

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BÁRBARA HOLZMANN MASS**

**RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA OBRA DE UMA EDIFICAÇÃO E SEUS  
IMPACTOS: ESTUDO DE CASO DE UMA RESIDÊNCIA EM *LIGHT STEEL*  
*FRAMING* E SIMULAÇÃO DE UMA EM ALVENARIA**

**CURITIBA**

**2017**

BÁRBARA HOLZMANN MASS

RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA OBRA DE UMA EDIFICAÇÃO E SEUS  
IMPACTOS: ESTUDO DE CASO DE UMA RESIDÊNCIA EM *LIGHT STEEL*  
*FRAMING* E SIMULAÇÃO DE UMA EM ALVENARIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração Ambiente Construído e Gestão, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

CURITIBA

2017

---

M414r

Mass, Bárbara Holzmann

Resíduos de construção civil na obra de uma edificação e seus impactos: estudo de caso de uma residência em Light Steel Framing e simulação de uma em alvenaria / Bárbara Holzmann Mass. – Curitiba, 2017.

140 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Sergio Fernando Tavares.

1. Resíduos de construção civil. 2. Impactos ambientais. 3. Energia embutida. 4. Alvenaria convencional. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sergio Fernando. III. Título.

CDD: 628.445

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

BÁRBARA HOLZMANN MASS

### RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA OBRA DE UMA EDIFICAÇÃO E SEUS IMPACTOS: ESTUDO DE CASO DE UMA RESIDÊNCIA EM LIGHT STEEL FRAMING E SIMULAÇÃO DE UMA EM ALVENARIA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Sérgio Scheer

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR



Prof. Dr. José Carlos Paliari

Universidade Federal de São Carlos

Curitiba, 30 de março de 2017

À minha mãe, Liza.  
Ao meu avô, Arnaldo.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Liza, pelo incentivo, suporte, orientação e carinho em tempo integral.

Aos meus avós, Arnaldo e Lizone, e à minha irmã, Anna Paula, pelo apoio em trilhar este caminho acadêmico.

Ao Marcos, pela paciência, apoio e carinho ao longo desta caminhada.

Ao Rogério Scheffer, pela viabilização do acompanhamento da obra de sua empresa e disponibilização de seus funcionários para fornecimento de dados.

Aos funcionários da Smart Sistemas Construtivos, pelo auxílio, inclusive aos sábados.

Aos meus empregadores, Sr. Ubirajara e Melissa, pelo apoio e por me liberarem do trabalho quando necessário.

E ao professor Sérgio, pela orientação.

Quando as gerações futuras julgarem as que vieram antes em relação aos temas ambientais, talvez cheguem à conclusão de que não sabiam: evitemos passar à história como as gerações que sabiam, mas que não se importaram.

Mikhail Gorbachev

## RESUMO

A construção civil é uma atividade geradora de grandes impactos ambientais, devido a fatores como: elevado consumo de recursos naturais, poluição ambiental, grande consumo de energia, alto índice de perdas e desperdícios, e geração de resíduos. No Brasil, ela é, em sua maioria, baseada em técnicas construtivas consideradas tradicionais e que acarretam grande consumo de matéria-prima e elevados índices de perdas. Um exemplo é a alvenaria de tijolos convencional que, apesar de muito utilizada, se prova ineficiente do ponto de vista ambiental. A literatura técnica, neste sentido, aponta o *Light Steel Framing* (LSF) como uma tecnologia mais eficiente, podendo ser uma alternativa viável. Desta forma, esta pesquisa tem, por meio da realização de um estudo de caso com etapa de simulação, dois objetivos principais, que são: (i) estimar a quantidade de RCC (resíduos de construção civil) gerados na fase de construção de uma edificação padrão concebida em LSF em comparação com uma em alvenaria convencional; e (ii) analisar os impactos ambientais associados a eles no seu ciclo de vida pré-operacional, em relação à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>. Para isto, foi concebido um estudo de caso experimental a partir do acompanhamento da obra de uma edificação residencial de pequeno porte construída em LSF no município de Ponta Grossa/PR, e sobre a qual foi simulada a mesma construção em alvenaria convencional, utilizando-se dados da literatura técnica. O acompanhamento da obra em LSF indicou um total de materiais adquiridos de quase 48t contra mais de 145t da simulação em alvenaria convencional, sendo aplicados na edificação 42,64t e 114,23t, respectivamente. Além disso, as quantidades de resíduos geradas foram de 5,51t (12,93%) e 35,84t (31,38%), respectivamente. Quanto aos impactos ambientais, utilizando-se de dados de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> nos materiais de construção, obtiveram-se índices de 11,23 GJ (0,19GJ/m<sup>2</sup>) e 0,89t (15,39kg/m<sup>2</sup>) para o LSF e de 65,66 GJ (1,13GJ/m<sup>2</sup>) e 6,29t (108,12kg/m<sup>2</sup>) para a alvenaria, respectivamente. Os resultados mostram que a edificação construída em LSF, além de gerar uma quantidade de resíduos muito menor do que a construída em alvenaria convencional, também possui menores impactos ambientais associados, indicando claros atributos de sustentabilidade.

**Palavras-chave:** Resíduos de construção civil. Impactos ambientais. Energia embutida. Emissões de CO<sub>2</sub>. Alvenaria convencional. *Light steel framing*.



## ABSTRACT

Civil construction is an activity that generates a lot of environmental impacts, due to factors such as: high consumption of natural resources, environmental pollution, high energy consumption, elevated levels of losses and wastes, and waste generation. In Brazil, it is mostly based on construction techniques considered traditional and that lead to great raw materials consumption and high levels of losses. An example is conventional brick masonry, which, although widely used, proves to be environmentally inefficient. Technical literature, in this sense, points Light Steel Framing (LSF) as a more efficient technology that can be a viable alternative. In this way, this research has, through a case study with a stage of simulation, two main goals, which are: (i) to estimate the amount of wastes generated in the construction phase of a standard building designed in LSF compared with one in conventional masonry; and (ii) to analyze the environmental impacts associated with them in their pre-operational life cycle, in relation to embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions. For this, an experimental case study was planned from the follow-up of the construction phase of a small residential building built in LSF in the city of Ponta Grossa/PR, and on which the same construction was simulated in conventional masonry, using technical literature data. The LSF construction follow-up indicated a total of acquired material of almost 48t against more than 145t of the simulation in masonry, being applied 42,64t and 114,23t in the building, respectively. In addition, the quantities of waste generated were 5,51t (12,93%) and 35,84t (31,38%), respectively. Regarding the environmental impacts, using the embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions data in building materials, indices of 11.23 GJ (0,19GJ/m<sup>2</sup>) and 0,89t (15,39kg/m<sup>2</sup>) were obtained for the LSF and 65,66 GJ (1,13 GJ/m<sup>2</sup>) and 6,29t (108.12 kg/m<sup>2</sup>) for the conventional masonry, respectively. The results show that the LSF building, besides generating a much smaller amount of waste than the one built in masonry, also has lower associated environmental impacts, indicating clear attributes of sustainability.

**Keywords:** Construction waste. Environmental impacts. Embodied energy. CO<sub>2</sub> emissions. Conventional masonry. Light steel framing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo.....	31
Figura 2 -	Perfis padronizados pela NBR 6355:2003.....	38
Figura 3 -	Efeitos da carga do vento: (a) translação e (b) tombamento.....	40
Figura 4 -	Montantes e guias de um painel de LSF.....	41
Figura 5 -	Distribuição dos esforços da verga para as ombreiras.....	42
Figura 6 -	Representação esquemática dos componentes de uma laje no sistema LSF.....	44
Figura 7 -	Esquema de construção, tipos: (a) balloon e (b) platform.....	46
Figura 8 -	Ciclo de vida dos produtos de construção.....	49
Figura 9 -	Fases da ACV.....	50
Figura 10 -	Fases do ciclo de vida energético de uma edificação.....	54
Figura 11 -	Fluxograma do trabalho.....	68
Figura 12 -	Planta baixa da residência em LSF.....	83
Figura 13 -	Elevações 1, 2, 3 e 4 da residência em LSF.....	84
Figura 14 -	Resíduos dos perfis de aço: perdas de processo.....	85
Figuras 15 e 16 -	Materiais necessários para montagem dos painéis em fábrica.....	86
Figuras 17 a 20 -	Montagem da estrutura de aço dos painéis, conforme projeto.....	87
Figuras 21 e 22 -	Instalação do revestimento externo em Panel H Smartside.....	88
Figuras 23 e 24 -	Instalação do isolamento em lã de vidro.....	88
Figuras 25 e 26 -	Instalação das tubulações embutidas e fixação das chapas internas.....	89
Figuras 27 e 28 -	Residência de LSF pré-montada em fábrica para testes: vistas externas.....	90
Figuras 29 e 30 -	Residência de LSF pré-montada em fábrica para testes: vistas internas.....	90
Figuras 31 e 32 -	Execução da fundação: (a) fôrmas e lastro de brita; e (b) armadura já montada.....	91
Figuras 33 e 34 -	Fundação em radier: (a) detalhe da armadura; e (b) detalhe da tubulação de esgoto.....	91

Figuras 35 e 36 -	Concretagem do radier.....	91
Figuras 37 e 38 -	Radier e calçada já concretados e desenformados.....	91
Figuras 39 e 40 -	Carregamento e transporte dos painéis.....	92
Figuras 41 a 46 -	Descarregamento e montagem dos painéis na obra.....	92
Figuras 47 e 48 -	Residência montada, com e sem telhas.....	93
Figura 49 -	Resíduos de brita gerados na execução da fundação em radier...	94
Figura 50 -	Resíduos da montagem dos painéis em fábrica: gesso acartonado, OSB e Panel H.....	94

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Perdas por parte da edificação de LSF.....	109
Gráfico 2 -	Massa de resíduos por parte da edificação de LSF.....	110
Gráfico 3 -	Percentual de resíduos gerado, por material de construção – LSF ..	111
Gráfico 4 -	LSF: materiais aplicados X resíduos da obra.....	111
Gráfico 5 -	Perdas por parte da edificação de alvenaria.....	113
Gráfico 6 -	Massa de resíduos por parte da edificação de alvenaria.....	114
Gráfico 7 -	Percentual de resíduos gerado, por material de construção – alvenaria.....	115
Gráfico 8 -	Alvenaria convencional: materiais necessários X resíduos da obra..	115
Gráfico 9 -	Comparação dos RCC por parte da edificação.....	116
Gráfico 10 -	Massa total (t) dos materiais utilizados (aplicados na edificação e resíduos gerados).....	117
Gráfico 11 -	Comparativo entre os impactos ambientais e a massa dos resíduos do LSF, por parte da edificação.....	118
Gráfico 12 -	Comparativo entre os impactos ambientais e a massa dos resíduos da alvenaria, por parte da edificação.....	119
Gráfico 13 -	Energia embutida e emissões de CO <sub>2</sub> nos materiais estudados por m <sup>2</sup> de construção.....	121

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 -	Emissões de CO <sub>2</sub> na etapa pré-operacional do ciclo de vida.....	55
Quadro 2 -	Quantidade de resíduos gerada nas três categorias.....	57
Quadro 3 -	Protocolo de coleta de dados.....	76
Quadro 4 -	Materiais de construção escolhidos para análise.....	81
Quadro 5 -	Partes da edificação em alvenaria a serem estudadas.....	96
Tabela 1 -	Valores percentuais de perdas de materiais.....	33
Tabela 2 -	Perda de materiais no Brasil.....	33
Tabela 3 -	Índices de perda utilizados.....	78
Tabela 4 -	Quantidade de material adquirida para a obra de LSF.....	93
Tabela 5 -	Quantidade de materiais (adquirida, aplicada e resíduos) na obra de LSF.....	95
Tabela 6 -	Composição de broca de concreto armado, controle tipo “C”, brita 1 e 2, fck= 13,5Mpa.....	97
Tabela 7 -	Volume de concreto total.....	97
Tabela 8 -	Quantidade de aço e fôrmas pelo volume de concreto.....	98
Tabela 9 -	Traço do concreto 21Mpa e quantidades totais de material.....	98
Tabela 10 -	Volume de madeira para fôrmas.....	98
Tabela 11 -	Composição das paredes de vedação.....	99
Tabela 12 -	Traço de argamassas de revestimento.....	99
Tabela 13 -	Composição das argamassas de revestimento.....	99
Tabela 14 -	Quantidade de materiais necessária para cobertura.....	100
Tabela 15 -	Quantidade de materiais (teórica necessária, resíduos e total) na obra de alvenaria.....	101
Tabela 16 -	Energia embutida nos resíduos da obra de LSF, por parte da edificação.....	103
Tabela 17 -	Energia embutida nos resíduos da obra de alvenaria, por parte da edificação.....	104

Tabela 18 - Energia embutida nos resíduos das obras, por material de construção.....	105
Tabela 19 - Emissões de CO <sub>2</sub> pelos resíduos da obra de LSF, por parte da edificação.....	106
Tabela 20 - Emissões de CO <sub>2</sub> pelos resíduos da obra de alvenaria, por parte da edificação.....	106
Tabela 21 - Emissões de CO <sub>2</sub> pelos resíduos das obras.....	107
Tabela 22 - Perdas por parte da edificação de LSF.....	108
Tabela 23 - Quantidade de resíduos gerada, por material de construção – LSF.	110
Tabela 24 - Perdas por parte da edificação de alvenaria.....	112
Tabela 25 - Quantidade de resíduos gerada, por material de construção – alvenaria.....	114
Tabela 26 - Impactos ambientais dos resíduos do LSF, por parte da edificação.	117
Tabela 27 - Impactos ambientais dos resíduos da alvenaria, por parte da edificação.....	118
Tabela 28 - Impactos ambientais dos resíduos.....	119
Tabela 29 - EE e CO <sub>2</sub> nos materiais aplicados nas obras.....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ACVCO <sub>2</sub>	Análise de Ciclo de Vida de CO <sub>2</sub>
ACVE	Análise de Ciclo de Vida Energético
BEN	Balanço Energético Nacional
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DFA	<i>Design for Assembly</i> - Projeto para montagem
EE	Energia Embutida
EEi	Energia Embutida Inicial
EI	Energia Incorporada
EPS	Poliestireno Expandido
ES	Engenharia Simultânea
FCO <sub>2</sub>	Fator de CO <sub>2</sub>
FE	Fator de Energia
GHG	<i>Green House Gases</i> – Gases do Efeito Estufa
IBS	<i>Industrialised Building Systems</i> – Sistemas de Construção Industrializados
ICE	<i>Inventory of Carbon and Energy</i> – Inventário de Carbono de Energia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> – Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Organização Internacional para Padronização
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PFF	Perfil Formado a Frio
PIB	Produto Interno Bruto
PPGECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCI	<i>Steel Construction Institute</i> – Instituto de Construção em Aço
TCPO	Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos
WF	<i>Wood Frame</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	PROBLEMA.....	19
1.2	OBJETIVO.....	19
1.3	PRESSUPOSTOS.....	19
1.4	JUSTIFICATIVAS.....	20
	1.4.1 Socioambiental.....	20
	1.4.2 Econômica.....	21
	1.4.3 Tecnológica.....	22
1.5	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA.....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
2.1	CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE.....	25
2.2	PERDAS E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	28
	2.2.1 Panorama brasileiro.....	32
2.3	USO RACIONAL DOS MATERIAIS.....	35
2.4	LIGHT STEEL FRAMING.....	37
	2.4.1 Composição.....	39
	2.4.1.1 Fundações.....	39
	2.4.1.2 Estrutura vertical.....	41
	2.4.1.3 Estrutura horizontal.....	44
	2.4.1.4 Cobertura.....	44
	2.4.2 Métodos de construção.....	45
	2.4.3 Industrialização e pré-fabricação.....	46
2.5	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	49
	2.5.1 Fases de uma ACV.....	51
	2.5.2 ACVE e ACVCO <sub>2</sub> .....	52
2.6	ESTADO DA ARTE.....	56
<b>3</b>	<b>ESTRATÉGIAS E MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>68</b>
3.1	ESTRATÉGIAS DE PESQUISA.....	69
	3.1.1 Unidade de análise.....	69
	3.1.2 Delimitação do trabalho.....	69
	3.1.3 Justificativa a partir do objetivo.....	69
	3.1.4 Testes de validade.....	71



3.1.5	Seleção do caso.....	72
3.2	PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS.....	73
3.2.1	Fase de embasamento teórico.....	73
3.2.2	Fase decisória.....	73
3.2.3	Fase de coleta de dados.....	75
3.2.4	Fase redacional.....	75
3.3	MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS.....	76
3.3.1	Quantidade de resíduos.....	77
3.3.2	Impactos ambientais associados.....	78
4	<b>GERAÇÃO DE RESÍDUOS NA FASE DE CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>81</b>
4.1	RESIDÊNCIA EM <i>LIGHT STEEL FRAMING</i> .....	82
4.1.1	Fabricação dos perfis de aço galvanizado.....	85
4.1.2	Construção da residência.....	86
4.1.3	Quantificação dos materiais.....	93
4.1.4	Quantificação dos resíduos.....	94
4.2	RESIDÊNCIA EM ALVENARIA CONVENCIONAL.....	95
4.2.1	Quantificação dos materiais de construção.....	96
4.2.2	Quantificação dos resíduos.....	100
5	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS.....</b>	<b>102</b>
5.1	ENERGIA EMBUTIDA.....	102
5.2	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	105
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>108</b>
6.1	QUANTIDADE DE RESÍDUOS DE OBRA.....	108
6.2	IMPACTOS AMBIENTAIS.....	117
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>134</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Para comportar suas atividades diárias, o homem transforma constantemente o ambiente natural em ambiente construído, utilizando-o para sua habitação, trabalho, lazer e locomoção. Por permear a base da vida humana, a construção civil possui um importante papel para a sociedade e está presente em todas as regiões ocupadas pelo homem, representando segurança, crescimento e bem-estar social.

Ela é considerada um importante segmento da indústria, exercendo um grande peso na economia mundial e sendo um indicativo de crescimento econômico e social. Devido às suas grandes proporções, a indústria da construção civil emprega grande quantidade de trabalhadores, é responsável por grande parcela da formação bruta de capital e movimenta ativamente a economia (CBIC, 2017).

Nos últimos anos, houve um crescimento exponencial da população mundial. Isto aconteceu aliado ao desenvolvimento da civilização baseado no uso de combustíveis fósseis e exploração desordenada do ambiente natural, deixando de lado as fontes de energia renováveis, a luz natural e as técnicas passivas de construção (ISOLDI et al., 2012). Dentro deste crescimento e exploração, também se enquadra a construção civil que, com um papel tão relevante, se tornou uma das atividades menos sustentáveis do planeta, no sentido ambiental.

Esta indústria é uma grande geradora de impactos ambientais, pois, além de alterar paisagens, consome muitos recursos naturais, como água, matérias-primas e energia (EDWARDS, 2004; SENAI, 2007; LACHIMPADI et al., 2012). Também é uma grande geradora de resíduos, pelo alto índice de perdas e desperdícios (PINTO, 1999; JOHN, AGOPYAN, 2000, AZEVEDO et al., 2006).

Matérias-primas e recursos naturais esgotáveis são extraídos da natureza para fabricação dos materiais de construção. Meios de transporte e equipamentos (como trens, caminhões, retroescavadeiras, entre outros), que empregam combustíveis fósseis, são utilizados em larga escala para realização de serviços e transporte de insumos. A água é utilizada de forma indiscriminada em todas as etapas dos processos.

Além disso, processos de transformação que exigem elevados insumos energéticos para sua implantação são necessários, desde a extração de matérias-primas e prospecção dos materiais até o final da construção (MONICH, 2012). Somado a isso, as edificações consomem energia em toda a sua fase de operação (em forma de climatização, cocção, iluminação, entre outros), manutenção/reformas e desconstrução. Segundo BEN (2015),

mais de 9% da energia total disponibilizada no Brasil foi destinada a habitações, ficando a indústria com uma parcela de 32,9% e os transportes com 32,5%.

Aliadas ao consumo energético, têm-se as emissões de CO<sub>2</sub>, que ocorrem em todas as etapas do ciclo de vida, comumente na fabricação e transporte de materiais e componentes, na operação da edificação e na demolição. A queima de fontes energéticas emite dióxido de carbono na atmosfera, o que contribui ainda mais para os problemas ambientais da atualidade, promovendo alterações no clima mundial (LOBO, 2010).

De acordo com Lobo (2010), visando à implantação de melhorias nos processos, produtos finais e serviços da construção civil, Análises de Ciclo de Vida têm sido realizadas. Elas utilizam inventários e bancos de dados sobre materiais e processos na busca da definição e mensuração de impactos ambientais, podendo ser recortadas para abordagens específicas (como análises energéticas ou de emissões de CO<sub>2</sub> associadas).

Em nosso país, a construção de edificações, principalmente as residenciais, é fundamentada, na maioria dos casos, em processos de produção de base tecnológica simples, utilizando-se em larga escala a técnica construtiva da alvenaria convencional. Nela, são usados tijolos cerâmicos e argamassa para confecção das paredes; e as estruturas são feitas em concreto armado. Além do elevado consumo de matéria-prima (como concreto, argamassas e tijolos), a geração de resíduos neste tipo de construção também é bastante elevada (SANTIAGO, ARAÚJO, 2008). Ela reflete a ineficiência no uso dos materiais e falta de planejamento de obra. As perdas e desperdícios são alarmantes.

Este conservadorismo prejudica o desenvolvimento do setor da construção. As barreiras à inovação impedem que novas medidas sejam tomadas na busca do desenvolvimento sustentável. O aprimoramento dos sistemas construtivos é desejado, buscando maior racionalidade construtiva.

Além do melhoramento, para tentar mitigar esta situação e reduzir a geração de resíduos, novas técnicas construtivas são buscadas como alternativas, como alvenaria de blocos estruturais, wood frame, *light steel framing*, entre outras. O LSF pode ser uma delas por ser considerada uma construção racionalizada e enxuta (VIVAN et al., 2010). Ele é um sistema construtivo estruturado em perfis de aço galvanizado com fechamento em placas parafusadas e fundações menos robustas devido à leveza dos painéis.

Apesar de prometer uma menor geração de resíduos, os materiais utilizados nas construções de LSF exigem processos de fabricação mais complexos e de maior energia embutida inicial. Comparando-se o aço, matéria-prima chave desta técnica, com o concreto (largamente utilizado na alvenaria), tem-se EE's (energias embutidas) de 35 e 1,2 MJ/kg,

respectivamente. Além disso, as emissões de dióxido de carbono associadas a estes dois materiais são de 2,73 e 0,12kg CO<sub>2</sub>/kg, reforçando os menores atributos de sustentabilidade para o aço.

É neste contexto que se insere este trabalho, o qual busca a comparação da quantidade de resíduos gerada na obra de cada uma destas técnicas construtivas (LSF e alvenaria convencional) e quais os impactos ambientais por eles gerados, em relação à energia embutida no ciclo de vida e ao CO<sub>2</sub> emitido, por meio de estudo de caso e simulação. A quantificação da EE e do CO<sub>2</sub> se faz necessária para verificação do impacto dos resíduos das duas técnicas construtivas, pois de nada adianta gerar menos RCC, se estes possuem maiores impactos associados.

## 1.1 PROBLEMA

Qual o impacto de uma habitação de pequeno porte construída em *light steel framing*, quando comparada com uma de alvenaria convencional, em relação à quantidade de resíduos de construção gerada na etapa de obra e à energia embutida e geração de CO<sub>2</sub> atribuída a estes resíduos na fase pré-operacional do seu ciclo de vida?

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em, por meio da realização de um estudo de caso com etapa de simulação, estimar a quantidade de resíduos de construção civil gerados na fase de construção de uma edificação padrão concebida em LSF em comparação com uma em alvenaria convencional e analisar os impactos ambientais associados a eles no seu ciclo de vida pré-operacional, em relação à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>.

## 1.3 PRESSUPOSTOS

Segundo Vivan (2011), o *light steel framing* (LSF) é um sistema construtivo pré-fabricado, sendo considerado um processo racionalizado e industrializado. Com boas práticas projetuais e produtivas, isso pode garantir os princípios da construção enxuta e ajudar na redução da geração de resíduos de construção (CRASTO, 2005; VIVAN, 2011).

De acordo com a pesquisa de Carminatti (2012), que se dedicou a estudar a energia embutida inicial (EEi) em construções de LSF e alvenaria de bloco cerâmico, o LSF apresentou valores muito semelhantes, mas ainda assim mais altos, aos do bloco cerâmico: 5,6 GJ/m<sup>2</sup> e 5,4 GJ/m<sup>2</sup>, respectivamente. Pedroso (2015) também encontrou maiores valores

de EEi e energia incorporada total para vedações de LSF quando comparado a outros sistemas.

Sposto et al. (2016) quantificaram a energia incorporada e as emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas em LSF quando comparadas a fachadas convencionais (de blocos cerâmicos e argamassas), chegando em percentuais menores para o LSF em massa, EE e emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, os autores afirmam que a massa de cada material serve como ponto de partida para a análise dos impactos, devido a sua proporcionalidade.

Neste sentido, quer-se aprofundar as pesquisas anteriores, comparando LSF e alvenaria convencional em termos de quantidade de resíduos e impactos ambientais gerados, porém, desta vez, analisando os impactos apenas dos RCC e não de toda a edificação ou suas partes.

## **1.4 JUSTIFICATIVAS**

### **1.4.1 Socioambiental**

A construção civil é uma atividade causadora de inúmeros impactos ambientais, principalmente devido à utilização de matérias-primas não renováveis, ao grande consumo energético em todas as fases do ciclo de vida de uma edificação e à significativa geração de resíduos. Segundo Edwards (2004) e Solano (2008), ela é a atividade menos sustentável do planeta, absorvendo entre 40 e 50% dos recursos materiais mundiais.

Além da elevada extração e exploração dos recursos naturais que são transformados em matéria-prima para esta indústria, outro aspecto que preocupa é a geração de resíduos, pois praticamente todas as atividades desenvolvidas neste setor são geradoras de RCC. Segundo John e Agopyan (2000), a massa de resíduos de construção gerada nas cidades é igual ou maior que a massa de resíduos domiciliares, podendo variar entre 41% a 70% da massa total de RSU (resíduos sólidos urbanos). Isto se deve ao alto índice de perdas no processo construtivo, que varia entre 20 e 30% da massa total de materiais. De acordo com IPEA (2012), em 2009, foram coletados, pelo serviço público (sem considerar os RCC provenientes do serviço privado), 28.530.000 toneladas de resíduos da construção civil; já em 2010, este número chegou a 30.998.000 t/ano. Isso mostra que o número cresce a cada ano.

Estes resíduos representam materiais que foram extraídos da natureza e que passaram por um processo para se tornarem matérias-primas, também gerador de impactos ambientais (pois consome recursos e energia) e que pode emitir poluentes. De acordo com Tavares e Bragança (2016), 1kg de aço requer 35 MJ de energia para sua fabricação, já na

fabricação do alumínio são 155 MJ/kg. Além disso, os materiais possuem emissões de CO<sub>2</sub> associadas à queima de combustíveis para sua fabricação, sendo que alguns deles também geram quantidades de dióxido de carbono significativas nos processos fabris em si. Desta forma, o alumínio emite na atmosfera 10,19kg CO<sub>2</sub>/kg. Segundo John (2000), a produção de uma tonelada de cal hidratada cálcica (CaO.H<sub>2</sub>O) libera aproximadamente 785 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera; já a produção de 1 t de clínquer (pelo método via seca), pode liberar de 820 a 870 kg de CO<sub>2</sub>. Ele afirma que, com base em outros autores, a produção de cimento, nos anos 2000, contribuía com 6 a 8% do CO<sub>2</sub> emitido no Brasil. Isto significa que a fabricação destes materiais já gerou grandes impactos ambientais, e que seu desperdício e/ou perda (transformando-os em resíduos) contribuem ainda mais para degradação do meio ambiente.

Os resíduos de construção gerados são uma questão complexa: deve-se pensar qual será sua destinação, se serão reaproveitados, reutilizados, reciclados ou simplesmente descartados. Outro problema é que, muitas vezes, o RCC é disposto irregularmente, acontecendo com 10 a 47% do total gerado, segundo estimativa de Pinto (1999). Estes resíduos podem causar enchentes, interdição parcial de vias, degradação do ambiente urbano, proliferação de doenças, entre outros (JOHN; AGOPYAN, 2000). Segundo Agopyan et al. (1998), além dos problemas ambientais da deposição clandestina, têm-se os custos sociais, pela poluição visual, geração de poeira, proliferação de vetores de doenças, entre outros. Qualquer uma das alternativas gera diversos impactos ambientais e sociais.

Sendo assim, este estudo justifica-se socioambientalmente pela quantidade de impactos ambientais que está associada à geração de resíduos (desde antes de os materiais se tornarem resíduos, quando ainda são matérias-primas extraídas da natureza, até a sua destinação final) e, conseqüentemente, aos problemas que isso pode trazer para a sociedade atualmente e também às gerações futuras. O trabalho visa estudar uma técnica construtiva que possa servir como opção à alvenaria convencional e que possa diminuir o consumo e desperdício de matérias-primas, aumentando a eficiência ambiental e sustentabilidade das construções, visando um futuro melhor.

#### **1.4.2 Econômica**

John e Agopyan (2000) relatam que, com base em diversos autores, estima-se um total entre 230 e 760 kg/hab.ano de resíduos de construção civil gerados no Brasil, sendo a mediana 510 kg/hab.ano. Para Azevedo et al. (2006), isso representa perda de recursos tanto para o gerador quanto para o setor público. No primeiro caso, têm-se os gastos com os materiais que foram desperdiçados e com o seu transporte para o destino final. Já para o

setor público, o ônus reside no fato de que ele deve absorver alguns custos de disposição final e, em alguns casos, do próprio transporte destes resíduos. Como mencionado no início deste trabalho, construções em alvenaria convencional, muito utilizadas no Brasil, são grande geradoras de resíduos, principalmente de tijolos, concreto e argamassas. Segundo Agopyan et al. (2003), a mediana (verificada em pesquisa de campo) da perda de tijolos cerâmicos é de 15%, superior à definida pela TCPO 10 de 1996, que variava entre 3 e 10% dependendo do tipo de bloco considerado. Isso representava uma perda financeira real acima do estipulado como padrão em composições orçamentárias nos anos 90.

Também do ponto de vista financeiro, o descarte irregular dos RCC, que ocorre frequentemente, onera as administrações municipais, que se responsabilizam pela remoção e disposição destes resíduos acumulados. Segundo John e Agopyan (2000), a coleta de entulho em cidades com mais de 600mil habitantes, no Brasil, pode chegar a mais de R\$400 milhões por ano, admitindo-se um valor de R\$10/hab.ano.

Além disso, sob o ponto de vista dos impactos ambientais, um relatório elaborado pelo Comitê de Economia das Mudanças Climáticas no Brasil (BRASIL, 2009) prevê que as mudanças climáticas possam representar prejuízos entre 719 bilhões (no melhor cenário) e 3,6 trilhões de reais (na simulação mais intensa). Também, o crescimento do PIB mundial pode ser afetado pelas emissões de CO<sub>2</sub>, com menores crescimentos projetados até 2030 conforme maiores forem as concentrações do gás na atmosfera (IPCC, 2007).

Dito isto, a justificativa econômica para a busca da redução da geração de RCC nas construções com a utilização de outras técnicas construtivas está na possibilidade de evitar e reduzir a aquisição de materiais que acabam se perdendo no processo construtivo. Em termos simples, diminui-se a quantidade de dinheiro investido que é, literalmente, jogado fora. Também se deve levar em conta que quanto menos resíduos são gerados, há menos gastos com a disposição final deles e com as consequências de seus impactos ambientais associados.

Além disso, com a utilização do LSF, que é um sistema construtivo muito mais leve que a alvenaria convencional, as fundações podem ser menos robustas, havendo menos consumo de materiais para este fim, reduzindo custos da construção.

### **1.4.3 Tecnológica**

A construção civil conta com inúmeras técnicas construtivas que podem ser utilizadas, cada uma contribuindo de formas distintas no impacto ambiental de um edifício. No Brasil, a mais significativa ainda é a alvenaria convencional em tijolos cerâmicos, mas,

como visto, ela se mostra grande consumidora de matérias-primas e grande geradora de resíduos de construção. Para redução do impacto da construção civil no meio ambiente, uma das medidas a ser tomada é a substituição de processos, técnicas e materiais tradicionais por outros mais eficientes.

Um exemplo de como as técnicas e materiais de construção utilizados podem afetar a geração de resíduos está na pesquisa de Agopyan et al. (2003). Nela, vê-se que, dependendo da vedação escolhida (bloco cerâmico, bloco de concreto ou tijolo cerâmico), as perdas podem ser diferentes. As vedações apresentam, respectivamente, uma média de perda de 18, 10 e 21% e uma mediana de 14, 11 e 15%. Os consumos de cimento para argamassa de assentamento também podem variar substancialmente (0,19 a 1,33 kg/ml) entre as três modalidades de alvenaria.

Segundo Milan et al. (2011), Vivan e Paliari (2012), Gomes e Lacerda (2014) e SBI (2017), o LSF apresenta inúmeras vantagens produtivas e tecnológicas pela pré-fabricação dos seus componentes, são elas: baixo peso, alta precisão dimensional, padronização construtiva, alta resistência, uso de materiais recicláveis, melhor desempenho termo-acústico, facilidade de passagem de instalações, baixa geração de resíduos, entre outras. Este estudo busca analisar o quão mais vantajosa poderia ser a utilização do LSF em relação à quantidade de resíduos gerados e aos impactos ambientais associados (energia embutida inicial e emissão de CO<sub>2</sub>) aos mesmos, podendo apontar esta tecnologia construtiva como alternativa mais viável em termos de minimização de impactos.

## **1.5 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA**

Nesta subseção, são relacionadas pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da UFPR que possuem alguma relação com o presente trabalho. Dentro da área de concentração “Ambiente Construído e Gestão”, tem-se a linha de pesquisa “Sustentabilidade no ambiente construído”. Nela, há inúmeros trabalhos que tratam dos impactos ambientais de edificações e/ou de materiais e técnicas construtivas. Também tratam de desempenho acústico e térmico de edificações, de conforto ambiental, entre outros.

Aproximando-se mais ao tema deste trabalho, têm-se diversos trabalhos que fazem análise do ciclo de vida (ACV) de materiais, mobiliário e de edificações, buscando estudar o desempenho ambiental destes. Em muitos casos, há o enfoque na análise do ciclo de vida energético. Como exemplo, tem-se os trabalhos de Marcos (2009), Lobo (2010) e Marchesini (2013).



Já Monich (2012) tem como tema “Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema *wood frame* o estado do Paraná”. Ela faz uma ACVE comparando dois sistemas construtivos, o *wood frame* e a alvenaria convencional. Esta abordagem se aproxima muito ao que este trabalho se propõe que é fazer uma ACV comparando a geração de resíduos e seus impactos em *light steel framing* e alvenaria convencional.

Em relação aos resíduos da construção civil, o programa já produziu dois trabalhos dentro da temática. São eles: (a) o de Guimarães Junior (2007), que trata da gestão dos resíduos incorporada ao planejamento e controle da produção; e (b) o de Druszcz (2002), que avalia os aspectos ambientais dos materiais de construção civil, enfocando na ACV do bloco cerâmico e verificando os resíduos gerados e sua possível destinação.

Pode-se dizer que a utilização da análise do ciclo de vida é bastante frequente dentro do PPGECC, porém recebendo mais atenção a ACVE. Resíduos também já foram tratados, porém com menor frequência; da mesma forma que a comparação entre duas técnicas construtivas. O que este trabalho propõe (quantificar a geração de resíduos na obra de uma residência de LSF em comparação com alvenaria convencional, além de analisar seus impactos ambientais) é, de certa forma, inovador no programa.

Na literatura, muito se vê sobre a redução na geração de resíduos que o uso do LSF pode proporcionar, porém poucas são as pesquisas que quantificam estes RCC, principalmente no cenário nacional. A contribuição que se pretende com este trabalho é de se explorar a questão da quantidade de resíduos gerada em uma obra de LSF, chegando-se em números mais concretos para haver uma melhor comparação com uma obra em alvenaria convencional. Além disso, expandindo o objetivo da pesquisa, a análise dos impactos ambientais (em relação à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>) contribui para verificar se, apesar de gerar menos resíduos, o LSF também possui menores ou maiores impactos associados a eles, visto que os materiais mais utilizados por esta técnica podem apresentar maiores índices de EE e emissões de CO<sub>2</sub>.

A segunda parte do objetivo, quantificação dos impactos, também pôde aproximar este trabalho com algumas outras dissertações de fora do programa, como é o caso da de Carminatti (2012), que faz uma ACVE de uma habitação social em LSF e alvenaria estrutural (de blocos de concreto e cerâmicos), e de Caldas (2016), que fez uma ACVE e uma ACVCO<sub>2</sub> de uma habitação em LSF e alvenaria de blocos cerâmicos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE

Por muitos anos, a população mundial cresceu e se desenvolveu utilizando os recursos naturais de forma desordenada e inconsequente. A partir do final da década de 1960 e, principalmente a partir da década de 1980, intelectuais fizeram projeções para o futuro e passaram a alertar a população sobre os riscos ambientais, especialmente em relação aos recursos naturais finitos e à alteração da dinâmica climática global. Em 1987, a primeira definição de *desenvolvimento sustentável* foi criada, afirmando que “o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer o atendimento às necessidades das gerações futuras.” (GONÇALVES; DUARTE, 2006). Apesar de o tema já ser tratado há muitos anos, a partir dos anos 2000 é que a sustentabilidade passou a ser mais aceita pela população e maiores preocupações foram levantadas.

Para se alcançar um desenvolvimento em longo prazo para a sociedade, SBI (2017) afirma que a sustentabilidade inclui preocupações ambientais, econômicas e sociais. Segundo ele, os diferentes tipos de atividades industriais e humanas contribuem para efeitos no meio ambiente, positivos ou negativos. Quanto aos impactos negativos, as maiores preocupações são em relação à: energia embutida; energia operacional; transporte; consumo de matérias-primas e água; emissão de substâncias tóxicas; reuso e reciclagem de materiais; e tratamento e disposição de resíduos. Quanto aos transportes, a combustão de combustíveis fósseis é a atividade que tem maior influência nos impactos ambientais, pois todos os transportes pesados (exceto trens elétricos), além de utilizarem recursos fósseis finitos, emitem CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HC e outros poluentes.

Dentro deste cenário está a construção civil, causadora de muitos impactos ao meio ambiente, principalmente pela utilização de matérias-primas não renováveis, pelo grande consumo energético e pela significativa geração de resíduos. Segundo SBI (2017), o ciclo de vida de todos os tipos de edificação, incluindo a sua produção/construção, seu uso e demolição, geram influências inevitáveis no planeta, podendo ser boas ou ruins. E a sustentabilidade na construção deve se preocupar com os principais aspectos ambientais e de saúde relacionados a este ciclo de vida.

Esta indústria está presente em todas as regiões ocupadas pelo homem, tendo um papel muito importante para a sociedade. SENAI (2007) afirma que a indústria da construção exerce um grande peso na economia internacional, empregando enorme

quantidade de trabalhadores e sendo responsável por cerca de 40% da formação bruta de capital.

Segundo CBIC (2017), no Brasil, a construção civil foi responsável por 5,6% do PIB (Produto Interno Bruto) em 2016, além de ter gerado mais de 9 milhões de empregos neste mesmo ano e possuir 8,67% da população ocupada total participando desta indústria em 2014. Já na Europa, SBI (2017) afirma que a construção emprega cerca de 7% da população, somando negócios anuais de mais de 1.000 bilhões de euros. Além de ser um setor central para a economia, ele aponta que a construção significa bem-estar, segurança, crescimento e investimentos para o futuro.

Com um papel tão relevante, a indústria da construção civil é uma das atividades menos sustentáveis do planeta, absorvendo, de acordo com Lachimpadi et al. (2012), até 60% dos materiais brutos extraídos da terra. Edwards (2004) afirma que se “destina 40% da água utilizada no mundo para abastecer instalações sanitárias e outros usos nos edifícios; utiliza 60% da terra cultivável para construção e 70% dos produtos relacionados à madeira estão vinculados à construção de edifícios”. O setor também é responsável por um elevado consumo energético e pela produção de gases do efeito estufa (principalmente o dióxido de carbono). Além disso, a ineficiência de alguns de seus processos faz com que praticamente todas as atividades desenvolvidas na construção possuam perdas e sejam geradoras de resíduos.

Segundo Lawson et al. (2005), no Reino Unido, a construção civil utiliza 5% do total de energia consumida no país, sendo que o ambiente construído chega a usar 40% deste total. Além disso, os autores afirmam que até 25% de todos os materiais adquiridos são desperdiçados em técnicas construtivas com atividades intensivas no canteiro de obras. Já SBI (2017) acrescenta que mais de 40% dos recursos materiais usados na sociedade são consumidos pela construção.

Para Sharma et al. (2011), o setor das edificações tem uma grande influência no consumo de recursos naturais e nas emissões liberadas no meio ambiente. Focando na questão energética, eles afirmam que o consumo de energia nas edificações tem um importante papel no mundo todo, pois, ao longo de toda a vida da edificação, a energia é utilizada, desde a construção até a demolição. Segundo eles, a demanda pode ser direta (usada na construção, operação, reabilitação e demolição) ou indireta (usada na produção dos materiais de construção). De qualquer forma, estudos apontam que o setor de edificações é responsável por 40% do uso de energia e emissões de GHG - gases do efeito estufa (SHARMA et al., 2011). Tavares (2006) analisou dados do Inventário Nacional de

Emissões de Gases de Efeito Estufa de 2005 e verificou que, do total das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, a construção civil é responsável por 4,58%.

Durante muito tempo, não houve preocupação com os impactos ocasionados pela atividade de construção no planeta, incluindo a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais não renováveis utilizados na sua cadeia produtiva, de acordo com Corte et al. (2015). Estes autores afirmam que os custos e prejuízos ocasionados pelo desperdício dos materiais e destinação dos resíduos gerados também não eram objeto de preocupação.

Segundo Marques e Salgado (2007), todo projeto de edificação causa algum tipo de impacto no ambiente em que se insere, mas isso não significa que o desempenho ambiental do edifício não possa ser melhorado, visando gerar menos impactos, gastos energéticos e resíduos de construção. A partir de 1990, intensificou-se a preocupação com as construções sustentáveis na tentativa de reverter, ou mesmo minimizar, os danos causados. Novas alternativas tecnológicas para a construção estão sendo buscadas pela frequente discussão sobre questões ambientais e a consciência da esgotabilidade dos recursos terrestres (ISOLDI et al., 2012).

Construção sustentável é um sistema construtivo que promove alterações conscientes no entorno, de forma a atender as necessidades de edificação, habitação e uso do homem moderno, preservando o meio ambiente e os recursos naturais, garantindo qualidade de vida para as gerações atuais e futuras. (ARAUJO, 2008)

Para Araújo (2008), a construção sustentável deve buscar o desenvolvimento de um modelo que proponha soluções aos problemas ambientais, mas sem renunciar ao uso da tecnologia e à criação de edificações que atendam as necessidades dos seus usuários. Isso vai de encontro com o exposto por Motta e Aguiar (2009), que afirmam que apesar de o modelo atual de desenvolvimento da civilização (baseado no crescente consumo de energia e recursos naturais com crescente geração de resíduos) estar conduzindo ao esgotamento desses recursos e a mudanças climáticas, a solução não é simplesmente parar de consumir, e sim criar uma nova situação de desenvolvimento sustentável.

Segundo Silva (2007), para reverter esta situação, exige-se uma reformulação ampla dos processos produtivos e de consumo, desde a extração da matéria-prima, os processos de produção e transporte, até o uso do produto e gerenciamento dos resíduos. A redução do impacto da construção civil no meio ambiente é uma tarefa complexa, sendo necessário que várias medidas sejam tomadas, como: aperfeiçoamento de projetos, redução do consumo de matérias-primas, redução no consumo de energia, redução do consumo de água, aproveitamento das condições naturais locais, redução e reciclagem de

resíduos, substituição de materiais tradicionais por outros mais eficientes, inovação, entre outros (SILVA, 2007; LORDSLEEM JR & LIMA, 2011).

## 2.2 PERDAS E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Dando destaque para a questão dos resíduos, para Souza et al. (2004), a busca pelo desenvolvimento sustentável coloca a construção como centro das discussões, visto que desperdiçar materiais (seja na forma de resíduos ou sob outra natureza) é desperdiçar recursos naturais, e que a geração de resíduos causa diversos impactos negativos para o meio ambiente, inclusive pela escassez de locais para deposição do resíduo gerado e pela deposição em locais indevidos.

Lachimpadi et al. (2012) afirmam que, em 2003, aproximadamente 323 milhões de toneladas de RCC foram geradas nos Estados Unidos e 70 milhões de toneladas na Inglaterra, além disso, em Hong Kong, estima-se que os aterros receberam 3.158 toneladas de resíduos de construção por dia, em 2007. Segundo Corte et al. (2015), em 2013, mais de 117 mil toneladas de resíduos de construção e demolição foram coletadas por dia nos municípios brasileiros, representando um aumento de 4,6% em relação ao ano anterior. Os autores ainda ressaltam que estes valores são, na realidade, ainda maiores, pois usualmente são coletados, pelos municípios, apenas os RCD lançados em vias públicas.

Segundo John e Agopyan (2000), a massa de resíduos de construção gerada nas cidades é igual ou maior que a massa de resíduos domiciliares. Isto se deve ao alto índice de perdas no processo construtivo, que varia entre 20 e 30% da massa total de materiais (PINTO, 1999; AZEVEDO et al., 2006).

O conceito de perda dado por Santos et al.<sup>1</sup> (1996) é citado por Agopyan et al. (1998) em seu relatório, sendo ela “qualquer ineficiência que reflita no uso de materiais, mão-de-obra e equipamentos em quantidades superiores àquelas necessárias para a produção da edificação”. Perda é aquilo que se gasta além do necessário. Para Agopyan et al. (1998), as perdas podem ser classificadas, segundo sua natureza, como: por superprodução (argamassa em excesso que endurece); por substituição (perda de capital por erro de especificação, acima do necessário); por transporte (mau acondicionamento, como sacos furados); no processamento em si (devido à má execução / execução inadequada); nos estoques (compra em excesso); no movimento (arranjo de canteiro

---

<sup>1</sup> SANTOS, A.; FORMOSO, C.T.; LANTELME, E. **Método de intervenção para redução das perdas na construção civil**: manual de utilização. Porto Alegre, 1996.

inadequado); por elaboração de produtos defeituosos; entre outras, como roubos, vandalismo e acidentes.

Além disso, Agopyan et al. (1998) afirmam que, segundo seu controle, existem dois tipos de perda. As inevitáveis são aquelas em nível aceitável, porque os investimentos para combatê-las seriam muito maiores que a economia gerada. Já as evitáveis são aquelas com custo de ocorrência muito superior ao de prevenção, sendo estas conceituadas por Agopyan et al. (1998) como desperdício.

As perdas, na construção civil, podem ocorrer de duas maneiras: por incorporação de materiais à edificação, principalmente em serviços moldados no local; ou pelos resíduos, que são sua parcela mais visível e com maior impacto ambiental (SOUZA et al., 2004; AGOPYAN et al., 2003), sendo o foco deste trabalho. Neste sentido, procurou-se uma aproximação com o tema, buscando seu conceito.

Segundo a ABNT-NBR 10.004/2004, resíduos sólidos (em estado sólido ou semi-sólido) são resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Os resíduos são classificados em duas classes principais: (a) Classe I – Perigosos: que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade; ou (b) Classe II – Não perigosos: II-A) não inertes, com características de biocombustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, havendo possibilidade de riscos à saúde ou ao meio ambiente; II-B) inertes, que quando amostrados de forma significativa e submetidos, à temperatura ambiente, a contato (dinâmico e estático) com água destilada/deionizada, não tiveram “nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor” (ABNT-NBR 10.004/04, p. 5).

Segundo Lima e Cabral (2013), os resíduos da construção são usualmente considerados como classe II-B, não perigosos e inertes; mas, quando da presença de contaminantes e impurezas, devem ser considerados como não perigosos e não inertes (II-A). A Resolução nº 307/02, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), entende resíduos da construção civil (RCC) como:

Materiais 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, caliça ou metralha. (BRASIL, 2003, p.1)

Ela também define quatro classes de resíduos para a construção civil, que deverão ter tratamentos distintos:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: solos, componentes cerâmicos, argamassas, concreto, etc. Quando não utilizados, devem ser enviados para aterros de resíduos exclusivos desta classe para futuras aplicações;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, como papel/papelão, metal, madeira, plástico, etc. Quando não reutilizados ou reciclados, devem ser encaminhados para áreas de armazenamento temporário e dispostos de maneira a permitir seu uso futuro;
- Classe C: resíduos ainda sem tecnologia ou aplicações viáveis economicamente para reciclagem/recuperação. Devem ser armazenados, transportados e destinados conforme normativa específica;
- Classe D: resíduos perigosos, como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados. Também devem ser armazenados, transportados e destinados conforme normas técnicas específicas.

Em 2011, esta resolução teve um de seus artigos alterados pela Resolução 431/11. Na versão de 2002, o gesso era classificado como resíduo pertencente à Classe C, sem alternativa tecnológica de reciclagem/recuperação viável devido aos contaminantes que podem estar misturados a ele. Porém, na versão de 2011, ele passou a ser incluído na Classe B, havendo possibilidade de reciclagem para outras destinações. Segundo Silva (2013), baseado em estudos de John e Cincotto<sup>2</sup> (2003), para tornar a reciclagem possível, o resíduo de gesso deve ser segregado no momento da sua geração, havendo controle da sua contaminação no estoque e transporte. Desta forma, sua reinserção nos processos de fabricação se torna viável, visto que, quando livre de contaminantes e impurezas, o gesso volta a possuir as características químicas da sua matéria-prima (gipsita).

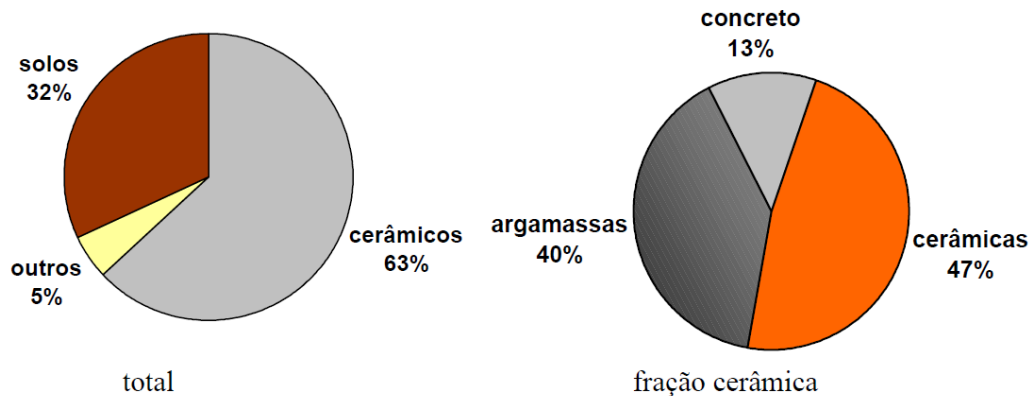
Segundo Costa et al. (2014), a composição e a quantidade dos RCC estão diretamente ligadas às características da fonte geradora, à qualidade da mão de obra, às técnicas construtivas utilizadas, à fase da obra em que se dá a coleta dos dados, entre outros. Eles afirmam que os resíduos da Classe A são os que mais predominam no Brasil (entre 88 e 96% do total), consistindo essencialmente em materiais inorgânicos, rochas naturais, materiais cerâmicos, concreto e argamassas. Para exemplificar o exposto, segue

---

<sup>2</sup> JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso**. São Paulo, 2003.

figura abaixo, com a composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo.

Figura 1 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo



Fonte: John e Agopyan (2000)

Em se tratando da geração de resíduos ao longo do ciclo de vida das construções, John e Agopyan (2000) afirmam que há três momentos: na fase de construção (canteiro de obras); na fase de manutenção e reformas; e na fase de demolição. Segundo os autores, as atividades de manutenção, reformas e demolição podem somar entre 42 e 80% do total de RCC gerado.

Na fase da construção, a geração de resíduos ocorre, principalmente, por perdas dos processos construtivos. Como já mencionado, parte destas perdas acaba incorporada nas construções e a outra parte é convertida em RCC, a fração estimada é de 50% para cada tipo de perda. Já na fase de manutenção, a geração de resíduos ocorre na correção de patologias, reformas ou modernização e no descarte de componentes degradados (JOHN; AGOPYAN, 2000). Na demolição, segundo Silva (2007), a geração de resíduos é o produto do processo, sempre havendo sua existência.

Para Tam et al. (2005), os principais fatores que contribuem com a geração de RCC são: (i) mal gerenciamento do canteiro de obras: falta de gerenciamento, canteiro desorganizado, manuseio inadequado, etc; (ii) falta de consciência ambiental pelos clientes/projetistas; (iii) danos na entrega dos materiais: compra excessiva, empacotamento inadequado, método de transporte, etc; e (iv) retrabalho devido a mão de obra ruim ou erros/mudanças de projeto. Isso vai de encontro com os estudos de Pinto (1999), que listou: definição e detalhamento insuficientes em projetos; mão de obra não qualificada; ausência de procedimentos operacionais de controle de execução; e qualidade inferior de alguns materiais utilizados. Parisi Kern et al. (2015) também afirmam que as decisões da fase de projeto afetam a quantidade de resíduos gerada na execução da obra. Uma parte



considerável dos RCC pode ser predita e eliminada com um bom gerenciamento. Segundo os autores, estudos de Poon (2007)<sup>3</sup> e Baldwin et al.<sup>4</sup> (2009) mostram que aproximadamente 10% dos RCC são gerados pelo processo de corte dos materiais durante o processo de construção, e que, neste contexto, elementos construtivos pré-fabricados podem efetivamente reduzir a geração de resíduos em obra.

### 2.2.1 Panorama brasileiro

Segundo Gomes e Lacerda (2014), a alvenaria é uma forma tradicional de construção, sendo utilizada há milhares de anos. Seus principais componentes são blocos ou tijolos, argamassa de assentamento e argamassas de revestimento (chapisco, emboço e reboco). Além disso, na estruturação da edificação, geralmente são utilizados componentes de concreto armado, como pilares, vigas e lajes. Após sua execução, a parede de alvenaria tem que ser talhada de forma manual para abertura de rasgos e passagem de tubulações de infraestrutura (elétrica, hidráulica e gás).

Alves (2015) afirma que, quando comparada a outras indústrias, a construção civil apresenta uma evolução tecnológica bastante lenta, principalmente quando se trata da racionalização de processos e materiais. No Brasil, escassas mudanças foram percebidas na construção civil, havendo evolução pouco significativa quanto às tecnologias e processos construtivos empregados, com predominância da “cultura do concreto”, segundo Alves (2015). Para Bernardes et al. (2012) e Caldas et al. (2016b), o uso de alvenaria na construção ainda é bastante comum, sendo as edificações constituídas basicamente de cimento e tijolos cerâmicos. Ela é culturalmente melhor aceita por sua durabilidade e pela facilidade na sua produção devido à montagem ser feita no local. De acordo com Santos e Farias Filho (1998), isto ocorre pois, na indústria da construção, existe um tradicionalismo arcaico em relação ao uso de novos materiais que devem substituir aqueles já consagrados, mas que estão tecnicamente ultrapassados.

Para Machado et al. (2010), o processo de assentamento manual é artesanal e lento, abrindo espaço para improvisações e desperdícios em obra. Já Santiago e Araújo (2008) afirmam que processos majoritariamente artesanais, com muito desperdício e baixa produtividade, ainda compõem a maior parcela da construção civil brasileira. Ainda neste raciocínio, Gomes e Lacerda (2014) afirmam que não há caráter homogêneo e seriado de produção. A construção tradicional, de alvenaria, ainda depende em grande escala de

---

<sup>3</sup> POON, C.S. Reducing construction waste. **Waste Manage**, v. 27, p. 1715-1716.

<sup>4</sup> BALDWIN, A.; POON, C.; SHEN, L.; AUSTIN, S.; WONG, I. Designing out waste in high-rise residential buildings: analysis of precasting methods and traditional construction. **Renewable Energy**, v. 34, p. 2067-2073.

tecnologias como moldagem no local, fôrmas de madeira e argamassas de assentamento; o que torna o processo construtivo um trabalho bastante intensivo no canteiro de obras. Isto, aliado à mão de obra de qualidade duvidosa, resulta em excesso de perdas e resíduos gerados (TAM et al., 2005).

Na tabela 1 abaixo, são apresentados alguns valores percentuais de perdas de materiais segundo três pesquisas.

Tabela 1 – Valores percentuais de perdas de materiais

Material	PINTO (1989)	SOIBELMAN (1993)	SANTOS (1995)
Concreto	1,5	12,9	-
Tijolos furados	-	50,0	5,4
Tijolos maciços	-	54,0	25,5
Componentes de vedação	13,0	-	-
Madeira	47,5	-	-
Rev. cerâmicos – paredes	9,5	-	-
Rev. cerâmicos - pisos	7,5	-	-

Fonte: Souza et al. (2004)

Em sua pesquisa, Agopyan et al. (1998) levantaram os percentuais de consumo e perda de materiais de construção analisando 69 canteiros de obras, predominantemente de edificações residenciais em concreto armado moldado *in loco* (86% quando comparado à alvenaria estrutural). Eles contaram com o apoio de diversas universidades do país, produzindo um relatório bastante completo e que ajudou a atualizar os índices que eram comumente utilizados em manuais de orçamentação (visto que encontraram valores superiores aos utilizados na época). Abaixo, são expostos os percentuais de perdas de alguns dos principais materiais utilizados nas técnicas tradicionais no Brasil, segundo o relatório de Agopyan et al. (1998) e segundo a 13ª edição da TCPO. As variações encontradas nos valores obtidos pelas duas fontes podem ser explicadas pelas distintas formas de coleta e análise dos dados realizadas em cada documento.

Tabela 2 – Perda de materiais no Brasil

Material		Agopyan et al (1998)		TCPO (2010)
Nome	Tipo	Amostras (n)	Mediana (%)	Média (%)
Concreto usinado	-	35	9	5 (de 1 a 33%)
Aço	Corte/dobra na obra	12	11	10 (de 4 a 16%)
Blocos e tijolos	Cerâmicos	37	13	5
	Concreto			3
Argamassa	Emboço interno	11	102	-
	Emboço externo	8	53	-
	Contrapiso	7	42	-
	Misturada em obra	-	-	30
	Industrializada	-	-	20

Fonte: Agopyan et al. (1998) e TCPO (2010).

As perdas citadas acima são o motivo da geração de RCC durante a construção. Considerando a taxa de geração de resíduos como razão entre a quantidade gerada e a área construída, Costa et al. (2014) compilaram dados de alguns autores, encontrando valores de massa de resíduos de 89,65kg/m<sup>2</sup> de piso (SOUZA, 2005<sup>5</sup>), 104,49kg/m<sup>2</sup> e 115,82kg/m<sup>2</sup> (CARELI, 2008<sup>6</sup>), e 137,02kg/m<sup>2</sup> (MARQUES NETO; SCHALCH, 2010<sup>7</sup>).

Os resíduos de construção, segundo Wang et al. (2015), afetam tanto o desenvolvimento sustentável, quanto a saúde humana. Eles afirmam que, em pesquisas e nas práticas de gerenciamento de RCC, o princípio dos 3 R's é utilizado - Redução, Reuso e Reciclagem. A redução é apontada como um dos métodos mais efetivos e eficientes, não apenas diminuindo a geração de resíduos e os problemas ambientais, como também reduzindo o custo das construções com separação de resíduos, transporte e disposição final. Em resumo, para se tornar sustentável, uma construção deve estar baseada na prevenção e redução de resíduos gerados, podendo utilizar os métodos citados acima. Mas quando a redução da geração de RCC não for alcançada, a reutilização e a reciclagem destes resíduos podem ser usadas como solução intermediária.

Para reduzir a geração de RCC, John e Agopyan (2000) sugerem inúmeras ações, sendo elas: (a) na fase de construção: aperfeiçoamento de projetos, seleção adequada de materiais, treinamento do pessoal, uso de ferramentas adequadas, melhor gestão de processos, mudança de tecnologia; (b) na fase de manutenção: melhoria da qualidade da construção para reduzir a necessidade de correções, projetos flexíveis que permitam modificações e desmontagens com reutilização, aumento da vida útil dos componentes da edificação; (c) na etapa de demolição: prolongamento da vida útil, incentivo a modernizações e não demolição, uso de tecnologia que permita a posterior reutilização dos componentes.

Segundo Miyazato e Oliveira (2009), a indústria da construção civil é uma grande consumidora de matérias-primas e forte geradora de resíduos. Isso deve ser revertido na tentativa de minimizar a saída de resíduos e também a entrada de matéria-prima não renovável, tornando seu processo mais enxuto. Considerando o exposto, faz-se importante

---

<sup>5</sup> SOUZA, V.B. **Avaliação da geração de entulho em conjunto habitacional popular**: estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

<sup>6</sup> CARELI, E.D. **A Resolução CONAMA nº 307/2002 e as novas condições para gestão dos resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2008.

<sup>7</sup> MARQUES NETO, J.C.; SCHALCH, V. Diagnóstico ambiental para gestão sustentável dos resíduos de construção e demolição: estudo da situação no município de São Carlos, SP. **Engenharia Civil**, Minho, v. 36, p. 41-50, 2010.

a busca de um uso mais racional dos materiais de construção, inclusive com o emprego de alguma técnica construtiva que possa ser mais vantajosa que a da alvenaria cerâmica convencional na minimização de resíduos gerados.

### **2.3 USO RACIONAL DOS MATERIAIS**

Segundo Santos e Farias Filho (1998), o modelo atual de gestão entende a construção civil como uma série de processos e subprocessos produtivos que fazem a conversão de materiais e mão de obra em produtos acabados, que são os edifícios. Para maior eficiência, deve haver um aperfeiçoamento progressivo destes processos, buscando redução dos desperdícios e da geração de resíduos na construção de edificações.

Reduzindo-se as atividades de fluxo e otimizando as atividades de conversão consegue-se aumentar a produtividade da mão-de-obra, assim como reduzir a possibilidade de ocorrência de perdas de materiais, pois quanto menor as atividades de movimentação e manuseio dos mesmos, menor a possibilidade de ocorrência de perdas (AGOPYAN et al., 1998, v. 2, p.10).

Mudando a logística de canteiro, deve-se tentar aplicar novos conceitos e processos. Um deles é o da produção enxuta na construção, que busca, em um ambiente de melhoria contínua, a redução dos prazos, dos custos e das perdas/desperdícios. Segundo Vivan et al (2010), a ideia da construção enxuta é maximizar valores através do aumento da eficiência da produção da edificação, eliminando assim os desperdícios originados em um processo inadequado e que não agrega nenhum valor.

Com o aprimoramento dos processos construtivos pela melhoria dos projetos, treinamento da mão de obra, utilização de equipamentos adequados e melhoria das condições de estoque/transporte, pode ser possível combater as perdas e a geração de resíduos sem haver mudança de tecnologias (JOHN; AGOPYAN, 2000). Isso tem relação com alguns princípios da construção enxuta acima mencionada. De qualquer forma, mudanças tecnológicas podem também reduzir os desperdícios e a geração de resíduos na construção.

Segundo Milan et al. (2011), o caminho para mudar o atual cenário da construção convencional passa pela construção industrializada, com mão-de-obra qualificada, otimização dos custos pela contenção do desperdício de materiais, padronização, produção em série e em escala, racionalização dos processos e cronogramas precisos. A utilização da pré-fabricação e a implementação de projetos modulares são vistas por Tam et al. (2005) e Wang et al. (2015) como técnicas efetivas para minimização da geração de resíduos em novas edificações. Isto seria caracterizado como uma mudança tecnológica e de processo.

Com a utilização de componentes pré-fabricados, a racionalização construtiva pode ser obtida. Por serem modulares e restringirem seus problemas à indústria, os sistemas que utilizam componentes pré-fabricados permitem maior aproveitamento dos materiais de construção, eliminando desperdícios, minimizando perdas e possuindo uma execução mais rápida e precisa, com controle rígido e melhoria na qualidade do produto final. Isto resulta em melhoria no desempenho e na durabilidade do edifício (MACHADO et al., 2010; GOMES; LACERDA, 2014; PENAZZI et al., 2014; CALDAS et al., 2016b). A mão de obra utilizada para montagem de componentes deve ser mais qualificada, dificultando improvisações e reformulações no canteiro de obras.

Para Tam et al. (2005), a pré-fabricação possui como benefícios: a diminuição do tempo de obra, a melhora da qualidade dos produtos fabricados fora do canteiro, a melhora na segurança do canteiro (local mais limpo e arrumado), e, conseqüentemente, a minimização dos RCC gerados.

Já segundo Machado et al. (2010), algumas vantagens que podem ser verificadas com a pré-fabricação são: (i) no processo de construção como um todo: diminuição de recursos necessários, redução do desperdício e dos resíduos no canteiro de obras, e, conseqüentemente, menores impactos socioambientais associados; (ii) na obra em si: estruturas mais leves, redução nos custos e dimensões da fundação pelo alívio das cargas, longa durabilidade, e facilidade para desmontagem e reutilização. Já as desvantagens encontradas são a exigência de mão de obra especializada e qualificada, o custo mais elevado, a alta energia incorporada e o processo de fabricação ainda, de certa forma, causador de impactos ambientais. Penazzi et al. (2014) somam às desvantagens a resistência do mercado à mudança; e incluem a produção em massa (com qualidade homogênea), o alto desempenho estrutural, e a rapidez e limpeza de obra na lista de vantagens dos sistemas pré-fabricados.

Em relação aos resíduos da pré-fabricação, eles podem ser originados dos processos de manufatura e transporte dos componentes ou da montagem no local. Lu e Yuan (2013) afirmam que a taxa de geração de resíduos, no primeiro caso, é de 2%, ou menos, em questão de peso. Já no segundo caso, a montagem de componentes pré-fabricados no local gera poucos resíduos, pois são fabricados para encaixarem perfeitamente com a estrutura de edificação. Desta forma, considera-se a pré-fabricação como uma alternativa de baixo-resíduo, quando comparada aos processos tradicionais.

## 2.4 LIGHT STEEL FRAMING

Para estimular a competitividade na indústria da construção, aumentando o nível de projetos, otimizando a produtividade e reduzindo o tempo de obra, Gomes e Lacerda (2014) afirmam que surgiram novos sistemas construtivos, os quais permitem maior rapidez no retorno dos investimentos sem grandes alterações no custo final da construção. Além disso, as preocupações com a sustentabilidade fizeram com que aspectos relacionados ao meio ambiente fossem adicionados ao conceito de qualidade da edificação.

O *light steel framing* (LSF) entra neste cenário como alternativa à construção tradicional (de certa forma improdutiva e geradora de grandes desperdícios e muitos resíduos pela existência de processos sequenciais e fragmentados sem sistema de gestão), sendo um sistema industrializado e pré-fabricado que pode levar a maior racionalização, pois busca fazer parte da “construção enxuta”, a qual objetiva “entregar o produto (edificação) de forma que os valores sejam maximizados e os desperdícios sejam minimizados” (VIVAN et al., 2010).

Seu nome – *light steel framing* – refere-se a elementos estruturados em um esqueleto estrutural de perfis leves de aço galvanizado. Ele tem origem no *wood framing*, que surgiu a partir de conceitos de praticidade, velocidade e produtividade, e no qual os perfis de estruturação são feitos em madeira. Com o desenvolvimento da indústria do aço, a madeira foi trocada pelos PFF (perfis formados a frio), originando o LSF.

Segundo Brasilit (2014), seu uso é bastante disseminado em países mais desenvolvidos, onde a construção civil é predominantemente industrializada. De acordo com Gomes e Lacerda (2014), o sistema foi introduzido no Brasil em 1998 com foco em edificações residenciais de médio e alto padrão. Campos (2010) afirma que, na época, foram importados, por algumas construtoras, de kits pré-fabricados em LSF para montagem de casas.

Apesar de ser um dos maiores produtores mundiais de aço, atualmente, no Brasil, o uso de estruturas metálicas ainda é restrito se comparado ao potencial do país e seu parque industrial. Dentro deste rol, o LSF, há tantos anos no mercado brasileiro, também ainda não foi completamente aceito devido a questões culturais. Os consumidores brasileiros querem bater na parede e ouvir o som de uma estrutura maciça e não “oca”, atribuindo um caráter de solidez a construções em alvenaria convencional (CAMPOS, 2010).

A estrutura do LSF é composta por vários componentes e subsistemas. Além do estrutural, há o de fundação, de isolamento termoacústico, de fechamentos (internos e externos), e de instalações hidráulicas e elétricas. Estes subsistemas devem estar inter-

relacionados de forma correta, com utilização de materiais adequados, assim possibilitando um melhor rendimento e racionalidade. Reunidos, eles resistem aos esforços estruturais e permitem a integridade da edificação.

Segundo Carminatti (2012), este sistema construtivo tem sua estrutura composta por PFF's de aço galvanizado, que são utilizados para compor painéis estruturais ou não estruturais. Estes perfis são conformados a frio a partir de bobinas de aço que são alteradas por meio de perfiladeiras e dobradeiras, devendo receber revestimento de zinco (ou liga de alumínio-zinco) por imersão contínua a quente ou eletrodeposição para proteção da peça contra corrosão (VIVAN, 2011). Caldas et al. (2016b) afirmam que os perfis podem ter espessuras de 0,80, 0,95 e 1,25mm e devem receber um revestimento mínimo de zinco de 180g/m<sup>2</sup>.

Os perfis são padronizados pela NBR 6355:2003 (conforme figura abaixo), que em seu anexo A apresenta as suas seções transversais. A designação dos nomes é feita, segundo Silva e Silva (2008), da seguinte forma: tipo do perfil x dimensões dos lados x espessura (em mm). Os mais utilizados no sistema LSF são as cantoneiras de abas iguais e os da série U, devendo ser destacados os perfis “Ue” e “U”.

Figura 2 – Perfis padronizados pela NBR 6355:2003 (continua)

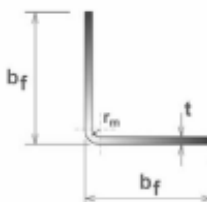
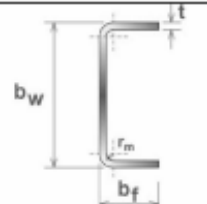
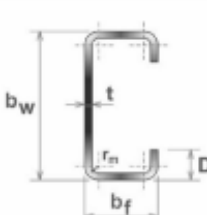
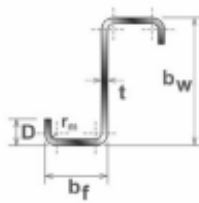
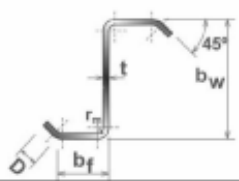
Série	Seção transversal	Designação
Cantoneira de abas iguais		<b>L</b> $b_f \times t$ Ex: <b>L</b> 50 x 3,00
U simples		<b>U</b> $b_w \times b_f \times t$ Ex: <b>U</b> 150 x 50 x 2,65
U enrijecido		<b>Ue</b> $b_w \times b_f \times D \times t$ Ex: <b>Ue</b> 150 x 60 x 20 x 2,65

Figura 2 – Perfis padronizados pela NBR 6355:2003 (conclusão)

Série	Seção transversal	Designação
Z enrijecido a 90°		$Z_{90} \ b_w \times \ b_f \times \ D \times \ t$ Ex: $Z_{90} \ 200 \times \ 75 \times \ 20 \times \ 2,25$
Z enrijecido a 45°		$Z_{45} \ b_w \times \ b_f \times \ D \times \ t$ Ex: $Z_{45} \ 200 \times \ 75 \times \ 20 \times \ 2,25$

Fonte: Silva e Silva (2008)

### 2.4.1 Composição

A principal característica deste sistema é o esqueleto da estrutura (formado por perfis de aço galvanizado) que forma as paredes, denominadas de painéis. Existem os perfis verticais, chamados de montantes, e os perfis horizontais, chamados de guias. O fechamento dos painéis pode ser feito com a utilização de diversos materiais.

A seguir, serão estudadas as partes que compõe o sistema construtivo LSF e como elas se encaixam. São elas: fundações, estrutura vertical, estrutura horizontal e cobertura.

#### 2.4.1.1 Fundações

Por serem constituídas com uma estrutura leve, as edificações construídas em LSF não exigem grandes fundações, pois possuem menor carga aplicada. Os painéis distribuem as cargas de forma uniforme, sendo necessário que a fundação seja contínua, suportando estes painéis em toda a sua extensão. Além da topografia, a escolha do tipo de fundação depende do tipo do solo, do nível do lençol freático e da profundidade de solo firme (CARMINATTI, 2012; VIVAN, 2011; BRASILIT, 2014).

Uma tipologia de fundação que se adequa bem a esta técnica construtiva é o radier, uma fundação superficial que pode ser admitida como laje, que é executada em toda a área da construção. O radier é construído da forma tradicional, com concreto armado, e recebe as solicitações da edificação, transmitindo as cargas para o solo onde está apoiado. Nele, segundo Brasilit (2014), além da laje contínua, podem existir vigas em seu perímetro, sob as paredes estruturais e onde mais forem necessárias.

Segundo Vivan (2011), o radier pode ser estruturalmente concebido de diversas maneiras, a depender das necessidades de cada obra (resistência do solo, cargas atuantes,

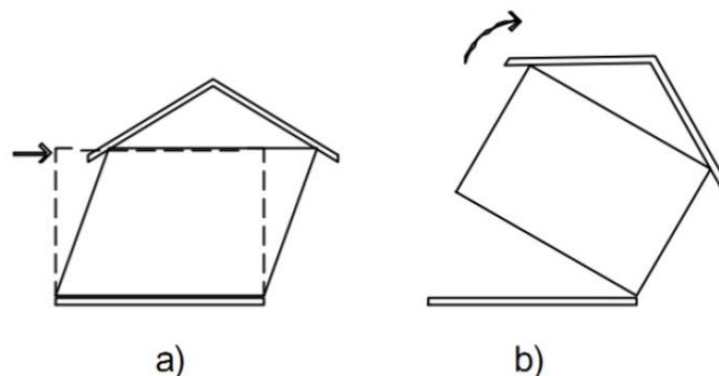


intensidade das ações da estrutura, entre outros). São elas: (a) lisa, como uma laje de espessura constante; (b) com pedestais, aumentando a seção nas regiões próximas dos pilares; (c) nervurado, com nervuras principais e secundárias na parte inferior ou superior para aumentar a rigidez; ou (d) em caixão, usado para grandes solicitações devido a sua grande rigidez. A tipologia mais usada é a lisa, devido às baixas solicitações de carga do LSF. Deve haver um desnível no contorno da edificação para que os painéis fiquem protegidos da umidade. Além disso, Brasilit (2014) afirma que as calçadas ao redor da edificação devem ter inclinação mínima de 5% para possibilitar o escoamento da água.

Outro tipo de fundação que também pode ser utilizada no LSF é a sapata corrida ou viga baldrame. Ela é caracterizada por elementos estruturais de concreto armado com uma base alargada em contato com o solo (para receber as cargas) e uma altura onde os painéis são apoiados (o que é vantajoso quando há a necessidade de afastar a construção do nível do solo). Neste sistema, o contrapiso é executado posteriormente, podendo ser de concreto armado ou perfis de aço galvanizado apoiados na sapata (VIVAN, 2011).

Independente da tipologia da fundação, deve haver a fixação dos painéis nela, para evitar a movimentação da estrutura com as ações do vento e garantir a resistência da edificação contra esforços de translação e tombamento. Segundo Carminatti (2012), translação é o deslocamento lateral da estrutura, já tombamento é a elevação da mesma. Os dois esforços podem ser vistos na figura 3.

Figura 3 – Efeitos da carga do vento: (a) translação e (b) tombamento.



Fonte: Carminatti (2012)

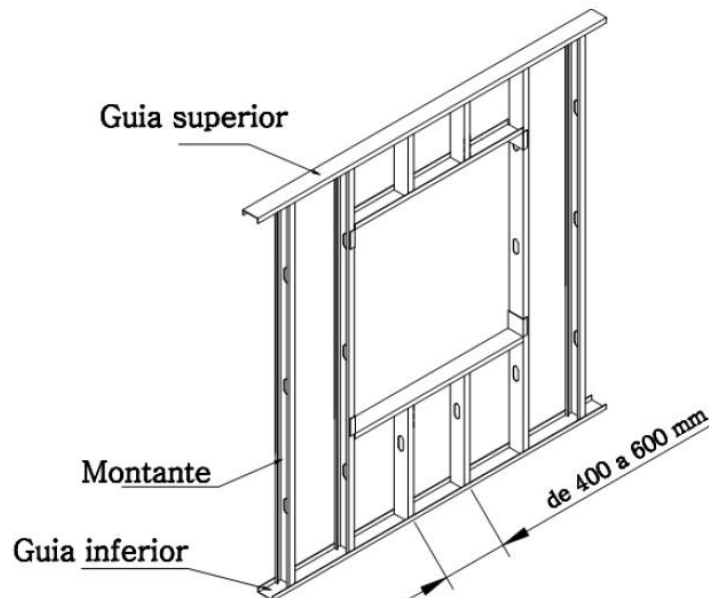
A ancoragem dos painéis pode ser feita de diversas formas, devendo ser escolhida conforme as solicitações estruturais existentes. Segundo Vivan (2011), todos os tipos de ancoragem necessitam de uma guia (formada por um perfil estrutural) posicionada na horizontal onde estarão fixados os montantes dos painéis. Os cinco principais tipos de ancoragem serão citados a seguir, porém não cabe a este trabalho se aprofundar no tema.

- Ancoragem química com barra roscada;
- Ancoragem com fita metálica;
- Ancoragem com bolts;
- Ancoragem com barra roscada tipo “J”;
- Ancoragem provisória, com pinos acionados à pólvora.

#### 2.4.1.2 Estrutura vertical

A estrutura vertical do LSF é composta pelos painéis, que podem ser autoportantes ou não, que formam as paredes da edificação. Conforme figura 4, estes painéis são constituídos por PFF dispostos na vertical (montantes), espaçados regularmente entre si (em módulos que variam entre 400 e 600mm de acordo com cálculo estrutural), que são unidos por guias (perfil em “U” na horizontal, formando a base e o topo dos painéis) com fixação feita por meio de parafusos, constituindo um quadro estrutural. Para Santiago et al. (2010), a modulação visa à otimização dos custos e uso de materiais, pois praticamente todos os materiais complementares e subsistemas são enquadrados em múltiplos deste espaçamento, permitindo a minimização de desperdícios.

Figura 4 – Montantes e guias de um painel de LSF

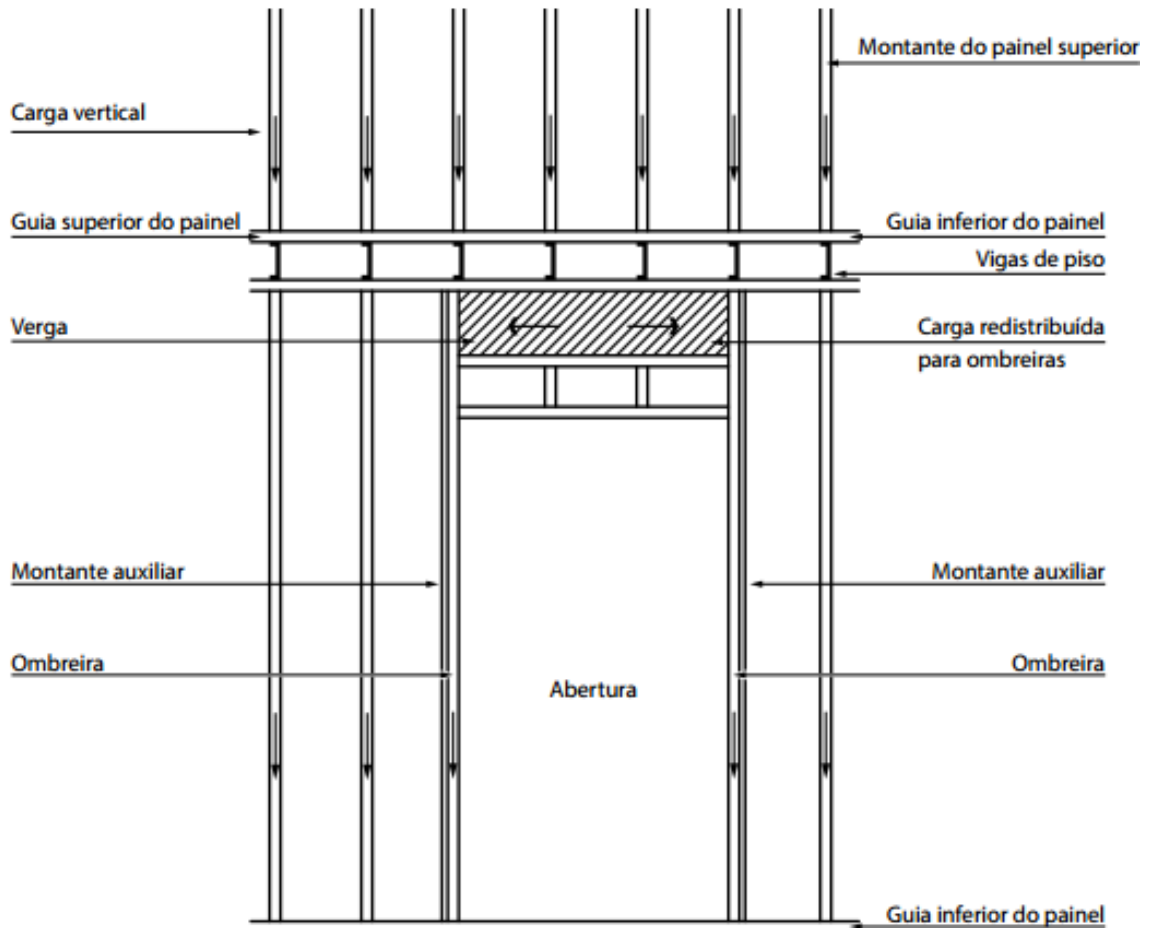


Fonte: Carminatti (2012)

Para execução de aberturas de portas e janelas, Brasilit (2014) afirma que um painel estrutural precisa de elementos como vergas, a fim de redistribuir a carga dos montantes interrompidos para os montantes que delimitam as laterais do vão (ombreiras),

conforme figura 5 abaixo. Estas vergas podem possuir diversas combinações, mas são basicamente compostas por dois perfis Ue conectados por peça parafusada nas extremidades e uma peça fixada nas mesas inferiores dos dois perfis Ue.

Figura 5 – Distribuição dos esforços da verga para as ombreiras



Fonte: Brasilit (2014)

Nos painéis, as cargas são divididas em um grande número de elementos, cada um recebendo uma parcela do total e encaminhando até o solo. Para maior resistência ao vento, por exemplo, a estabilidade é garantida pela inclusão de peças metálicas na diagonal, formando um “X”. Já para travamento horizontal, fitas de aço galvanizado e bloqueadores (perfis Ue e U) são conectados aos montantes, garantindo a diminuição do seu comprimento de flambagem e evitando sua rotação quando sujeitos a carregamentos de compressão (CARMINATTI, 2012; BRASILIT, 2014).

O encontro entre painéis pode ocorrer, segundo Vivan (2011), de três formas: no canto das edificações (em “L”); nos encontros em “T”; e nos encontros em cruz. Cada formato exige a fixação de montantes de apoio, além dos que já compõem o painel.

A vedação destes painéis deve ser feita com elementos leves e com maior grau de industrialização, para se alinharem ao objetivo de ser um sistema construtivo mais racionalizado e enxuto, havendo mais organização e limpeza no canteiro de obras. As placas possuem dimensões fixas que se adequam aos módulos pré-definidos dos montantes, geralmente possuindo 120cm de largura. Segundo Vivian (2011) e Carminatti (2012), a vedação pode ocorrer com diversos materiais, sendo os principais:

- a) Placas de OSB – *oriented strand board*: rígidas e resistentes mecanicamente, podem ser usadas nas faces internas ou externas. Quando usadas externamente, devem receber proteção contra umidade e água, com a aplicação de película ou manta de alta densidade; além de serem previstas juntas de dilatação.
- b) Placas cimentícias: fabricadas a partir de mistura de cimento Portland, agregados naturais de celulose e fios sintéticos, podem ser usadas interna ou externamente, possuindo resistência à abrasão e impermeabilidade. São de ótima aplicação em áreas molhadas, como banheiros, cozinhas e áreas de serviço. Necessitam de tratamento especial nas juntas entre placas e no encontro da parede com o piso.
- c) Placas de gesso acartonado: solução mais usual no LSF para fechamento interno, principalmente quando os painéis não são estruturais. São compostas de gesso e papel cartão e possuem resistência à compressão e à flexão. Duas dimensões variam de acordo com o fabricante, porém as espessuras são de 6,5, 9,5, 12,5 e 15mm. Elas podem ser de três tipos: (a) standard, usada em áreas secas; (b) resistente à umidade, na cor verde, é indicada para ambientes sujeitos à umidade; e (c) resistente ao fogo, na cor rosa.

Segundo Caldas et al. (2016b), externamente os fechamentos mais utilizados são em placa cimentícia ou *siding* vinílico<sup>8</sup>. Já os fechamentos internos são usualmente feitos com chapas de OSB (quando há necessidade de reforço da parede para cargas diferenciadas) e placas de gesso acartonado para receber os revestimentos.

Com o intuito de melhorar o conforto ambiental das edificações, dentro dos painéis (entre os montantes) podem ser usadas mantas para isolamento térmico e acústico (usualmente com 50mm), como lã de rocha mineral ou lã de vidro. Este isolamento multicamada é aplicado, segundo Gomes e Lacerda (2014), de forma uniforme e contínua entre os perfis metálicos, após o fechamento de uma das faces do painel.

---

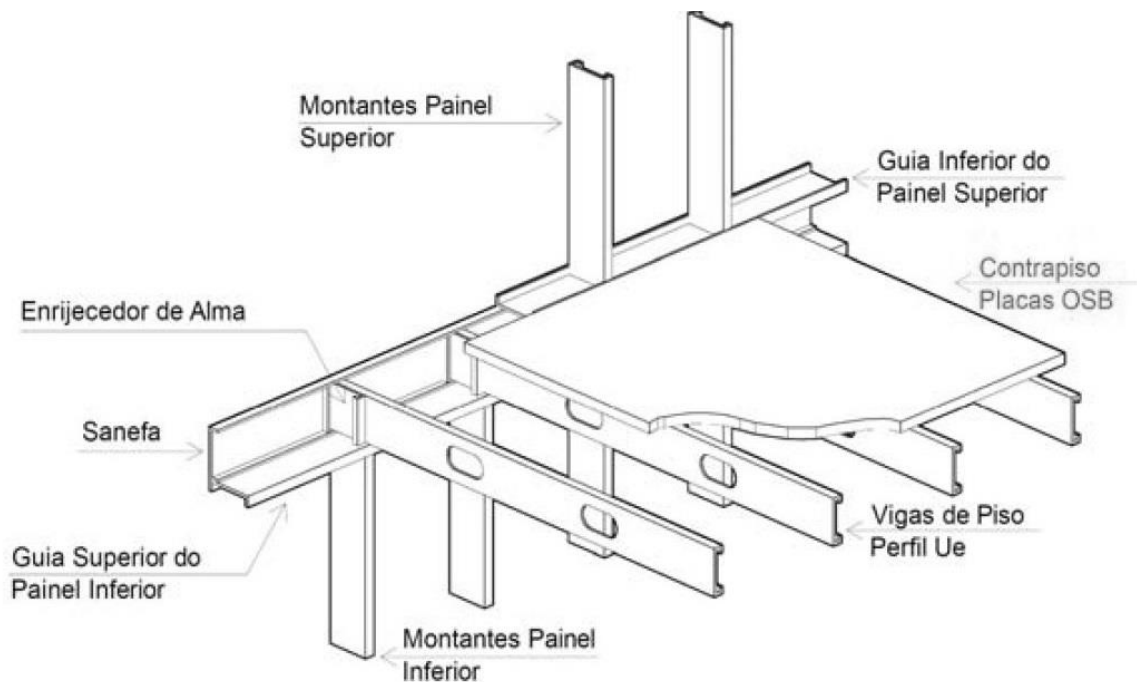
<sup>8</sup> Revestimento de PVC (régua plástica) para uso externo.

### 2.4.1.3 Estrutura horizontal

Segundo Vivan (2011), Carminatti (2012) e Brasilit (2014), as estruturas horizontais seguem o mesmo conceito das verticais, havendo modulação dos perfis que compõem as vigas da laje. Estas servem de apoio para o contrapiso e transmitem o carregamento para os painéis estruturais verticais, sendo assim, os montantes dos painéis devem estar alinhados com as vigas da laje, possuindo a mesma modulação.

Os perfis mais utilizados para esta função são os “Ue”. Também compõem a estrutura horizontal as sanefas e os enrijecedores de alma. O material mais utilizado para conformação das lajes são placas rígidas de OSB de 18mm, que podem ser combinadas com materiais para isolamento acústico. No caso de áreas úmidas, como banheiros, o mais indicado é a placa cimentícia (CARMINATTI, 2012; VIVAN, 2011). A figura abaixo exemplifica a composição de uma laje em LSF.

Figura 6 – Representação esquemática dos componentes de uma laje no sistema LSF



Fonte: Vivan (2011)

Segundo Vivan (2011), estas lajes podem ser executadas com balanços ou desníveis, assim como as lajes convencionais.

### 2.4.1.4 Cobertura

Segundo Carminatti (2012) e Vivan (2011), as coberturas em LSF utilizam, essencialmente, os mesmos materiais dos painéis, existindo tesouras e caibros de aço. Apesar de as características arquitetônicas destas coberturas serem praticamente iguais às

coberturas de construções convencionais, deve-se atentar para a necessidade de respeitar o conceito de estrutura alinhada, devendo a alma dos perfis da cobertura estar alinhada com os montantes dos painéis estruturais.

A solução mais comum é o uso de tesouras ou treliças para estruturação da cobertura. No caso das telhas, qualquer tipo pode ser utilizado. Dependendo do seu tipo e dimensão, pode haver a necessidade de instalação de placas de OSB como base, e também camadas de algum tipo de isolamento.

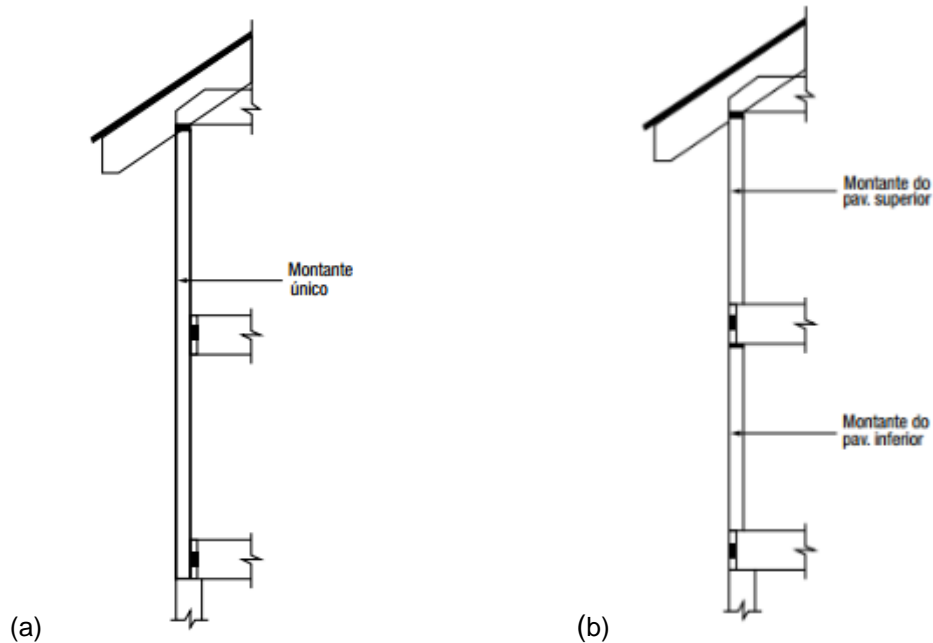
#### **2.4.2 Métodos de construção**

Segundo Brasilit (2014), existem três métodos principais de construção em LSF. O primeiro é o método “stick”, no qual os perfis são cortados no canteiro de obra, vindo perfurados de forma padrão para passagem de tubulações elétricas e hidráulicas. Os painéis, lajes, contraventamentos e tesouras do telhado também são montados no local, com os subsistemas sendo instalados após a montagem da estrutura. Desta forma, mesmo existindo aumento das atividades em obra, há maior facilidade de transporte de peças até o canteiro de obras, não havendo necessidade que o construtor possua local para pré-fabricação do sistema.

O método por painéis é o segundo a ser estudado. Nele, os painéis, contraventamentos, lajes e tesouras de cobertura são pré-fabricados fora do canteiro e montados no local da obra. Para diminuir o tempo de construção, Brasilit (2014) afirma que alguns fechamentos também podem ser aplicados em fábrica. Ao chegar na obra, os painéis e subsistemas são conectados normalmente, com o uso de parafusos autobrocantes e autoatarrachantes. Para o autor, as principais vantagens deste método são o maior controle de qualidade na produção dos sistemas, minimização do trabalho em obra, maior velocidade de montagem e aumento da precisão dimensional.

De acordo com Brasilit (2014), nestes dois casos, as construções podem ser montadas por “balloon” ou “platform”. No “balloon”, há um montante único para todos os pavimentos, sendo a estrutura do piso fixada nas laterais deste montante. Já na construção “platform”, os pavimentos são construídos um por vez e de forma sequencial, resultando em painéis descontínuos estruturalmente. A figura a seguir pode exemplificar melhor o exposto.

Figura 7 – Esquema de construção, tipos: (a) balloon e (b) platform



Fonte: Brasilit (2014)

Já o terceiro método é o da construção modular, onde as unidades são completamente produzidas em fábrica, podendo ser entregues na obra com todos os acabamentos internos instalados (instalações elétricas e hidráulicas, revestimentos decorativos, louças e metais, bancadas, etc.). A estocagem pode se dar lado a lado ou uma sobre as outras (BRASILIT, 2014).

### 2.4.3 Industrialização e pré-fabricação

Segundo Vivan et al. (2010), Gomes et al. (2013) e Corte et al. (2015), LSF é um sistema, sob o ponto de vista técnico, industrializado e que apresenta um elevado grau de pré-fabricação, montagens simples, planejamento preciso e entregas *just-in-time*. O sistema utiliza materiais “secos”, como os já mencionados perfis de aço, gesso acartonado, OSB, placas cimentícias, etc., permitindo que as atividades de conversão de insumos fiquem restritas apenas à construção da fundação (usualmente em radier), a pequenas adequações/recortes de componentes e ao tratamento de juntas.

Sendo assim, a construção de edificações em LSF demanda mais atividades de montagem de componentes e menos de conversão/fluxo. Isto permite, segundo Vivan e Paliari (2012) e Gomes et al. (2013), que sejam necessárias poucas atividades paralelas à montagem do componente (painel, laje, cobertura, etc.), agregando maior valor ao produto final e proporcionando melhor eficácia no uso de materiais.

Milan et al. (2011) afirmam que o processo produtivo do LSF se caracteriza por: insumos industrializados produzidos conforme normas de qualidade; padronização e modulação de medidas; utilização de mão de obra especializada; maior facilidade na gestão do processo construtivo. Além disso, o sistema gera menor quantidade de resíduos, menor consumo energético na movimentação de materiais e menor impacto na implantação da obra.

Já segundo SBI (2017), quando comparado às práticas convencionais dos dias atuais, a construção em aço oferece: (i) eficiência de materiais: resultando em menos utilização de recursos naturais, menos transporte, menos emissões e menos utilização de energia; (ii) reciclabilidade: resultando em menos resíduos e menos emissões, além de menos uso de recursos naturais; (iii) qualidade e durabilidade; (iv) construção a seco e racionalizada: resultando em menos perigos a saúde, menos resíduos, menos uso de energia, menos emissões. Para ele, a construção em aço é rápida, mais leve (portanto mais eficiente no uso de materiais, energia, transporte e emissões), com menos resíduos (eficiente no uso de materiais, gerando poucas quantidades de resíduos, que são na sua maioria recicláveis), possui alto desempenho (com material produzido com tecnologia computadorizada e dimensões precisas) e reciclável (sem perdas na qualidade do aço).

Outras vantagens que podem ser percebidas com o uso deste sistema são a alta resistência, o baixo peso da estrutura e demais componentes (pela utilização de menos materiais por volume construído e por estes serem mais leves), a grande precisão dimensional e a utilização de materiais que são quase 100% recicláveis (VIVAN; PALIARI, 2012; SILVA et al., 2014). Além disso, tem-se a possibilidade concreta de redução da geração de resíduos. Isto porque, devido à necessidade de projeto bastante detalhado que se utiliza da racionalização e modulação, a precisão do quantitativo de materiais a ir para a obra é muito maior e, conseqüentemente, o desperdício e as perdas são menores (SBI, 2017).

A geração de resíduos cerâmicos (principalmente de argamassas e concreto), percebidos como mais representativos (em massa de entulho), é evitada nas construções de LSF, visto que, como mencionado, se trata de uma construção a seco. Além disso, as tubulações dos sistemas elétricos e hidrossanitários são inseridas entre as chapas dos painéis antes do seu fechamento, reduzindo a necessidade de quebras (com geração de RCC) após a construção. Ainda há descarte de materiais, resultado da modulação estrutural e das placas de revestimento, porém em quantidade muito menor do que no caso da alvenaria, que tem que ser erguida, para então ser “demolida” onde passarão as tubulações,



e preenchida e revestida com argamassa de cimento, água e areia. Isso gera um consumo grande desses materiais, além da probabilidade maior de haver perdas.

Segundo Carminatti (2012), para reduzir ainda mais o desperdício de materiais, pode-se usar um equipamento chamado *FrameMaster* que auxilia na fabricação de perfis e estruturas utilizadas no sistema. Ele produz perfis conforme a necessidade da obra, do tamanho a ser utilizado, marcando cada um com um código. Isso, além de facilitar a montagem dos painéis, reduz as perdas que ocorreriam no caso de perfis com comprimento padrão. A necessidade de modificações e adaptações em obra é reduzida, visto que os perfis são produzidos para aplicação pontual. Além disso, Santiago et al. (2010) afirmam que os painéis podem ser montados em fábrica, permitindo que os objetivos da construção enxuta sejam alcançados através de boa produtividade e qualidade.

Em sua pesquisa, Gomes e Lacerda (2014) apontam como principais vantagens do sistema: a superioridade do desempenho termo-acústico em 2,5 vezes com relação à alvenaria; a facilidade para passagem de utilidades (como água, esgoto, eletricidade, lógica, etc.); e a ocorrência do processo de fabricação do LSF em ambiente fabril, com mão de obra qualificada, com garantia de qualidade e controle durante o processo industrial. Porém a necessidade de utilização mão de obra especializada também é citada como desvantagem pelos autores, devido a sua escassez no mercado brasileiro.

Apesar destas vantagens, Campos (2010) afirma que, pela incompatibilidade dos sistemas industrializados com improvisações, seu projeto deve ter suas especificidades e condicionantes bem resolvidos antes de ir para o canteiro de obras. O projeto é o principal articulador das ações de uma construção. Sua falta ou falhas na sua execução são responsáveis por 40 a 45% dos erros de execução na construção civil. Bernardes et al. (2012) e Vivan et al. (2010) afirmam que, para aumento da produtividade, diminuição das perdas e desperdícios e redução de RCC, o LSF deve possuir projetos bastante detalhados e que contemplem as diversas atividades de construção de um edifício. Esta característica é apontada pelos autores acima como uma possível barreira no cenário brasileiro, visto que em nosso país, muitas vezes, não há elaboração de projetos holísticos e completos.

A partir do exposto, percebeu-se que, de acordo com os estudos de diversos autores, o *light steel framing* é, em diferentes níveis dependendo das características de cada obra, um método industrializado e pré-fabricado de construção, o que pode contribuir para a redução da geração de resíduos se houver um projeto bem elaborado e que considere também as etapas da montagem e construção, não apenas as dimensões e layout da edificação.

## 2.5 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Para avaliar o impacto ambiental de uma edificação, existe a Análise do Ciclo de Vida (ACV), que considera todas as etapas de uma construção, desde a extração de recursos para fabricação dos materiais a serem utilizados até disposição ou reutilização destes após a demolição. A figura abaixo exemplifica o ciclo de vida de uma construção.

Figura 8 – Ciclo de vida dos produtos de construção



Fonte: Athena Institute (2011 *apud* CARMINATTI, 2012)

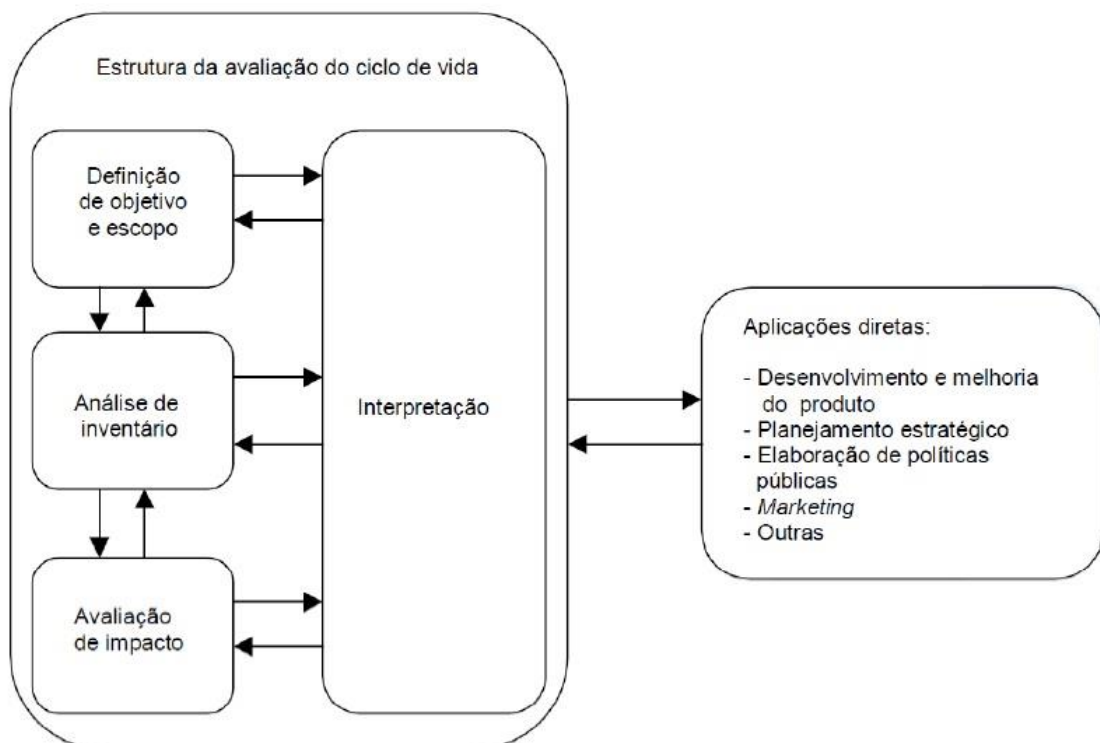
Para Crawford (2008), a Análise de Ciclo de Vida é uma das ferramentas mais populares para avaliar impactos ambientais que um produto ou processo específico tem ao longo de toda a sua vida, do berço ao túmulo. Isso pode ser aplicado também às construções de edificações, seguindo a mesma lógica do que para um único produto, porém considerando todos os materiais de construção envolvidos no processo.

Segundo Carminatti (2012), a ACV se utiliza de uma abordagem holística de uma construção, fornecendo uma visão global de um determinado sistema e, assim, auxiliando na análise, na escolha de alternativas e na tomada de decisões na construção civil. Ela determina os reais e possíveis impactos ambientais associados a determinado serviço ou produto, além de fazer a quantificação destes impactos. As repercussões ambientais são analisadas a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas, energia, produtos, subprodutos e resíduos). No caso do estudo em questão, a ACV é importante para analisar o impacto ambiental da geração de RCC com a utilização de duas técnicas construtivas diferentes.

A ACV começou a ser desenvolvida em 1974, quando o *Midwest Research Institute* iniciou um estudo para verificar impactos ambientais do ciclo de vida de alguns produtos. A partir de 1993, houve a padronização da ACV pela ISO - *International Organization for Standardization*, e no Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou as versões nacionais destas normas (CARMINATTI, 2012). São elas: NBR ISO 14040, 14041, 14042 e 14043. As versões nacionais foram aprovadas com base em versões mais antigas da ISO internacional, sendo que as versões internacionais passaram por uma atualização em 2006, ainda não disponível nas NBR brasileiras. Apesar disto, para fins deste estudo, será feita uma breve revisão das normas nacionais e internacionais.

A ISO 14040 define os princípios e estrutura de um ACV, dividindo-o em quatro fases: (i) definição de objetivo e escopo; (ii) análise do inventário; (iii) avaliação do impacto; e (iv) interpretação do ciclo de vida. A figura a seguir mostra a estruturação das fases e o relacionamento entre elas. Já a ISO 14044 define os requisitos e orientações para realização de uma ACV.

Figura 9 – Fases da ACV



Fonte: Carminatti (2012)

A seguir, cada uma das fases será brevemente descrita com base nas normas ISO e nos trabalhos de Miyazato e Oliveira (2009); Soares et al. (2006); e Carminatti (2012).

### 2.5.1 Fases de uma ACV

#### a) Definição do objetivo e escopo:

Nesta primeira fase, os objetivos e o escopo devem ser definidos para evitar a possibilidade de interpretações equivocadas. O objetivo deve ser claro e explicitar as razões motivadoras, a aplicação pretendida e os interesses no resultado do estudo. Ele é o planejamento do estudo, onde são feitas delimitações e definição do público-alvo.

O escopo define o que está incluído no sistema e os métodos de avaliação a serem utilizados. São delimitadas as fronteiras do estudo, os tipos de impacto que serão analisados e a unidade funcional (unidade de comparação que estabelece uma referência e assegura a comparabilidade dos resultados de uma ACV entre diferentes sistemas).

#### b) Análise do inventário:

Nesta fase, o uso de recursos (energia e matérias-primas) e as cargas ambientais (efluentes, resíduos sólidos e emissões atmosféricas) geradas são quantificados ao longo do ciclo de vida do produto/material/sistema em questão, sendo feito um balanço de dados de entrada e saída do sistema. Isto é feito por meio de uma intensiva coleta de dados (que devem ser consistentes para obtenção de resultados mais precisos), que culmina na geração de planilhas que calculam e apresentam os fluxos existentes no objeto de estudo.

Segundo Crawford (2008), a análise de inventário é uma das etapas mais cruciais existentes em uma ACV, pois envolve a reunião de dados e cálculos para quantificar as entradas e saídas do sistema em todo o ciclo de vida. Ela é a fase que consome mais tempo e dinheiro.

A Análise do Inventário pode ser feita de diversas maneiras, de acordo com Crawford (2008). Os métodos tradicionais são: (a) análise de processo, onde todas as etapas de fabricação são desdobradas e os processos analisados; (b) análise de entradas e saídas, que utiliza dados de médias nacionais para cada setor da economia e possibilita maior limitação das fronteiras do sistema.

Este tipo de análise pode sofrer diversas limitações, principalmente pelo uso de dados não confiáveis, incompletos ou antigos nos dois métodos. Para tentar melhorar a confiabilidade e precisão dos dados e minimizar as limitações desta análise, um método híbrido, que combina os dois métodos tradicionais, foi desenvolvido recentemente. Esta técnica híbrida pretende combinar os benefícios dos dois métodos-base e minimizar suas respectivas limitações.

c) Avaliação dos impactos:

Esta fase reúne os fatores de impacto em categorias, visando permitir a comparação de diferentes opções. As categorias podem ser associadas a impactos locais, regionais e globais. São três etapas a serem seguidas: seleção e definição das categorias; classificação; e caracterização. Isso tudo em busca da compreensão e avaliação da intensidade e do significado das alterações potenciais sobre o ambiente associadas ao sistema estudado. É feita uma análise crítica do objetivo e escopo para verificar se os mesmos ainda são pertinentes, havendo possibilidade de revisão.

d) Interpretação dos resultados:

A interpretação dos resultados, como visto na figura 9, não ocorre apenas no final, mas em todas as fases da ACV. Ela inclui a identificação dos impactos ambientais significativos, avaliação do estudo, e conclusões e recomendações de implementação de melhorias para reduzir os impactos significativos. Busca-se responder as questões levantadas no escopo. Ela possui três elementos básicos: (a) identificação dos temas de relevância; (b) avaliações; e (c) conclusões, recomendações e relatório.

Segundo Degani e Cardoso (2015), no ciclo de vida de um edifício, contemplamos as seguintes etapas: planejamento, implantação, uso, manutenção e demolição. Em cada uma dessas fases são desenvolvidas atividades que interagem com o meio ambiente de formas distintas para cada tecnologia construtiva empregada. Sendo assim, temos a ACV como importante ferramenta de verificação dos impactos ambientais de determinado sistema construtivo estudado, podendo ser feita análise comparativa entre alternativas e escolha da que apresenta menor impacto. Por se tratar de uma pesquisa extensa e dispendiosa, deve ser feito um recorte da realidade a ser estudada.

### **2.5.2 ACVE e ACVCO<sub>2</sub>**

São muitos os aspectos que devem ser melhorados na construção, havendo necessidade de redução no consumo de água, diminuição na geração de resíduos, melhoria do conforto térmico e qualidade do ar, uso de materiais e sistemas gerados de menores impactos, entre outros. Pesquisas devem fornecer subsídios e resultados que possam auxiliar na tomada de decisões por projetistas, engenheiros e arquitetos. Elas devem ajudar na escolha de materiais, componentes e sistemas construtivos mais eficientes e que possibilitem uma redução nos impactos ambientais gerados.

Segundo Caldas (2016), devido ao crescimento das indústrias de mineração, manufatura e da construção civil, o consumo energético e as emissões de CO<sub>2</sub> cresceram nas últimas décadas no Brasil. Dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), para o ano de 2014, apontam que os maiores setores consumidores foram as indústrias (com 32,9%) e os transportes (32,5%), sendo que as habitações consumiram uma parcela de 9,3% da energia disponibilizada no país. Ainda em relação às habitações, estas foram responsáveis por um consumo de 21,2% da energia elétrica do país, havendo um crescimento de 5,7% de um ano para o outro.

Além disso, em todos os processos inerentes à construção civil (extração, fabricação e transporte de materiais e componentes; construção em si; operação e demolição da edificação), há emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera (CALDAS, 2016).

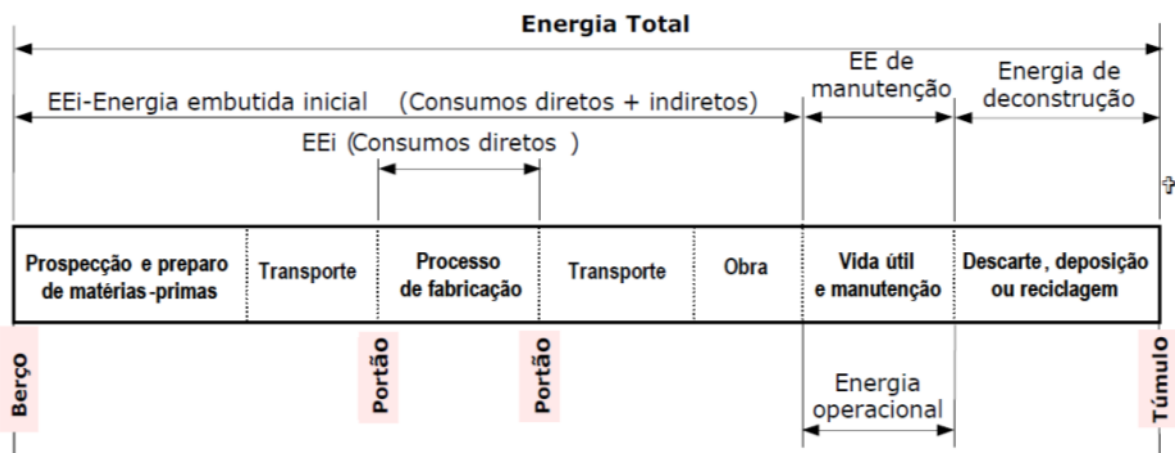
Com o desenvolvimento industrial e a crescente emissão de gases poluentes, denominados posteriormente de gases do efeito estufa (GEE), a atmosfera passou a conter concentrações mais elevadas, principalmente de CO<sub>2</sub>, e assim passar por um processo de “superaquecimento”. [...] A queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral ou petróleo, destruição de florestas e manejo do solo são as principais fontes antrópicas de emissão dos GEE. Além destas atividades, as indústrias de uma forma geral, incluindo a construção civil, possuem uma contribuição significativa nestas emissões (CALDAS, 2016, p. 27).

A ACV se torna bastante complexa quando o produto a ser avaliado é uma edificação. Isto porque, segundo Oba (2014), a construção não acontece de forma seriada e linear, como no caso de outros produtos. Como sua montagem é *in loco*, cada construção é um caso diferente, sofrendo adaptações segundo a mão de obra, infraestrutura, localização, função, entre outros. Para ser confiável e correta, a ACV é extensa e pode demandar bastante tempo e recursos. Desta forma, para haver uma maior simplificação do processo de análise, e pelos impactos relacionados ao consumo energético serem bastante relevantes, é usual ser feita uma ACV com foco específico na questão da energia. Oba (2014) afirma que a ACVE (Análise do Ciclo de Vida Energético) é uma avaliação que considera apenas a energia consumida durante o ciclo de vida, fazendo um recorte da realidade e sendo um método auxiliar na tomada de decisões (por considerar a eficiência energética da construção) e, não, substitutivo de uma ACV completa.

Uma ACVE pode ser um método eficaz de mensuração de impactos de uma determinada edificação, pois, segundo Caldas (2016), as edificações demandam energia, direta ou indiretamente, em todo o seu ciclo de vida: na produção de seus materiais e componentes, incluindo a extração de matérias-primas; diretamente na construção; na sua operação, manutenção e reabilitação; e na sua demolição.

Tavares (2006) faz uma síntese das principais etapas do ciclo de vida energético de uma edificação, conforme figura abaixo. Há três fases principais: pré-operacional, operacional e pós-operacional. A primeira corresponde à fase antes da ocupação, na qual, em uma análise energética, tem-se a energia embutida inicial. A segunda é a fase de uso e manutenção da edificação, na qual energia é utilizada para suprir as necessidades dos ocupantes (energia operacional) e na realização de reformas e adequações (energia de manutenção). Já a terceira e última etapa consiste na demolição, com descarte, deposição ou reciclagem dos materiais, havendo a energia de desconstrução.

Figura 10 – Fases do ciclo de vida energético de uma edificação



Fonte: Tavares (2006)

Segundo ele, a energia embutida inicial é o conjunto de insumos energéticos utilizados para erguer uma edificação. Eles podem ser: (a) diretos, aqueles que ocorrem dentro dos limites da fábrica para obtenção dos materiais de construção; ou (b) indiretos, que incluem extração, transporte e beneficiamento das matérias-primas, transporte de materiais para o canteiro de obras e a obra propriamente dita. Já a energia operacional é aquela consumida durante a vida útil da edificação, considerando iluminação, cocção, climatização, entre outros.

Para determinação da energia embutida (EE) de uma edificação, a análise da EE dos materiais de construção nela aplicados é de grande importância. Segundo Tavares (2006), há diversas pesquisas relevantes sobre EE em materiais de construção, sendo os valores são usualmente disponíveis em MJ/kg e MJ/m<sup>3</sup> de material produzido.

O consumo de energia na obra é um assunto que pode variar bastante de autor para autor, sendo que cada um considera aspectos diferentes para esta fase. Eles podem ser o consumo energético relacionado à utilização de equipamentos (como betoneiras, máquinas de corte, elevadores de carga, etc.) e aos desperdícios.

Tavares (2006) afirma que o transporte de insumos e equipamentos pode ser um fator relevante no ciclo de vida energético de uma edificação. Na fase pré-operacional, há transportes de: matérias-primas até indústria; materiais processados até centro de distribuição e de lá para os canteiros; equipamentos utilizados; trabalhadores; e resíduos. Na fase operacional, os materiais utilizados nas reformas passam pelo mesmo processo, somando-se o transporte de resíduos eliminados da edificação. Já na fase pós-operacional, há a movimentação dos resíduos da demolição. Usualmente são utilizados valores médios de transporte, devido à dificuldade de cálculo das distâncias reais percorridas.

Como não é o foco deste trabalho, a energia operacional, de manutenção e de desconstrução não serão estudadas por esta revisão bibliográfica.

Já para quantificação e avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> que ocorrem nas principais etapas do ciclo de vida de um material, componente, sistema ou edificação, é utilizada a metodologia de ACVCO<sub>2</sub>. Segundo Caldas (2016), esta complementa a ACVE, pois a maioria das emissões de carbono é originada em fontes energéticas, principalmente a queima de combustíveis fósseis. No quadro abaixo, adaptado de Caldas (2016), é exposta uma organização das emissões de CO<sub>2</sub> na etapa pré-operacional do ciclo de vida de uma edificação.

Quadro 1 - Emissões de CO<sub>2</sub> na etapa pré-operacional do ciclo de vida

Item	Fases	Energias
1	Emissões de CO <sub>2</sub> originados das reações químicas naturais	CO <sub>2</sub> Incorporado Inicial
2	Emissões de CO <sub>2</sub> originados dos combustíveis utilizados na prospecção, fabricação e transporte de insumos	
3	Emissões de CO <sub>2</sub> originados dos combustíveis utilizados na fabricação dos materiais de construção	
4	Emissões de CO <sub>2</sub> originados dos combustíveis utilizados no transporte de materiais de construção das fábricas até o canteiro	
5	Emissões de CO <sub>2</sub> originados da energia elétrica consumida por equipamentos na obra	
6	Perdas dos materiais	
7	Transporte das perdas	

Fonte: Adaptado de Caldas (2016)

Neste trabalho, a ACV será utilizada para quantificação e análise dos impactos ambientais (energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> associadas) dos resíduos de construção



civil gerados a partir do uso de duas técnicas construtivas distintas: o light steel framing (LSF) e a alvenaria cerâmica convencional.

## 2.6 ESTADO DA ARTE

Após elaboração de revisão bibliográfica para maior aproximação com os conceitos que cercam o tema tratado nesta dissertação, faz-se uma pesquisa de estado da arte. Nela, são buscados trabalhos já publicados que se aproximem aos assuntos estudados e que tragam contribuições importantes aos pesquisadores. As questões da sustentabilidade, Análise de Ciclo de Vida (incluindo realização de ACVE's e cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas às fontes energéticas) e geração de resíduos na construção civil são bastante extensas, possuindo um amplo leque de possibilidades. Desta forma, abaixo são compiladas algumas pesquisas relevantes sobre o tema.

Quanto aos resíduos, Perez et al. (2016) afirmam que, apesar do esforço da comunidade acadêmica em estudar as perdas, comparado a outros temas, a quantidade de estudos que focam nas perdas da construção civil é relativamente pequeno.

Wang et al. (2015) fizeram um estudo elaborando um diagrama de ciclo causal, identificando variáveis que podem influenciar na redução dos RCC gerados e criando diversos cenários para análise. Por outras pesquisas apontarem que o uso de componentes pré-fabricados pode reduzir significativamente os desperdícios e resíduos, um dos cenários considera o uso destes materiais. Como resultado, a simulação dos autores sugere que, de todos os cenários elaborados, o aumento na quantidade de componentes pré-fabricados exerce o efeito mais forte como forma de minimizar esta geração, seguido por modificações de projeto e investimento em campanhas de redução de RCC. A maior influência destes componentes consiste na redução dos resíduos de concreto, muito desperdiçado em processos convencionais de execução e moldagem no local.

Outra pesquisa que corrobora esta afirmação é a de Lachimpadi et al. (2012). Os pesquisadores, motivados por um projeto na Malásia que visa promover o uso de Sistemas de Construção Industrializados (IBS), fizeram estudos de caso em oito canteiros de obras de arranha-céus residenciais de médio-custo, definindo três métodos construtivos padrão: (i) Construção Convencional (categoria I): muitas atividades executadas no local, com uso de vergalhões dobrados em obra, fôrmas de madeira montadas por carpinteiros e concreto de fundações, vigas e colunas; (ii) Sistema Misto (categoria II): método de construção intermediário com alguns elementos pré-fabricados e outros moldados *in loco*; (iii) IBS (categoria III): processo construtivo com técnicas, produtos, componentes ou sistemas pré-fabricados para instalação.

Os resultados obtidos são que os canteiros categoria III geraram as menores quantidades de resíduos quando comparados com as categorias II e I. Os IBS geram 0,0016 ton/m<sup>2</sup> de piso, Sistemas Mistos geram 0,030 ton/m<sup>2</sup> e Construção Convencional, 0,048 ton/m<sup>2</sup>. Na categoria I, componentes minerais somaram 81% dos resíduos (60% concreto e agregados, 15% solo e areia, 3% tijolos e blocos, e 3% metal e telhas). Na categoria II, componentes minerais somaram 88% dos resíduos (50% solo e areia, 30% concreto e agregados, 4% tijolos e blocos). Na categoria III, 93% do total de resíduos era de origem mineral, sendo 75% solo e areia, 14% concreto e agregados, e 2% tijolos e blocos. A diminuição da porcentagem de concreto e seus agregados como resíduo é devido ao grande desperdício na categoria I pelo manuseio errado e funcionários despreparados. Percebeu-se que quanto mais elementos pré-fabricados de concreto entram nas obras, menos resíduos desses materiais se têm. O quadro 2 mostra a quantidade de resíduos gerada nos três métodos.

Quadro 2– Quantidade de resíduos gerada nas três categorias

Categoria	Canteiro de obras	Dimensão (m <sup>2</sup> )	RCC totais (ton)	Taxa de geração de resíduos (ton/m <sup>2</sup> )		Taxa de geração de resíduos (ton/100m <sup>2</sup> )	
				Média		Média	
I: Construção Convencional	Obra 1	101.297,30	5.357,5	0,053	0,048	5,29	4,8
	Obra 2	27.499,72	1.171,7	0,043		4,26	
II: Sistema Misto	Obra 3	111.536,00	3.792,2	0,033	0,030	3,40	3,02
	Obra 4	133.308,00	4.200,00	0,032		3,15	
	Obra 5	178.181,81	4.454,5	0,025		2,50	
III: Sistema de Construção Industrializado (IBS)	Obra 6	116.666,05	1.730,0	0,014	0,016	1,48	1,55
	Obra 7	37.594,81	600,0	0,016		1,60	
	Obra 8	71.421,85	1.130,0	0,016		1,58	

Fonte: Traduzido de Lachimpadi et al. (2012)

Em seu artigo, Alves (2015) faz um levantamento comparativo entre o sistema de alvenaria convencional e os sistemas construtivos a seco (LSF e WF – wood frame) objetivando descobrir qual é o mais vantajoso para o mercado. Ela afirma que, além dos impactos ambientais gerados pelo setor, outras fragilidades são percebidas na construção convencional, como: nível de controle de processos e da execução de obras; baixa qualificação dos operários; verificação de patologias construtivas; longos prazos de construção; entre outras. Este tipo de problema não deveria ocorrer em bens de elevado valor aquisitivo e de produção em larga escala como é o caso das edificações. Para a autora, a construção civil deveria industrializar seus processos, mudando o paradigma de “construção” para “montagem”. Desta forma, haveria maior controle de custos, produção e consumo de materiais, reduzindo-se perdas e otimizando a mão de obra e aumentando a produção e a qualidade.

Segundo Alves (2015), os sistemas a seco reduzem o número de insumos pela simplificação e redução da quantidade de etapas executivas, sendo estas bem

sistematizadas e melhor controladas. Isto ocorre pela necessidade de projeto mais detalhado, o qual prevê e corrige possíveis incompatibilidades, antecipando soluções para fabricação e montagem dos elementos. Ela afirma que “o projeto funciona como um manual de montagem, simples e prático, cujo planejamento permite a redução de 85% na geração de resíduos”. Além disso, a padronização e modulação dos insumos proporcionam alta produtividade de baixo desperdício.

Dentro dos sistemas industrializados e pré-fabricados, como já mencionado, encontra-se o *light steel framing*. Nos últimos anos, segundo Mashhadifarrahani (2015), várias pesquisas foram conduzidas sobre estruturas em LSF de forma geral. A maioria delas é no contexto do desempenho estrutural das variações de perfis esbeltos ou avaliação sistêmica de tais estruturas. Havendo dois diferentes métodos utilizados, que são: (i) procedimentos experimentais e produção de modelos físicos; e (ii) Análises numéricas com softwares de elementos finitos. Os procedimentos experimentais são menos utilizados devido à necessidade de elaboração de inúmeros modelos físicos e gasto considerável de tempo e dinheiro.

Os benefícios da construção modular e de LSF são baseados na natureza do processo construtivo fora do canteiro, incluindo: o baixo peso dos sistemas, com cargas e tamanhos das fundações reduzidas em até 70% em relação à construção em tijolos e concreto; a produtividade e velocidade do processo aumentada em 30%, reduzindo impactos do canteiro; a redução no transporte de itens; a redução significativa de resíduos do canteiro pelo uso de aço leve pré-fabricado com componentes modulares; o uso de componentes cortados no tamanho a ser usado resulta em ausência de resíduos; e a facilidade de modificação e extensão deste tipo de estrutura (LAWSON, 2014).

Segundo Lawson (2014), um projeto da BRE Smartlife de 2008 comparou a produtividade do canteiro e a geração de resíduos de construções em tijolos e blocos, LSF, painéis de madeira e concreto com isolante térmico para três empreendimentos habitacionais em Cambridge, produzindo 106 casas no total. O LSF foi a técnica de construção mais rápida, com a maior produtividade por pessoa e menor geração de resíduos quando comparado em custo à construção convencional. Os benefícios registrados foram: redução de 50% do tempo para completar o envelope, aumento de 25% na produtividade por pessoa e redução de 25% nos resíduos.

O mesmo autor afirma que, em 2010, três edificações residenciais modulares multi pavimento, somando 25.000 m<sup>2</sup> de área construída, foram monitoradas, em Wolverhampton, durante os 15 meses da construção para chegar a algumas estatísticas. As maiores conquistas foram uma redução de cerca de 40% no período padrão de construção, a

redução de 50% dos funcionários requeridos, os resíduos de canteiros enviados para aterros foram reduzidos em 95% (economizando até 15.000 libras) e o número de entregas de materiais reduzido em 60%.

Considerando os aspectos técnicos do sistema de LSF, Caldas et al. (2016b) afirmam que há diversos estudos nacionais e internacionais sobre o consumo de energia no ciclo de vida deste tipo de edificação. Porém eles afirmam haver uma lacuna de pesquisas sobre o desempenho térmico deste sistema com seus possíveis materiais isolantes. Desta forma, eles fazem uma simulação computacional e avaliam a energia consumida ao longo do ciclo de vida de uma residência em LSF comparando o desempenho térmico do sistema em três cenários (sem isolante, com lã de vidro, com lã de rocha e com EPS – poliestireno expandido). Seus resultados concluem que a transmissão térmica do sistema foi melhorada com o uso dos isolantes e que os três materiais estudados não ultrapassaram os valores máximos definidos para a faixa de conforto, enquanto o sistema sem isolantes não atendeu as questões de conforto nem para o inverno nem para o verão.

Além dos estudos de aspectos técnicos e estruturais sobre este método construtivo, como é tendência recentemente (devido à demanda habitacional brasileira), a pesquisa de Meirelles et al. (2012) estuda o potencial de aplicação de sistemas leves na produção de habitações de baixo custo. Os autores concluem que, apesar da quantidade de energia necessária para produção do aço, o LSF tem grande potencial para atingir mais sustentabilidade. Isto porque ele possui qualidade e precisão construtivas (devido ao seu processo industrial), rápido tempo de montagem e possibilidade de utilização de perfis de aço reciclado, além da utilização de materiais renováveis (como o OSB, feito com madeira de reflorestamento).

Garcia et al. (2013) fizeram uma revisão bibliográfica objetivando apresentar sistemas construtivos mais eficientes e sustentáveis para implementação em habitações sociais, estudando o LSF, o Monolite e o Wall System. Os autores concluíram que os três sistemas mostram uma significativa redução no tempo de execução da obra, minimizam a geração de resíduos, favorecem maior controle dos processos construtivos e proporcionam menor gasto com fundações.

Silva et al. (2014b) também estudam o custo-benefício do sistema *light steel framing* para construção de habitações populares, quando comparado à alvenaria tradicional. Eles concluem que o LSF se destaca por sua versatilidade, rapidez, produtividade e menor geração de resíduos. Apesar de possuir um custo um pouco maior que o método convencional, o aumento da qualidade do produto final, com redução no uso

de recursos e nos prazos de entrega, mostra o sistema como melhor forma de se construir em tempos de elevada demanda e agilidade.

Ainda seguindo a linha das habitações sociais, Lima (2014) estuda as vantagens dos novos métodos construtivos disponíveis no Brasil para a construção deste tipo de edificação. A autora afirma que a utilização do LSF (sistema industrializado incompatível com improvisações no canteiro de obras) demanda projetos que considerem o processo de montagem da edificação. Isto possibilita a redução de certas atividades de fluxo (como transporte, espera e inspeção) que não chegam a ser consideradas na construção tradicional (motivo gerador de grandes desperdícios de materiais e mão de obra). Desta forma, com o uso do LSF tem-se menor desperdício de material, maior rapidez de execução e acabamentos com precisão em milímetros. Além disso, pelo menor índice de perdas, pode-se obter uma obra mais barata.

Somando-se aos estudos sobre desempenho, qualidade e potencial de utilização do LSF em habitações sociais, Mashhadifarahani (2015) menciona sua ligação com a questão dos resíduos, afirmando que a minimização, ou até mesmo eliminação, dos RCC deve ser sempre considerada, porém, no sistema estrutural convencional, a produção de resíduos é inevitável. Neste sentido, a aplicação do LSF é vantajosa pela possibilidade de reutilização de partes usadas das estruturas, e pela menor produção de resíduos quando comparado a outros métodos construtivos no Irã. Desta forma, ele cita que a utilização de um sistema industrial para a construção em um país em desenvolvimento com um grande crescimento populacional (como Irã, China e Índia) pode ser um atalho para o acesso à moradia, além de finalmente fornecer residências mais sustentáveis à população, sendo considerada uma opção viável na busca de um ambiente mais saudável.

NASH (2014) expõe que, em estudos comparativos conduzidos pela SCI – Steel Construction Institute (Instituto de Construção em Aço, do Reino Unido), considerando o impacto urbano da utilização de tecnologias fora de canteiro, concluiu-se que eram possíveis reduções na geração de resíduos de até 70%, quando comparando a construção modular de LSF fora de canteiro e a construção tradicional de canteiro de obra. Desta forma, ela sugere que a substituição de uma grande quantidade de atividades intensivas de canteiro por componentes de *light steel* produzidos em fábrica pode ser uma alternativa viável.

WRAP (2008) afirma que usualmente é falado que a construção fora de canteiro ou Métodos Modernos de Construção resultam em menor geração de resíduos em todo o mundo, mas que evidências para suportar tal afirmação são geralmente faltantes. Desta forma, o programa conduziu uma série de estudos de caso que analisam diferentes

sistemas. A pesquisa foi feita com amostragem de 56 residências com projetos muito semelhantes, em Cambridgeshire (Inglaterra), comparando os resíduos gerados no LSF (35 residências) e em alvenaria convencional (21 residências). Para o LSF, foram somados valores de resíduos gerados na elaboração, em fábrica, dos painéis e na sua montagem em obra, concluindo-se que seu uso reduz em  $4,8\text{m}^3/100\text{m}^2$  de construção os RCC gerados quando comparados à alvenaria convencional, (ou seja em 22%), com menor quantidade de resíduos de concreto, isolamento e embalagens. Uma das razões para os resultados é explicada por WRAP (2008) devido à substituição dos blocos da construção tradicional pelos painéis de aço, o que naturalmente resulta em uma grande redução na quantidade de resíduos de argamassa e blocos.

Segundo WRAP (2016), devido ao nível de precisão no projeto e manufatura de painéis de LSF, as estruturas entregues não necessitam de modificações ou ajustes durante o processo de ereção. Uma vez no canteiro, apenas um número limitado de materiais são necessários para completar a estrutura (como parafusos e outros elementos de fixação) e, devido à precisão do projeto, este material adicional é entregue em quantidades controladas para evitar desperdícios e resíduos desnecessários. Devido ao controle dos processos, o resíduo diretamente associado à construção é limitado e representa uma pequena porção do RCC que seria gerado para um serviço equivalente em canteiros de obra mais tradicionalistas. O programa identificou que o uso de LSF, quando comparado à construção tradicional e dependendo da extensão da pré-fabricação em indústria, reduz entre 40 e 70% os resíduos nos canteiros de obra.

WRAP (2016 e 2017a) também afirma que as técnicas em LSF são simples e se baseiam na fixação e união de componentes elementares. Isto permite que a indústria racionalize e otimize os processos e procedimentos de projeto e manufatura de forma muito semelhante à indústria automotiva, onde o gerenciamento de resíduos é bastante crítico na competitividade das empresas.

O programa (WRAP, 2017a) sistematiza alguns procedimentos executados pela fábrica Framing Solutions, em busca de menos resíduos, que são: ter certeza de que cada projeto está compatível para a técnica LSF; otimizar o projeto de cada painel do LSF para cada projeto; otimizar o uso de maquinário e equipamentos; revisar procedimentos de forma regular; garantir que a abordagem usada em fábrica seja mantida também no canteiro de obras; e reutilizar ou reciclar resíduos inevitáveis. Aplicando este melhoramento contínuo de processos, somado à combinação de softwares e uma planta automatizada, a empresa conseguiu reduzir sua geração de RCC para menos de 1% dos materiais utilizados, sendo totalmente reutilizado ou reciclado. Além disso, na entrega no canteiro, os novos

procedimentos de fornecimento, corte e instalação de isolamento térmico reduziram os resíduos de 12% para 1%.

Já no Brasil, Gomes et al. (2013), buscando provas para a mesma afirmação, em parceria com a USP (Universidade de São Paulo), desenvolveram e construíram um protótipo de moradia popular de LSF com painéis montados no canteiro na cidade de São Carlos/SP. Ao final da pesquisa, observaram que o sistema possibilitou a redução de desperdícios em obra para menos de 5%.

Vivan e Paliari (2012) desenvolveram um trabalho cujo objetivo principal é a proposição de diretrizes para o desenvolvimento do *Design for Assembly* (DFA – projeto do processo de produção/montagem de um bem) na construção de habitações unifamiliares em prol da melhoria na construtibilidade dos projetos, considerando a apresentação dos projetos e a padronização de informações que definem a sequência de montagem dos elementos que farão parte de um sistema em LSF. Em seu artigo, os autores afirmam que o processo de projeto deve possuir um gerenciamento por modelos de gestão que possa garantir qualidade. Desta forma, sugerem a utilização da Engenharia Simultânea (ES), que permite que as atividades necessárias para construção em LSF sejam detalhadas de maneira correta, com exposição das sequências de montagem e das interferências entre subsistemas. Assim, os operários possuem um “manual” com o modo correto de execução, reduzindo ou até eliminando imprevistos, o que elimina desperdícios por retrabalhos.

Além da pesquisa bibliográfica, os autores realizaram entrevistas com profissionais que utilizam o LSF, chegando a algumas conclusões. A primeira delas é que a mão de obra que trabalha no setor é bastante especializada com conhecimento técnico e experiência prática para execução, havendo eventuais tomadas de decisões no canteiro de obras. A segunda é que, na prática, não foram observadas evidências do uso da ES e do DFA nos empreendimentos, contribuindo para maior dependência da experiência do operário e possivelmente resultando em decisões não condizentes com as boas práticas preconizadas para o *light steel framing*. Isto porque caso houvesse uso da ES e desenvolvimento do DFA, o processo de montagem seria uma atividade meramente mecânica, sem necessidade de tomadas de decisões intelectuais. E como terceira conclusão, eles observaram que as obras em LSF são, usualmente, produzidas apenas com projetos básicos (de certa forma mais detalhados que os utilizados em obras de alvenaria) de arquitetura e estrutura, gerando oportunidades para o surgimento de dúvidas quanto à montagem das partes em canteiro de obra.

Lawson et al. (2005) afirmam que, apesar de a pré-fabricação não ser uma novidade, a pré-fabricação por manufatura fora do canteiro de obras estava ganhando cada

vez mais espaço no início dos anos 2000. Ela consiste em um processo de fornecimento e construção no qual a maior parte dos elementos da edificação é produzida em condições fabris, ao invés de no canteiro. Esta técnica pode levar a uma construção mais rápida, com melhor qualidade, menor utilização de matérias-primas e menos geração de resíduos. Isto porque, de acordo com os autores, em uma obra com atividades intensivas de canteiro, os custos com retrabalhos e resíduos podem somar até 5% do total, não sendo significativos em uma obra com produção intensiva em fábrica. Como o gasto com resíduos é maior no primeiro caso, isto pode demonstrar uma quantidade maior gerada.

Saindo um pouco da questão dos resíduos e partindo para a questão dos impactos ambientais, recentemente, tem-se visto um aumento expressivo no número de publicações com relação à sustentabilidade das edificações e da construção civil como um todo. Como técnica de análise existente, a ACV é bastante aplicada a edificações, podendo ser desenvolvidas estratégias de otimização das etapas complexas requeridas, havendo foco mais específico em determinados aspectos. Isto proporcionou a criação de metodologias adaptadas para avaliação das questões de consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>.

Chau et al. (2015) realizaram uma extensa pesquisa bibliográfica sobre as três correntes frequentemente aplicadas para avaliar os impactos ambientais da construção civil em estudos de ciclo de vida: ACV, ACVE e ACVCO<sub>2</sub>. Os autores levantaram, em diversas publicações, definições e aspectos metodológicos sobre o tema, comparando-as em relação aos seus objetivos, metodologias e descobertas. A partir disso, eles concluíram que resultados bastante consistentes podem ser obtidos das três correntes no que diz respeito à contribuição relativa nas diferentes fases de um ciclo de vida, sendo que a fase de uso é dominante quanto aos impactos ambientais associados (energia, CO<sub>2</sub> e outros impactos), seguida pela etapa de pré-uso e, por último, a de demolição, independente do tipo de edificação.

Porém, devido à utilização de unidades funcionais distintas e pela maioria das pesquisas serem feitas a partir de estudos de caso, Chau et al. (2015) afirmam que a comparação de resultados com referenciais ou outros estudos fica dificultada. Além disso, alegam que não há uma diretriz sólida sobre qual corrente metodológica deveria ser aplicada em estudos de ciclo de vida quando o objetivo é comparar diferentes projetos.

Ainda na linha de estudos mais teóricos, Ramesh et al. (2010) elaboram uma revisão crítica da ACVE em edificações, a partir de 73 casos em 13 países, incluindo edificações residenciais e de escritório construídas em madeira, aço, concreto e outros sistemas. Os resultados mostram que as energias operacional e embutida são as maiores responsáveis pela demanda do ciclo de vida, com 80-90% e 10-20% respectivamente. Além



disso, os autores afirmam que esta demanda operacional pode ser reduzida pela utilização de tecnologias passivas e ativas na operação da edificação, mesmo que isso cause um aumento na energia embutida. Porém, eles reforçam que edificações de baixa energia possuem um desempenho melhor do que edificações autossuficientes (energia operacional zero) no contexto de todo o ciclo de vida.

Já de forma mais prática, Saade et al. (2014) propuseram uma lista de indicadores de ciclo de vida para descrever a eco eficiência dos principais materiais de construção utilizados no Brasil, verificando sua aplicabilidade em quatro estudos de caso típicos das práticas nacionais. Os indicadores foram analisados na etapa pré-operacional, desde a extração de matérias-primas até o portão da fábrica, sendo eles: energia embutida, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de água, conteúdo não renovável e emissões de compostos orgânicos não voláteis (COVs). As ACVs foram realizadas com base no software SimaPro 7.3, enquanto os dados para produção dos materiais foram coletados da literatura ou adaptados do Ecoinvent. Um banco de dados para 12 materiais e componentes foi elaborado, concluindo-se que eles descrevem de maneira justa os indicadores de sustentabilidade (sempre com mais de 96% do total). Os autores mencionam que ainda há uma deficiência nacional e internacional em dados de referência para inserção nas plataformas de ACV, havendo a necessidade de combinação de múltiplas fontes, algumas das quais não são tão metodologicamente sólidas e completas, podendo enfraquecer comparações dos resultados. De qualquer maneira, a pesquisa de Saade et al. é uma importante contribuição para os estudos de ACV, ACVE e ACVCO<sub>2</sub> no Brasil.

Com um foco na ACVE nas etapas de pré-uso, uso/manutenção e desconstrução em uma habitação térrea de interesse social, Pedroso (2015) abordou os sistemas de vedação em quatro técnicas construtivas distintas: concreto moldado no local, alvenaria de blocos de concreto estrutural, *steel frame* e convencional. Ao final de sua tese, o autor verificou que a alvenaria de blocos de concreto estruturais apresentou menores valores de energia incorporada (EI) final, sendo o LSF e o concreto (com apenas uma utilização das fôrmas) as técnicas com maiores EI final. Quanto à EI nas diferentes etapas do ciclo de vida, Pedroso concluiu que a desconstrução é a menos significativa, sendo a etapa de uso e manutenção a mais representativa.

Já Carminatti (2012) faz uma ACVE de uma habitação de interesse social concebida em LSF, simulando a quantidade de energia embutida inicial neste projeto e em adaptações dele para outras duas técnicas construtivas (alvenaria estrutural de blocos de concreto e de blocos cerâmicos). Comparando os resultados, o autor encontrou que a opção

em blocos cerâmicos apresentou o menor valor de EE absoluto, seguida pelo LSF e, por último, blocos de concreto.

Elegendo as emissões de CO<sub>2</sub> e a energia embutida como foco de seu trabalho, Lobo (2010) fez o levantamento de um inventário destes valores e fez a aplicação deles no quantitativo de uma edificação de tecnologia convencional brasileira (chegando em 4,23GJ/m<sup>2</sup> de EE e 0,57t CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>). Assim, ele demonstrou um método de cálculo de EE e emissões de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional de uma edificação a partir da planilha de serviços de uma obra, incluindo a extração de matéria-prima, processos de fabricação de materiais, atividades de execução da obra e transporte em todas as etapas.

Caldas (2016) fez, considerando o ciclo de vida completo, uma ACVE e ACVCO<sub>2</sub> de uma edificação habitacional de LSF, em Brasília, comparando-a com uma em blocos cerâmicos convencionais. A metodologia de pesquisa utilizada foi de estudo de caso com aplicação de planilhas e uso de software de simulação da etapa operacional. Como resultados, o autor obteve que a segunda técnica apresentou maior consumo energético em dois cenários de dados de inventário coletados na literatura (mínimo e médio) e mais emissões de CO<sub>2</sub> nos três cenários (mínimo, médio e máximo). Além disso, como Pedroso (2015) e Ramesh et al. (2010), percebeu que a etapa de uso é a mais relevante das três, sendo a etapa de demolição pouco significativa (com cerca de 1% das participações).

Em sua pesquisa, Sposto et al. (2016) fizeram uma análise da energia incorporada e das emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas de LSF, considerando as etapas de indústria e as de transporte de materiais (este para cinco regiões brasileiras). Para maior complementação dos resultados, os valores obtidos foram comparados com os de fachadas convencionais (blocos cerâmicos e argamassas de revestimento), chegando-se em percentuais menores para o LSF, tanto em massa, quanto em energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, os autores apontaram uma maior influência da fase da indústria nestes indicadores, sendo o transporte pouco representativo.

Seguindo a mesma linha de Sposto et al. (2016), Caldas et al. (2016a) realizam uma Análise de Ciclo de Vida Energética (ACVE) e uma Análise de Ciclo de Vida de Emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>) em fachadas de *light steel framing*, mas desta vez comparando-as com fachadas em: parede de concreto moldada no local, blocos de concreto estruturais e blocos cerâmicos estruturais. Este trabalho também apresenta um foco diferenciado por considerar apenas as etapas de indústria (etapas de extração, processamento e manutenção), excluindo as etapas de transporte e demolição pela sua pequena representatividade, e objetivando avaliar diferentes sistemas de fachadas para habitações de interesse social. Por meio de aplicação de metodologia, os autores

concluíram que o sistema de paredes de concreto moldadas no local, embora represente maior massa, foi o que apresentou menores valores de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, com 189,4 MJ/m<sup>2</sup> e 28,6kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> respectivamente.

Focando especificamente na questão do CO<sub>2</sub>, Costa (2012) definiu um método para quantificação das emissões do gás na produção dos principais materiais de construção brasileiros. Considerando a extração, processamento e transporte de matérias-primas, este método utilizou especificações matemáticas, informações de fatores de emissão e outros parâmetros, sendo aplicada uma fórmula geral adaptada a cada material, havendo três níveis de precisão de estimativas. Para comprovar a aplicabilidade de seu método, Costa realizou um estudo de caso de uma residência de baixa renda, concluindo que 40% das emissões totais geradas ocorreram na produção dos materiais.

Já Cunha (2016), quantificou as emissões de CO<sub>2</sub> no processo de construção de vinte residências unifamiliares de baixa renda construídas em blocos cerâmicos. A autora se baseou no método de ACVE proposto por Tavares (2006), utilizando a EE para obter os índices de dióxido de carbono. Por chegar a valores elevados (mais de 60t de CO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera), Cunha propôs a substituição dos materiais de vedação por outros alternativos, concluindo que o emprego de blocos de concreto não seria vantajoso (com 1,87t a mais de CO<sub>2</sub> emitido) e que o uso de blocos de solo-cimento poderia reduzir 8t de emissões de CO<sub>2</sub>.

Ainda com enfoque no CO<sub>2</sub>, Tavares e Bragança (2016), com o objetivo de desenvolver uma ferramenta útil no cálculo de gás carbônico embutido em edificações, atualizaram dados da emissão deste gás em materiais de construção e na matriz de geração de energia elétrica brasileira. Eles organizaram planilhas discriminando os insumos energéticos com dados primários do processo de fabricação dos materiais (usando referências como o Balanço Energético Nacional e relatórios de ministérios), além de atualizarem as informações sobre emissões de carbono por uso de combustíveis com base no IPCC de 2006. Ao final, os autores resgatam quantitativos de uma pesquisa de 2008 sobre uma edificação residencial típica brasileira, recalculando as emissões de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional do ciclo de vida da edificação, e concluindo que os novos índices encontrados são superiores aos antigos. Segundo eles, isto se deve, principalmente, pela revisão de alguns processos produtivos dos materiais e pelo aumento da participação de combustíveis fósseis na geração termoelétrica do país. Além de contribuir na avaliação do CO<sub>2</sub> embutido em edificações residenciais, a pesquisa elabora um importante banco de dados sobre os índices relativos aos principais materiais de construção utilizados no Brasil.

Nota-se grande quantidade de pesquisas sobre aplicabilidade do LSF na produção de HIS, ressaltando-se seus aspectos da construção industrializada e racionalizada. São feitas comparações entre os métodos construtivos industrializados para verificação dos melhores sistemas, em relação à durabilidade, resistência estrutural, entre outros. Além disso, o desempenho das edificações também é estudado.

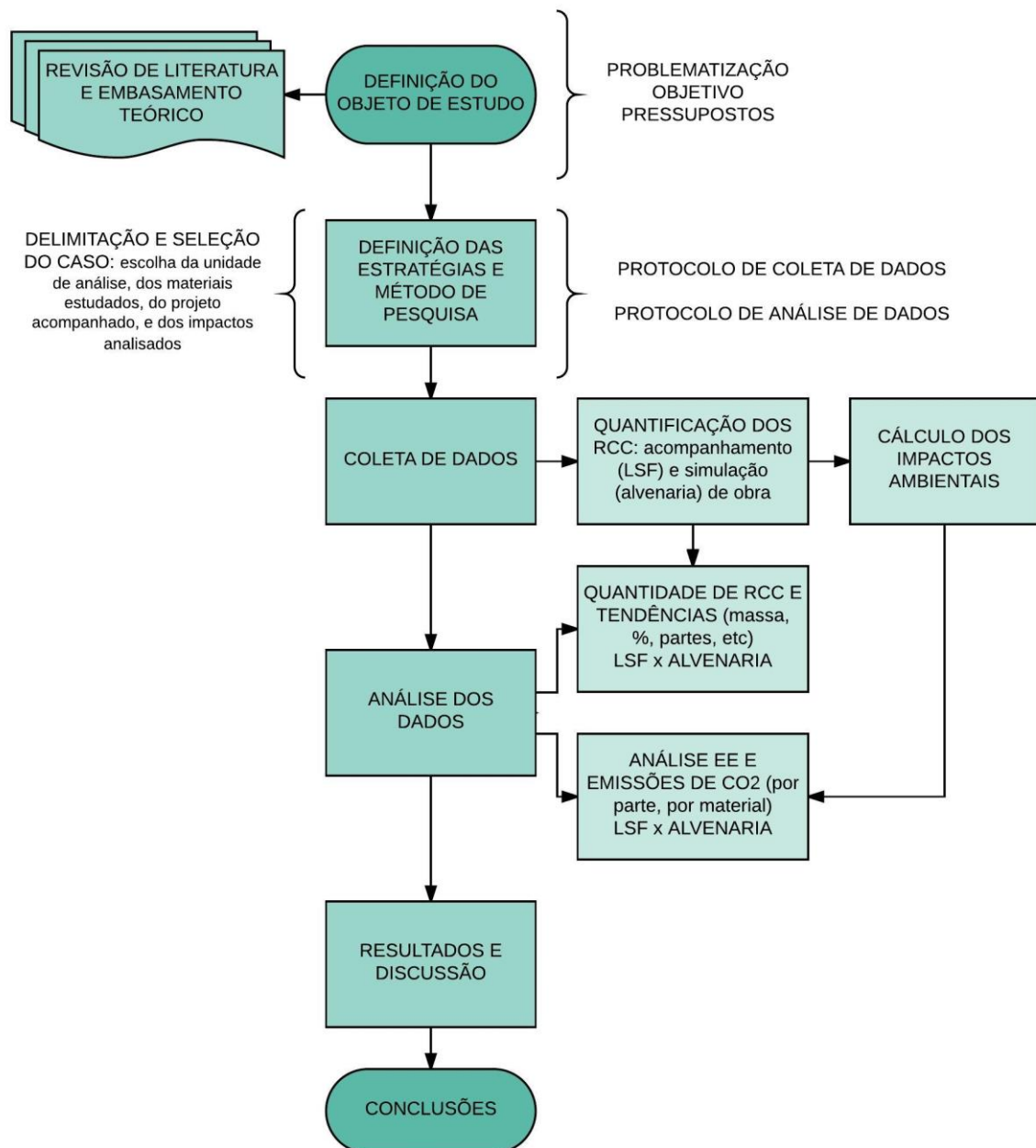
Fora do Brasil, principalmente na Inglaterra (pelo WRAP), são feitos estudos quantificando resíduos gerados pelo sistema LSF. Já no nosso país, não há muitas pesquisas em relação à quantidade de resíduos produzida pela técnica construtiva, há apenas menções das vantagens de utilização do sistema, incluindo a redução na quantidade de RCC por se tratar de construção com elementos pré-fabricados e modulares. Esta pesquisa visa colaborar com material sobre o assunto, fazendo, além da quantificação dos resíduos, uma análise dos seus impactos associados, mensurando os atributos de sustentabilidade das técnicas construtivas estudadas.

Quanto aos impactos ambientais, muitos são os estudos realizados, sendo que o tema vem ganhando espaço nas publicações científicas. Como visto, podem ser feitas ACVs completas ou simplificadas, com enfoque em aspectos específicos (usualmente energia embutida e/ou emissões de CO<sub>2</sub>). Ainda há falta de um banco de dados sólido, principalmente em nosso país. Mas a evolução das pesquisas sobre o tema pode proporcionar uma incrementação do inventário de valores para materiais de construção.

### 3. ESTRATÉGIAS E MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção, serão explicadas as estratégias e método de pesquisa utilizados. Para melhor entendimento da organização da pesquisa, abaixo, tem-se um fluxograma da organização e realização desta dissertação, cujas etapas serão explicadas nas subseções a seguir.

Figura 11 – Fluxograma do trabalho



Fonte: o autor.

### **3.1 ESTRATÉGIAS DE PESQUISA**

#### **3.1.1 Unidade de análise**

Este trabalho tem como unidade de análise obras residenciais de pequeno porte em *light steel framing* e em alvenaria convencional. Os aspectos estudados nestas obras são: fundações/lajes de pavimentos, paredes/painéis e cobertura. Foi feita uma comparação entre as duas técnicas construtivas em relação à geração de resíduos durante a fase de construção das edificações e em relação aos impactos ambientais gerados por estes resíduos, ao longo da fase pré-operacional, em relação à energia embutida e às emissões de CO<sub>2</sub>.

#### **3.1.2 Delimitação do trabalho**

Os resíduos levantados neste trabalho foram aqueles referentes aos materiais-chave que são utilizados em cada técnica construtiva, como, por exemplo, o aço galvanizado a ser usado nos perfis do LSF e o tijolo cerâmico na alvenaria convencional. Além disso, a quantificação dos RCC se limitou à fase de construção das edificações. Já os impactos ambientais analisados (energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>) foram aqueles referentes à etapa pré-operacional do ciclo de vida, considerando-se a extração e produção destes materiais-chave.

Não foram estudados todos os materiais utilizados na construção com cada técnica construtiva, apenas os mais relevantes, escolhidos conforme critérios a serem tratados a seguir. Também não foram abordados todos os componentes da edificação, sendo excluídas instalações elétricas e hidráulicas, revestimentos decorativos e esquadrias, por exemplo. Estes componentes foram excluídos deste estudo, pois podem ser muito similares nas duas técnicas construtivas, por exemplo: as mesmas esquadrias e revestimentos decorativos de piso podem ser utilizadas nos dois métodos, gerando a mesma quantidade de resíduos.

#### **3.1.3 Justificativa a partir do objetivo**

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa científica é o resultado de um exame minucioso realizado a fim de resolver um determinado problema, por meio da utilização de procedimentos científicos. Quanto aos seus objetivos, as pesquisas podem ser classificadas como: exploratória, descritiva ou explicativa. Segundo Gil (2007) uma pesquisa exploratória visa proporcionar uma maior familiaridade com o problema, a fim de construir hipóteses ou torná-lo mais explícito. Este tipo de pesquisa envolve levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de exemplos que estimulem a compreensão do fenômeno

a ser estudado. Dentro da classificação deste tipo de pesquisa, ela pode ser pesquisa bibliográfica ou estudo de caso. Já pesquisas descritivas são, segundo Gerhardt e Silveira (2009), aquelas que visam descrever os fatos e fenômenos de uma determinada realidade, podendo ser em forma de estudo de caso, análise documental e pesquisas ex-post-facto.

Quanto aos procedimentos, Gerhardt e Silveira (2009) e Gil (2007), afirmam que as pesquisas podem ser: (i) bibliográfica, quando elaborada a partir de material já publicado; (ii) documental, quando elaborada a partir de documentos que não receberam tratamento analítico; (iii) experimental, quando, a partir da determinação do objeto de estudo, selecionam-se variáveis capazes de influenciá-lo e observa-se o efeito delas; (iv) de campo, com coleta de dados junto a pessoas; (v) ex-post-facto, quando um experimento é realizado após os fatos para se entender as relações de causa e efeito; (vi) de levantamento de uma amostra ou de uma população; (vii) estudo de caso, quando há um estudo exaustivo de poucos objetos que se deseja conhecer de maneira ampla, profunda e detalhada; entre outras.

Esta dissertação se encaixa como estudo de caso flexível, quase-experimento. A pesquisa em questão é considerada flexível, pois seu planejamento pode mudar ou evoluir ao longo do processo. Segundo Yin (2001), um estudo de caso é voltado para acontecimentos contemporâneos, em seu contexto da vida real, sobre os quais o pesquisador tem pouco ou nenhum controle. Nesta estratégia, a investigação baseia-se em múltiplas fontes de evidências, como revisão bibliográfica, pesquisa documental, entrevistas, observação direta, entre outros, tudo isto buscando a triangulação dos dados para entender o fenômeno que se propõe estudar. É um método bastante abrangente, incorporando abordagens específicas à coleta e análise dos dados. Além disso, Gerhardt e Silveira (2009) afirmam que, em um estudo de caso, o pesquisador não pretende intervir na realidade observada, mas sim revelá-la como ela é percebida, conhecendo-a com profundidade.

Segundo as definições criadas por Yin (2001), o estudo em questão se enquadra na categoria de Projeto de Caso Único Incorporado (com múltiplas unidades de análise). Nele foi estudado um único caso – um projeto de edificação residencial de pequeno porte – com unidades múltiplas de análise que são os dois sistemas construtivos. O projeto escolhido é de uma residência a ser construída originalmente em LSF, sendo feita uma simulação/estimativa da geração de resíduos para este mesmo projeto se construído em alvenaria convencional.

Esta pesquisa também é considerada como um experimento de campo com etapa de simulação, pois, após observação em direta para se revelar a realidade do caso base

(residência em LSF), ao invés de conhecê-lo com absoluta profundidade, foi estabelecida uma simulação em alvenaria convencional. Esta simulação manteve as características e dimensões do projeto arquitetônico do caso base, porém alterou as variáveis dos materiais e técnicas aplicados na construção. Este estudo não se trata de estudo de caso puro, pois o objetivo principal não é conhecer a fundo o que causa as diferenças nas quantidades de RCC entre as duas técnicas (atores, variáveis e parâmetros) e, sim, explorar quantitativamente os resultados de resíduos gerados e seus impactos ambientais.

A escolha desta estratégia é considerada adequada a esta pesquisa devido à necessidade de múltiplas fontes de evidências para estudo da unidade de análise, além da necessidade de comparação entre as duas técnicas construtivas em termos de resíduos gerados. O uso de apenas uma ferramenta (como a revisão bibliográfica, ou a observação direta) tornaria o trabalho incompleto e com possibilidade de erros. O estudo é descritivo e caracterizado como quantitativo, pois visa identificar a quantidade de resíduos gerada e os impactos ambientais relacionados à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> destes resíduos de cada técnica construtiva. Apesar disto, um diagnóstico qualitativo se faz necessário, estabelecendo uma relação entre os resíduos e os impactos ambientais gerados.

#### **3.1.4 Testes de validade**

a) Validade do constructo: por se tratar de um estudo de caso associado a um quase-experimento, as evidências deste trabalho, conforme citado anteriormente, são provenientes de mais de uma fonte de pesquisa. Além da extensa investigação bibliográfica em literatura relevante sobre o tema, foi realizada pesquisa em campo, observação direta e simulação com alteração de variáveis. De forma que a pesquisa fornecesse os dados necessários para que o problema seja respondido, as informações foram coletadas com bastante critério, obedecendo uma estratégia pré-definida e havendo domínio e encadeamento lógico de todas as etapas. Na coleta de informações para a simulação dos resíduos da casa de alvenaria, foi utilizada bibliografia técnica relevante, como os relatórios de Agopyan et al. (1998), que são uma das mais completas pesquisas sobre resíduos de construção em obras brasileiras, e a TCPO (2010), que é referência nacional na composição de materiais e serviços para orçamentos. Já para a pesquisa de campo e observação direta, foram elaboradas planilhas detalhadas a serem preenchidas, tendo sido computados todos os resíduos gerados dos materiais escolhidos. Para análise dos impactos ambientais, foram utilizados dados de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub> de fontes confiáveis (por já possuírem reconhecimento em pesquisas sobre o tema) e atualizadas, dando preferência aos índices obtidos em literatura nacional por serem mais adequados à realidade brasileira.



b) Validade interna: a validade interna é uma relação de causa e efeito, mostrando-se determinadas condições que levam a outras. No caso desta pesquisa, busca-se que a utilização de outra técnica construtiva (que não a de alvenaria de tijolos cerâmicos convencional), mais especificamente o *light steel framing*, possibilite a redução na quantidade de resíduos de construção civil gerada na obra de uma residência e, conseqüentemente, dos seus impactos ambientais associados. Para isto, optou-se por um estudo de caso *in loco* para a técnica LSF, menos comum no Brasil, tendo acesso aos projetos detalhados e às etapas de construção e montagem; e um experimento com simulação baseada em literatura técnica para a alvenaria, técnica consolidada no país. Desta forma, o grau de confiança se dá pelo cumprimento das etapas lógicas de coleta e análise de dados, podendo-se estabelecer que a condição 1 (uso do LSF) leve ao efeito/condição 2 (redução da quantidade de resíduos e seus impactos associados).

c) Validade externa: as técnicas utilizadas na realização deste estudo são generalizáveis, porém os resultados desta pesquisa não são generalizáveis por se tratar de um estudo de caso.

d) Confiabilidade: este trabalho foi executado em forma de estudo de caso com simulação, sendo assim, foi definida uma estratégia a ser seguida na coleta e triangulação destes dados. Se o protocolo de coleta de dados for seguido conforme proposto nesta dissertação, podem-se reproduzir, em outros estudos futuros, os resultados obtidos por esta pesquisadora.

### **3.1.5 Seleção do caso**

A seleção do caso a ser estudado nesta pesquisa se deu a partir de alguns critérios e, principalmente, da disponibilidade na fase de observação direta. Foi escolhido o projeto de uma residência unifamiliar de pequeno porte, que possuísse entre 50 e 100 m<sup>2</sup>, que fosse ser construída em *light steel framing* nas cidades de Curitiba (e região metropolitana) ou Ponta Grossa/PR. A escolha das cidades aconteceu pela disponibilidade de a autora poder acompanhar e visitar as obras, quando necessário, para coleta dos dados. A partir dos critérios citados anteriormente, a seleção ocorreu, principalmente, de acordo com o planejamento e cronograma da obra, havendo preferência por uma obra que ainda não tivesse sido iniciada e que tivesse previsão de conclusão antes da entrega da dissertação.

A obra em LSF escolhida é uma residência de um caseiro em uma fazenda no município de Ponta Grossa/PR. A construção possui 58,15m<sup>2</sup> e teve seu início no mês de maio de 2016, com conclusão da montagem no mês de agosto/2016. Maiores detalhes do projeto e características construtivas da residência serão tratadas em seção específica.

No caso da residência de alvenaria convencional, a quantificação dos resíduos foi feita com base em literatura e produções técnicas sobre o tema, sendo utilizado como base o mesmo projeto da casa em LSF. Como a alvenaria convencional é a técnica construtiva mais utilizada no Brasil, os dados puderam ser obtidos com mais facilidade.

### **3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS**

O protocolo de coleta de dados foi elaborado para ser seguido durante a execução da pesquisa, a fim de guiar a autora para que atingisse o objetivo do trabalho e para garantir a confiabilidade/rastreabilidade deste. A confiabilidade permite que outra pessoa, seguindo este protocolo de coleta e os métodos de análise a serem demonstrados posteriormente, possa seguir os mesmos passos e obter os mesmos resultados. Como já citado, o objetivo deste trabalho consiste em quantificar os resíduos de construção civil gerados na construção de uma edificação padrão concebida em LSF em comparação com uma em alvenaria convencional e verificar os impactos ambientais (energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>) a eles associados na fase pré-operacional dos mesmos. A seguir, será apresentado o encadeamento lógico e temporal das etapas seguidas para execução deste projeto.

#### **3.2.1 Fase de embasamento teórico**

Primeiramente, a teoria que envolve o projeto foi conhecida, sendo explorada por meio de revisão bibliográfica, vista na seção 2, anterior. Esta revisão forneceu a base para o desenvolvimento da pesquisa e do estudo de caso experimental, sustentando todo o projeto. Foram estudados temas como: sustentabilidade e construção civil; perdas e resíduos na construção civil; uso racional dos materiais; o sistema construtivo *light steel framing* (LSF); e análise do ciclo de vida.

Este embasamento teórico foi feito a partir de diversas fontes de pesquisa. Dentre elas, podem ser citadas: dissertações de Mestrado e teses de Doutorado nacionais; artigos de periódicos nacionais e internacionais relevantes sobre o tema; artigos nacionais em anais de congressos; relatórios de pesquisas, como a de Agopyan et al. (1998); normas técnicas nacionais e internacionais; entre outros.

#### **3.2.2 Fase decisória**

Para ser feita a análise da construção das edificações em LSF e alvenaria convencional, a partir do conceito e método de ACV, foram definidos o escopo e os objetivos da pesquisa, sendo ela dividida em três etapas: (i) escolha dos materiais de construção chave a serem estudados; (ii) construção da edificação; e (iii) impactos ambientais. Para a primeira etapa, foram escolhidos e listados os materiais a serem analisados, considerados

os mais relevantes para este estudo. Esta escolha se deu a partir dos seguintes critérios: (a) componentes estudados: fazer parte dos componentes da edificação a serem estudados, como fundações, paredes de vedação e cobertura; (b) representatividade em massa: ser um material que compõe parcela significativa da massa do componente estudado. As esquadrias, por exemplo, apesar de serem representativas no quesito massa, foram excluídas por não se enquadrarem no primeiro critério (não são um componente estudado). Já os parafusos de fixação dos perfis de aço galvanizado no LSF, apesar de serem um material utilizado em um componente estudado, não foram contabilizados pela sua pequena representatividade em massa.

Na segunda etapa, em relação à execução da obra, foram selecionados os projetos a serem executados, com base no escopo definido e nos critérios apontados anteriormente, como: porte/tamanho da residência, localização da construção, facilidade de acesso e acompanhamento, cronograma de obra, entre outros. Como mencionado, para a residência em alvenaria, pela grande quantidade de pesquisas feitas sobre o tema, pela facilidade de obtenção de dados na literatura e pela grande confiabilidade dos mesmos, optou-se pela quantificação dos resíduos com base em bibliografia técnica, como a TCPO (2010) e Agopyan et al. (1998).

Já na terceira etapa, como ferramenta de avaliação do impacto ambiental, foi escolhida uma metodologia de análise simplificada da energia embutida (EE) e das emissões de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional do ciclo de vida, com base em fontes como a tese de Tavares (2006), o Inventário de Carbono e Energia da Universidade de Bath (ICE v2.0, 2011), a dissertação de Monich (2012) e o artigo de Tavares e Bragança (2016). Ainda, também se optou por não estudar os impactos ambientais associados às fases operacional (de manutenção) e pós-operacional (de demolição) neste trabalho, devido ao foco ser a etapa de obra.

Na obtenção da energia total da fase pré-operacional de uma edificação, Tavares (2006) soma as energias das seguintes etapas: (i) prospecção, fabricação e transporte de insumos; (ii) fabricação dos materiais de construção; (iii) transporte dos materiais ao sítio da obra; (iv) energia consumida na obra; (v) transporte dos trabalhadores até a obra; (vi) desperdício de materiais; (vii) transporte do desperdício. Como o foco deste trabalho são os impactos ambientais dos resíduos gerados em obra, foram calculadas as etapas (i) e (ii) destes RCC, especificadas acima.

Desta forma, as etapas (iii) e (vii) de transporte de materiais (da fábrica ao canteiro e do canteiro à destinação final) não foram computadas. Além disso, a exclusão se justifica também pelo fato de que os resultados obtidos seriam proporcionais às quantidades de

RCC em todos os casos, não havendo grandes alterações nos padrões de impactos ambientais associados. Já a etapa (vi) não foi considerada, pois, no caso desta dissertação, as duas primeiras fases (i e ii) já se referem apenas as quantidades de materiais que se tornaram resíduos. Já as etapas (iv) e (v) não foram estudadas, porque não têm relação com a geração de RCC. No caso do cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>, o mesmo raciocínio e etapas foram seguidos.

### **3.2.3 Fase de coleta de dados**

Quanto à fase de construção, após a definição da edificação em LSF a ser analisada, foi feita a observação direta da realidade da obra. Este tipo de abordagem trata os acontecimentos em tempo real e dentro do contexto do evento, sendo bastante vantajosa, apesar de consumir muito tempo e poder apresentar elevados custos de deslocamento. Dados da obra também foram coletados por meio de registros em arquivo mantidos por pessoas designadas pelo pesquisador, e por meio de entrevistas não-estruturadas (espontâneas) conduzidas conforme necessidade.

Como já citado, pela impossibilidade de observação direta em obra no caso da edificação em alvenaria de tijolos cerâmicos convencional, a coleta de dados se deu a partir de documentos, registros e bibliografia. A principal referência na definição das quantidades e composições de materiais necessárias foi a TCPO 13 – Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (2010). Já na coleta de dados sobre resíduos, a mesma TCPO foi utilizada, somando-se à pesquisa de Agopyan et al. (1998) e à tese de Tavares (2006).

A avaliação dos impactos ambientais dos resíduos relativos à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional foi feita embasada na metodologia utilizada por Tavares (2006) e Monich (2012) em suas pesquisas. Ainda, a base de dados foi retirada, além destes dois estudos, do Inventário de Carbono e Energia da Universidade de Bath (ICE v2.0, 2011) e do artigo de Tavares e Bragança (2016), dando sempre preferência para este último devido ao caráter nacional dos seus dados e à atualização da sua data de publicação.

### **3.2.4 Fase redacional**

Após embasamento teórico, tomada de decisões e coleta de dados, foi iniciada a fase redacional, explicitando em forma de texto todas as evidências encontradas até então. A partir desta organização textual de informações, foi possível a próxima etapa de análise dos dados coletados. A forma de tratamento das informações obtidas será abordada no tópico a seguir. O quadro abaixo apresenta um resumo do protocolo de coleta dos dados.

Quadro 3 – Protocolo de coleta de dados

FASE		MÉTODO
<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	Embasamento teórico sobre o tema	- revisão bibliográfica e documental
<b>FASE DECISÓRIA</b>	Escolha dos materiais-chave	- escolha dos materiais-chave de cada técnica construtiva a serem estudados
	Obra	- busca de projetos residenciais em LSF e alvenaria convencional com obra programada - análise dos projetos e cronogramas de obra - seleção do projeto a ser construído em LSF e opção pela simulação deste mesmo projeto em alvenaria convencional
	Impactos ambientais associados	- estudo de outros trabalhos - escolha da energia embutida e emissões de CO <sub>2</sub> na fase pré-operacional como impactos ambientais a serem analisados
<b>FASE DE COLETA DE DADOS</b>	Obra	- observação direta em obra do projeto em LSF - análise de relatórios e registros de obra (LSF) - entrevistas não-estruturadas / espontâneas (caso necessário) com pessoal em obra (LSF) - coleta de dados em bibliografia para simulação dos resíduos gerados em obra de alvenaria convencional
	Impactos ambientais associados	- coleta de dados sobre energia embutida e emissões de CO <sub>2</sub> associadas aos materiais construtivos em trabalhos como os de Tavares (2006), ICE v2.0 (2011), Monich (2012) e Tavares e Bragança (2016)
<b>FASE REDACIONAL</b>	Obra e impactos ambientais	- compilação dos dados coletados em forma de texto, gráficos e tabelas para posterior análise dos mesmos

Fonte: o autor.

### 3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS

Depois de realizada a coleta dos dados, conforme protocolo estabelecido no subitem anterior, foi feita a análise do inventário. Esta é uma fase muito importante, pois é onde os dados coletados foram processados e transformados em informações e conhecimento. As informações foram analisadas cuidadosamente, havendo a quantificação dos resíduos gerados e a identificação de padrões e tendências. Além disso, foram analisados os impactos ambientais na fase pré-operacional do ciclo de vida, em relação à EE e emissões de CO<sub>2</sub>, dos resíduos gerados por cada tipo de técnica construtiva. Para cada fase, o método de análise de dados foi diferenciado, devido à natureza e fontes distintas das informações obtidas.

### 3.3.1 Quantidade de resíduos

Em relação à fase da obra da residência em LSF, em um primeiro momento, as informações sobre o projeto foram apresentadas, havendo uma descrição das características técnicas e construtivas do caso em questão. Além disso, os procedimentos de obra foram apresentados, sendo também inserido o acompanhamento fotográfico das etapas conforme sua ocorrência. Posteriormente, os dados coletados sobre os resíduos gerados foram organizados em planilhas e padronizados para quilogramas, comparando-se o total de material adquirido, o total de material empregado na construção e a quantidade de resíduos gerada. Isso possibilitou a apresentação da relação de perda por resíduo no sistema construtivo (que é o quociente entre a quantidade de resíduos e a quantidade de materiais aplicados). Também foram elaborados gráficos, para melhor visualização, estabelecendo a quantidade de resíduos gerada por cada material empregado ou parte da edificação. Este tipo de análise também permitiu a classificação dos tipos de resíduos predominantes, dos materiais que mais apresentam perdas por resíduo e das partes da edificação apresentam maior índice de geração de RCC.

Para estimativa da residência em alvenaria convencional, os dados coletados em bibliografia técnica também foram organizados em planilhas. Nelas, a partir das quantidades teóricas de material necessárias, foram estimadas as quantidades de perdas por RCC, sendo apresentados: quantidade necessária para aplicação, quantidade de perda por resíduo e quantidade total (aplicada + resíduos). Em um primeiro momento, as planilhas foram organizadas por parte da edificação (superestrutura/estrutura, paredes/painéis e cobertura), depois houve a separação por materiais de construção, com padronização das unidades de medidas para quilogramas.

Os índices de perda por resíduo dos materiais utilizados na casa de alvenaria, coletados anteriormente, foram filtrados conforme relevância das fontes de dados. No caso de materiais em que a TCPO (2010) e Agopyan et al. (1998) apresentam índices diferentes considerando mesmos condicionantes, foi feita uma média aritmética simples das perdas. Já quando a fonte considera aspectos mais específicos à produção e/ou aplicação de determinado material, esta foi a perda por RCC considerada, não sendo calculada a média entre os valores. Por exemplo, Agopyan et al. (1998), em sua pesquisa de campo, analisaram a perda de cimento especificamente na fabricação de argamassa, enquanto que a TCPO (2010) apresenta uma perda genérica de cimento; neste caso, o índice obtido por Agopyan foi o utilizado como referência. Quando da ausência do índice de perdas nestes dois documentos, foram utilizados os valores encontrados por Tavares (2006).

A tabela abaixo apresenta os valores de perdas por entulho dos componentes da construção em alvenaria convencional considerados neste trabalho. A relação completa dos índices pesquisados e efetivamente utilizados, com suas fontes, encontra-se nos apêndices A e B.

Tabela 3 – Índices de perda por resíduo utilizados

DESCRIÇÃO		PERDAS MATERIAL (%)	PERDAS PRODUTO (%)
CONCRETO	CIMENTO	16,5	6
	AREIA	15,0	
	BRITA	9,0	
ARMADURA	AÇO	10,5	0
FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	15,0	100
	COMPENSADO	15,0	
ALVENARIA DE TIJOLO	TIJOLO 9x14x19cm	15,0	0
ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	16,5	24
	AREIA	18,5	
CHAPISCO	CIMENTO	11,8	21
	AREIA	18,5	
EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	9,5	90
	AREIA	18,5	
	CAL HIDRATADA	6,0	
EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	19,0	90
	AREIA	18,5	
	CAL HIDRATADA	3,5	
REBOCO	AREIA	18,5	13
	CAL HIDRATADA	18,0	
MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	15,0	0
TELHAS	TELHA FIBROCIMENTO	10,0	0

Para cada técnica construtiva, após a identificação das quantidades de resíduos de obra, os dados foram compilados em dois tipos de planilha, sempre se obtendo a quantidade de material adquirida, quantidade de material aplicada e quantidade de resíduos gerada: (i) a primeira delas é organizada por parte da edificação e separada em estrutura, paredes de vedação e cobertura, chegando em quais partes e serviços são os maiores geradores de resíduos, sendo menos eficientes neste aspecto; e (ii) a segunda é organizada por material de construção, chegando-se nos materiais mais propensos à geração de RCC. Desta forma, pode-se fazer uma comparação entre a geração de resíduos na construção em LSF e alvenaria.

### 3.3.2 Impactos ambientais associados

Para utilizar uma abordagem holística com visão global de cada técnica construtiva estudada foi utilizada a metodologia Análise do Ciclo de Vida (ACV). Ela é composta por quatro fases: definição de objetivo e escopo; análise do inventário; avaliação do impacto; e

interpretação do ciclo de vida. A ACV é uma ferramenta muito importante para verificação dos impactos ambientais, que são analisados a partir de um inventário de entradas e saídas, feito com base em um recorte da realidade. No caso do estudo em questão, ela é importante para analisar os impactos ambientais dos RCC gerados, com a utilização de duas técnicas construtivas diferentes, em relação à EE e emissões de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional do ciclo de vida.

A fase de definição de objetivo e escopo foi aplicada para coleta dos dados desta dissertação, quando da escolha dos sistemas e materiais analisados, além das categorias de impacto estudadas. Já a análise do inventário foi aplicada dentro do método de análise dos dados, sendo destrinchadas e trabalhadas as informações obtidas. A penúltima fase (avaliação do impacto) foi aplicada conforme explicitado abaixo, considerando a energia embutida e as emissões de CO<sub>2</sub>. Já a etapa de interpretação foi e está sendo feita de maneira contínua ao longo de todo o trabalho, não sendo realizada em algum momento específico e exclusivo.

Na etapa pré-operacional de uma edificação, tem-se a extração e processamento dos materiais na fábrica, além do seu transporte até o canteiro de obras. A energia embutida (EE) é a quantidade de energia consumida para a produção de um material (desde a extração das suas matérias-primas e transporte até a indústria, até sua fabricação) e seu transporte até o canteiro de obras.

A fórmula abaixo é utilizada para obtenção da energia embutida na (i) prospecção, fabricação e transporte de insumos; e (ii) fabricação dos materiais de construção. As quantidades de material consideradas para inclusão na fórmula são a massa de RCC gerada por cada material.

$$EE_{mat} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot FE_i$$

Onde:

$EE_{mat}$  – energia embutida na extração e processamento dos materiais (MJ)

$i$  – material de construção discriminado

$n$  – número de materiais

$m$  – massa de RCC do material utilizado (kg)

$FE_i$  – fator de energia dos resíduos do material discriminado (MJ/kg)

Já para determinação do CO<sub>2</sub> emitido pelas fontes energéticas utilizadas na fabricação dos materiais que se tornaram resíduos, tem-se:



$$ECO_{2mat} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot FCO_{2i}$$

Onde:

$ECO_{2mat}$  – emissões de CO<sub>2</sub> na extração e processamento dos materiais que se tornaram resíduos (kg CO<sub>2</sub>)

$i$  – material de construção discriminado

$n$  – número de materiais

$m$  – massa de RCC o material utilizado (kg)

$FCO_{2i}$  – fator de CO<sub>2</sub> dos resíduos material discriminado (kg CO<sub>2</sub>/kg)

Após a determinação dos valores de EE (MJ) e emissões de CO<sub>2</sub> (kg) dos resíduos, os dados foram compilados em tabelas e gráficos comparativos para o LSF e a alvenaria convencional. Eles são compostos por quantidades absolutas de impactos, porcentagens de participação por parte da edificação e comparação com a proporção da massa de resíduo. Além disso, foi feito o cálculo da EE e CO<sub>2</sub> por kg de RCC e por m<sup>2</sup> das edificações. Os resultados obtidos foram então expostos e discutidos em sessão específica.

#### 4. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NA FASE DE CONSTRUÇÃO

A partir do objetivo de pesquisa, que é quantificar os resíduos de construção civil gerados durante a obra de uma edificação padrão concebida em LSF em comparação com uma em alvenaria convencional e analisar os impactos ambientais causados por eles, foi definido o objetivo e escopo desta etapa. Devido à impossibilidade prática de análise de todos os insumos utilizados em uma construção, conforme citado na seção de estratégias e método de pesquisa, os materiais considerados mais relevantes e expressivos foram escolhidos para serem analisados, sendo eles explicitados no quadro abaixo.

Quadro 4 – Materiais de construção escolhidos para análise

TÉCNICA CONSTRUTIVA	APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO	
		PRODUTO	MATERIAL
<b>LIGHT STEEL FRAMING</b>	ESTRUTURA - RADIER E CALÇADA EXTERNA	LASTRO	BRITA
		FÔRMAS (m <sup>2</sup> )	MADEIRA SERRADA
		ARMADURA	AÇO
		CONCRETO USINADO	CIMENTO
			AREIA
	PAINÉIS VERTICAIS	PERFIL DE AÇO GALVAN.	AÇO GALVANIZADO
		FECHAMENTO EXTERNO	PANEL H - SMARTSIDE
		FECHAMENTO INTERNO	GESSO ACARTONADO
			OSB
	COBERTURA	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO
		PERFIL DE AÇO GALVAN.	AÇO GALVANIZADO
		SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD
		COBERTURA	TELHA SHINGLE
<b>ALVENARIA CONVENCIONAL</b>	SUPERESTRUTURA - ESTACAS	CONCRETO	CIMENTO
			AREIA
		ARMADURA	BRITA
			AÇO
	ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO
			AREIA
			BRITA
		ARMADURA	AÇO
		FÔRMAS	MADEIRA SERRADA
		MADEIRA COMPENSADA	
	PAREDES DE VEDAÇÃO	ALVENARIA DE TIJOLO	TIJOLO 9x14x19cm
		ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO
	REVESTIMENTOS	CHAPISCO	AREIA
			CIMENTO
		EMBOÇO EXTERNO	AREIA
			CAL HIDRATADA
			CIMENTO
		EMBOÇO INTERNO	AREIA
			CAL HIDRATADA
			CIMENTO
REBOCO	AREIA		
	CAL HIDRATADA		
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	
	TELHAS	TELHA DE FIBROCIMENTO	

Fonte: o autor.

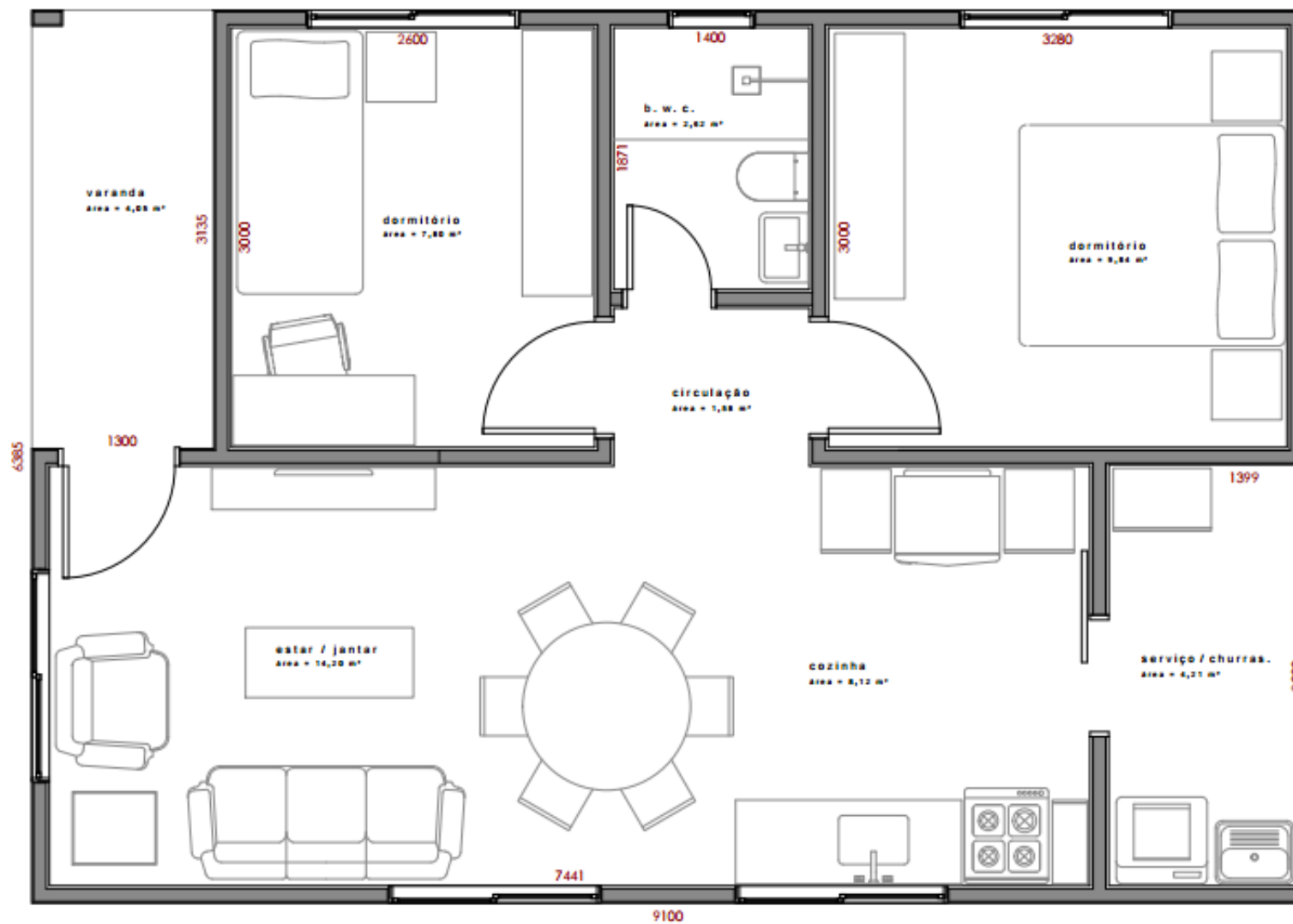
Em resumo, sintetizando a relação pela eliminação de insumos recorrentes, a lista a ser estudada é:

- Aço;
- Areia;
- Brita;
- Cal;
- Cimento;
- Gesso acartonado;
- Lã de vidro;
- Madeira compensada;
- Madeira serrada;
- OSB;
- Panel H - Smartside;
- Perfil de aço;
- Telha de fibrocimento;
- Telha Shingle;
- Tijolo cerâmico.

#### **4.1 RESIDÊNCIA EM LIGHT STEEL FRAMING**

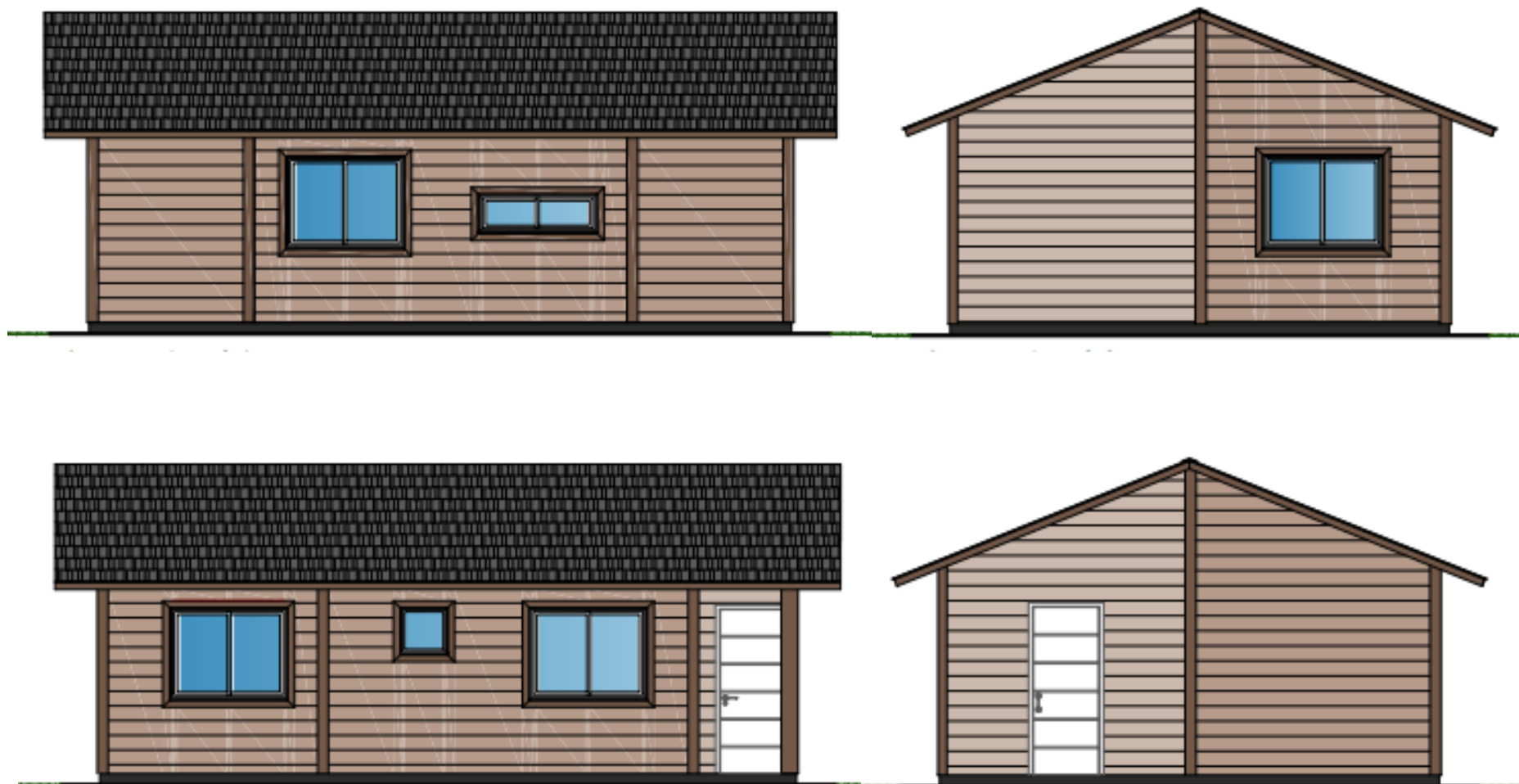
Para comparação da quantidade de resíduos de construção civil gerados entre uma construção em alvenaria convencional e uma em *light steel framing*, este trabalho fez o acompanhamento direto de uma obra com a segunda técnica. Ela foi construída no município de Ponta Grossa/PR, em uma fazenda na área rural, para servir como residência do caseiro. A edificação possui 58,15m<sup>2</sup>, conforme projeto a seguir, sendo dois quartos, sala e cozinha integradas, banheiro e lavanderia. Além disso, todo o perímetro da edificação possui uma calçada de 0,95 metros de largura.

Figura 12 – Planta baixa da residência em LSF



Fonte: Smart Sistemas Construtivos

Figura 13 – Elevações 1, 2, 3 e 4 da residência em LSF



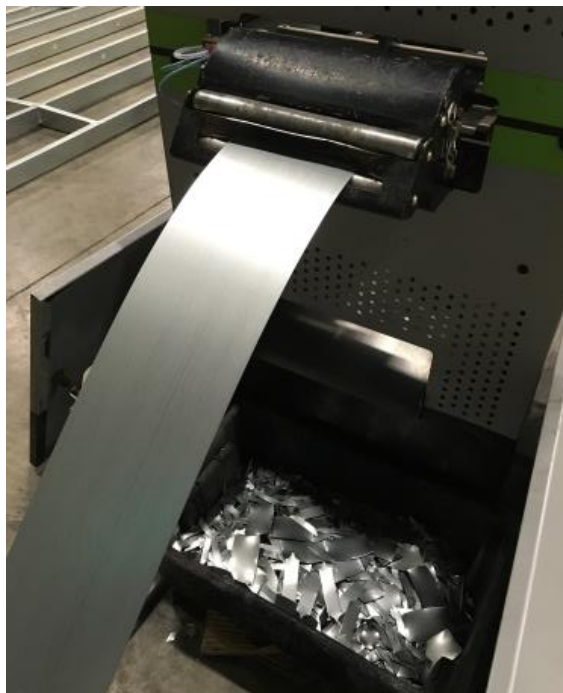
Fonte: Smart Sistemas Construtivos.

Conforme estudado na revisão bibliográfica, as edificações em LSF possuem componentes básicos. No caso desta residência, eles são: (i) fundação em radier; (ii) estrutura vertical padrão com perfis de aço galvanizado; (iii) fechamento interno dos painéis em gesso acartonado com reforços em OSB em locais onde está prevista a instalação de armários; (iv) fechamento externo dos painéis em Panel H Smartside; (v) isolamento térmico dentro dos painéis com manta de lã de vidro; (vi) cobertura de perfis metálicos com uso de placas de OSB e telhas shingle. Como se trata de uma residência de apenas um pavimento, não foram utilizados sistemas horizontais de laje. O método de construção utilizado é o “por painéis”, com painéis, contraventamentos e tesouras da cobertura fabricados e montados fora do canteiro e encaixados entre si no local da obra.

#### 4.1.1 Fabricação dos perfis de aço galvanizado

Em um primeiro momento, a partir de slitters (tiras de aço galvanizado enroladas de largura específica para cada dimensão da seção de perfil) foram produzidos, através de perfiladeira, os perfis de aço galvanizado que fazem parte da residência estudada. Na perfiladeira, além da dobradura, ocorre também a furação do perfil para passagem de tubulações de elétrica e hidráulica. Os perfis utilizados nesta obra são os denominados engenheirados, pois foram fabricados sob medida, conforme projeto específico. Este processo gera perdas/resíduos (figura 14) pelas furações ou recortes executados nos perfis para passagem de tubulações.

Figura 14 – Resíduos dos perfis de aço: perdas de processo



Fonte: o autor.

Na fabricação dos perfis usados especificamente na obra estudada, as perdas de processo somaram uma quantia de 33 kg de sucata de aço para a produção de 1.323,46 kg de perfis a serem utilizados nos painéis de vedação e na estruturação da cobertura. Considerando-se, segundo o fabricante, que os perfis para a cobertura representam 29,97% e para os painéis, 70,03% do peso de aço a ser utilizado, temos 23,11 kg de sucata para 926,82 kg de aço aplicado em painéis verticais; e 9,89kg de resíduos para 396,64kg de aço aplicado na cobertura.

#### 4.1.2 Construção da residência

A construção da residência aconteceu, inicialmente, em duas frentes de trabalho distintas: montagem dos painéis em fábrica e execução da fundação no canteiro de obras. A primeira delas (montagem dos painéis em fábrica) se iniciou no dia 20/06/2016 na sede da empresa Smart Sistemas Construtivos, em Ponta Grossa/PR. Foi escolhida a opção de montagem em fábrica por permitir maior controle dos processos e menor desperdício de insumos. Lá já se encontravam todos os materiais e projetos de detalhamento necessários, sendo dado início à montagem da estrutura de aço galvanizado (tanto das paredes de vedação quanto da cobertura), como pode ser observado nas figuras abaixo.

Figuras 15 e 16 – Materiais necessários para montagem dos painéis em fábrica



Fonte: o autor.

Figuras 17, 18, 19 e 20 – Montagem da estrutura de aço dos painéis, conforme projeto



Fonte: o autor.

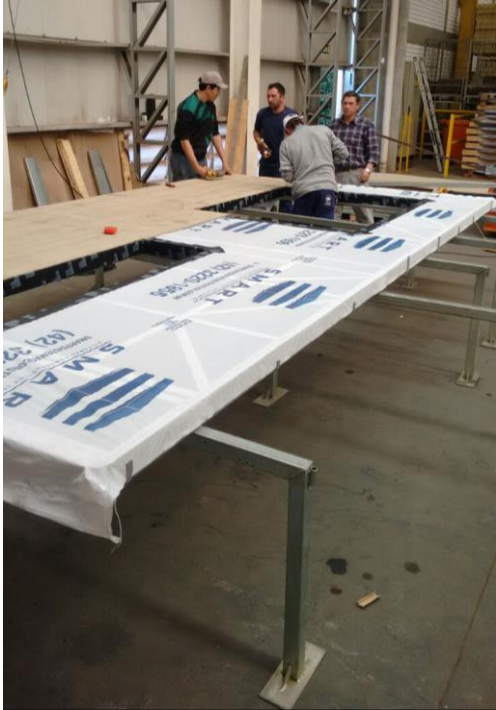
A etapa mostrada acima não gerou nenhum tipo de resíduo, visto que os perfis já vieram da produção cortados nos tamanhos exatos para serem utilizados nesta residência. Além disso, as furações para encaixe e passagem de tubulações também já estavam feitas.

Após a estrutura estar pronta, em relação à cobertura, os painéis receberam chapas de OSB Techshield e uma manta de subcobertura (não contabilizada), que foram parafusadas na estrutura. Já os painéis de vedação tiveram suas faces externas fechadas com membrana hidrófuga e o revestimento externo (Panel H Smartside), que foi parafusado à estrutura. Em seguida, foram encaixadas, pelo lado interno, as mantas de lã de vidro para



isolamento termoacústico da edificação. As figuras a seguir (21 a 24) demonstram este processo.

Figuras 21 e 22 – Instalação do revestimento externo em Panel H Smartside



Figuras 23 e 24 – Instalação do isolamento em lã de vidro



Fonte: Smart Sistemas Construtivos.

Por se tratar de uma residência cuja execução objetiva custos reduzidos, a instalação externa mais comum, composta por chapas de OSB e placas cimentícias não foi

realizada. Em seu lugar, foram utilizados apenas os painéis Smartside da empresa LP, que são chapas de OSB impressas sob pressão com um acabamento em resina impregnada resistente a intempéries e que possui pintura saturada (PBO). O painel reproduz a textura de cedro e recebe posterior pintura final à base d'água (LP BUILDING PRODUCTS, 2016).

Em um próximo momento, no início de julho, as tubulações de elétrica e hidráulica foram embutidas dentro dos painéis, sendo instalados também caixas de passagem e quadro de luz, conforme figura 25. Como estas instalações não fazem parte do escopo deste trabalho, seus resíduos gerados não foram quantificados. Após esta etapa, as chapas internas, constituídas de placas de OSB (quando da necessidade de reforço para armários) e gesso acartonado foram instaladas nos painéis, como pode ser visto na figura 26.

Figuras 25 e 26 – Instalação das tubulações embutidas e fixação das chapas internas



Fonte: o autor.

Em seguida, na segunda quinzena do mês de julho, foi iniciada uma montagem teste da residência dentro da fábrica. Os painéis foram ligados uns aos outros e as esquadrias foram instaladas, conforme figuras a seguir. Internamente, os painéis se encontravam quase que completamente revestidos, restando apenas algumas lacunas que foram concluídas após a montagem final, já na fazenda. Estas aberturas foram deixadas para permitir melhor fixação dos perfis na fundação.

Figuras 27 e 28 – Residência de LSF pré-montada em fábrica para testes: vistas externas



Fonte: o autor.

Figuras 29 e 30 – Residência de LSF pré-montada em fábrica para testes: vistas internas



Fonte: o autor.

Neste mesmo momento, a segunda frente de trabalho, de execução da fundação em radier e calçada externa, foi iniciada. Foram montadas fôrmas de madeira para delimitação do perímetro e desníveis da residência, assim como os limites da calçada. Sobre um lastro de brita, foi colocada uma lona e foram montadas as armaduras da fundação. No dia 25/07/2016, ocorreu a concretagem com uso de concreto usinado de 30 MPa bombeado por caminhão. As figuras a seguir ilustram estas etapas.

Figuras 31 e 32 – Execução da fundação: (a) fôrmas e lastro de brita; e (b) armadura já montada



Figuras 33 e 34 – Fundação em radier: (a) detalhe da armadura; e (b) detalhe da tubulação de esgoto



Figuras 35 e 36 – Concretagem do radier



Figuras 37 e 38 – Radier e calçada já concretados e desenformados



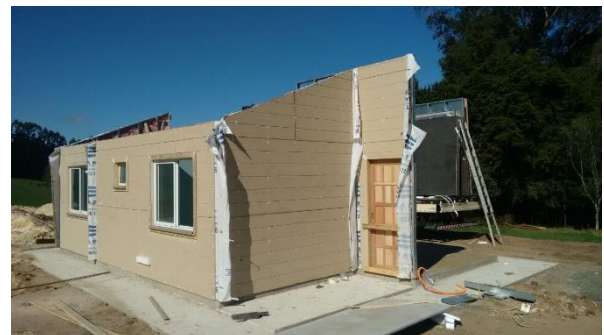
Fonte: o autor, Smart Sistemas Construtivos.

No dia 24 de agosto de 2016, os painéis foram carregados em um caminhão e transportados da fábrica até a fazenda. Lá eles foram montados conforme teste na fábrica e orientações de projeto. As figuras abaixo (de 39 a 46) mostram o transporte e montagem final.

Figuras 39 e 40 – Carregamento e transporte dos painéis



Figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46 – Descarregamento e montagem dos painéis na obra



Fonte: Smart Sistemas Construtivos.

Vale ressaltar que a finalização do preenchimento dos painéis internos, fechando as lacunas restantes, foi realizada no próprio local da obra. Os painéis necessários para este serviço já haviam sido cortados nos tamanhos adequados em fábrica, sendo apenas parafusados na obra e não gerando resíduos adicionais em canteiro. Quanto à cobertura, após encaixe final na edificação montada, os painéis receberam o revestimento da telha Shingle, processo que gerou certa quantidade de RCC em canteiro. Abaixo, seguem imagens da casa antes e após receber as telhas.

Figuras 47 e 48 – Residência montada, com e sem telhas



Fonte: o autor, Smart Sistemas Construtivos.

#### 4.1.3 Quantificação dos materiais

A empresa Smart Sistemas Construtivos, responsável pela execução da obra, encaminhou um quantitativo de todos os materiais adquiridos para construção desta residência. Foram selecionados aqueles (constituintes da fundação, painéis de vedação e painéis de cobertura) relevantes a este estudo. Aqueles relativos a instalações elétricas e hidráulicas, esquadrias, forros e revestimentos decorativos internos de parede/piso (como pintura e cerâmica) não foram considerados por não serem objeto de estudo desta autora. Abaixo, pode-se observar a lista das quantidades adquiridas.

Tabela 4 – Quantidade de material adquirida para a obra de LSF (continua)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE ADQUIRIDA
ESTRUTURA - RADIER E CALÇADA EXTERNA	LASTRO	BRITA (m <sup>3</sup> )	4,00
	FÓRMAS (m <sup>2</sup> )	MADEIRA SERRADA (m <sup>3</sup> )	0,39
	AÇO (kg)	AÇO (kg)	382,05
	CONCRETO USINADO (m <sup>3</sup> )	CIMENTO (kg)	4.942,08
		AREIA (m <sup>3</sup> )	9,36
		BRITA (m <sup>3</sup> )	9,93

Tabela 4 – Quantidade de material adquirida para a obra de LSF (conclusão)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE ADQUIRIDA
PAINÉIS VERTICAIS	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO (kg)	949,93
	FECHAMENTO EXTERNO	PANEL H – SMARTSIDE 4880x1200x11,1mm (chapa)	17,00
	FECHAMENTO INTERNO	GESSO ACARTONADO 1200x2400x12,5mm (chapa)	46,00
		OSB 1200x2400x9,5mm (chapa)	11,00
	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO (m <sup>2</sup> )	150,00
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO (kg)	406,53
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD 1200x2400x11,1mm (chapa)	29,00
	COBERTURA	TELHA SHINGLE (m <sup>2</sup> )	89,90

Fonte: Smart Sistemas Construtivos.

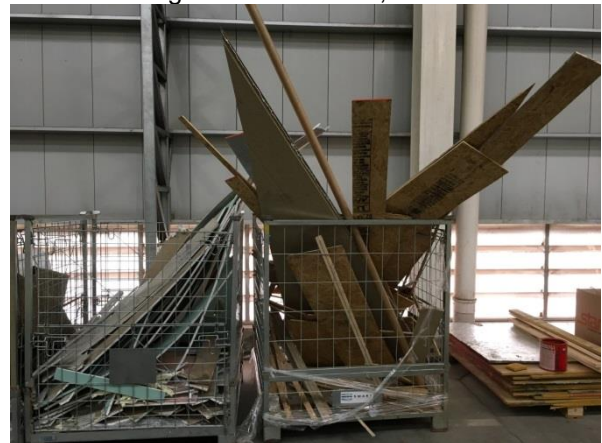
#### 4.1.4 Quantificação dos resíduos

Como já mencionado, os resíduos da fabricação dos perfis já foram computados. Quanto aos entulhos da fundação em radier, foram gerados resíduos de madeira serrada, aço e brita (conforme figura 49). Resíduos de concreto usinado não foram gerados em obra, pois a quantidade adquirida foi exata para o uso necessário, porém, será considerado um valor de perda por resíduo para fabricação deste concreto pela empresa responsável, conforme dados da TCPO (2010). Já na montagem dos painéis em fábrica, o recorte das placas e isolamento para encaixe na modulação gerou certa quantidade de resíduos, demonstrada na figura 50.

Figura 49 – Resíduos de brita gerados na execução da fundação em radier



Figura 50 – Resíduos da montagem dos painéis em fábrica: gesso acartonado, OSB e Panel H



Fonte: o autor

Pode-se perceber que, devido à maior industrialização, o processo já permite a quantificação dos resíduos como rotina de trabalho. Estes RCC gerados, assim como os materiais adquiridos, foram quantificados em diversas unidades de medidas, usualmente utilizadas para fins comerciais. Para haver possibilidade de comparação de valores, os valores foram uniformizados para kg. No apêndice C, encontra-se a planilha completa com os dados e conversões.

Com base no exposto, a tabela 5 foi elaborada. Nela, é apresentado um resumo das quantidades adquiridas, das quantidades aplicadas e dos resíduos gerados de cada material na obra da residência em LSF.

Tabela 5 – Quantidade de materiais (adquirida, aplicada e resíduos) na obra de LSF

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE ADQUIRIDA (kg)	QTDE APLICADA (kg)	QTDE RESÍDUOS (kg)
ESTRUTURA	LASTRO	BRITA	6.600,00	4.125,00	2.475,00
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	236,25	236,25	236,25
	AÇO	AÇO	382,05	378,66	3,39
	CONCRETO USINADO	CIMENTO	4.942,08	4.576,00	366,08
		AREIA	14.182,58	13.132,02	1.050,56
		BRITA	16.387,27	15.173,40	1.213,87
PAREDES	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	949,93	926,82	23,11
	FECHAMENTO EXTERNO	PANEL H - SMARTSIDE 4880x1200x11,1mm	764,69	736,25	28,44
	FECHAMENTO INTERNO	GESSO ACARTONADO 1200x2400x12,5mm	1.258,56	1.235,47	23,09
		OSB 1200x2400x9,5mm	192,61	185,44	7,17
	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO	120,00	96,00	24,00
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	406,53	396,64	9,89
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD 1200x2400x11,1mm	591,60	586,57	5,03
	COBERTURA	TELHA SHINGLE	904,80	858,50	46,30
<b>TOTAL</b>			<b>47.918,96</b>	<b>42.643,03</b>	<b>5.512,18</b>

Fonte: Smart Sistemas Construtivos. Elaboração própria.

## 4.2 RESIDÊNCIA EM ALVENARIA CONVENCIONAL

Na comparação da quantidade de resíduos de construção civil gerados entre uma construção em alvenaria convencional e uma em *light steel framing*, este trabalho fez o acompanhamento direto de uma obra com a segunda técnica, como descrito no tópico anterior. Já para a residência em alvenaria convencional, optou-se pela simulação dos resíduos com base em literatura e produções técnicas sobre o tema. Como esta técnica construtiva é a mais utilizada no Brasil, dados podem ser obtidos com mais facilidade, pois há diversas pesquisas sobre o assunto.



#### 4.2.1 Quantificação dos materiais de construção

Desta forma, utilizou-se o projeto da residência construída em LSF como base, considerando sua execução em alvenaria de tijolos cerâmicos 6 furos. Para isto, foi feita a divisão das partes da edificação a serem estudadas nesta pesquisa (conforme quadro 5 abaixo), seguida pelo dimensionamento delas. Vale ressaltar que a escolha dos materiais e composições de produtos utilizados na edificação em alvenaria não foi feita com base em critérios de desempenho e, sim, com base em escolhas que pudessem refletir a prática de construções de baixa renda (por exemplo, sem execução de laje de forro, com utilização de telhas de fibrocimento, entre outros).

Quadro 5 – Partes da edificação em alvenaria a serem estudadas

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO	
	PRODUTO	MATERIAL
SUPERESTRUTURA - ESTACAS	CONCRETO	CIMENTO
		AREIA
		BRITA
	ARMADURA	AÇO
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO
		AREIA
		BRITA
	ARMADURA	AÇO
	FÓRMAS	MADEIRA SERRADA MADEIRA COMPENSADA
PAREDES DE VEDAÇÃO	ALVENARIA DE TIJOLO	TIJOLO 9x14x19cm
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO
		AREIA
REVESTIMENTOS	CHAPISCO	CIMENTO
		AREIA
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO
		AREIA
		CAL HIDRATADA
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO
		AREIA
		CAL HIDRATADA
	REBOCO	AREIA
CAL HIDRATADA		
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA
	TELHAS	TELHA DE FIBROCIMENTO

Fonte: o autor.

Em relação à estrutura básica, foram lançados e dimensionados estacas, viga baldrame, laje de piso e da caixa d'água, pilares e vigas; para as paredes de vedação, quantificou-se a alvenaria em tijolos cerâmicos e os revestimentos básicos (chapisco, emboço e reboco); e para cobertura foram considerados o madeiramento e as telhas de fibrocimento. Cabe ressaltar que quase todas as etapas necessitaram de um detalhamento

e desmembramento maior, pois são compostas por diversas matérias-primas. Por exemplo, no caso dos pilares, não se tem apenas o concreto, tem-se as fôrmas (compostas de madeira serrada e chapa de compensado), o concreto (cimento, areia e brita) e a armadura (aço).

Na composição das estacas, determinou-se uma profundidade de 3m e diâmetro de 20cm. Com base no lançamento da estrutura, foram locadas 28 delas na implantação do projeto (com distância aproximada de 1,5m entre elas), chegando-se a uma composição de matérias-primas conforme tabela 6, abaixo, baseada na TCPO (2010, p. 80).

Tabela 6 – Composição de broca de concreto armado, controle tipo “C”, brita 1 e 2, fck= 13,5Mpa

TRAÇO ESTACA POR m	20cm <sup>(1)</sup>	COMPRI- MENTO (m)	QUANTI- DADE	COMPRI- MENTO TOTAL (m)	TOTAL
AÇO	0,63	3,00	28	84,00	52,920
CIMENTO (kg)	8,823				741,132
AREIA (m³)	0,02895				2,432
BRITA (m³)	0,0262504				2,205

Fonte: (1) TCPO (2010, p. 80). Elaboração própria.

A estrutura em concreto armado teve seu volume e composição pré-dimensionados, conforme tabelas 7 e 8, abaixo. Na determinação das armaduras e fôrmas, utilizaram-se índices de consumo inferidos por Souza (2003), que discrimina os valores médios de índice de aço e fôrmas em viga baldrame, pilares e vigas pelo seu volume de concreto. No caso das lajes, não estudadas por Souza, utilizou-se o índice de aço e de fôrmas proposto pela TCPO (2010), já as fôrmas da laje de piso foram consideradas inexistentes pela concretagem ser dentro do baldrame. Apenas a calçada externa considerou formas em seu perímetro.

Tabela 7 – Volume de concreto total

DESCRIÇÃO		ÁREA TOTAL / DA SEÇÃO (m²)	ESPESSURA / COMPR. (m)	VOLUME (m³)	QTDE (und OU m)	VOLUME DE CONCRETO TOTAL (m³)
<b>ESTRUTURA</b>	VIGA BALDRAME	0,060	1,00	0,060	59,25	3,555
	LAJE DE PISO INTERNA	49,878	0,20	9,976	1,00	9,976
	LAJE DE PISO EXTERNA	8,273	0,15	1,241	1,00	1,241
	LAJE DE PISO CALÇADA	33,041	0,10	3,304	1,00	3,304
	LAJE DA CAIXA D'ÁGUA	4,200	0,10	0,420	1,00	0,420
	PILAR	0,023	2,64	0,059	12,00	0,713
	VIGA COBERTURA	0,030	1,00	0,030	59,25	1,778
<b>TOTAL</b>						<b>20,986</b>

Fonte: o autor.

Tabela 8 – Quantidade de aço e fôrmas pelo volume de concreto

DESCRIÇÃO		ARMADURA (kg/m <sup>3</sup> CONCRETO)	PESO DE AÇO TOTAL (kg)	FÔRMAS (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> CONCRETO)	ÁREA DE FÔRMAS TOTAL (m <sup>2</sup> )
ESTRUTURA	VIGA BALDRAME	89,46 <sup>(1)</sup>	318,030	14,28 <sup>(1)</sup>	50,765
	LAJE DE PISO INTERNA	91,68 <sup>(2)</sup>	914,554	0	0,000
	LAJE DE PISO EXTERNA	91,68 <sup>(2)</sup>	113,763	0	0,000
	LAJE DE PISO CALÇADA	91,68 <sup>(2)</sup>	302,920	-	3,858
	LAJE DA CAIXA D'ÁGUA	91,68 <sup>(2)</sup>	38,506	9,01 <sup>(2)</sup>	3,784
	PILAR	172,5 <sup>(1)</sup>	122,958	23,14 <sup>(1)</sup>	16,494
	VIGA COBERTURA	73,35 <sup>(1)</sup>	130,380	16,65 <sup>(1)</sup>	29,595
<b>TOTAL</b>			<b>1.941,111</b>		<b>104,497</b>

Fontes: (1) Souza (2003); (2) TCPO (2010, p. 19). Elaboração própria.

No caso do concreto presente nas estruturas acima descritas, foi destrinchada sua composição com base em concreto estrutural virado em obra (com controle "A" e brita 1) na resistência de 21MPa constante na TCPO (2010, p. 152), chegando-se nas quantidades totais de cimento, areia e brita utilizados, conforme tabela 9.

Tabela 9 – Traço do concreto 21MPa e quantidades totais de material

TRAÇO CONCRETO POR m <sup>3</sup>	21MPa <sup>(1)</sup>	VOLUME DE CONCRETO TOTAL (m <sup>3</sup> )	TOTAL
CIMENTO (kg)	331	20,986	6946,292
AREIA (m <sup>3</sup> )	0,857		17,985
BRITA (m <sup>3</sup> )	0,836		17,544

Fonte: (1) TCPO (2010, p. 152). Elaboração própria.

As fôrmas consideradas são de chapa compensada, e = 12mm, para pilares/vigas/lajes, incluso contraventamentos/escoramentos com pontaletes 7,5x7,5cm, conforme composição da TCPO (2010, p. 127) para apenas um aproveitamento. As quantidades de madeira fornecidas (em metro e por tipo) para 1m<sup>2</sup> de fôrma foram convertidas para o volume de madeira serrada e volume de madeira compensada, conforme tabela 10.

Tabela 10 – Volume de madeira para fôrmas

DESCRIÇÃO		ÁREA TOTAL / DA SEÇÃO (m <sup>2</sup> )	VOLUME TOTAL DE 1m (m <sup>3</sup> )	QTDE P/ 1m <sup>2</sup> FÔRMA (m) <sup>(1)</sup>	VOLUME P/ 1m <sup>2</sup> FÔRMA (m <sup>3</sup> )	ÁREA DE FÔRMAS TOTAL (m <sup>2</sup> )	VOLUME TOTAL (m <sup>3</sup> )
MADEIRA SERRADA	PONTALETE 3x3"	0,005625	0,005625	6	0,034	104,497	5,611
	SARRAFO 1x3"	0,001875	0,001875	8,25	0,015		
	TÁBUA 1x8"	0,005	0,005	0,52	0,003		
	TÁBUA 1x6"	0,00375	0,00375	0,5	0,002		
MADEIRA COMPENSADA	COMPENSA- DO 12mm	1	0,012	1,25	0,015		0,015

Fonte: (1) TCPO (2010, p. 127). Elaboração própria.

Na quantificação da alvenaria de vedação, conforme projeto, obtém-se um total de 119,44 m<sup>2</sup> de paredes de vedação e 238,88 m<sup>2</sup> de revestimentos internos e externos (chapisco, emboço e reboco). Utilizando-se tijolos cerâmicos 6 furos, com 9x14x19cm, e juntas de 1cm entre eles, têm-se 33,33 tijolos e 0,01m<sup>3</sup> de argamassa por m<sup>2</sup> de alvenaria. Para esta composição, a tabela 11 demonstra as quantidades de matérias-primas necessárias, para uma argamassa de assentamento traço 1:4.

Tabela 11 – Composição paredes de vedação

COMPOSIÇÃO ALVENARIA	QTDE	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )	TOTAL	QTDE FINAL
TIJOLO 9x19x14cm (peça)	33,33	119,44	<b>3.981,33</b>	<b>3.981,33</b>
ARGAMASSA 1:4 (m <sup>3</sup> )	0,01		<b>1,22</b>	
CIMENTO (kg)	365,00 <sup>(1)</sup>			<b>444,68</b>
AREIA (m <sup>3</sup> )	0,935 <sup>(1)</sup>			<b>1,14</b>

Fonte: (1) TCPO (2010, p. 189). Elaboração própria.

Já para as argamassas de revestimentos, foram utilizadas as composições presentes na TCPO (2010), com os traços especificados na tabela abaixo.

Tabela 12 – Traço de argamassas de revestimento

TRAÇO ARGAMASSAS POR m <sup>2</sup>	CHAPISCO e=5mm 1:3 <sup>(1)</sup>	EMBOÇO EXTERNO e=20mm 1:2:6 <sup>(2)</sup>	EMBOÇO INTERNO e=20mm 1:2:8 <sup>(3)</sup>	REBOCO e=5mm 1:3 <sup>(4)</sup>
CIMENTO (kg)	2,43	6,075	3,64	0,00
AREIA (m <sup>3</sup> )	0,0061	0,0305	0,0244	0,004675
CAL HIDRATADA (kg)	0,00	6,075	3,64	1,215

Fonte: TCPO (2010, p. 321<sup>(3)</sup>, 323<sup>(2)</sup>, 331<sup>(4)</sup> e 337<sup>(1)</sup>). Elaboração própria.

Após definição dos traços, as quantidades necessárias de material, com base na metragem quadrada a ser revestida, foram calculadas. A tabela 13 mostra os valores encontrados.

Tabela 13 – Composição das argamassas de revestimento

DESCRIÇÃO	CHAPISCO e=5mm 1:3	EMBOÇO EXTERNO e=20mm 1:2:6	EMBOÇO INTERNO e=20mm 1:2:8	REBOCO e=5mm 1:3	TOTAL
ÁREA (m <sup>2</sup> )	238,88	119,44	119,44	238,88	
CIMENTO (kg)	580,4784	725,598	434,76	0,00	<b>1.740,84</b>
AREIA (m <sup>3</sup> )	1,457168	3,64292	2,914336	1,116764	<b>9,13</b>
CAL HIDRATADA (kg)	0,00	725,598	434,7616	290,2392	<b>1.450,60</b>

Fonte: TCPO (2010). Elaboração própria.

Em relação à cobertura, a quantidade de madeiramento e telhas necessárias também foi extraída da TCPO (2010). Assim, para vãos menores que 10m (como é o caso da residência), são necessários 0,03m<sup>3</sup> de madeira serrada/m<sup>2</sup> de cobertura e 1,15m<sup>2</sup> de telhas de fibrocimento onduladas 6mm. Tendo estes índices como base, além da metragem de cobertura a ser executada, chegaram-se nas quantidades teóricas necessárias destes materiais, conforme a seguir.

Tabela 14 – Quantidade de materiais necessária para cobertura

DESCRIÇÃO	UND	QTDE /m <sup>2</sup>	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )	TOTAL
MADEIRA (TIPO PEROBA)	m <sup>3</sup>	0,030	81,4	2,442
TELHA FIBROCIMENTO ONDULADA 6MM	m <sup>2</sup>	1,15		93,61

Fonte: TCPO (2010). Elaboração própria.

#### 4.2.2 Quantificação dos resíduos

Com base em todos os quantitativos demonstrados anteriormente, foi elaborada uma tabela de perdas por resíduos de materiais por parte da edificação (estrutura, paredes e cobertura), contendo as quantidades teóricas necessárias e as perdas ocorridas que acabam se tornando resíduos. Os valores iniciais, obtidos em diversas unidades de medida, foram padronizados para quilogramas utilizando-se os pesos específicos dos materiais constantes na tese de Tavares (2006) e nos catálogos técnicos de fornecedores. As tabelas completas com as quantidades de materiais de todas as partes da edificação com suas respectivas conversões de unidades se encontram nos apêndices D e E. Já as porcentagens de perda por entulho utilizadas foram extraídas de pesquisas e fontes de dados conforme explicitado na seção 3, nas estratégias de pesquisa.

Vale ressaltar que, quando se fala em perda de material, é a perda de matéria-prima (por entulho) que ocorre até a fase de mistura para formação de novo material, por exemplo, perda de areia até que ela seja misturada para formação da argamassa. Já a perda de produto (também por entulho), é aquela que ocorre quando do manuseio e aplicação do produto final, como no caso da argamassa de assentamento, que possui uma perda de 24%, pois há resíduo de massa no chão, endurecimento, má aplicação, etc. As duas quantidades parciais de perda por entulho foram somadas, chegando-se à quantidade final. No caso do concreto, no início, ainda é feita a multiplicação por um fator de consumo, visto que a TCPO (2010) afirma que para execução de 1 m<sup>3</sup> de estrutura de concreto, há um consumo de 1,08 m<sup>3</sup> deste material.

A quantidade final de perdas por resíduo é então somada à quantidade inicial necessária de materiais, chegando-se na quantidade total de materiais utilizada (aplicada na

edificação e/ou em forma de resíduo). A seguir, encontra-se a tabela dos resíduos para a edificação em alvenaria.

Tabela 15 – Quantidade de materiais (teórica necessária, resíduos e total) na obra de alvenaria

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE TEÓRICA NECESSÁRIA (kg)	QTDE PERDAS POR RESÍDUO (kg)	QTDE TOTAL (kg)	
SUPERES TRUTURA - ESTACAS	CONCRETO	CIMENTO	800,423	176,093	976,516	
		AREIA	3.978,911	815,677	4.794,588	
		BRITA	3.929,370	569,759	4.499,129	
	ARMADURA	AÇO	52,920	5,557	58,477	
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO	7.501,995	1.650,439	9.152,434	
		AREIA	29.426,745	6.032,483	35.459,227	
		BRITA	31.263,600	4.533,222	35.796,822	
	ARMADURA	AÇO	1.941,111	203,817	2.144,927	
		FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	3.366,507	3.871,483	3.871,483
			COMPENSADO	862,102	991,417	991,417
VEDAÇÃO	ALVENARIA	TIJOLO	8.758,933	1.313,840	10.072,773	
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	444,675	180,093	624,769	
		AREIA	1.725,735	733,438	2.459,173	
REVESTIMENTOS	CHAPISCO	CIMENTO	580,478	190,397	770,875	
		AREIA	2.207,610	872,006	3.079,615	
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	725,598	721,970	1.447,568	
		AREIA	5.519,024	5.988,141	11.507,165	
		CAL HIDRATADA	725,598	696,574	1.422,172	
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	434,762	84,755	519,516	
		AREIA	4.415,219	4.790,513	9.205,732	
		CAL HIDRATADA	434,762	406,502	841,264	
	REBOCO	AREIA	1.691,897	532,948	2.224,845	
		CAL HIDRATADA	290,239	89,974	380,213	
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	1.465,200	219,780	1.684,980	
	TELHAS	FIBROCIMENTO	1.684,980	168,498	1.853,478	
<b>TOTAL</b>			<b>114.228,393</b>	<b>35.839,373</b>	<b>145.839,157</b>	

Fontes: TCPO (2010); Agopyan et al (1998) e Tavares (2006). Elaboração própria.

## 5. IMPACTOS AMBIENTAIS

A segunda etapa da pesquisa, como já mencionado, é a mensuração dos impactos ambientais associados aos resíduos gerados em obra, sendo eles: a energia embutida e as emissões de CO<sub>2</sub>. Para análise da EE e CO<sub>2</sub> emitido na fase pré-operacional do ciclo de vida de uma edificação, é feito um cruzamento dos dados das quantidades de resíduos dos principais materiais utilizados nas edificações (obtidos na seção anterior) com os índices a eles correspondentes.

Os valores de energia embutida em cada material ( $FE_i$  em MJ/kg), assim como as emissões de carbono a ele associadas ( $FCO_{2_i}$  em kg CO<sub>2</sub>/kg de material), foram retirados de bibliografia nacional e internacional, dando preferência a fontes nacionais para maior aproximação com a realidade brasileira e para os estudos mais recentes e atualizados. As principais fontes de dados foram: Tavares e Bragança (2016), Monich (2012) e o Inventário de Carbono e Energia da Universidade de Bath (ICE v2.0, 2011).

### 5.1 ENERGIA EMBUTIDA

Em Tavares (2006), o autor utiliza dados de energia embutida nos materiais de construção no Brasil obtidos com base em pesquisas de outros autores e, também, revisa valores dos materiais mais significativos em termos de quantidade e conteúdo energético (como cimento, cerâmica vermelha, aço e cerâmica de revestimento). Desta forma, um banco de dados com valores de energia embutida dos materiais ( $FE_i$ ) é estabelecido, sendo apresentados em MJ/kg e MJ/m<sup>3</sup>. Já para realização de sua pesquisa, Tavares e Bragança (2016) atualizam este banco de dados, apresentando apenas valores em MJ/kg.

Como o LSF ainda não é uma técnica construtiva muito difundida no Brasil, alguns dos materiais de construção utilizados neste tipo de edificação não constam nos trabalhos citados acima. Desta forma, utilizaram-se dados obtidos no ICE – Inventory of Carbon and Energy - v2.0 (2011), que é um inventário criado pela Universidade de Bath, na Inglaterra, com dados de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> advindos da fabricação de materiais de construção. Neste documento, a energia embutida é composta, mais comumente, pelo total de energia primária consumida no ciclo de vida de um material, incluindo extração, fabricação e transporte. Este tipo de recorte se chama *Cradle-to-Gate* (do berço ao portão), e, apesar de não poder ser considerado perfeito, já é suficiente para estimativa de coeficientes de EE.

Na obtenção dos índices ainda faltantes, utilizou-se a pesquisa de Monich (2012), que fez uma avaliação ambiental de uma habitação pré-fabricada no sistema *wood frame*, o

qual é composto por fechamentos semelhantes ao LSF. Esta autora adaptou dados encontrados no estudo do Athena Institute<sup>9</sup> (2008), obtendo fatores de energia embutida para chapas de OSB e chapas de Smartside (que é um fechamento externo para edificações compostas por painéis).

Os índices compilados encontram-se organizados por material de construção no apêndice F, havendo indicação de suas respectivas fontes. Fazendo a aplicação destes índices nas fórmulas de energia embutida na etapa pré-operacional, chegou-se na tabela 16 para o LSF, separada por parte da edificação.

Tabela 16 – Energia embutida nos resíduos da obra de LSF, por parte da edificação

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE RESÍDUOS (kg)	EE NO MATERIAL (MJ/kg) <sup>1</sup>	EE (MJ)		
ESTRUTURA	LASTRO	BRITA	2.475,00	1,50	3.712,50	8.297,16	
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	236,25	2,00	472,50		
	AÇO	AÇO	3,39	35,00	118,71		
	CONCRETO USINADO	CIMENTO		366,08	4,50		1647,36
		AREIA		1.050,56	0,50		525,28
		BRITA		1.213,87	1,50		1820,81
PAREDES	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	23,11	35,00	808,85	2.044,04	
	FECH. EXTERNO	PANEL SMARTSIDE	28,44	13,11	372,85		
	FECH. INTERNO	GESSO ACARTON.		23,09	6,75		155,86
		OSB		7,17	4,81		34,49
	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO	24,00	28,00	672,00		
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	9,89	35,00	346,15	893,49	
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD	5,03	4,81	24,19		
	COBERTURA	TELHA SHINGLE	46,30	11,30	523,15		
<b>TOTAL</b>			<b>5.512,18</b>		<b>11.234,70</b>		

Fonte: o autor.

<sup>1</sup> Fontes dos dados de EE: Tavares e Bragança (2016); ICE v2.0 (2011); Monich (2012).

Ela demonstra que, para uma quantidade de resíduos de 5,52t, o total de energia embutida é de 11,24 GJ. Esta energia está dividida em 8,30 GJ na estrutura, 2,04 GJ nas paredes e 0,89 GJ na cobertura. São 2,04MJ de energia embutida por quilo de resíduos gerados.

Já para a edificação em alvenaria, obteve-se a tabela 17. Nela, tem-se que as 35,84t de resíduos geradas possuem uma energia embutida de 65,66 GJ, sendo 42,30 GJ

<sup>9</sup> ATHENA INSTITUTE, Athena Sustainable Materials Institute. **A cradle-to-gate life cycle assessment of Canadian oriented strand board.** Ottawa: Athena Sustainable Materials Institute, 2008.



na estrutura, 21,90 GJ nas paredes de vedação e 1,45 GJ na cobertura. Isso totaliza uma EE de 1,83 MJ/kg de resíduos.

Tabela 17 – Energia embutida nos resíduos da obra de alvenaria, por parte da edificação

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE RESÍDUOS (kg)	EE NO MATERIAL (MJ/kg) <sup>1</sup>	EE (MJ)	
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO	176,093	4,50	792,42	42.300,31
		AREIA	815,677	0,50	407,84	
		BRITA	569,759	1,50	854,64	
	ARMADURA	AÇO	5,557	35,00	194,48	
	CONCRETO	CIMENTO	1.650,439	4,50	7.426,97	
		AREIA	6.032,483	0,50	3.016,24	
		BRITA	4.533,222	1,50	6.799,83	
	ARMADURA	AÇO	203,817	35,00	7.133,58	
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	3.871,483	2,00	7.742,97	
		COMPENSADO	991,417	8,00	7.931,33	
PAREDES (ALVENARIA E REVESTIMENTOS)	ALVENARIA	TIJOLO	1.313,840	5,00	6.569,20	21.904,34
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	180,093	4,50	810,42	
		AREIA	733,438	0,50	366,72	
	CHAPISCO	CIMENTO	190,397	4,50	856,79	
		AREIA	872,006	0,50	436,00	
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	721,970	4,50	3.248,87	
		AREIA	5.988,141	0,50	2.994,07	
		CAL HIDRATADA	696,574	3,00	2.089,72	
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	84,755	4,50	381,40	
		AREIA	4.790,513	0,50	2.395,26	
		CAL HIDRATADA	406,502	3,00	1.219,51	
	REBOCO	AREIA	532,948	0,50	266,47	
		CAL HIDRATADA	89,974	3,00	269,92	
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	219,780	2,00	439,56	1.450,55
	TELHAS	FIBROCIMENTO	168,498	6,00	1.010,99	
<b>TOTAL</b>			<b>35.839,373</b>		<b>65.655,196</b>	

Fonte: o autor.

<sup>1</sup> Fontes dos dados de EE: Tavares e Bragança (2016); ICE v2.0 (2011); Monich (2012).

Para sintetizar os valores obtidos, foi feito o cálculo da energia embutida por materiais de construção. A tabela 18 mostra, para as duas técnicas construtivas estudadas, a quantidade de resíduos de cada material de construção associada a sua energia embutida total.

Tabela 18 – Energia embutida nos resíduos das obras, por material de construção

TÉCNICA CONSTRUTIVA		LSF		ALVENARIA	
MATERIAL	EE NO MATERIAL (MJ/kg)	RESÍDUOS (kg)	EE (MJ)	RESÍDUOS (kg)	EE (MJ)
AÇO	35,00 <sup>1</sup>	3,392	118,71	209,373	7.328,06
AREIA	0,50 <sup>1</sup>	1.050,562	525,28	19.765,204	9.882,60
BRITA	1,50 <sup>1</sup>	3.688,872	5.533,31	5.102,981	7.654,47
CAL HIDRATADA	3,00 <sup>1</sup>	0,000	0,00	1.193,050	3.579,15
CIMENTO	4,50 <sup>1</sup>	366,080	1.647,36	3.003,747	13.516,86
FIBROCIMENTO	6,00 <sup>1</sup>	0,000	0,00	168,498	1.010,99
GESSO ACARTONADO	6,75 <sup>2</sup>	23,090	155,86	0,000	0,00
LÃ DE VIDRO	28,00 <sup>2</sup>	24,000	672,00	0,000	0,00
MADEIRA COMPENSADA	8,00 <sup>1</sup>	0,000	0,00	991,417	7.931,33
MADEIRA SERRADA	2,00 <sup>1</sup>	236,250	472,50	4.091,263	8.182,53
OSB	4,81 <sup>3</sup>	12,199	58,68	0,000	0,00
PANEL SMARTSIDE	13,11 <sup>3</sup>	28,440	372,85	0,000	0,00
PERFIL DE AÇO	35,00 <sup>1</sup>	33,000	1.155,00	0,000	0,00
TELHA SHINGLE	11,30 <sup>2</sup>	46,297	523,15	0,000	0,00
TIJOLO CERÂMICO	5,00 <sup>1</sup>	0,000	0,00	1.313,840	6.569,20
<b>TOTAL</b>		<b>5.512,18</b>	<b>11.234,70</b>	<b>35.839,37</b>	<b>65.655,20</b>

Fontes: (1) Tavares e Bragança (2016); (2) ICE v2.0 (2011); Monich (2012). Elaboração própria.

## 5.2 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Os índices de CO<sub>2</sub> nos materiais de construção utilizados neste trabalho foram obtidos nas mesmas fontes de dados da energia embutida, havendo relação direta entre eles. Para determinação do CO<sub>2</sub> embutido nos materiais, Tavares e Bragança (2016) inicialmente fazem a discriminação dos insumos energéticos (por fontes) utilizados na fabricação dos principais materiais utilizados no Brasil. A partir daí, os autores utilizam os índices de emissão de carbono por fonte definidos no protocolo do IPCC – Painel Intergovernamental em Mudança Climática (2006), que informam as emissões para uso como combustíveis, ou seja, na conversão em energia. Após aplicação de um fator de conversão, os autores chegam nos índices de CO<sub>2</sub> (em kg/GJ de energia utilizada por cada fonte). No caso da eletricidade, Tavares e Bragança adaptaram os valores com base na matriz termoelétrica brasileira.

Além do carbono emitido pela queima de combustíveis, alguns materiais possuem parcelas de emissões significativas associadas às reações químicas ocorridas em seu processo produtivo. Tavares e Bragança (2016) compilam estas parcelas e as somam no cálculo das emissões totais de dióxido de carbono na fase pré-operacional. Aplicando sua metodologia, os autores obtêm índices de CO<sub>2</sub> embutido em kg CO<sub>2</sub>/kg de material.

Da mesma forma que para a EE, os índices FCO<sub>2</sub> compilados no apêndice F foram aplicados às fórmulas das emissões de dióxido de carbono na etapa pré-operacional, chegando-se na tabela 19 para o LSF, por parte da edificação.

Tabela 19 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelos resíduos da obra de LSF, por parte da edificação

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE RESÍDUOS (kg)	kgCO <sub>2</sub> / kg <sup>1</sup>	kg CO <sub>2</sub>	
ESTRUTURA	LASTRO	BRITA	2.475,00	0,10	247,50	724,85
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	236,25	0,11	25,99	
	AÇO	AÇO	3,39	2,73	9,26	
	CONCRETO USINADO	CIMENTO	366,08	0,79	289,20	
		AREIA	1.050,56	0,03	31,52	
	BRITA	1.213,87	0,10	121,39		
PAREDES	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	23,11	2,73	63,09	127,83
	FECH. EXTERNO	PANEL SMARTSIDE	28,44	0,75	21,33	
	FECH.INTERNO	GESSO ACARTON.	23,09	0,39	9,01	
		OSB	7,17	0,28	2,01	
	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO	24,00	1,35	32,40	
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	9,89	2,73	27,00	42,30
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD	5,03	0,28	1,41	
	COBERTURA	TELHA SHINGLE	46,30	0,30	13,89	
<b>TOTAL</b>			<b>5.512,18</b>		<b>894,98</b>	

Fonte: o autor.

<sup>1</sup> Fontes dos dados de CO<sub>2</sub>: Tavares e Bragança (2016); ICE v2.0 (2011); Monich (2012).

Ela demonstra que, para as 5,52t de resíduos, o total de CO<sub>2</sub> é de 894,98kg. Esta quantidade está dividida em 734,85kg na estrutura, 127,83kg nas vedações e 42,30kg na cobertura. São 0,16kg de CO<sub>2</sub> por quilo de resíduos gerados. Já para a edificação em alvenaria, obteve-se a tabela 20.

Tabela 20 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelos resíduos da obra de alvenaria, por parte da edificação (continua)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE RESÍDUOS (kg)	kgCO <sub>2</sub> / kg <sup>1</sup>	kg CO <sub>2</sub>	
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO	176,093	0,79	139,11	3.562,64
		AREIA	815,677	0,03	24,47	
		BRITA	569,759	0,10	56,98	
	ARMADURA	AÇO	5,557	2,73	15,17	
	CONCRETO	CIMENTO	1.650,439	0,79	1.303,85	
		AREIA	6.032,483	0,03	180,97	
		BRITA	4.533,222	0,10	453,32	
	ARMADURA	AÇO	203,817	2,73	556,42	
	FÔRMAS	MAD. SERRADA	3.871,483	0,11	425,86	
		COMPENSADO	991,417	0,41	406,48	

Tabela 20 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelos resíduos da obra de alvenaria, por parte da edificação (conclusão)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE RESÍDUOS (kg)	kgCO <sub>2</sub> / kg <sup>1</sup>	kg CO <sub>2</sub>	
PAREDES (ALVENARIA E REVESTIMENTOS)	ALVENARIA	TIJOLO	1.313,840	0,17	223,35	2.578,82
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	180,093	0,79	142,27	
		AREIA	733,438	0,03	22,00	
	CHAPISCO	CIMENTO	190,397	0,79	150,41	
		AREIA	872,006	0,03	26,16	
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	721,970	0,79	570,36	
		AREIA	5.988,141	0,03	179,64	
		CAL HIDRATADA	696,574	0,87	606,02	
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	84,755	0,79	66,96	
		AREIA	4.790,513	0,03	143,72	
		CAL HIDRATADA	406,502	0,87	353,66	
REBOCO	AREIA	532,948	0,03	15,99		
	CAL HIDRATADA	89,974	0,87	78,28		
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MAD.SERRADA	219,780	0,11	24,18	145,49
	TELHAS	FIBROCIMENTO	168,498	0,72	121,32	
<b>TOTAL</b>			<b>35.839,373</b>		<b>6.286,948</b>	

Fonte: o autor.

<sup>1</sup> Fontes dos dados de CO<sub>2</sub>: Tavares e Bragança (2016); ICE v2.0 (2011); Monich (2012).

Nela, tem-se que as 35,84t de resíduos geradas possuem 6.286,95 kg de emissões de CO<sub>2</sub> associadas (3.562,64kg na estrutura, 2.578,82kg nas vedações e 145,49kg na cobertura). Isso totaliza 0,18kg de CO<sub>2</sub> por kg de resíduo. Como foi feito para a energia embutida, objetivando analisar os resultados sob outra perspectiva, foram demonstrados os valores de emissões de CO<sub>2</sub> por materiais de construção, conforme tabela 21 abaixo.

Tabela 21 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelos resíduos das obras

TÉCNICA CONSTRUTIVA		LSF		ALVENARIA	
MATERIAL	kgCO <sub>2</sub> / kg DE MATERIAL	RESÍDUOS OBRA (kg)	kgCO <sub>2</sub>	RESÍDUOS OBRA (kg)	kgCO <sub>2</sub>
AÇO	2,73 <sup>1</sup>	3,392	9,26	209,373	571,59
AREIA	0,03 <sup>1</sup>	1.050,562	31,52	19.765,204	592,96
BRITA	0,10 <sup>1</sup>	3.688,872	368,89	5.102,981	510,30
CAL HIDRATADA	0,87 <sup>1</sup>	0,000	0,00	1.193,050	1.037,95
CIMENTO	0,79 <sup>1</sup>	366,080	289,20	3.003,747	2.372,96
FIBROCIMENTO	0,72 <sup>1</sup>	0,000	0,00	168,498	121,32
GESSO ACARTONADO	0,39 <sup>2</sup>	23,090	9,01	0,000	0,00
LÃ DE VIDRO	1,35 <sup>2</sup>	24,000	32,40	0,000	0,00
MADEIRA COMPENSADA	0,41 <sup>1</sup>	0,000	0,00	991,417	406,48
MADEIRA SERRADA	0,11 <sup>1</sup>	236,250	25,99	4.091,263	450,04
OSB	0,28 <sup>3</sup>	12,199	3,42	0,000	0,00
PANEL SMARTSIDE	0,75 <sup>3</sup>	28,440	21,33	0,000	0,00
PERFIL DE AÇO	2,73 <sup>1</sup>	33,000	90,09	0,000	0,00
TELHA SHINGLE	0,30 <sup>2</sup>	46,297	13,89	0,000	0,00
TIJOLO CERÂMICO	0,17 <sup>1</sup>	0,000	0,00	1.313,840	223,35
<b>TOTAL</b>		<b>5.512,18</b>	<b>894,98</b>	<b>35.839,37</b>	<b>6.286,95</b>

Fontes: (1) Tavares e Bragança (2016); (2) ICE v2.0 (2011); Monich (2012). Elaboração própria.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados obtidos nas seções anteriores, os resultados serão apresentados e discutidos nesta seção, sendo feitas comparações entre as técnicas construtivas estudadas.

### 6.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS DE OBRA

Para a edificação em LSF, a partir da tabela com as quantidades de matérias-primas (adquiridas, aplicadas e resíduos) separadas por partes da edificação, foram somadas as massas de todos os materiais constituintes de cada parte (estrutura, paredes e cobertura). Desta forma, obteve-se a tabela 22 abaixo. A partir dela, verifica-se que, sobre uma quantidade de materiais adquiridos no montante de 47,92t, os resíduos somam 5,51t, enquanto que o total de materiais aplicados é de 42,64t. Desta forma, chegou-se a um índice de perdas por resíduos global (dos componentes estudados) da obra de 12,93%.

Tabela 22 – Resíduos por parte da edificação de LSF

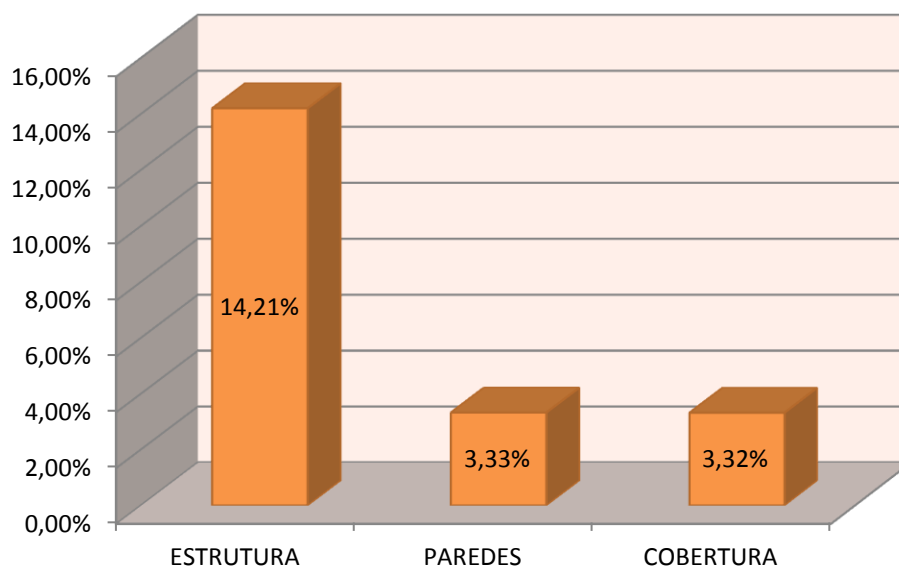
APLI-CAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE ADQUIRIDA (kg)	QTDE APLICADA (kg)	QTDE RESÍDUO (kg)	PERDAS POR RCC (%)	% DO TOTAL
ESTRUTURA	LASTRO	BRITA	42.730,24	37.621,33	5.345,16	14,21%	96,97%
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA					
	AÇO	AÇO					
	CONCRETO USINADO	CIMENTO					
		AREIA					
BRITA							
PAREDES	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	3.285,80	3.179,99	105,81	3,33%	1,92%
	FECHAMENTO EXTERNO	PANEL H SMARTSIDE					
	FECHAMENTO INTERNO	GESSO ACARTONADO					
		OSB					
ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO						
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO	1.902,93	1.841,71	61,22	3,32%	1,11%
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD					
	COBERTURA	TELHA SHINGLE					
<b>TOTAL</b>			<b>47.918,96</b>	<b>42.643,03</b>	<b>5.512,18</b>	<b>12,93%</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: o autor.

Conforme gráfico 1 e analisando-se os resíduos por parte da edificação, tem-se que, nos materiais aplicados na estrutura da residência, houve um índice de perda por RCC de 14,21%. Já nos sistemas de paredes e cobertura, os índices foram significativamente

menores, com 3,33% e 3,32% respectivamente. Isto pode ser explicado pelo fato de estas duas últimas partes serem compostas de itens industrializados e pré-fabricados, que demandam mais atividades de montagem e menos atividades de conversão de insumos. Desta forma, percebe-se que os conceitos de estudados na revisão bibliográfica (sobre as vantagens da pré-fabricação e industrialização) são válidos, havendo uma redução significativa nos índices de perda por RCC nestes sistemas.

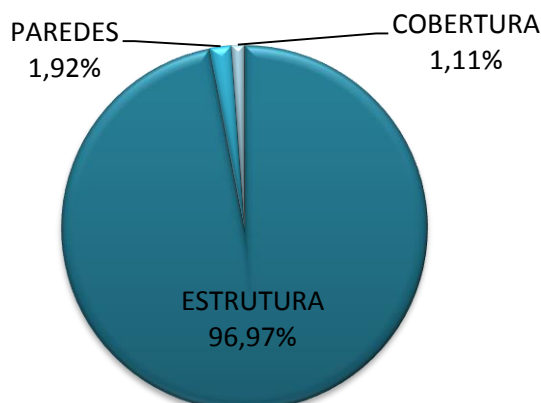
Gráfico 1 – Perdas por resíduos por parte da edificação de LSF



Fonte: o autor.

Se os resíduos forem analisados com base em sua massa absoluta (gráfico 2), percebe-se que a parcela relativa às fundações soma 96,97% do total, restando 1,92% para as paredes e 1,11% na cobertura. Da mesma forma, o total de materiais aplicados na fundação também é muito mais pesado que os materiais das outras partes. Isto pode ser explicado pelo LSF (*light steel framing*) ser um sistema de construção leve, como o próprio nome já diz. Desta maneira, os painéis de vedação e cobertura são menos significativos em termos de peso.

Gráfico 2 – Massa de resíduos por parte da edificação de LSF



Fonte: o autor.

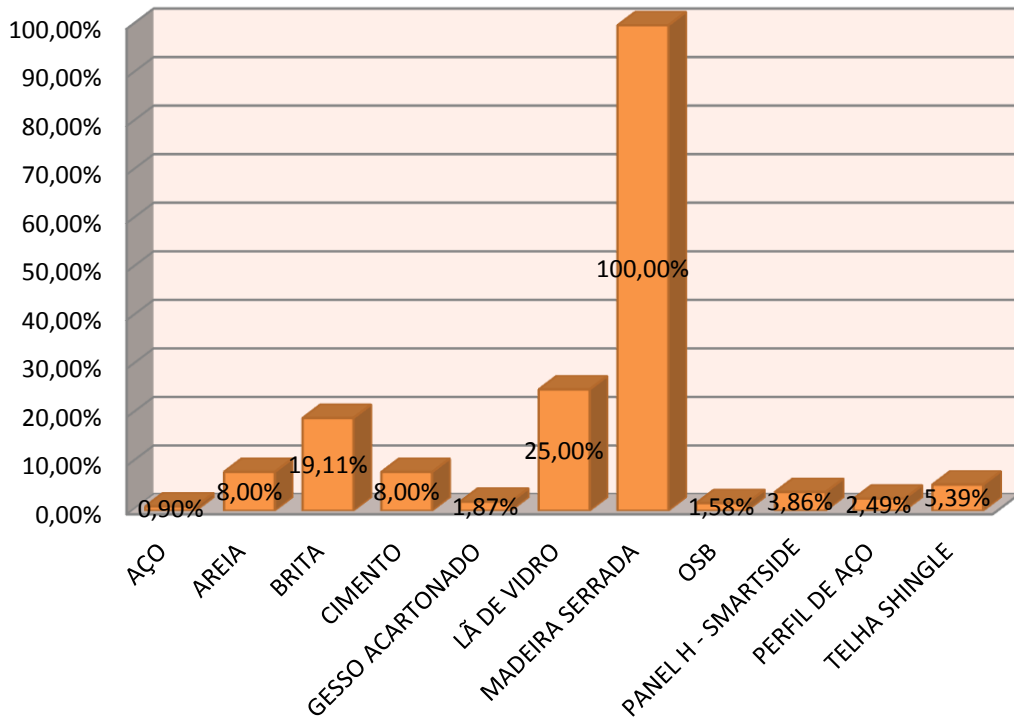
Ainda para o LSF, quando da classificação dos resíduos gerados por materiais de construção, obteve-se a tabela 23 e o gráfico 3. Neles, pode-se perceber que as perdas por RCC dos materiais de construção são relativamente baixas, estando à maioria abaixo dos 10%. Os únicos materiais que ficaram com índices maiores são a brita, a lã de vidro e a madeira serrada. As maiores perdas por entulho de brita e lã de vidro podem ser explicadas pela compra ter que ser feita em quantidades comerciais (m<sup>3</sup> e/ou rolos inteiros). Assim, por exemplo, apesar de serem necessários apenas 120m<sup>2</sup> de lã de vidro, o material teve que ser comprado em rolos inteiros, mesmo que possuindo metragem superior a isso (150m<sup>2</sup> somando-se todos os rolos comprados). Já a perda de 100% da madeira se deve ao fato de ela ter sido comprada para compor as fôrmas desta obra unicamente, não sendo reaproveitada em outras construções. Toda a madeira utilizada foi descartada como resíduo após o final da obra.

Tabela 23 – Quantidade de resíduos gerada, por material de construção - LSF

MATERIAL	QTDE ADQUIRIDA (kg)	QTDE APLICADA (kg)	QTDE RESÍDUO (kg)	PERDAS POR RCC (%)
AÇO	382,052	378,660	3,392	0,90%
AREIA	14.182,582	13.132,020	1.050,562	8,00%
BRITA	22.987,272	19.298,400	3.688,872	19,11%
CIMENTO	4.942,080	4.576,000	366,080	8,00%
GESSO ACARTONADO	1.258,560	1.235,470	23,090	1,87%
LÃ DE VIDRO	120,000	96,000	24,000	25,00%
MADEIRA SERRADA	236,250	236,250	236,250	100,00%
OSB	784,214	772,015	12,199	1,58%
PANEL H - SMARTSIDE	764,694	736,254	28,440	3,86%
PERFIL DE AÇO	1.356,460	1.323,460	33,000	2,49%
TELHA SHINGLE	904,800	858,503	46,297	5,39%
<b>TOTAL</b>	<b>47.918,964</b>	<b>42.643,033</b>	<b>5.512,181</b>	<b>12,93%</b>

Fonte: o autor.

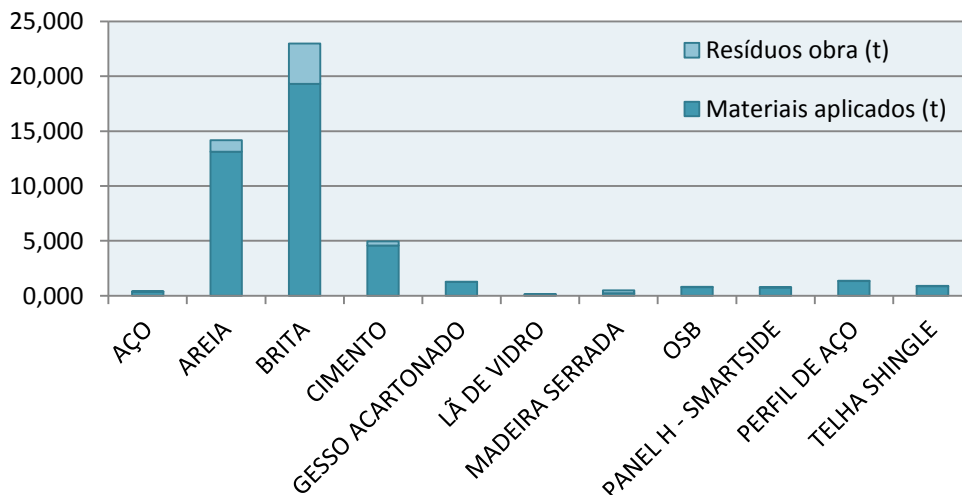
Gráfico 3 – Percentual de resíduos gerado, por material de construção - LSF



Fonte: o autor.

Uma consideração a ser feita é a participação expressiva da areia e da brita no peso da obra, tanto nos materiais adquiridos quanto nos resíduos. Isso pode ser explicado pela conversão de unidades existente. Estes materiais são adquiridos por metro cúbico e, quando convertidos (através de seu peso específico) para quilogramas, passam a representar uma massa bastante elevada. O gráfico 4 exemplifica o exposto. Neste caso, a soma dos dois materiais representa 77,57% do peso total de materiais adquiridos (37,17t) e 86,03% dos RCC gerados (4,74t).

Gráfico 4 – LSF: materiais aplicados X resíduos da obra



Fonte: o autor.



Para a obra da residência em estrutura de concreto armado e vedação em alvenaria de tijolos cerâmicos convencional, também foram somadas as massas de todos os materiais constituintes de cada parte da edificação a partir da planilha com as quantidades de matérias-primas (teoricamente necessárias, perdas por resíduos e quantidade total) obtendo-se a tabela 24. Nela, percebe-se que a quantidade de perdas por RCC de obra soma 35,84t, enquanto que a quantidade teórica necessária de materiais seria de 114,23t, chegando-se a um índice de perdas por resíduos na obra de 31,38%.

Tabela 24 – Perdas por parte da edificação de alvenaria

APLI-CAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE TEÓRICA NECESSÁRIA (kg)	QTDE PERDAS POR RCC (kg)	QTDE TOTAL (kg)	PERDAS POR RCC (%)	% DO TOTAL					
ESTACAS	CONCRETO	CIMENTO	83.123,683	18.849,945	97.745,019	22,68%	52,60%					
		AREIA										
		BRITA										
	ARMADURA	AÇO										
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO										
		AREIA										
		BRITA										
	ARMADURA	AÇO										
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA										
		COMPENSADO										
PAREDES	ALVENARIA	TIJOLO						27.954,530	16.601,150	44.555,680	59,39%	46,32%
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO										
		AREIA										
REVESTIMENTOS	CHAPISCO	CIMENTO										
		AREIA										
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO										
		AREIA										
		CAL										
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO										
		AREIA										
		CAL										
	REBOCO	AREIA										
		CAL										
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	3.150,180	388,278	3.538,458	12,33%	1,08%					
		TELHAS						FIBROCIMENTO				
<b>TOTAL</b>			<b>114.228,393</b>	<b>35.839,373</b>	<b>145.839,157</b>	<b>31,38%</b>	<b>100,00%</b>					

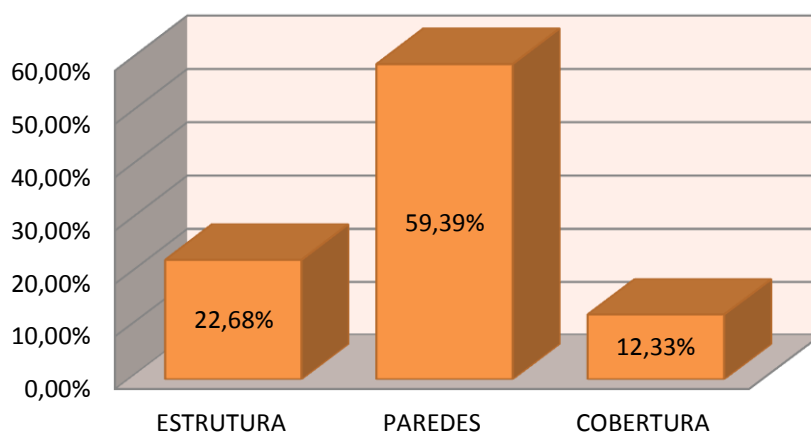
Fonte: o autor.

No caso do LSF, para a quantidade total de materiais adquiridos, há uma divisão em duas parcelas: resíduos e aplicados. Porém, no caso da alvenaria, como foi realizada uma simulação, os valores obtidos foram divididos em: quantidade teórica necessária, quantidade de resíduos e quantidade total. Esta quantidade total não é a soma das duas

primeiras parcelas (ficando um pouco inferior a este valor), devido à questão das fôrmas de madeira. Para este componente (considerado como totalmente descartado ao final da obra, sem reaproveitamentos), a quantidade teórica necessária é aquela que seria utilizada exclusivamente na montagem de fôrmas (e descartadas posteriormente), já as perdas por RCC são a soma da quantidade teórica e dos desperdícios na montagem das fôrmas (de 15%). A madeira das fôrmas foi considerada completamente descartada visto que, como no acompanhamento da obra de LSF toda a madeira virou resíduo, seguiu-se o mesmo padrão de utilização, não havendo reposições em outras obras.

Analisando-se as perdas por resíduos por parte da edificação, tem-se, conforme gráfico 5, que, nos materiais aplicados na estrutura e na cobertura da residência, os índices foram de 22,68% e 12,33% respectivamente, sendo estes índices mais altos que no caso do LSF. Já nas paredes de vedação (alvenaria e revestimentos), houve uma perda bastante elevada de 59,39% (16,60t). Neste caso, os revestimentos (chapisco, emboço e reboco) compõem 86,57% destes resíduos, com uma massa de 14,37t. Teoricamente, seriam necessárias 17,03t destas argamassas, isto significa que a massa de resíduos quase alcança este total, indicando alto índice de perdas por entulho (mais de 84%). Isto pode ser explicado pelo caráter bastante artesanal de aplicação destes produtos, o que reduz o controle sobre o resultado e permite perdas por endurecimento, quedas no chão, má aplicação, entre outros.

Gráfico 5 – Perdas por resíduos por parte da edificação de alvenaria

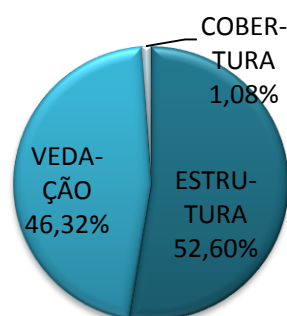


Fonte: o autor.

Fazendo-se uma análise com base em sua massa absoluta, conforme gráfico 6, percebe-se que a parcela relativa à estrutura da habitação soma 52,60% do total, restando 46,32% para as paredes e 1,08% para a cobertura. Percebe-se que, ao contrário do caso de LSF (em que apenas as fundações somavam grande parcela da massa de resíduos), para a alvenaria, tem-se que a estrutura e as paredes de vedação somam juntas quase 99% da

massa de resíduos total. Isto pode ser explicado pela grande ocorrência de atividades de conversão de insumos nestas duas partes da edificação, processo que, pela grande necessidade de movimentação e manuseio de materiais, possibilita maiores gerações de resíduos. Ainda quanto à massa absoluta, o uso intensivo do concreto torna a edificação mais pesada de maneira geral, sendo a massa de resíduos reflexo disto. Os resíduos da cobertura não representam tanto peso, pois ela é composta por materiais mais leves.

Gráfico 6 – Massa de resíduos por parte da edificação de alvenaria



Fonte: o autor.

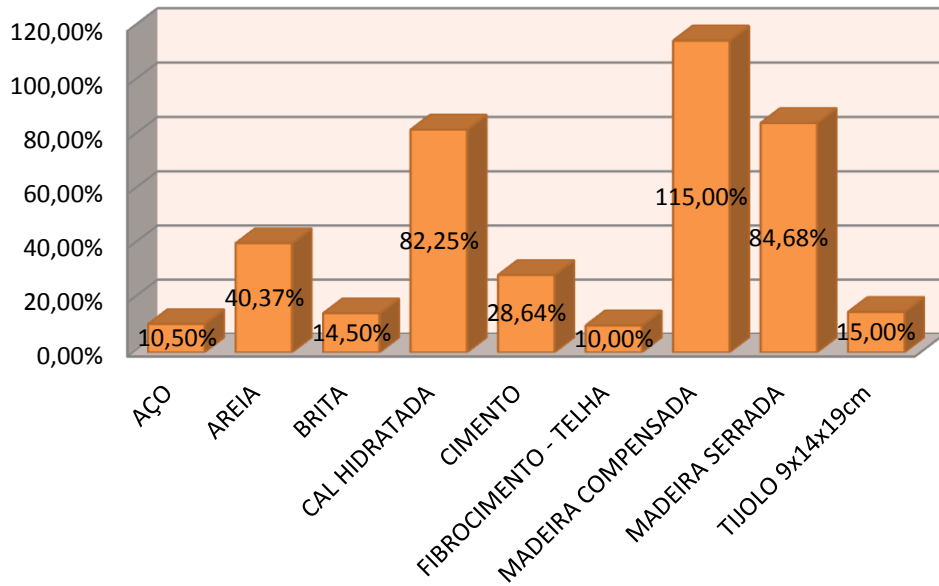
Quanto à classificação dos resíduos da residência em alvenaria gerados por materiais de construção, obteve-se a tabela 25 e o gráfico 7, a seguir. Neles, pode-se perceber que as perdas (por resíduos) dos materiais de construção são mais elevadas que no LSF, estando todos acima dos 10%. Os materiais que ficaram com índices maiores de perdas por resíduos foram a madeira compensada e a serrada pelo fato de elas terem sido consideradas como totalmente descartadas ao final da obra (sem reaproveitamento). No caso da madeira compensada, o índice ficou superior aos 100% de perda, pois foram somados os 100% utilizados nas fôrmas mais os 15% de perdas na montagem das mesmas. Já a madeira serrada não teve o índice acima dos 100%, pois além de ser utilizada nas fundações, também foi na cobertura, havendo compensação nos itens.

Tabela 25 – Quantidade de resíduos gerada, por material de construção – alvenaria

MATERIAL	QTDE NECESSÁRIA (kg)	PERDAS POR RESÍDUO (kg)	QTDE TOTAL (kg)	PERDAS POR RCC (%)
AÇO	1.994,031	209,373	2.203,404	10,50%
AREIA	48.965,141	19.765,204	68.730,345	40,37%
BRITA	35.192,970	5.102,981	40.295,951	14,50%
CAL HIDRATADA	1.450,599	1.193,050	2.643,649	82,25%
CIMENTO	10.487,931	3.003,747	13.491,677	28,64%
FIBROCIMENTO - TELHA	1.684,980	168,498	1.853,478	10,00%
MADEIRA COMPENSADA	862,102	991,417	991,417	115,00%
MADEIRA SERRADA	4.831,707	4.091,263	5.556,463	84,68%
TIJOLO 9x14x19cm	8.758,933	1.313,840	10.072,773	15,00%
<b>TOTAL</b>	<b>114.228,393</b>	<b>35.839,373</b>	<b>145.839,157</b>	<b>31,38%</b>

Fonte: o autor.

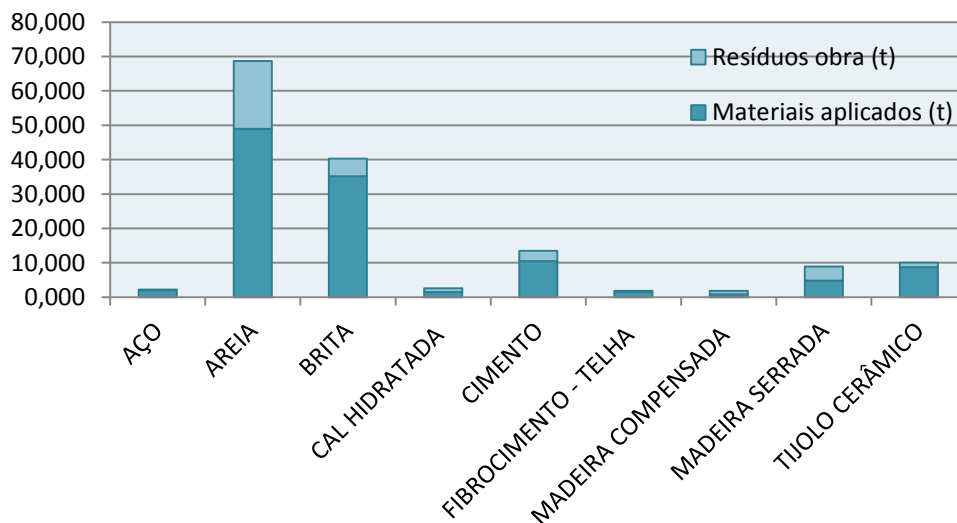
Gráfico 7 – Percentual de resíduos gerado, por material de construção – alvenaria



Fonte: o autor.

Assim como no caso do LSF, na habitação em alvenaria, a areia e a brita têm participação expressiva no peso da obra, tanto nos materiais necessários quanto nos resíduos. Neste caso, a soma dos dois materiais representa 73,68% do peso total de materiais necessários (com 84,16t) e 69,39% dos RCC gerados (com 24,87t). O gráfico 8 exemplifica o exposto.

Gráfico 8 – Alvenaria convencional: materiais necessários X resíduos da obra

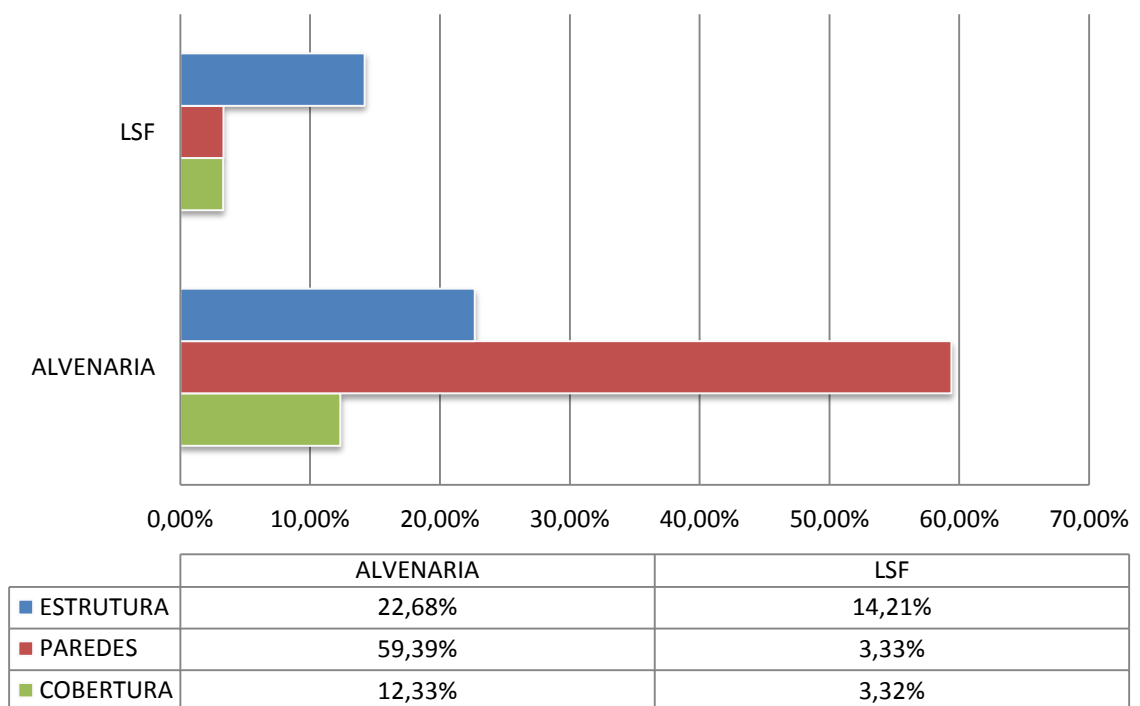


Fonte: o autor.

Comparando-se as quantidades de resíduos geradas pelas duas técnicas construtivas, por parte da edificação, tem-se o gráfico 9. Ele evidencia o que já foi exposto

quanto ao maior índice de perdas por resíduos, em todas as partes da edificação, da construção em alvenaria. Além disso, ficam claras as vantagens dos painéis industrializados e pré-fabricados (que demandam maiores atividades de montagem apenas) componentes da vedação e cobertura do LSF, gerando menos de 5% de resíduos em cada parte. Em suma, chega-se a um valor de menos de 13% de resíduos dos materiais aplicados no LSF e de mais de 30% na alvenaria convencional, percebendo-se que o índice de perdas por RCC da primeira técnica é menos da metade do índice em alvenaria convencional, mostrando claros atributos de sustentabilidade pela menor quantidade de RCC gerada.

Gráfico 9 – Comparação dos RCC por parte da edificação

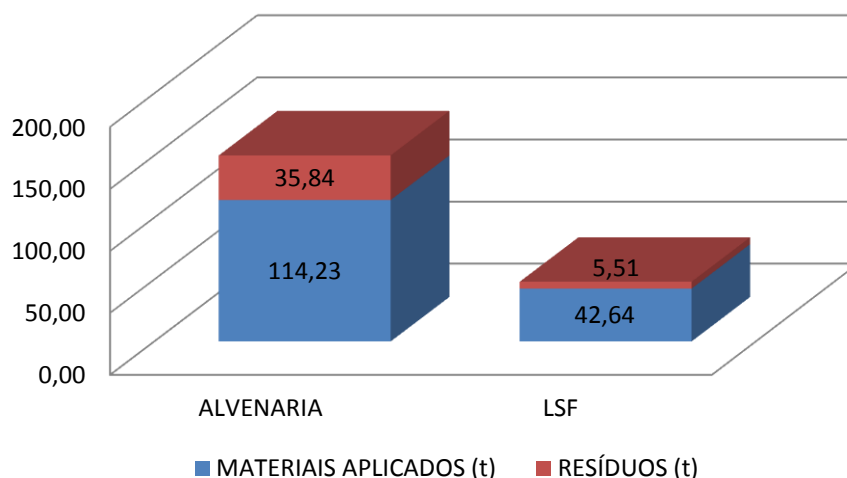


Fonte: o autor.

Comparando-se os valores absolutos obtidos nesta pesquisa, tem-se 6,5 vezes mais massa de resíduos de obra na construção em alvenaria convencional do que na de LSF. Isto pode ser explicado, além de pela maior porcentagem de perdas por RCC existentes, pelo fato de a edificação em alvenaria ser mais pesada, consumindo mais materiais e materiais com maior massa.

Além dos resultados relativos aos resíduos, pode-se verificar que, como é a proposta desta técnica construtiva, a edificação em *light steel framing* é muito mais leve do que a de alvenaria de tijolos convencional, possuindo menos da metade da massa de materiais aplicados e menos de um terço da massa daqueles adquiridos, como pode ser verificado no gráfico comparativo abaixo.

Gráfico 10 – Massa total (t) dos materiais utilizados (aplicados na edificação e resíduos gerados)



Fonte: o autor.

Para quantificação dos resíduos por metro quadrado, dividiu-se o total dos RCC gerados pela área da edificação (58,15m<sup>2</sup>), chegando-se a 0,616t de resíduos de obra por m<sup>2</sup> de piso na construção de alvenaria convencional e a 0,095t/m<sup>2</sup> de resíduos na obra de LSF. Isto ressalta o fato de a massa de resíduos na primeira técnica construtiva ser muito menor do que aquela em alvenaria convencional.

## 6.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

A partir dos dados obtidos na seção 5, anterior, pode-se perceber que, para a edificação em LSF, grande parte dos impactos ambientais relativos à energia embutida e às emissões de CO<sub>2</sub> está concentrada nas fundações, somando 74% e 81% do total, respectivamente. Já para as outras partes, as paredes ficam com a segunda parcela de impactos (18 e 14%) e a cobertura com a terceira (8 e 5%). Isto pode ser melhor visualizado na tabela 26, que compara a quantidade de resíduos com a energia embutida e os índices de CO<sub>2</sub>.

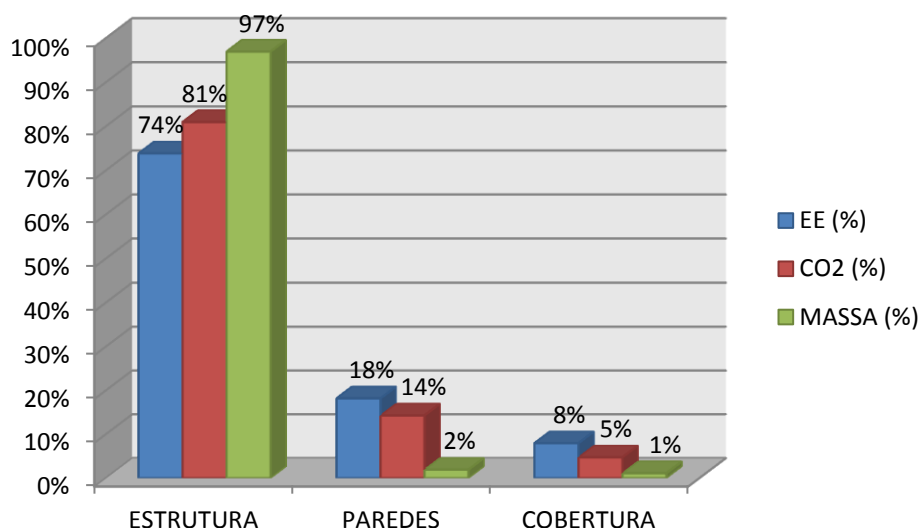
Tabela 26 – Impactos ambientais dos resíduos do LSF, por parte da edificação

APLICAÇÃO	RESÍDUOS		ENERGIA EMBUTIDA		CO <sub>2</sub>	
	QTDE (kg)	MASSA (%)	EE (MJ)	EE (%)	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> (%)
FUNDAÇÕES	5.345,16	97%	8.297,16	74%	724,85	81%
PAREDES	105,81	2%	2.044,04	18%	127,83	14%
COBERTURA	61,22	1%	893,49	8%	42,30	5%
<b>TOTAL</b>	<b>5.512,18</b>		<b>11.234,70</b>		<b>894,98</b>	

Fonte: o autor.

Chegar à conclusão simplista de que as fundações são as maiores geradoras de impactos ambientais poderia levar a resultados equivocados. Para isto, observou-se a relação dos impactos com a massa de resíduos. A partir disso, pôde-se perceber que os resíduos de materiais das fundações são responsáveis por 97% da massa total de RCC, sendo este o motivo pelo qual os impactos associados são maiores. Também se pôde observar que as paredes, apesar de gerarem apenas 2% da massa de resíduos, possuem impactos com uma proporção maior. Isto se deve pelo uso de materiais industrializados, que exigem maior processamento fabril para que possam ser utilizados (possuindo fatores de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> mais elevados). O mesmo pode ser dito sobre a cobertura, que possui massa de resíduos pouco significativa, porém impactos ambientais em proporções maiores. O gráfico abaixo ajuda a ilustrar o exposto.

Gráfico 11 – Comparativo entre os impactos ambientais e a massa dos resíduos do LSF, por parte da edificação



Fonte: o autor.

Já na edificação em alvenaria, conforme tabela 27, a maioria dos impactos ambientais relativos à energia embutida e às emissões de CO<sub>2</sub> está dividida entre a estrutura (65% da EE e 57% do CO<sub>2</sub>) e as paredes (33 e 41%, respectivamente), restando uma parcela muito pequena para a cobertura.

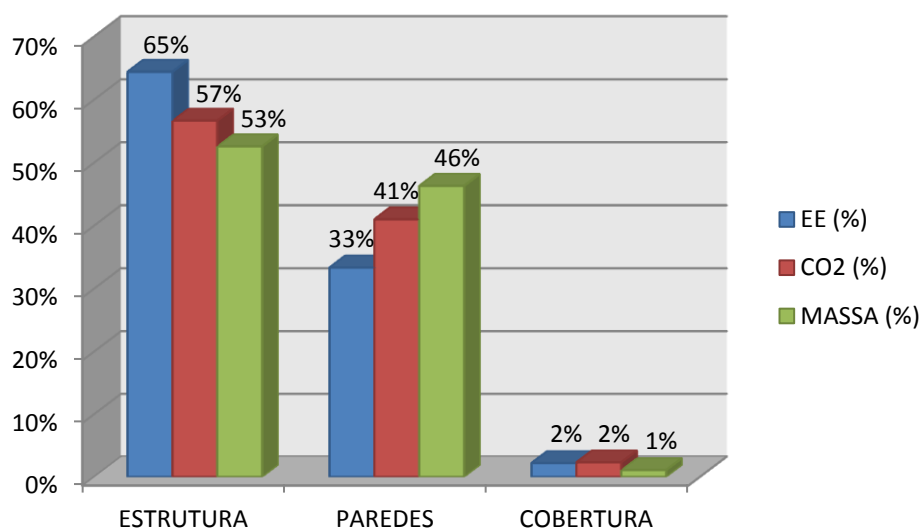
Tabela 27 – Impactos ambientais dos resíduos da alvenaria, por parte da edificação

APLICAÇÃO	RESÍDUOS		ENERGIA EMBUTIDA		CO <sub>2</sub>	
	QTDE (kg)	MASSA (%)	EE (MJ)	EE (%)	kg CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> (%)
ESTRUTURA	18.849,945	53%	42.300,31	65%	3.562,64	57%
PAREDES	16.601,150	46%	21.904,34	33%	2.578,82	41%
COBERTURA	388,278	1%	1.450,55	2%	145,49	2%
<b>TOTAL</b>	<b>35.839,373</b>		<b>65.655,196</b>		<b>6.286,948</b>	

Fonte: o autor.

Ao contrário do caso em LSF, na alvenaria é mantida uma proporcionalidade maior entre a massa de resíduos e os impactos ambientais associados, ficando estes indicadores na mesma faixa de valores (como pode ser observado no gráfico abaixo). Isto mostra que os materiais constituintes de todas as três partes estudadas da edificação possuem índices de impacto semelhantes e que, desta forma, os níveis de impacto são proporcionais à massa de resíduos.

Gráfico 12 – Comparativo entre os impactos ambientais e a massa dos resíduos da alvenaria, por parte da edificação



Fonte: o autor.

Conforme tabela 28, fazendo-se uma comparação entre os valores encontrados para as duas técnicas construtivas, tem-se que a alvenaria, além de gerar maior massa de resíduos, possui mais energia embutida e mais emissões de CO<sub>2</sub> associadas a estes RCC. Porém, quando se faz uma análise destes índices por kg de resíduo gerado, o cenário é alterado. O LSF apresenta uma energia embutida maior por quilo de RCC, com 2,04 MJ/kg, enquanto a alvenaria possui apenas 1,83 MJ/kg. Isto demonstra que os materiais utilizados na edificação de LSF possuem mais energia embutida do que aqueles utilizados para construção em alvenaria. Já quanto às emissões de CO<sub>2</sub>, as duas técnicas construtivas apresentam índices bastante próximos, com 0,162 e 0,175 kg CO<sub>2</sub>/kg de resíduo respectivamente.

Tabela 28 – Impactos ambientais dos resíduos

TÉCNICA CONSTRUTIVA	EE (MJ)	EE/kg RCC	EE (MJ/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> (kg)	CO <sub>2</sub> /kg RCC	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
LSF	11.234,70	2,038	193,20	894,98	0,162	15,39
ALVENARIA	65.655,20	1,832	1.129,07	6.286,95	0,175	108,12

Fonte: o autor.



Calculando-se os impactos ambientais por m<sup>2</sup> de construção, a quantidade muito maior de resíduos no caso da alvenaria continua fazendo com que seus índices sejam significativamente maiores do que os do LSF. São 193,2 MJ/m<sup>2</sup> de energia embutida e 15,39 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> para o LSF, contra 1.129,07 MJ/m<sup>2</sup> e 108,12kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, para a alvenaria. Esta apresenta 5,84 mais energia embutida e 7,03 mais emissões de CO<sub>2</sub> em seus resíduos do que o LSF.

Para se fazer uma análise um pouco mais aprofundada da questão dos impactos dos materiais constituintes de cada técnica construtiva (além dos seus RCC), calculou-se também a energia embutida e as emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais aplicados na construção das residências (estudados nesta dissertação), conforme tabela 29 abaixo. Por meio dela, pode-se perceber que, nos materiais efetivamente aplicados em obra, no caso do LSF, são 150,25GJ de energia embutida e 12,25t de CO<sub>2</sub>, que correspondem a 2,58GJ/m<sup>2</sup> e 210,64kg/m<sup>2</sup>, respectivamente. Já para a alvenaria, são 269,08GJ de EE (4,63GJ/m<sup>2</sup>) e 23,57t de CO<sub>2</sub> (405,27kg/m<sup>2</sup>).

Tabela 29 – EE e CO<sub>2</sub> nos materiais aplicados nas obras

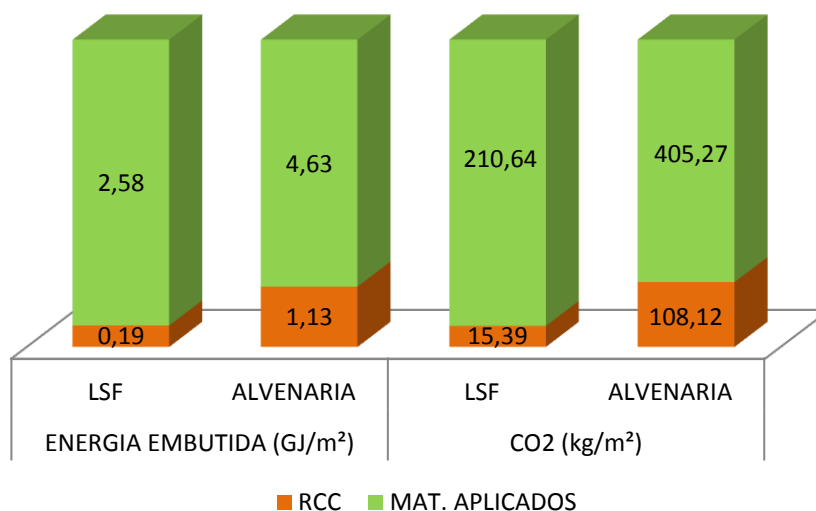
TÉCNICA CONSTRUTIVA	LSF			ALVENARIA		
	MATERIAIS APLICADOS (kg)	EE material (MJ)	kgCO2	MATERIAIS APLICADOS (kg)	EE material (MJ)	kgCO2
AÇO	378,660	13.253,110	1.033,743	1.994,031	69.791,074	5.443,704
AREIA	13.132,020	6.566,010	393,961	48.965,141	24.482,571	1.468,954
BRITA	19.298,400	28.947,600	1.929,840	35.192,970	52.789,455	3.519,297
CAL HIDRATADA	0,000	0,000	0,000	1.450,599	4.351,796	1.262,021
CIMENTO	4.576,000	20.592,000	3.615,040	10.487,931	47.195,687	8.285,465
FIBROCIMENTO	0,000	0,000	0,000	1.684,980	10.109,880	1.213,186
GESSO ACART.	1.235,470	8.339,423	481,833	0,000	0,000	0,000
LÃ DE VIDRO	96,000	2.688,000	129,600	0,000	0,000	0,000
MAD.COMPENSADA	0,000	0,000	0,000	862,102	6.896,813	353,462
MADEIRA SERRADA	236,250	472,500	25,988	4.831,707	9.663,414	531,488
OSB	772,015	3.713,394	216,164	0,000	0,000	0,000
PANEL SMARTSIDE	736,254	9.652,290	552,191	0,000	0,000	0,000
PERFIL DE AÇO	1.323,460	46.321,100	3.613,046	0,000	0,000	0,000
TELHA SHINGLE	858,503	9.701,086	257,551	0,000	0,000	0,000
TIJOLO CERÂMICO	0,000	0,000	0,000	8.758,933	43.794,667	1.489,019
<b>TOTAL</b>	<b>42.643,033</b>	<b>150.246,513</b>	<b>12.248,956</b>	<b>114.228,393</b>	<b>269.075,357</b>	<b>23.566,595</b>

Fonte: o autor.

Conforme gráfico 13, abaixo, fazendo um paralelo com os impactos dos resíduos, obteve-se que, para 2,77 GJ/m<sup>2</sup> de energia embutida nos materiais da edificação de LSF, 7% correspondem aos resíduos e 93% aos aplicados, mantendo o mesmo índice para o CO<sub>2</sub>, que soma 226,03kg no total (210,64 kg em materiais aplicados e 15,39kg referentes

aos RCC). Já na residência em alvenaria, dos 5,76GJ/m<sup>2</sup> de EE nos materiais totais, 20% se refere aos resíduos e 80% aos materiais aplicados; e quanto aos 513,39kg totais de CO<sub>2</sub>, as parcelas são respectivamente 21 e 79%. Isso reforça ainda mais a conclusão de que a massa da edificação em alvenaria possui uma relação direta com seus impactos ambientais.

Gráfico 13 – Energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> nos materiais estudados por m<sup>2</sup> de construção



Fonte: o autor.

Sendo assim, percebe-se claramente que a edificação em LSF possui menos impactos ambientais associados do que aquela em alvenaria. Isto porque sua massa de resíduos (e de materiais aplicados) é muito menor, compensando o fato de sua energia embutida por kg ser mais elevada. Desta forma, pode-se dizer que a técnica construtiva de *light steel framing* possui claros atributos de sustentabilidade, gerando menor quantidade de resíduos e possuindo menos impactos ambientais a eles associados.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção civil permeia todas as atividades humanas, estando em constante expansão e sendo de grande importância para a economia mundial, movimentando grandes quantidades de capital e gerando muitos empregos. Apesar disto, esta indústria também está cercada de aspectos negativos, visto que é uma grande consumidora de recursos naturais (como água, matérias-primas e energia) e grande geradora de impactos ambientais (como a emissão de gases do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global). Além disso, por seu alto índice de perdas e desperdícios, ela é uma grande geradora de resíduos.

A questão dos resíduos se torna bastante delicada por diversos fatores, como: altos custos para coleta; escassez de locais para deposição; deposição em locais indevidos com prejuízos para o meio ambiente e saúde da população; perdas financeiras para os geradores, que adquiriram um material não utilizado e tem que custear sua destinação; impactos ambientais associados à fabricação e transporte destes materiais que acabaram não sendo utilizados; entre outros.

Pelo seu tamanho e pela gravidade dos seus impactos negativos na dinâmica climática global, práticas mais sustentáveis devem ser buscadas pela indústria da construção, visando o não esgotamento dos recursos naturais e, conseqüentemente, um futuro melhor para as próximas gerações. Elas devem estar presentes em todas as fases do processo construtivo: desde a idealização, concepção e construção do projeto, até o uso, manutenção e final da vida útil da edificação. Porém, muitas vezes, há dificuldade em se mensurar o desempenho que um projeto ou construção possa ter em termos de sustentabilidade. Para isto, análises podem ser feitas sob diferentes pontos de vista, inclusive com estudos de ciclo de vida (ACV's) e suas ramificações (ACVE, ACVCO<sub>2</sub>, entre outros).

Através dos estudos conduzidos, este trabalho contribui para pesquisas sobre geração de resíduos na construção civil em relação à técnica construtiva do LSF. Percebe-se que muito se fala sobre as potenciais reduções nos desperdícios ocorridos neste tipo de construção, porém poucas são as pesquisas práticas que quantificam estes RCC, chegando a valores de perdas. Indo além da sua simples quantificação, sob o viés da sustentabilidade, a análise da EE (energia embutida) e emissões de CO<sub>2</sub> destes resíduos permite uma mensuração dos impactos ambientais a eles associados.

O objetivo desta dissertação, que era, por meio da realização de um estudo de caso com etapa de simulação, estimar a quantidade de resíduos de construção civil gerados na fase de construção de uma edificação padrão concebida em LSF em comparação com uma

em alvenaria convencional e analisar os impactos ambientais associados a eles no seu ciclo de vida pré-operacional, em relação à energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>, foi atingido.

Para atendimento deste objetivo, uma conceituação teórica sobre o tema se fez necessária, sendo realizada uma revisão bibliográfica e de estado da arte no capítulo 2 desta dissertação. Em sequência, as estratégias e método de pesquisa foram detalhadas no capítulo 3, para aplicação nos capítulos 4 e 5. Sua estrutura permitiu a criação de um plano para quantificação dos RCC e análise adequada dos seus impactos.

Por meio de aplicação do método definido, foi realizado um estudo de caso de uma habitação unifamiliar em LSF construída no município de Ponta Grossa/PR, com acompanhamento da fase de obra. Já para a alvenaria convencional, foi realizada uma simulação da sua construção, com base na literatura técnica e no projeto arquitetônico da edificação efetivamente construída. Desta forma, o capítulo 4 cumpre com a primeira parte do objetivo, apresentando a quantificação dos resíduos gerados por estas duas técnicas construtivas.

Já a segunda parte, de análise dos impactos ambientais em relação à EE e emissões de CO<sub>2</sub>, foi cumprida no capítulo 5. Nele, o método definido de análise dos indicadores, para as etapas pré-operacionais de extração das matérias-primas e prospecção dos materiais, excluindo-se as etapas de transporte, foi aplicado e os índices para os resíduos gerados foram calculados. Chegaram-se a valores de energia embutida em MJ e emissões de CO<sub>2</sub> em kg para as quantidades totais dos materiais que se tornaram resíduos.

Os resultados obtidos foram expostos no capítulo 6, com tabelas e textos explicativos, além de gráficos ilustrativos. Estes resultados foram avaliados sob vários focos, como: por técnica construtiva, por partes das edificações e por materiais de construção. Também foram considerados valores totais, valores por kg de material e valores por m<sup>2</sup> de construção. Assim, as seguintes considerações podem ser feitas.

A edificação em alvenaria convencional é significativamente mais pesada do que a casa de LSF, com 2,7 vezes mais massa de materiais aplicados nas partes e componentes estudados (114,23t e 42,64t, respectivamente). Mantendo esta relação de massa, a quantidade de resíduos de construção civil gerada na obra da edificação de LSF é 6,5 vezes menor do que no caso da alvenaria. Foram 5,51t de RCC para o LSF (0,095t/m<sup>2</sup>) e 35,84t para a alvenaria (0,616t/m<sup>2</sup>).

Desconsiderando-se o fato de a edificação em alvenaria ser mais pesada e analisando os resíduos com base nas porcentagens geradas, ainda assim se tem mais

resíduos para esta construção. Foram calculadas mais de 30% de perdas por resíduos para a obra de alvenaria, enquanto que o LSF apresentou menos de 13%.

Analisando as partes das edificações, concluiu-se que, no caso do LSF, as fundações são as maiores geradoras de resíduos, com 14,21%. Já os painéis de vedação vertical e de cobertura, compostos de elementos pré-fabricados e montados em ambiente fabril, tiveram índices de perdas por RCC na faixa dos 3% cada um. Estes índices comprovam as vantagens da industrialização e pré-fabricação estudadas na literatura, que afirma que menores atividades de conversão e mais de montagem, em ambiente controlado, podem reduzir as perdas.

No caso da alvenaria, todas as partes possuíram mais de 10% de perdas por RCC, sendo as paredes de vedação as maiores geradoras, com quase 60%. Isto se deve à parcela de perdas por entulho ocorrida na mistura e aplicação das argamassas de revestimento, processo ainda bastante artesanal.

Com base no pressuposto de que os materiais aplicados na construção em LSF carecem de atividades de prospecção mais complexas e que demandam mais energia, a análise dos impactos foi de fundamental importância para verificação de sua influência na sustentabilidade das técnicas construtivas. Para o LSF, encontraram-se valores de energia embutida de 2,038 MJ/kg de resíduos, enquanto que para a alvenaria este valor foi de 1,832 MJ/kg, demonstrando que a primeira técnica realmente utiliza materiais que demandam mais energia inicial de fabricação. Porém, apesar disto, pela massa dos RCC ser significativamente menor no caso do LSF, esta edificação apresentou 11,2GJ (0,19GJ/m<sup>2</sup>) de EE, contra 65,6GJ (1,13GJ/m<sup>2</sup>) na alvenaria.

Quanto às emissões de CO<sub>2</sub>, obtiveram-se valores de 894,98kg para o LSF e 6.286,95kg para a alvenaria. Realizando o mesmo procedimento de comparação, têm-se 0,162kg CO<sub>2</sub>/kg de RCC para o LSF e 0,175kg/kg para a alvenaria. Neste caso, verificou-se que, mesmo havendo a desconsideração da massa total, a alvenaria continuou com maiores emissões de dióxido de carbono por kg de resíduo. São 15,39kg/m<sup>2</sup> e 108,12kg/m<sup>2</sup> para o LSF e alvenaria, respectivamente. Assim, estes resultados mostram que os resíduos de LSF apresentam menores impactos ambientais do que os da alvenaria.

Fazendo um somatório dos impactos dos resíduos com os impactos dos materiais aplicados na edificação, obteve-se 2,77GJ/m<sup>2</sup> de energia embutida e 226,03kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> na edificação de LSF. Já para a alvenaria, foram 5,76GJ/m<sup>2</sup> de EE e 513,39kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

Pelo exposto, pôde-se concluir que a edificação construída em LSF, além de gerar uma quantidade de resíduos muito menor do que a mesma se construída em alvenaria

convencional, também possui menores impactos ambientais associados, tanto com relação ao seus RCC quanto ao total de materiais aplicados. Isto indica claros atributos de sustentabilidade.

Desta maneira, entende-se que o problema da pesquisa foi respondido. Apesar disto, não se considera que o assunto esteja esgotado, devendo as investigações prosseguir. Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Fazer uma abordagem mais completa do edifício, considerando os resíduos de mais partes da edificação, como instalações de elétrica e hidráulica;
- Fazer uma abordagem mais completa do ciclo de vida, considerando os resíduos das obras de manutenção e da fase de demolição;
- Fazer uma análise de custos e prazos, incluindo valor agregado de cada tipo de obra e custos para o cliente;
- Utilizar a mesma metodologia de quantificação dos resíduos para as técnicas estudadas: acompanhamento da obra real, sem etapas de simulação;
- Estudar a geração de resíduos em mais de um tipo de obra em LSF: com utilização de perfis comerciais (em dimensões padrões e que devem ser recortados) e com utilização de perfis engenheirados (que são produzidos conforme projeto específico);
- Estudar mais de uma obra de LSF, comparando resultados e obtendo valores médios e medianos;
- Comparar a geração de resíduos entre outras técnicas construtivas, como blocos de concreto, blocos cerâmicos estruturais, wood frame, entre outras;
- Aprofundar os cálculos de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> considerando as etapas de transporte dos materiais;
- Estudar outros parâmetros de sustentabilidade, além da energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>, como eutrofização, exaustão de recursos renováveis e não renováveis, depleção do ozônio estratosférico, entre outros.

## REFERÊNCIAS:

AGOPYAN V.; SOUZA, U.E.L.; PALIARI, J.C.; ANDRADE, A.C. **Pesquisa “Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras”**. Relatório final. EPUSP/FINEP/ITQC, 1998.

AGOPYAN V.; SOUZA, U.E.L.; PALIARI, J.C.; ANDRADE, A.C. Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras. **Coletânea Habitare**, Porto Alegre, v. 2, p. 224-249, 2003.

ALVES, L.P. Comparativo do custo benefício entre o sistema construtivo em alvenaria e os sistemas steel frame e wood frame. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, ed. 10, v. 1, dez. 2015.

ARAÚJO, M. A. **A moderna construção sustentável**. 2008. In: AECweb. Disponível em: [http://www.aecweb.com.br/cont/a/a-moderna-construcao-sustentavel\\_589](http://www.aecweb.com.br/cont/a/a-moderna-construcao-sustentavel_589). Acesso em 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AZEVEDO, G. O. D.; KIPERSTOK, A.; MORAES, L. R. S. Resíduos da construção civil em Salvador: os caminhos para uma gestão sustentável. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.11, n. 1, p. 65-72, jan/mar. 2006.

Balanco Energético Nacional (BEN) 2015: **Relatório Síntese do ano base 2014**. Brasília, 2015

BERNARDES, M.; NILSSON, S.G.; MARTINS, M.S.; ROMANINI, A. Comparativo econômico da aplicação do Sistema Light Steel Framing em habitação de interesse social. **Revista de Arquitetura da IMED**, v. 1, n. 1, p. 31-40, jan/jun. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Comitê de Economia das Mudanças Climática no Brasil (EMCB). **Relatório do Comitê de Economia de Mudanças Climática**. Brasília, 2009.

BRASILIT – Saint-Gobain. **Construção industrializada**. 2014. Disponível em: <http://www.brasilit.com.br/sites/default/files/treinamentos/pdf/apostila-construcao-industrializada.pdf>. Acesso em: jul. 2016.

CALDAS, L.R. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO<sub>2</sub> de uma edificação habitacional unifamiliar de Light Steel Framing**. 174p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CALDAS, L.R.; SPOSTO, R.M.; CALDEIRA-PIRES, A.; PAULSEN, J.S. Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas para habitações sociais. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 7, n. 2, p. 238-256, mai/ago 2016 (a).

CALDAS, L.R.; SPOSTO, R.M.; LOPES, A.M.S.; TAVARES, W.C. Avaliação do Ciclo de Vida energético (ACVE) e do desempenho térmico de uma habitação de Light Steel Framing

com o uso de diferentes tipos de isolantes térmicos. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 2, p. 1-14, dez. 2015 – jun 2016 (b).

CAMPOS, H.C. **Avaliação pós-ocupação de edificações construídas no sistema *Light Steel Framing***. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CARMINATTI, R. J. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em *light steel framing***. 141p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Banco de dados. **PIB e Investimento**: PIB Brasil e Construção Civil. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>. Acesso em: mar. 2017.

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

CORTE, P.J.D.; GOULART, J.D.; SANTOS, F.F. Geração de resíduos em obras da construção civil com a utilização do sistema steel framing. In: VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 7, n. 2, Bagé, 2015. **Anais...** Bagé, 2015.

COSTA, B.L.C. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, R. V. G.; ATHAYDE JUNIOR, G. B.; OLIVEIRA, M. M. Taxa de geração de resíduos da construção civil em edificações na cidade de João Pessoa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 127-137, jan/mar. 2014.

CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: *Light steel framing***. 231p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

CRAWFORD, R.H. Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. **Journal of Environmental Management**, v. 88, p. 496-506, 2008.

CUNHA, I.B. **quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. **A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios**: a importância da etapa de projeto arquitetônico. Disponível em: [http://www.pcc.usp.br/files/text/personal\\_files/francisco\\_cardoso/Nutau%202002%20Degani%20Cardoso.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/personal_files/francisco_cardoso/Nutau%202002%20Degani%20Cardoso.pdf). Acesso em: 29 mar.2015.

DRUSZCZ, M. T. **Avaliação dos aspectos ambientais dos materiais de construção civil – uma revisão bibliográfica com estudo de caso do bloco cerâmico**. 154p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

EDWARDS, B. **Guía básica de La sostenibilidad**. Colaboração de Paul Hyett. Barcelona: Gustavo Gili, 2004.



GARCIA, S.; MARTINS, M.S.; ROMANINI, A.; BERNARDES, M. **Análise de sistemas construtivos para implementação em habitação de interesse social**. In: VII Mostra de Iniciação Científica e extensão Comunitária & VI Mostra de Pesquisa e Pós-graduação IMED. Passo Fundo, 2013. Disponível em: [https://www.imed.edu.br/Uploads/marcelesallesmartins\\_anicoliromanini\(%C3%A1rea3\).pdf](https://www.imed.edu.br/Uploads/marcelesallesmartins_anicoliromanini(%C3%A1rea3).pdf). Acesso em: jan. 2017.

GERHARDT, T.E.; SILVEIRA, D.T. **Métodos de pesquisa**. (Série Educação à Distância). 120p. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOMES, J.O.; LACERDA, J.F.S.B. Uma visão mais sustentável dos sistemas construtivos no Brasil: análise do estado da arte. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, Florianópolis, v. 7, n. 2, 2014.

GOMES, C.E.M.; VIVAN, A.L.; SICHIERI, E.P.; PALIARI, J.C. Light Steel Frame na produção de moradias no Brasil. In: IX Congresso de Construção Metálica e Mista & I Congresso Luso-brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto, 2013. **Anais...** Porto, 2013.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre o ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81, out./dez. 2006.

GUIMARÃES JUNIOR, P. V. **Antecipações gerenciais para integração da gestão de resíduos na construção civil no planejamento e controle de produção**. 182p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ICE v 2.0 – Inventory of Carbon and Energy. University of Bath: Inglaterra, 2011. Disponível em: [www.carbonsolutions.com/resources/ice%20v2.0%20-%20jan%202011.xls](http://www.carbonsolutions.com/resources/ice%20v2.0%20-%20jan%202011.xls). Acesso em: set. 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 14040:2006, **Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Suíça, 2006.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 14044:2006, **Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. Suíça, 2006.

ISOLDI, R.; SATTLER, M. A.; GUTIERREZ, E. **Tecnologias inovadoras visando a sustentabilidade: um estudo sobre inovação, técnica, tecnologia e sustentabilidade em arquitetura e construção**. Disponível em: <<http://www.ufpel.edu.br/faurb/prograu/documentos/artigo3-sustentabilidade.pdf>> Acesso em: abr. 2012.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113p. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares, 2000, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 2000.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso**. USP. Disponível em: [http://www.sibr.com.br/sibr/portal.jsp?id=9&pagina=artigo.jsp&artigo\\_id=159](http://www.sibr.com.br/sibr/portal.jsp?id=9&pagina=artigo.jsp&artigo_id=159). Acesso em jun. 2016.

LACHIMPADI, S.K.; PEREIRA, J.J.; TAHA, M.R.; MOKHTAR, M. Construction waste minimisation comparing conventional and precast construction (Mixed System and IBS) methods in high-rise buildings: A Malaysia case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 68, p. 96-103, 2012.

LAWSON, R.M. **Sustainability of Light Steel Construction**. The Steel Construction Institute: Ascot, 2014.

LAWSON, R.M.; OGDEN, R.G.; PEDRESCHI, R.; GRUBB, P.J.; POPOOLA, S.O. **Development in pre-fabricated systems in light steel and modular construction**. In: The Structural Engineer. Londres, 2005.

LIMA, M.M. As vantagens dos novos métodos construtivos utilizados no Brasil para obras de padrão popular. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, ed. 7, v. 1, jul. 2014.

LIMA, A.S.; CABRAL, A.E.B. caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169-176, abr/jun. 2013.

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**. 139p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

LORDSLEEM JUNIOR, A. C.; LIMA, P. R. A. Canteiros de obras com menor impacto ambiental: avaliação baseada no referencial AQUA. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 18, p. 39-48, nov. 2011.

LP BUILDING PRODUCTS. **LP SmartSide**. (Catálogo Técnico). Curitiba. Disponível em: <http://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-smartside/>. Acesso em: jun. 2016.

LU, W.; YUAN, H. Investigating waste reduction potential in the upstream processes of offshore prefabrication construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 804-811, 2013.

MACHADO, R.C.; SOUZA, H.A.; BARROSO-KRAUSE, C. Fechamentos verticais industrializados e estrutura metálica como materiais alternativos para uma construção. In: ENTAC 2010 - XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. **Anais...** Canela, 2010.

MARCHESINI, I.A. **Análise da influência do mobiliário em MDF no ciclo de vida energético da edificação: um estudo sobre a energia embutida no mobiliário de escritórios comerciais**. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional da construção de habitação de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. 130p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MARQUES, F. M.; SALGADO, M. S. Padrões de sustentabilidade aplicados ao processo de projeto. *In: Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios*, 7., 2007, Curitiba. **Anais**. Curitiba: UFPR, 2007. Disponível em: <http://www.cesec.ufpr.br/workshop2007/Artigo-16.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2012.

MASHHADIFARAHANI, S. Light weight steel frames vs. common building structures: structural performance evaluation. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)**, v. 12, n. 1, p. 222-229, 2015.

MEIRELLES, C.R.M.; SEGALL, M.L.; RAIA, F.; MESQUITA, J.A.; FERREIRA, H.F. O potencial sustentável dos sistemas leves na produção da habitação social. **Revista da Arquitetura da IMED**, v. 1, n. 2, p. 164-173, 2012.

MILAN, G.S.; NOVELLO, R.V.; REIS, Z.C. A viabilidade do sistema *light steel frame* para construções residenciais. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 7, n. 1, p. 189-209, 2011.

MIYAZATO, T.; OLIVEIRA, C. T. A. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): aplicações e limitações no setor da construção civil. *In: ELECS - V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*. **Anais**. Recife, 2009.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema *wood frame* no estado do Paraná**. 126p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, M.T.P. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.4, n.1, p. 84-119, maio/2009. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/viewFile/50953/55034>. Acesso em: 24 ago. 2015.

NASH – National Association of Steel Framed Housing Inc. **Steel-framing facts: waste**. Austrália, 2014. Disponível em: <http://nashnz.org.nz/wp-content/uploads/2014/06/Waste.pdf>. Acesso em: jan. 2017.

OBA, M.M. **O projeto de readequação visando a construção mais sustentável no edifício moderno**: estudo de caso sobre o Centro Politécnico da UFPR. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PARISI KERN, A.; DIAS, M.F.; KULAKOWSKI, M.P.; GOMES, L.P. Waste generated in high-rise buildings construction: a quantification model based on statistical multiple regression. **Waste Management**, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.043>.

PEDROSO, G.M. **Avaliação de ciclo de vida energético (AVCE) de sistemas de vedação de habitações**. 226p. Tese (doutorado em Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PENAZZI, M.E.; SOUZA, A.S.C.; SERRA, S.M.B. Construções industrializadas para habitações de interesse social: aspectos gerais. *In: ENTAC 2014 – XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Maceió, 2014. **Anais...** Maceió, 2014.

PÉREZ, C.T.; COSTA, D.B.; GONÇALVES, J.P. Identificação, mensuração e caracterização das perdas por transporte em processos construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 243-263, jan./mar. 2016.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: an overview. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1592-1600, 2010.

SAADE, M.R.M.; SILVA, M.G.; GOMES V.; FRANCO, H.G.; SCHWAMBACK, D.; LAVOR, B. Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 54-71, 2014.

SANTIAGO, A.K.; ARAÚJO, E.C. Sistema light steel framing como fechamento externo vertical industrializado. **CONSTRUMETAL – Congresso Latino-americano da Construção Metálica**. São Paulo, 2008.

SANTOS, C.A.B.; FARIAS FILHO, J.R. Construção civil: um sistema de gestão baseada na logística e na produção enxuta. **ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 1998.

SBI – Stalbyggnadsinstitutet, The Swedish Institute of Steel Construction. **Sustainability of steel-framed buildings**. Disponível em:  
[http://stalbyggnadsinstitutet.se/uploads/source/files/Artiklar/SBI-Sustainability\\_of\\_steel\\_framed\\_buildings.pdf](http://stalbyggnadsinstitutet.se/uploads/source/files/Artiklar/SBI-Sustainability_of_steel_framed_buildings.pdf). Acesso em: jan. 2017.

SENAI. Departamento Regional do Rio Grande do Sul. **Produção mais limpa em edificações**. Porto Alegre, Centro Nacional de Tecnologias Limpas, 2007.

SHARMA, A.; SAXENA, A.; SETHI, M.; SHREE, V.; VARUN. Life cycle assessment of buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 871-875, 2011.

SILVA, A. F. F. **Gerenciamento de resíduos da construção civil de acordo com a resolução CONAMA nº 307/01 – estudo de caso para um conjunto de obras de pequeno porte**. 102 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, M.F. **Emprego de gesso na construção civil: a sistematização da gestão de resíduos da pasta de gesso, gesso acartonado e placas de gesso**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVA, E.L.; PIERIN, I.; SILVA, V.P. **Estruturas compostas por perfis formados a frios: dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. (Série Manual da Construção em Aço). 192p. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2014a.

SILVA, E.L.; SILVA, V.P. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme a NBR 14762 e NBR 6355**. (Série Manual da Construção em Aço). 119p. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008.

SILVA, C.F.B.; SOARES, D.M.T.; SIMONI, E.L.; LIMA, G.E.; BARBOZA, J.C.; MANITA, J.P.C.; FERREIRA, T.M.; PINTO, C.O. Custo-benefício do sistema construtivo Steel Framing. In: 8º EnTec – Encontro de Tecnologia da UNIUBE, Uberaba, 2014. **Anais...** Uberaba, 2014b.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida o contexto da construção civil. **Construção e Meio Ambiente - Coletânea Habitare**, Porto Alegre, v. 7, p. 96-127, 2006.

SOLANO, R. B. P. A importância da arquitetura sustentável na redução do impacto ambiental. In: NUTAU 2008. **Anais**. São Paulo: USP, 2008.

SOUZA, E. **Índices médios de consumo para elaboração de projetos em concreto armado**. Monografia. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2003.

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

SPOSTO, R.M.; CALDAS, L.R.; NABUT NETO, A.C. Energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas de *light steel framing* no Brasil. **Oculum Ensaios**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 163-182, jan./jun. 2016.

TAM, C.M.; TAM, V.W.Y.; CHAN, J.K.W.; NG, W.C.Y. Use of prefabrication to minimize construction waste – a case study approach. **The International Journal of Construction Management**, p. 91-101, 2005.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 225p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S.F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO<sub>2</sub> para materiais de construção em edificações brasileiras. In: SBE Series 16 – Brazil & Portugal. **Anais**. Vitória, 2016.

TCPO – Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos. 13 ed. São Paulo: Pini, 2010.

VIVAN, A. L. **Projetos para produção de residências unifamiliares em *light steel framing***. 209p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

VIVAN, A.L.; PALIARI, J.C. *Design for Assembly* aplicado ao projeto de habitações em *Light Steel Frame*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n 4, p. 101-115, out./dez. 2012.

VIVAN, A. L.; PALIARI, J. C.; NOVAES, C. C. Vantagem produtiva do sistema *light steel framing*: da construção enxuta à racionalização construtiva. In: ENTAC – XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais**. Canela, 2010.

WANG, J.; LI, Z.; TAM, V. W.Y. Identifying best design strategies for construction waste minimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 237-247, 2015.

WRAP – Waste & Resources Action Programme. **Light steel frame construction**. Case study: Waste minimization through offsite construction. United Kingdom, sem ano. Disponível em: Acesso em jan. 2017a.

WRAP – Waste & Resources Action Programme. **Use of light steel frame reduces waste from house building**. United Kingdom, sem ano. Acesso em jan. 2017b.

WRAP – Waste & Resources Action Programme. **Waste reduction potential of Light Steel Frame construction**. United Kingdom, sem ano. Disponível em: <http://www2.wrap.org.uk/document.rm?id=4508>. Acesso em: abr. 2016.

WRAP – Waste & Resources Action Programme. **Waste reduction through the use of Steel Frame at SmartLIFE**. United Kingdom, 2008. Disponível em:

<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Steel%20Frame%20Full%20case%20study%20FINAL.pdf>. Acesso em: abr. 2016

YIN, R. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. Tradução de Daniel Grassi. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

## APÊNDICE A – Perdas por Agopyan et al. (1998)

DESCRIÇÃO		PERDAS MATERIAL (%)				
		MEDIANA <sup>1</sup>	PARCELA INCORPORADA <sup>2</sup>	PARCELA DE ENTULHO <sup>3</sup>	PARCELA DE ENTULHO CONSIDERADA <sup>4</sup>	ÍNDICE DE PERDAS POR ENTULHO CONSIDERADO
AÇO	AÇO GERAL	11%	0%	11%	-	11%
AREIA	AREIA GERAL	44%	-	-	50%	22%
	AREIA CONCRETO	6%	6%	0%	-	0%
BRITA	BRITA GERAL	38%	-	-	50%	19%
	BRITA NO CONCRETO	15%	6%	9%	-	9%
CAL HIDRATADA	CAL GERAL	36%	-	-	50%	18%
	CAL NO EMBOÇO EXTERNO	12%	-	-	50%	6%
	CAL NO EMBOÇO INTERNO	46%	42,5%	3,5%	-	3,5%
CIMENTO	CIMENTO GERAL	56%	-	-	50%	28%
	CIMENTO NO CHAPISCO	23,5%	-	-	50%	11,8%
	CIMENTO NO EMBOÇO EXTERNO	53%	43,5%	9,5%	-	9,5%
	CIMENTO NO EMBOÇO INTERNO	102%	83%	19%	-	19%
MADEIRA COMPENSADA	COMPENSADO GERAL	-	-	-	-	-
MADEIRA SERRADA	MADEIRA GERAL	-	-	-	-	-
TELHAS	TELHA FIBROCIMENTO	-	-	-	-	-
TIJOLOS	TIJOLO CERÂMICO FURADO	15%	0%	15%	-	15%

<sup>1</sup> A mediana é a porcentagem de perda encontrada para determinado material, considerando as perdas por incorporação à edificação e perdas por entulho. Ela foi obtida pela diferença entre o consumo real e o consumo de referência para determinado serviço.

<sup>2</sup> A parcela incorporada é a perda que ocorre, por exemplo, em forma de sobreessuras ou maior consumo de produto, não havendo geração de resíduos. Em alguns materiais, os autores especificaram esta parcela através da análise das espessuras/consumos reais e espessuras/consumos de referência.

<sup>3</sup> A parcela de entulho é aquela que vira resíduo de obra. Quando da especificação do índice de incorporação, este é deduzido das perdas totais para se chegar nas porcentagens de entulho.

<sup>4</sup> Quando não há menção das parcelas incorporadas e de entulho, é utilizado o índice mencionado por John e Agopyan (2000), que afirmam que, dentro das perdas, estima-se que 50% sejam de materiais incorporados e 50% por entulho.

## APÊNDICE B – Perdas por TCPO (2010), Agopyan et al. (1998) e Tavares (2006)

DESCRIÇÃO		PERDAS MATERIAL (%)				PERDAS PRODUTO (%)		
		TCPO	AGOPYAN	TAVARES	MASS	TCPO	AGOPYAN	MASS
CONCRETO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	28,0 <sup>1</sup>	-	16,5	5	6	6
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	0,0 <sup>2</sup>	-	15,0			
	BRITA	-	9,0 <sup>2</sup>	-	9,0			
AÇO	AÇO	10,0 <sup>1</sup>	11,0 <sup>1</sup>	-	10,5	0	0	0
CONCRETO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	28,0 <sup>1</sup>	-	16,5	5	6	6
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	0,0 <sup>2</sup>	-	15,0			
	BRITA	-	9,0 <sup>2</sup>	-	9,0			
AÇO	AÇO	10,0 <sup>1</sup>	11,0 <sup>1</sup>	-	10,5	0	0	0
FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	-	-	15	15,0	-	-	100
	COMPENSADO	-	-	15	15,0			
ALVENARIA DE TIJOLO	TIJOLO 9x14x19cm	5,0 <sup>1</sup>	15,0 <sup>2</sup>	-	15,0	0	0	0
ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	28,0 <sup>1</sup>	-	16,5	30	18	24
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	22,0 <sup>1</sup>	-	18,5			
CHAPISCO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	11,8 <sup>2</sup>	-	11,8	-	21	21
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	22,0 <sup>1</sup>	-	18,5			
EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	9,5 <sup>2</sup>	-	9,5	-	90	90
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	22,0 <sup>1</sup>	-	18,5			
	CAL HIDRATADA	-	6,0 <sup>2</sup>	-	6,0			
EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	5,0 <sup>1</sup>	19,0 <sup>1</sup>	-	19,0	-	90	90
	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	22,0 <sup>1</sup>	-	18,5			
	CAL HIDRATADA	-	3,5 <sup>2</sup>	-	3,5			
REBOCO	AREIA	15,0 <sup>1</sup>	22,0 <sup>1</sup>	-	18,5	-	13	13
	CAL HIDRATADA	-	18,0 <sup>1</sup>	-	18,0			
MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	-	-	15	15,0	-	-	0
TELHAS	TELHA FIBROCIMENTO	-	-	10	10,0	-	-	0

<sup>1</sup> Perdas genéricas

<sup>2</sup> Perdas específicas por serviço



### APÊNDICE C – Conversão de unidades da residência em LSF para kg (massa)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE ADQUIRIDA	PESO ESPECÍFICO (kg/m <sup>2</sup> )	QTDE ADQUIRIDA (kg)	QTDE APLICADA	QTDE APLICADA (kg)	QTDE PERDAS (kg)	
ESTRUTURA - RADIER E CALÇADA EXTERNA	LASTRO	BRITA (m <sup>3</sup> )	4,00	1.650,00	6.600,00	2,50	4.125,00	<b>2.475,00</b>	
	FÔRMAS (m <sup>2</sup> )	MADEIRA SERRADA (m <sup>3</sup> )	0,39	600,00	236,25	-	236,25	<b>236,25</b>	
	AÇO (kg)	AÇO (kg)	382,05	-	382,05	378,66	378,66	<b>3,39</b>	
	CONCRETO USINADO (m <sup>3</sup> )	CIMENTO (kg)		4.942,08	-	4.942,08	4.576,00	4.576,00	<b>366,08</b>
		AREIA (m <sup>3</sup> )		9,36	1.515,00	14.182,58	8,67	13.132,02	<b>1.050,56</b>
		BRITA (m <sup>3</sup> )		9,93	1.650,00	16.387,27	9,20	15.173,40	<b>1.213,87</b>
PAREDES	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO (kg)	949,93	-	949,93		926,82	<b>23,11</b>	
	FECHAMENTO EXTERNO	PANEL H - SMARTSIDE 4880x1200x11,1mm (chapa)	17,00	7,56	764,69		736,25	<b>28,44</b>	
	FECHAMENTO INTERNO	GESSO ACARTONADO 1200x2400x12,5mm (chapa)	46,00	9,50	1.258,56		1.235,47	<b>23,09</b>	
		OSB 1200x2400x9,5mm (chapa)	11,00	6,08	192,61		185,44	<b>7,17</b>	
	ISOLAMENTO	LÃ DE VIDRO (m <sup>2</sup> )	150,00	7,50	120,00	120,00	96,00	<b>24,00</b>	
COBERTURA	PERFIL DE AÇO	AÇO GALVANIZADO (kg)	406,53	-	406,53		396,64	<b>9,89</b>	
	SUBCOBERTURA	OSB TECHSHIELD 1200x2400x11,1mm (chapa)	29,00	7,08	591,60		586,57	<b>5,03</b>	
	COBERTURA	TELHA SHINGLE (m <sup>2</sup> )	89,90	10,06	904,80	85,30	858,50	<b>46,30</b>	

## APÊNDICE D – Cálculo completo das quantidades de material para a residência em alvenaria convencional

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE PARCIAL NECESSÁRIA	CONSUMO	QTDE NECESSÁRIA	PERDAS MATERIAL (%)	QTDE PERDAS PARCIAL 1	PERDAS PRODUTO (%)	QTDE PERDAS PARCIAL 2	QTDE PERDAS POR ENTULHO FINAL	QTDE TOTAL (NECESSÁRIA + ENTULHO)
	PRODUTO	MATERIAL									
SUPERESTRUTURA - ESTACAS	CONCRETO (m³)	CIMENTO (kg)	741,132	1,08	800,423	16,5	132,070	5,5	44,023	176,093	976,516
		AREIA (m³)	2,432		2,626	15,0	0,394		0,144	0,538	3,165
		BRITA (m³)	2,205		2,381	9,0	0,214		0,131	0,345	2,727
	ARMADURA (kg)	AÇO (kg)	52,920	1,00	52,920	10,5	5,557	0,0	0,000	5,557	58,477
ESTRUTURA	CONCRETO (m³)	CIMENTO (kg)	6.946,292	1,08	7.501,995	16,5	1.237,829	5,5	412,610	1.650,439	9.152,434
		AREIA (m³)	17,985		19,424	15,0	2,914		1,068	3,982	23,405
		BRITA (m³)	17,544		18,948	9,0	1,705		1,042	2,747	21,695
	ARMADURA (kg)	AÇO (kg)	1.941,111	1,00	1.941,111	10,5	203,817	0,0	0,000	203,817	2.144,927
	FÔRMAS (m²)	MADEIRA SERRADA (m³)	5,611	1,00	5,611	15,0	0,842	100,0	5,611	6,452	6,452
		COMPENSADO (m²)	1,567		1,567	15,0	0,235		1,567	1,803	1,803

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE NECESSÁRIA	PERDAS MATERIAL (%)	QTDE PERDAS PARCIAL 1	PERDAS PRODUTO (%)	QTDE PERDAS PARCIAL 2	QTDE PERDAS POR ENTULHO FINAL	QTDE TOTAL (NECESSÁRIA + ENTULHO)
	PRODUTO	MATERIAL							
PAREDES DE VEDAÇÃO	ALVENARIA (m²)	TIJOLO (peças)	3.981,333	15,0	597,200	0,0	0,000	597,200	4.578,533
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO (m³)	CIMENTO (kg)	444,675	16,5	73,371	24,0	106,722	180,093	624,769
		AREIA (m³)	1,139	18,5	0,211		0,273	0,484	1,623
REVESTIMENTOS	CHAPISCO (m³)	CIMENTO (kg)	580,478	11,8	68,496	21,0	121,900	190,397	770,875
		AREIA (m³)	1,457	18,5	0,270		0,306	0,576	2,033
	EMBOÇO EXTERNO (m³)	CIMENTO (kg)	725,598	9,5	68,932	90,0	653,038	721,970	1.447,568
		AREIA (m³)	3,643	18,5	0,674		3,279	3,953	7,595
		CAL HIDRATADA (kg)	725,598	6,0	43,536		653,038	696,574	1.422,172
	EMBOÇO INTERNO (m³)	CIMENTO (kg)	434,762	19,0	82,605	90,0	2,150	84,755	519,516
		AREIA (m³)	2,914	18,5	0,539		2,623	3,162	6,076
		CAL HIDRATADA (kg)	434,762	3,5	15,217		391,285	406,502	841,264
	REBOCO (m³)	AREIA (m³)	1,117	18,5	0,207	13,0	0,145	0,352	1,469
CAL HIDRATADA (kg)		290,239	18,0	52,243	37,731		89,974	380,213	

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE NECESSÁRIA	PERDAS MATERIAL (%)	QTDE PERDAS	QTDE TOTAL
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA (m³)	2,442	15	0,366	2,808
	TELHAS	TELHA FIBROCIMENTO (m²)	93,610	10	9,361	102,971

## APÊNDICE E – Conversão de unidades da residência em alvenaria para kg (massa)

APLICAÇÃO	DESCRIÇÃO		QTDE TEÓRICA NECESSÁRIA	QTDE PERDAS	PESO ESPECÍFICO	QTDE TEÓRICA NECESSÁRIA (kg)	QTDE PERDAS POR ENTULHO (kg)
SUPERESTRUTURA - ESTACAS	CONCRETO	CIMENTO	800,423	176,093	-	800,423	176,093
		AREIA	2,626	0,538	1515	3.978,911	815,677
		BRITA	2,381	0,345	1650	3.929,370	569,759
	ARMADURA	AÇO	52,920	5,557	-	52,920	5,557
ESTRUTURA	CONCRETO	CIMENTO	7501,995	1650,439	-	7.501,995	1.650,439
		AREIA	19,424	3,982	1515	29.426,745	6.032,483
		BRITA	18,948	2,747	1650	31.263,600	4.533,222
	ARMADURA	AÇO	1941,111	203,817	-	1.941,111	203,817
	FÔRMAS	MADEIRA SERRADA	5,611	6,452	600	3.366,507	3.871,483
		COMPENSADO	1,567	1,803	550	862,102	991,417
PAREDES	ALVENARIA	TIJOLO 9x14x19cm	3981,333	597,200	2,2	8.758,933	1.313,840
	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	CIMENTO	444,675	180,093	-	444,675	180,093
		AREIA	1,139	0,484	1515	1.725,735	733,438
REVESTIMENTOS	CHAPISCO	CIMENTO	580,478	190,397	-	580,478	190,397
		AREIA	1,457	0,576	1515	2.207,610	872,006
	EMBOÇO EXTERNO	CIMENTO	725,598	721,970	-	725,598	721,970
		AREIA	3,643	3,953	1515	5.519,024	5.988,141
		CAL HIDRATADA	725,598	696,574	-	725,598	696,574
	EMBOÇO INTERNO	CIMENTO	434,762	84,755	-	434,762	84,755
		AREIA	2,914	3,162	1515	4.415,219	4.790,513
		CAL HIDRATADA	434,762	406,502	-	434,762	406,502
	REBOCO	AREIA	1,117	0,352	1515	1.691,897	532,948
		CAL HIDRATADA	290,239	89,974	-	290,239	89,974
COBERTURA	MADEIRAMENTO	MADEIRA SERRADA	2,442	0,366	600	1.465,200	219,780
	TELHAS	TELHA FIBROCIMENTO	93,610	9,361	18	1.684,980	168,498

## APÊNDICE F – EE e emissões de CO<sub>2</sub> nos materiais

MATERIAL	EE NO MATERIAL (MJ/kg)	kgCO <sub>2</sub> / kg DE MATERIAL
AÇO	35,00 <sup>1</sup>	2,73 <sup>1</sup>
AREIA	0,50 <sup>1</sup>	0,03 <sup>1</sup>
BRITA	1,50 <sup>1</sup>	0,10 <sup>1</sup>
CAL HIDRATADA	3,00 <sup>1</sup>	0,87 <sup>1</sup>
CIMENTO	4,50 <sup>1</sup>	0,79 <sup>1</sup>
FIBROCIMENTO	6,00 <sup>1</sup>	0,72 <sup>1</sup>
GESSO ACARTONADO	6,75 <sup>2</sup>	0,39 <sup>2</sup>
LÃ DE VIDRO	28,00 <sup>2</sup>	1,35 <sup>2</sup>
MADEIRA COMPENSADA	8,00 <sup>1</sup>	0,41 <sup>1</sup>
MADEIRA SERRADA	2,00 <sup>1</sup>	0,11 <sup>1</sup>
OSB	4,81 <sup>3</sup>	0,28 <sup>3</sup>
PANEL SMARTSIDE	13,11 <sup>3</sup>	0,75 <sup>3</sup>
PERFIL DE AÇO	35,00 <sup>1</sup>	2,73 <sup>1</sup>
TELHA SHINGLE	11,30 <sup>2</sup>	0,30 <sup>2</sup>
TIJOLO CERÂMICO	5,00 <sup>1</sup>	0,17 <sup>1</sup>

Fontes: (1) Tavares e Bragança (2016); (2) ICE v2.0 (2011); (3) Monich (2012). Elaboração própria.