Taylor and Francis, 2017.

BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of Industrial Energy Analysis**. Chichester, England: Ellis Horwood, 1979.

BOHADANA, I.P.B. **Avaliação de habitação de interesse social rural, construída com fardos de palha, terra e cobertura verde, segundo critérios de sustentabilidade**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BRASIL. **Lei n. 9503, de 23 de Setembro de 1997**. Institui o código de trânsito brasileiro. **Diário Oficial da União**, seção I, 25 de Setembro de 1997.

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.

BRITO, R. Declaração Ambiental de Produto (DAP). 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/PDF/cbtc/apresentacao-cbtc-declaracao-ambiental-produto-inmetro.pdf>. Acesso em Agosto de 2017.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V.26, p.379-388, 2013.

CALDEIRA, D.M. **Avaliação do ciclo de vida energético na fase de pré-uso e uso de telhas termoacústicas com poliestireno expandido para edificação habitacional no DF**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

CAMPOS, F.H.A. **Análise do ciclo de vida na construção civil: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Construção Civil Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

CARMINATTI JÚNIOR, R. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em light steel framing**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY GREEN DESIGN INITIATIVE. Economic input-output life cycle assessment (EIO-LCA) model. 2003.

CBIC, 2017. PIB Brasil e Construção Civil. Disponível em:

<<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>>

Acesso em: Agosto, 2017

CIB; UNEP-IETC. Agenda 21 for Sustainable Constructions in Developing Countries. Pretoria, África do Sul: CSIR Building and Construction Technology, 2002.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO No 307, DE 5 DE JULHO DE 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União no 136 de 17/07/2002,

CONMETRO - CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Resolução no 15 de Dezembro de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Diário oficial da União, 04 de Janeiro de 2011.

_____. Resolução no 01 de 16 de Maio de 2012. Dispõe sobre a Aprovação do Plano de Ação Quadrienal 2012-2015 do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida; e dá outras providências.

_____. Resolução no 6 de 22 de Dezembro de 2016. Dispõe sobre a aprovação do Plano de Ação Quadrienal 2016-2019 do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida; e dá outras providências. Diário Oficial da União, 27 Dezembro de 2016.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Sondagem CNT de eficiência energética no transporte rodoviário de cargas. Brasília: CNT, 2015.

CRAWFORD, R. B. **Life Cycle Assessment in the built environment**. London: Taylor and Francis, 2011.

_____. Life Cycle Energy Analysis. EDG 71 RC. March 2012. Disponível em: <http://www.environmentdesignguide.com.au/pages/content/recent-papers/edg-71-rc--life-cycle-energy-analysis.php> Acesso em: Setembro, 2017.

CONDEIXA, K.M.S.P. Comparação entre materiais da construção civil através da avaliação

do ciclo de vida : sistema Drywall e alvenaria de vedação. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2013.

CUNHA, I.B. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

CZACHORSKI, M.; LESLIE, N. **Source Energy and Emission Factors for Building Energy Consumption**. Buildings. Washington, USA: Natural Gas Codes and Standards Research Consortium, 2009.

DIXIT, M.K.; CULP, C.H.; FERNANDEZ-SOLÍS, J.L. System Boundary for embodied energy in Buildings. A conceptual model for definition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 21, p. 153-164, 2013.

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

_____. Need for embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, p.3730-3743, 2012.

DORILEO, I.L.; BAJAY, S.V.; GORLA, F.D. **Oportunidades de eficiência energética para indústria: relatório setorial: setor cimenteiro**. Brasília: CNI, 2009.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2011: ano base 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

_____. Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia. PDE 2021. Consolidação de bases de dados do Setor Transporte: 1970-2010. Nota Técnica SDB-Abast No 1/2012. Rio de Janeiro, EPE, 2012.

_____. **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

_____. **Balanco Energético Nacional 2016: ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EVANGELISTA, P. et al. Desempenho ambiental de edificações: avaliação de ciclo de vida em empreendimento residencial. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceió, 2014. **Anais...** ANTAC, 2014.

FGV PROJETOS. Políticas Permanentes de Habitação. A importância do Programa Minha Casa Minha Vida. 2014.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014**. Belo

Horizonte: Fundação João Pinheiro, Centro de Estatística e Informações, 2016. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br>> . Acesso em: Julho, 2017.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition. Luxemburgo: União Européia, 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3ª edição revista e ampliada. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GRAF, H. F.; TAVARES, S. F. Energia incorporada dos materiais de uma edificação padrão brasileira residencial. In 1º CONGRESSO DE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE.. **Anais...** Santa Catarina, 2010

GRAF, H.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 da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

GT - GUIA DO TRANSPORTADOR, 2017. Disponível em http://www.guiadotrc.com.br/guiadotransportador/pesos_caminhao.asp. Acesso em Junho, 2017.

HAMMOND, G.; JONES, C.. Inventory of Carbon & Energy: ICE. Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2008.

HAMMOND, G.; JONES, C. Inventory of Carbon & Energy (ICE)Version 2.0. University of Bath, 2011.

HAYNES, R.. Embodied energy calculations within life cycle analysis of residential buildings, 2010. Disponível em:

<<http://etoolglobal.com/wp-content/uploads/2012/10/Embodied-Energy-Paper-Richard-Haynes.pdf>>. Acesso em: Junho, 2014.

HERRERA, J.A.Q. **Quantificação e correlação das variáveis do ciclo de vida energético da edificação: energia incorporada na envolvente arquitetônica e consumo energético pelo comportamento térmico, caso de estudo: moradia**. Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA.. 2017. Disponível em www.ibict.com.br. Acesso em Setembro, 2017.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Modernising Building Energy Codes to secure our global energy future. Paris: OECD/IEA, 2013.

_____. **World Energy Balances: Overview**. Paris: OECD/IEA, 2017a.

_____. **The Future of Trucks: Implications for energy and the environment**. Paris: OECD/IEA, 2017b.

IFIAS – INTERNATIONAL FEDERATION OF INSTITUTES FOR ADVANCED STUDIES. IFIAS Workshop Report. Energy Analysis and Economics. Resources and Energy V.1, p. 15-204, 1978.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2017. Disponível em:

<<http://www.infoconsumo.gov.br/qualidade/pbacv/objetivo.asp>>. Acesso em: Agosto de 2017

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS _____. **Informações sobre madeiras**. Disponível em:

http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acesso em Abril, 2017.

ISO – INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 15686-1: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework**. Switzerland: ISO, 2011.

ISO, 2017. Disponível em: <https://www.iso.org/committee/54854/x/catalogue/>. Acesso em: Agosto, 2017.

JOHN, V.M. et al. **Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto - Relatório final para empresas participantes**. São Paulo: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), 2014.

JOHN, V.M.; SATO, N.M.; SATTTLER, M.A (Ed); PEREIRA, F.O.R (Ed). **Durabilidade de Componentes da Construção**. Porto Alegre : ANTAC, 2006. (Coleção Habitare, v. 7).

JRC, 2017. Disponível em: < <http://eplca.jrc.ec.europa.eu>>. Acesso em: Agosto, 2017.

KLOPPFER, W (Ed). **Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment**. Springer, 2014.

KALBUSCH, A.; GHISI, E. Método para quantificação do consumo energético no ciclo de vida de equipamentos hidrossanitários. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 57-73, 2012.

KONING, et al. A life cycle approach to buildings. Principles, calculations, design tools. Munich: Detail, 2010.

KOTAJI, S.; SCHUURMANS, A.; EDWARDS, S. (Ed). Life Cycle Assessment in building and construction: A state-of-the-art report. USA: Society of Toxicology and Chemistry (SETAC), 2003.

LEITE, A.A.F.; BAJAY, S.V.; GORLA, F.D. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: setor vidreiro**. Brasília: CNI, 2010.

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). Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

LOUREIRO, et al. **Propostas para Análise do Desempenho Energético das Edificações**. Sindigás, 2015.

MACEDO, D.B.G. **Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas construtivos – aplicação em um sistema estruturado em aço**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

MACIEL, A. C. F. **Energia Incorporada de Fachadas Ventiladas. Estudo de Caso para Edificação Habitacional em Brasília-DF**. Dissertação (Mestrado). Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

MANFREDINI, C. Impactos ambientais causados pelas indústrias de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

MANKIW, G. **Introdução à Economia**, tradução da 3ª edição norte-americana, São Paulo: Cengage Learning, 2008.

MARQUES, V.M. **Avaliação de aspectos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com e sem amianto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2014.

MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO (Brasil). Secretaria de Tecnologia Industrial –CETEC- MG - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Balanco Energético de Edificações Típicas**. Brasília, 1982.

MILLER, K.B. **Modelo parametrizado de ACV: Aplicação em sistemas construtivos com estudo de caso em vedações verticais**. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

MMA – MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE (Brasil). 1º Inventário de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários. Relatório final. Brasília, 2011.

_____. Inventário de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013. Ano base 2012. Relatório final. Brasília, 2014.

MONAHAN, J.; POWELL, J.C; An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, V.43, p. 179-188, 2011

MONTEIRO, M. B. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético do Sistema de Painéis de Aço Isotérmico Aplicados em Edifícios no Contexto Bioclimático**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

MORAIS, A.E; SPOSTO, R.M. Revestimento cerâmico e de granito: estudo preliminar comparativo com foco na energia incorporada. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Canela, 2010. **Anais...** ANTAC, 2010.

MT – MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (Brasil). Projeto de Reavaliação de estimativas e metas do PNLT. Relatório Final. Brasília, 2012.

NABUT NETO, A.C. **Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas. Estudo de Caso do Steel Frame para Utilização em Brasília**. Dissertação (Mestrado). Program de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NOVO, A.L.A. **Perspectivas para o Consumo de Combustível no Transporte de Carga no Brasil: uma Comparação entre os Efeitos Estrutura e Intensidade no Uso Final de Energia do Setor**. Dissertação (Mestrado). Programa de Planejamento Energético. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, L.S. **Avaliação do Ciclo de Vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

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 Engenharia da Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

PALACIO, C.D.U. **Análise Térmica e Energia Incorporada de Vedações para Habitações de Interesse Social. Estudo de Caso com Utilização do Steel Frame no Entorno do DF.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

PEDROSO, G.M. **Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil da 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. In: EURO ELECS 2015. **Proceedings...** Guimarães, Portugal, 2015.

PEREIRA, S.W. **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos. Aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

PIETROBON et al. Análise comparativa do consumo energético na fase de fabricação dos materiais de construção. In: III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC, julho de 1995. **Anais...** Gramado: ANTAC, 1995.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, A.A. Lyfe cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v.42, p. 1592-1600, 2010.

RODRIGUES, T.O. et al. **Guia Qualidata: requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida.** Brasília: Ibict, 2016.

ROSSI, E. **Avaliação do Ciclo de Vida da brita para a construção civil: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado). **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.** Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2013.

RUPP, R.F; LAMBERTS, R. Relatório: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações [Versão 1]. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, 2017.

SANTOS, M.R.P. **Metodologias de previsão da vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção. Revisão bibliográfica.** Dissertação (Mestrado). Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia do Porto. Porto, 2010.

SANTOS, I.G.; PEREIRA, A.F. Análise de Ciclo de Vida: uso do software eco-it para comparação entre dois sistemas de fachada (alvenaria e vidro). In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2008, Fortaleza, **Anais...** ANTAC, 2008.

SANSÃO, J.H. **Análise ambiental de alvenarias em blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Construção Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

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.

SETAC – SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY, 2017. Disponível em: < <https://www.setac.org/?page=History> >. Acesso em: Agosto, 2017.

SHARMA, A. et al. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V.15, p. 871–875, 2011.

SILVA, B. V. **Construção de Ferramenta para Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, L. P. **Análise do Ciclo de Vida Energético de Habitações de Interesse Social**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

SILVA, M.G. et al. Energia e emissões incorporadas nos estágios de produto e construção de edificações: aplicação a casos brasileiros. In: EURO ELECS 2015. **Proceedings...** Guimarães, Portugal, 2015.

SIMÕES, A.F.; BAJAY, S.V. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: metais não-ferrosos**. Brasília: CNI, 2010.

SPERB, M.R. **avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

SOMBRIÓ, 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 da Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

SORENSEN, B. **Life-Cycle Analysis of Energy Systems**. From Methodology to Applications. Cambridge: RSC, 2011.

TABORIANSKI, V.M.; SIMONI, R.A.; PRADO, R.T.A. Elaboração de inventário de consumo de energia no ciclo de vida dos materiais utilizados em fachadas de edifícios no

Brasil. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Fortaleza, 2008. **Anais....** ANTAC, 2008.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TAVARES, S.; LAMBERTS, R. Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 18-21 julho 2004, São Paulo. **Anais....** ANTAC, 2004.

_____. Consumo de Energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, Maceió, 2005. **Anais...** ANTAC, 2005.

_____. Determinação da Energia Embutida em Edificações: um Atributo de Sustentabilidade. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Florianópolis, 2006. **Anais...** ANTAC, 2006.

TAVARES, S.F. et al. Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: análise comparativa a coberturas convencionais. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceió, 2014. **Anais...** ANTAC, 2014.

THORMARK, C. Including recycling potential in energy use into the life-cycle of buildings. **Building Research and Information**, V. 28(3), p. 176-183, 2000.

_____. A low energy building in a life cycle - its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. **Building and Environment**. V.37, p. 429-435, 2002.

_____. 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.

_____. Energy and resources, material choice and recycling potential in low energy buildings. **CIB conference SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices. Proceedings**. Lisboa, 2007.

TRAJANO, L. **Avaliação do ciclo de vida dos produtos derivados do cimento para Habitações de Interesse Social**. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco. Recife, 2010.

UDO DE HAES, H.; HEIJUNG, R. Life-cycle assessment for energy analysis and management. **Applied Energy**, V. 84, p. 817-827, 2007.

UN – HABITAT - UNITED NATIONS CENTRE FOR HUMAN SETTLEMENTS (Habitat). Energy for Building – Improving Energy Efficiency in Construction and in the Production of Building Materials in Developing Countries. Nairobi, 1991.

VENKATARAMA REEDY, B.V.; JAGADISH, K.S. Embodied Energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**. v.35, p.129-137, 2003.

VINHAL, L. D. **Estudo de indicadores ambientais de blocos cerâmicos com base em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando o contexto brasileiro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2016.

WILTING, H.C. **An energy perspective on economic activities**. Doctoral Thesis, Rijksuniversiteit Groningen, Holanda, 1996.

WINTHER, B. N.; HESTNES, A.G. Solar Versus Green: The Analysis Of A Norwegian Row House. **Solar Energy**, Vol. 66, n.6, pp. 387–393, 1999.

YOHANIS, Y.G.; NORTON, B. Life-Cycle operational and embodied energy for a generic single storey Office building in the UK. **Energy**, V.27, p.77-92, 2002.

YOKOO, N.; YOKOYAMA, K. (Ed). **Evaluation of Embodied Energy and CO_{2eq} for Buildings Construction (Annex 57). Overview of Annex 57 Results**. Japan: Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2016.

ZENID, G.J. (Coord). Madeira : uso sustentável na construção civil. 2ª edição. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas : SVMA, 2009.

ZHANG, Z. et al. BEPAS - A life cycle building environmental performance assessment model. **Building and Environment**, v. 41, ed. 5, p. 669-675, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Fotografias da fachada e áreas externas do condomínio Residencial The Capital

Figura 49 – Entrada do Condomínio Residencial The Capital

Fonte: Autora

Figura 50 – Fachada dos blocos

Fonte: Autora

Figura 51- Fachada dos blocos

Fonte: Autora

Figura 52- Fachada dos blocos

Fonte: Autora

Figura 53– Área externa - guarita da entrada

Fonte: Autora

Figura 54 – Área externa - estacionamento

Fonte: Autora

APÊNDICE B

Fotografias do condomínio residencial the Capital: Estrutura em concreto armado, fundações do tipo strauss e lajes do tipo treliçadas com enchimento cerâmico.

Figura 55 – Execução das fundações do tipo Strauss

Fonte: Plano A

Figura 56 – Fundações do tipo Strauss

Fonte: Plano A

Figura 57 – Estrutura em concreto armado - Baldrame

Fonte: Plano A

Figura 58 – Laje treliçada com enchimento cerâmico

Fonte: Plano A

APÊNDICE C

Fotografias da alvenaria de blocos cerâmicos e tijolo comum do Condomínio Residencial The Capital

Figura 59 – Alvenaria de blocos cerâmicos

Fonte: Plano A

Figura 60 – Detalhe da execução da alvenaria

Fonte: Autora

Figura 61 – Detalhe do uso de blocos cerâmicos e tijolo comum na alvenaria

Fonte: Autora

Figura 62 – Blocos de cerâmica de 8 furos e tijolos comuns

Fonte: Autora

APÊNDICE D

Fotografias das Paredes Externas do Condomínio Residencial the Capital

Figura 63 – Execução do reboco nas paredes externas

Fonte: Autora

Figura 64 – Detalhe da textura da parede exterior

Fonte: Autora

APÊNDICE E

Fotografias das paredes internas e piso do Condomínio Residencial The Capital

Figura 65 – Acabamento das paredes internas e rodapé cerâmico

Fonte: Autora

Figura 66 – Piso cerâmico rejuntado e soleira de granito

Fonte: Autora

APÊNDICE F

Fotografias das esquadrias do Condomínio Residencial The Capital.

Figura 67 – Esquadria

Fonte: Autora

Figura 68 - Esquadria

Fonte: Autora

APÊNDICE G

Fotografias dos banheiros, cozinha e área de serviço do Condomínio Residencial The Capital.

Figura 69 – Revestimento cozinha e área de serviço

Fonte: Autora

Figura 70 - Tanque

Fonte: Autora

Figura 71 – Bancada do banheiro geral

Fonte: Autora

Figura 72 – Louças sanitárias

Fonte: Autora .

APÊNDICE H

Fotografias de acabamentos do Condomínio Residencial The Capital.

Figura 73 - Churrasqueira

Fonte: Autora

Figura 75 – Blocos de vidro no banheiro

Fonte: Autora

Figura 74 - Porta

Fonte: Autora

Figura 76 – Porta de entrada dos apartamentos

Fonte: Autora

APÊNDICE I

Tabela 45 – Levantamento de Coeficientes de Energia Embutida em materiais de construção brasileiros

	Material	Valor (MJ/kg)	Ano	Fonte
Aço	<i>Geral</i>	19,22	2009	Arcelor Mittal (2009 apud Silva, 2013)
	<i>Geral</i>	20,80	2015	EPE (2016)
	<i>Geral</i>	25,58	1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	<i>Geral</i>	30,00 ± 1	2006	Tavares, 2006
	<i>Geral</i>	16,90	2016	Arcelor Mittal, 2016
	<i>Aço para estrutura</i>	21,92	1982	MIC CETEC MG, 1982
	<i>Aço Galvanizado</i>	32,46	1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Guia G90	39,90	2012	Carminatti Junior, 2012
	Montante M90	44,30	2012	Carminatti Junior, 2012
	Montante M140	56,50	2012	Carminatti Junior, 2012
	Perfil Cartola	20,40	2012	Carminatti Junior, 2012
	Tubos Galvanizados 1/2 a 3"	41,79	1982	MIC CETEC MG, 1982
	Tubos Galvanizados 3' a 10 3/4 '"	41,63	1982	MIC CETEC MG, 1982
Acrílico		55,30	1982	MIC CETEC MG, 1982
Água		0,70	2007	Silva (2013) a partir de Sabesp (2007) e Whately e Diniz (2009)
Alumínio	<i>Geral</i>	98,84	1982	MIC CETEC MG, 1982
	<i>Geral</i>	98,20	2006	Tavares, 2006
	<i>Geral</i>	7,17	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
	<i>Alumínio Primário</i>	55,15	2006	Simões e Bajay, 2010
	<i>Alumínio Composto</i>	98,69	2012	Gouveia (2012 apud Maciel, 2013)
	<i>Alumina</i>	5,21	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
	<i>Alumina</i>	11,91	2006	Simões e Bajay, 2010
	Areia Quartzosa	0,32	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Areia	Areia	0,002	2013	Silva (2013)
	Areia	0,07	1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Areia	0,017	1982	MIC CETEC MG, 1982
	Areia Seca	0,23	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Argamassa	Argamassa	0,64	2013	Silva (2013)
Argila	Argila	0,01	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Bauxita	Bauxita	0,01	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Borracha	Borracha	16,00	2009	Dippel e Bragança (2009 apud Silva, 2013)
Brita	Geral	0,002	2013	Silva (2013)
	Geral	0,02	2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008

	Geral	0,02		2012	Rossi, 2013
	Geral	0,07		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Brita Calcárea	0,03		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Brita Granítica	0,03		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Geral	4,35		2010	Bajay e Santana (2010)
	Geral	5,02		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Cal	Cal virgem ou Hidratada	2,35		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Cal hidratada	5,02		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
	Cal hidratada	3,96		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Cal Virgem	3,95		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Calcário	0,06		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Calcário	Pó Calcário	0,07		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Chapa de Fibras	Chapa de Fibras	7,25		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Azulejo	10,77		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Manilha	1,25-14,95		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Revestimento Paredes - Via Seca	2,43-2,67	*1	2015	Morais e Sposto, 2010
	Revestimento Paredes - Via Seca	2,64		2007	Alves, Melchiades e Boschi, 2007
Cerâmica	Revestimento Paredes - Via Seca	2,43		2007	Alves, Melchiades e Boschi, 2007
	Revestimento Paredes - Via úmida	3,87-5,12	*1	2015	Morais e Sposto, 2010
	Revestimento Paredes - Via úmida	4,45		2007	Alves, Melchiades e Boschi, 2007
	Revestimento	5,1	$\pm 1,3$	2006	Tavares, 2006
	Piso	6,45		2004	Pereira, 2004
	Piso	7,26		2004	Pereira, 2004
	Piso	2,40		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Geral	0,00		2013	Silva (2013)
	Geral	2,66		1994	CEMIG (1994 apud Berni, Bajay e Gorla, 2010)
	Geral	2,82		2003	Manfredini, 2003
Cerâmica Vermelha	Geral	3,13		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Geral	2,9	$\pm 0,8$	2006	Tavares, 2006
	Tijolo	3,06		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Tijolo	0,15-0,27		2016	Vinhal, 2016
	Telha	3,01		1982	MIC CETEC MG, 1982
Cimento	Geral	3,078		2015	EPE, 2016
	Geral	2,98		2010	Silva (2013) a partir de EPE (2010)
	Geral	3,17		2006	Dorileo, Bajay e Gorla, 2009
	Geral	4,76		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Geral	4,20	$\pm$	2006	Tavares, 2006

		0,4	
	Cimento Amianto	3,94	1982 MIC CETEC MG, 1982
	Cimento Portland	4,04	1985 Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Cimento Portland (CPI)	2,88	2008 Taborianski, Simoni e Prado, 2008
	Cimento Portland de Alta Resistência (CPV- ARI)	2,91	2008 Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Cobre	Cobre	87,65	1985 Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Cobre Primário	14,43	2006 Simões e Bajay, 2010
	Geral	13,51	2007 Oliveira (2007 apud Silva, 2013)
	Blocos	0,60	1985 Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Blocos	0,43	1982 MIC CETEC MG, 1982
	Blocos Pavimento Retangular - 6 cm	0,34-0,86	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Blocos Pavimento Retangular - 8 cm	0,34-0,83	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Blocos Pavimento Retangular - 10 cm	0,30-0,60	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Pavimento 16 faces - 6 cm	0,37-0,70	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Pavimento 16 faces - 8 cm	0,33-0,84	2015 Oliveira, L.S., 2015
Concreto	Bloco Pavimento 16 faces - 10 cm	0,36-0,74	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Estrutural (14x19x39) - 4 MPa	0,21-0,69	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Estrutural (14x19x39) - 6 MPa	0,21-0,71	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Estrutural (14x19x39) - 8 MPa	0,24-0,73	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Estrutural (14x19x39) - 10 MPa	0,24-0,77	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco Estrutural (14x19x39) - 12 MPa	0,27-1,17	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco de Vedação (espx14x39) - 14 cm	0,24-0,53	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Bloco de Vedação (espx14x39) - 9 cm	0,21-0,47	2015 Oliveira, L.S., 2015
	Tubos	0,52	1982 MIC CETEC MG, 1982
	Vigas	0,62	1982 MIC CETEC MG,, 1982
Dolomita	Dolomita	0,03	2008 Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Estanho	Estanho	21,86	2006 Simões e Bajay, 2010
Feldspato	Feldspato	0,29	2008 Taborianski, Simoni e Prado, 2008

Fibrocimento	Telha fibrocimento	3,55		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Telha de fibrocimento com amianto	32,53	*2	2014	Marques, 2014
	Telha de fibrocimento com poppropileno	790,32	*2	2014	Marques, 2014
Gesso	Gesso	0,72		2010	Bajay e Santana (2010)
	Gesso Forro	0,00		1982	MIC CETEC MG, 1982
Gipsita	Gipsita	0,53		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Madeira	Aglomerada	5,23		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Serrada Bruta	3,34		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
Metalon	Metalon	47,27		1982	MIC CETEC MG, 1982
Níquel	Níquel	391,32		2006	Simões e Bajay, 2010
	Granito para revestimento paredes	0,78-1,27	*1	2015	Morais e Sposto, 2015
Pedra	Mármore	1,39		1982	MIC CETEC MG, 1982
	PVC	74,33		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
PVC	PVC	0,54		1982	MIC CETEC MG, 1982
Soda Cáustica	Soda Cáustica	19,49		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
Tinta	Tintas (em geral)	73,06		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Tinta Venezianas, vitrodifusores e ladrilhos de vidro	1,18		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Vermiculite Izo-Flok	23,07		1982	MIC CETEC MG, 1982
Vermiculite	Vermiculite Izo-Beton	1,81		1982	MIC CETEC MG, 1982
		0,54		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Vidro	10,87		2005	Calculado a partir de Leite, Bajay e Gorla, 2010
Vidro	Vidro - Telhas	22,91		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Vidro (float)	7,40		2008	Taborianski, Simoni e Prado, 2008
	Vidro Plano	20,82		1982	MIC CETEC MG, 1982
Zinco	Vidro Plano	29,93		1985	Guimarães (1985 apud Sperb, 2000)
	Vidro Blocos	22,92		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Vulcapiso	0,25		1982	MIC CETEC MG, 1982
	Zinco	13,00		2009	MME (2009) apud Silva (2013)
	Zinco	16,62		2010	Simões e Bajay, 2010

Fonte: Elaboração Própria.

APÊNDICE J

Concessionária: Enersul

Classe: Residencial; Subclasse: Residencial:

Tipo de Tarifa: Convencional

Tabela 46 - Consumo de energia elétrica na obra

Mês	Consumo Energia Elétrica (kWh)
Abril 2013	-
Maio 2013	-
Junho 2013	7275
Julho 2013	530
Agosto 2013	659
Setembro 2013	473
Outubro 2013	175
Novembro 2013	230
Dezembro 2013	213
Janeiro 2014	129
Fevereiro 2014	194
Março 2014	231
Abril 2014	299
Maio 2014	231
Junho 2014	220
Julho 2014	298
Agosto 2014	222
Setembro 2014	211
Outubro 2014	273
Novembro 2014	265
Dezembro 2014	264
Janeiro 2015	273

Continua

Conclusão

Mês	Consumo Energia Elétrica (kWh)
Fevereiro 2015	268
Março 2015	278
Abril 2015	253
Maio 2015	156
Junho 2015	289
Julho 2015	244
Agosto 2015	249
Setembro 2015	252
Outubro 2015	156
Novembro 2015	237
Dezembro 2015	159
Janeiro 2016	234
Fevereiro 2016	231
Março 2016	228
Abril 2016	100
Maio 2016	100
Junho 2016	100
Total	16199

Fonte: Autora a partir de informações fornecidas pela Plano A.

APÊNDICE K

Planilha de cálculo utilizada para determinar a EEi do condomínio residencial The Capital

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Notas fiscais						QMI		EE Materiais							EE Tr
2	Fornecedor	Nota Fiscal	Descrição	Marca	QMI	Unidade	Peso Unitário /Peso Especifico	QMI (kg)	Material	CE _{MI} (MJ/kg)	Fonte	EE _{MI} (MJ)	Fator Conversão	EE _{MI} EPrim (MJ)	EE _{MI} NR (MJ)	Loc
3	Ferragem Alvorada Ltd	064 224	Tijolo de Vidro 190X	Glassbock	72,00	Unidade	2,30	165,60	Vidro - Tijolo	22,92	Brasil (1982)	3796,00	1,21	4583,40	2313,38	Campo (
4	Ferragem Alvorada Ltd	064 044	Tijolo de Vidro 190X	Glassbock	72,00	Unidade	2,30	165,60	Vidro - Tijolo	22,92	Brasil (1982)	3796,00	1,21	4583,40	2313,38	Campo (
5	Metta Agrocenter	156 413	Disco Diamantado A	ATC	2,00	Unidade	0,11	0,22	Aço	20,80	BEN (2016)	4,58	1,18	5,39	4,09	Campo (
6	Metta Agrocenter	156 413	Disco Serra Bosch M	Bosch	2,00	Unidade	0,10	0,20	Aço	20,80	BEN (2016)	4,16	1,18	4,90	3,72	Campo (
7	Metta Agrocenter	156 454	Tubo 25MM Sold Ti	Tigre	30,00	Barra	1,15	34,38	Plástico - PVC	74,33	Guimarães, 1985 apud Spert	2555,47	1,25	3204,99	2456,92	Campo (
8	Metta Agrocenter	156 454	Adap. Curto 25X3/4	Tigre	40,00	Unidade	0,02	0,64	Plástico - PVC	74,33	Guimarães, 1985 apud Spert	47,57	1,25	59,66	45,74	Campo (
9	Madefor C. Mat. Const	001 995	Madeira Serrada de l	-	2,45	m ³	480,00	1176,00	Madeira	3,34	Guimarães, 1985 apud Spert	3927,84	1,21	4742,58	2393,72	Campo (
10	Ceramica Sta Marta Pa	003 181	Blocos/tijolos 8 furo	-	7 500,00	Unidade	2,79	20925,00	Cerâmica Vermelha - Tijolo	2,91	Média dos estudos brasileiro	60891,75	1,13	68557,58	30043,98	Campo (
11	Perfilferros Indústria e	061 297	Cadeirinha . 40x80 C	CSN	4,00	Barra	7,50	30,00	Aço	20,80	BEN (2016)	624,00	1,18	735,39	557,26	Campo (
12	Perfilferros Indústria e	061 297	Lamb. Trapezoidal. S	CSN	4,00	m	4,40	17,60	Aço	20,80	BEN (2016)	366,08	1,18	431,43	326,93	Campo (

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	EE Transporte													
2	Local Obra	Local Venda	Local Produção	D _{VOI} (km)	Tipo de Transporte	CE _{MT} (MJ/tkm)	EE _{TM} D _{VOI} (MJ)	D _{FVI} (km)	Tipo de Transporte	CE _{MT} (MJ/tkm)	EE _{TM} D _{FVI} (MJ)	EE _{TM} (MJ)	EE _{TM} Eprim (MJ)	EE _{TM} NR (MJ)
3	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	São Paulo - SP	3,40	Entrega Urbana	4,27	2,41	993	Transporte Interestadual	0,19	31,69	34,09	39,68	39,68
4	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	São Paulo - SP	3,40	Entrega Urbana	4,27	2,41	993	Transporte Interestadual	0,19	31,69	34,09	39,68	39,68
5	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Weissopolis (pinhais) PR	3,40	Entrega Urbana	4,27	0,00	1013	Transporte Interestadual	0,19	0,04	0,05	0,05	0,05
6	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Campinas - SP	3,40	Entrega Urbana	4,27	0,00	927	Transporte Interestadual	0,19	0,04	0,04	0,04	0,04
7	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Rio Claro - SP	3,40	Entrega Urbana	4,27	0,50	846	Transporte Interestadual	0,19	5,60	6,10	7,11	7,11
8	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Rio Claro - SP	3,40	Entrega Urbana	4,27	0,01	846	Transporte Interestadual	0,19	0,10	0,11	0,13	0,13
9	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	6,30	Entrega Urbana	4,27	31,67	6,65	Transporte Regional CG	2,41	18,84	50,51	58,79	58,79
10	Campo Grande - MS	Panorama - SP	Panorama SP	416,00	Transporte Interestadual	0,19	1677,41	0	Transporte Regional	0,58	0,00	1677,41	1952,37	1952,37
11	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Barra do Pirai - RJ	13,00	Entrega Urbana	4,27	1,67	1335	Transporte Interestadual	0,19	7,72	9,38	10,92	10,92
12	Campo Grande - MS	Campo Grande - MS	Barra do Pirai - RJ	13,00	Entrega Urbana	4,27	0,98	1335	Transporte Interestadual	0,19	4,53	5,51	6,41	6,41

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 47 – Bases de dados existentes e suas características.

Bases de Dados	Fronteira geográfica	Unidades	Cobertura	Fonte primária de dados	Fronteira de Análise	Método	Norma
3EID Energia embutida e intensidade de emissões	Japão	Tep ou Ton-C	EE/GEE	Dados IO da economia Japonesa	Berço ao portão	Input-Output	N/A
ICE	RU/Europa	kgCO ₂ eq e unidades SI	EE/GEE	Revistas, livros, conferências etc.	Berço ao portão	Processo	ISO 14040/14044
E3IOT	Europa	Emissões/ €	ICV	Dados IO da economia europeia	Berço ao portão	Input-Output	N/A
Athena LCI	N.A (Canadá)	Emissões/ unidades SI	ICV	Industria	Berço ao portão	Processo	N/A
Carnegie Mellon IO LCA	N.A (USA)	tCO ₂ /\$	ICV/GEE	Dados IO da economia EUA	Berço ao portão	Input-Output	N/A
US Embodied Energy	N.A (USA)	Libras CO ₂ /pé ²	EE/GEE	Dados Athena	Berço ao túmulo	Processo	N/A
FWPA	Austrália	CO ₂ eq/ Unidades SI	GEE	Ecoinvent	Berço ao portão	Processo	ISO 14040/ ISO14048
BPLCI (Building product LCI)	Austrália	Emissões / unidades SI	ICV	Ecoinvent	Berço ao portão	Processo	ISO 14044
NZ EE/EC data	Nova Zelândia	\$	EE/GEE	Dados IO da economia da NZ	Berço ao portão	Input-Output	N/A
Okobau.dat	Alemanha	Emissões / unidades SI	ICV/A	Gabi	Berço ao portão	Processo	EN15804
Ecoinvent data 2.2+	Suíça	Fontes de energia /unidades SI Emissões /unidades SI	ICV/ AICV/ EE/ GEE	Ecoinvent v.2.2+	Portão ao portão e Berço ao portão	Processo	De acordo com todas as normas internacionais relevantes
KBOB recommendation 2009/1: 2014	Suíça	Fontes de energia /unidades SI Emissões /unidades SI	ICV /EE /GEE	Ecoinvent v.2.2+	Manufatura (berço ao portão) e disposição final	Processo	EN15804
GIOGEN (LCI database for civil works)	França	Emissões /unidades SI	ICV	Ecoinvent	Berço ao portão	Processo	N/A

Fonte: Yooko e Yokoyama, 2016.

ANEXO B

Tabela 47 – Teor de umidade de equilíbrio da madeira na base seca em função da umidade relativa e da temperatura para a maioria das capitais dos estados brasileiros

Cidade	Umidade relativa do ar * (%)	Temperatura* (°C)	Teor da umidade de equilíbrio da madeira** (%)
Aracaju	78,2	26,0	15,2
Belém	86,5	26,0	18,4
Belo Horizonte	76,5	21,1	14,9
Brasília	67,6	21,2	12,5
Cuiabá	73,1	25,6	13,7
Curitiba	80,2	16,5	16,2
Florianópolis	82,2	20,3	16,8
Fortaleza	80,2	26,6	15,8
Goiânia	65,7	23,2	12,0
João Pessoa	80,6	26,1	15,9
Macapá	82,8	26,6	16,8
Maceió	79,0	24,8	15,5
Manaus	83,1	26,7	16,9
Porto Alegre	76,0	19,5	14,8
Porto Velho	84,8	25,1	17,7
Recife	81,2	25,5	16,2
Rio Branco	83,3	24,9	17,3
Rio de Janeiro	79,1	23,7	15,6
Salvador	79,5	25,2	15,6
Santos	79,9	21,3	15,9
São Luís	78,4	26,1	15,2
São Paulo	78,4	19,3	15,5
Teresina	77,5	26,5	14,9
Vitória	81,8	24,2	16,2

* Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

** Calculado de acordo com ASTM D 4933-91 – Standard Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-based Materials.

Fonte: ZENID, 2009.

ANEXO C

Tabela 48 – Densidade das madeiras consumidas na construção do condomínio residencial
The Capital

Nome Notas Fiscais	Nome Científico	Densidade Aparente (kg/m ³)	Fonte
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	710 ⁽²⁾	IPT, 2017
Angelim Amargoso	<i>Vaitarea sp</i>	936 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Cambará	<i>Qualea paraensis</i>	640 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Cedrinho	<i>Erisma ucinatum</i>	590 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Curupixá	<i>Micropholis venulosa</i>	790 ⁽²⁾	IPT, 2017
Eucalipto	<i>Eucalipto cloeziana</i>	800 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Imbuia - Canela	<i>Lauraceae</i>	650 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Peroba	<i>Aspidosperma polyneuron</i>	790 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Pinus	<i>Pinus elliottii</i>	480 ⁽¹⁾	IPT, 2017
Pinus	<i>Pinus oocarpa</i>	538 ⁽²⁾	IPT, 2017

(1) (r_{ap} , 15%)

(2) (r_{ap} , 12%)

Fonte: Elaboração própria.