

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação do Ciclo de Vida e simulação  
termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do  
Programa Minha Casa Minha Vida**

**Gustavo Longaray Moraga**

Porto Alegre  
2017

GUSTAVO LONGARAY MORAGA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E SIMULAÇÃO  
TERMOENERGÉTICA EM UNIDADE HABITACIONAL  
UNIFAMILIAR DO PROGRAMA MINHA CASA MINHA  
VIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2017

### CIP - Catalogação na Publicação

Moraga, Gustavo Longaray  
Avaliação do Ciclo de Vida e simulação  
termoenergética em unidade habitacional unifamiliar  
do Programa Minha Casa Minha Vida / Gustavo Longaray  
Moraga. -- 2017.  
161 f.

Orientadora: Ana Paula Kirchheim.  
Coorientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2017.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Simulação  
termoenergética. 3. Construção Civil. 4. Impacto  
Ambiental . 5. Habitação Social. I. Kirchheim, Ana  
Paula, orient. II. Passuello, Ana Carolina  
Badalotti, coorient. III. Título.

GUSTAVO LONGARAY MORAGA

# **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA EM UNIDADE HABITACIONAL UNIFAMILIAR DO PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelas professoras orientadoras e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 06 de Abril de 2017

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Kirchheim  
Dr<sup>a</sup>. pela UFRGS  
orientadora

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Carolina Badalotti Passuello  
Dr<sup>a</sup>. pela Universidade Rovira i Virgili  
co-orientadora

Prof. Carlos Torres Formoso  
Coordenador do PPGECC/UFRGS

## **BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cássia Maria Lie Ugaya (UTFPR)  
Dr<sup>a</sup>. pela Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Maurício Carvalho Ayres Torres (IMED)  
Dr. pela Universidade Politécnic da Catalunha (Espanha)

Prof. Dr. Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)  
Dr. pela Universidade de Sheffield (Inglaterra)

It pays to keep an open mind, but not so  
open that your brain falls out  
*Carl Sagan*

Dedico este trabalho à minha família  
por toda compreensão e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

À Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro que possibilitou a dedicação para o desenvolvimento deste mestrado.

Agradeço a disponibilidade e dedicação das minhas orientadoras Ana Paula e Ana Carolina, que além da amizade e dos conselhos, solidificam a afirmação do astrônomo Carl Sagan que diz, ciência é mais do que um corpo de conhecimento, é paixão pelo que se faz. Agradeço também aos professores do NORIE, Ângela, Bonin, Denise, Formoso, Isatto, Luciani e Sattler que sempre estiveram disponíveis para ajudar e contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos professores da banca de qualificação que ajudaram diretamente nas definições dos rumos da dissertação, também aos professores da banca de defesa pelas correções e sugestões. Especialmente agradeço a contribuição do Maurício, que mesmo antes da definição do tema de mestrado me encorajou pela busca de novos desafios, dentro e fora da universidade.

Igualmente agradeço a atenção dada pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), que gentilmente forneceu alguns dos dados utilizados nessa pesquisa.

Aos amigos do NORIE que deixaram os dias de trabalho muito mais leves e bonitos, principalmente a minha turma de mestrado em materiais de construção, Priscila, Carol, Bruno, Thais e Gabriela. Além deles, a Michele cujas conversas influenciaram muito o desenvolvimento da dissertação. E todos os amigos e colegas que fiz durante esse tempo, Michele, Carina, Silvia, Fernanda, Erich, Eugênio, Muriel, Marlon, Natalia, Thiago, Lucília, Airton e vários outros que de alguma maneira contribuíram para esse trabalho.

Agradeço a colaboração e dedicação dos bolsistas de graduação que navegaram juntos no mar de ACV. Foi uma honra ter crescido junto com vocês, Igor, Arthur, Cristiane, Eduardo, Bruno.

Aos meus amigos Perivaldo e Matheus que me ajudaram e aconselharam nos momentos mais críticos e improváveis.

À minha Família pelo amor incondicional, sempre.

## RESUMO

MORAGA, G. L. **Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Os edifícios são responsáveis por importantes impactos ambientais, principalmente, pelo seu longo ciclo de vida. Neste sentido, as edificações são potenciais redutoras de danos ambientais, já que as decisões sobre seu impacto podem ser feitas em projeto. No Brasil, o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) produziu mais de dois milhões de unidades de habitação, sendo um importante gerador de impactos. Foram realizadas pesquisas avaliando impactos sociais, urbanísticos e arquitetônicos do PMCMV, entretanto ainda existe escassez de estudos avaliando os impactos ambientais dessas edificações. Esta pesquisa utiliza a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar os impactos ambientais potenciais de uma casa do PMCMV. A metodologia considera três fases, com referência no estudo de caso de uma casa térrea situada na região metropolitana de Porto Alegre (sul do Brasil). A Fase 1 quantifica o uso de energia através de simulação termoenergética, testando envoltórias alternativas em comparação à original. A Fase 2 realiza a ACV preliminar, para verificar as contribuições de impacto mais relevantes em dois modelos selecionados. A Fase 3 desenvolve a ACV final com dados adaptados para a realidade brasileira. Os resultados demonstram que os impactos operacionais da edificação são os mais importantes ao longo do ciclo de vida de 50 anos, para as duas alternativas de envoltória avaliadas. Mesmo assim, os requerimentos incorporados da edificação podem representar impactos importantes, ultrapassando 40% em categorias como aquecimento global e depleção da camada de ozônio. O transporte de materiais de construção e matérias primas é um dos maiores causadores dos impactos incorporados. Além desse, a recorrência de manutenções mostra-se importante, assim como a durabilidade dos materiais de construção. A aplicação da ferramenta de ACV confirma sua importância como instrumento para a tomada de decisão, identificando processos mais relevantes na qualificação ambiental de edificações.

**Palavras-chave:** *Avaliação do Ciclo de Vida, habitação social, simulação termoenergética, impacto ambiental, construção civil, edificação residencial, ISO 14040.*



## ABSTRACT

MORAGA, G. L. **Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Buildings are responsible for expressive environmental impacts, especially for its long life-cycle. In fact, buildings are important potential reducers of environmental damages, because decisions concerning its future impacts can be made at design stage. In Brazil, “My House My Life” program (MHMLP) produced more than two million dwellings, generating significant impacts. Some of MHMLP impacts were already addressed, such as social, urban and architectural, however there is a lack on environmental impacts studies focused on these buildings. This research applies Life Cycle Assessment method to quantify potential environmental impacts of a MHMLP dwelling. Methodology considered three phases, using as reference the case study of a single-story house located at the metropolitan area of Porto Alegre (southern Brazil). Phase 1 quantifies energy use through thermal dynamic simulations, considering different encloses types in comparison to the original option. Phase 2 applies streamlined Life Cycle Assessment (LCA) framework to evaluate the most important contributions to the environmental impacts of the two previously selected models. In phase 3, LCA was developed considering data regionalization and adaptation to the Brazilian context. Results show that operational impacts are the most important ones on the 50 years dwelling life cycle, for both evaluated alternatives. Nevertheless, embodied impacts can represent more than 40% of total global warming and ozone depletion potential impacts. Transportation of raw and construction materials is one of the most important contributors to embodied impacts. Furthermore, recurrent embodied impacts are important, as well as construction materials durability. LCA application validates its importance as a framework to support decision-making, identifying hotspots on buildings environmental qualification.

**Keywords:** *Life cycle assessment, social housing, thermal dynamic simulation, environmental impact, civil construction, dwelling house, ISO 14040.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA	19
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	21
1.3	OBJETIVOS	24
1.4	DELIMITAÇÕES	24
1.5	ESTRUTURA DA PESQUISA	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFÍCIOS	27
2.2	CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES	29
2.2.1	Eficiência energética em edificações residenciais	32
2.2.2	Simulações termoenergéticas	36
2.3	ACV EM EDIFICAÇÕES	37
2.4	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	41
2.4.1	Definição de objetivo e escopo	41
2.4.2	Análise de inventário de ciclo de vida	44
2.4.3	Avaliação de impactos do ciclo de vida	47
2.4.4	Interpretação	48
2.5	PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA	48
2.6	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO	49
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
3.1	DEFINIÇÕES DO ESTUDO DE CASO	52
<b>4</b>	<b>FASE 1 – SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA</b>	<b>56</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO MÉTODO	56
4.1.1	Caracterização climática de Porto Alegre	57
4.1.2	Sistemas construtivos	58
4.1.3	Esquemas de ocupação, iluminação e equipamentos	60
4.1.4	Sistema de condicionamento térmico artificial	62
4.2	RESULTADOS	64
4.2.1	Simulação termoenergética para as cinco envoltórias	65
4.3	CONCLUSÃO DA FASE 1	67
<b>5</b>	<b>FASE 2 – ESTUDO PRELIMINAR DE ACV</b>	<b>68</b>
5.1	DEFINIÇÃO DO MÉTODO	68
5.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	71

5.2.1	Requerimentos incorporados .....	72
5.2.2	Requerimentos operacionais .....	73
5.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA.....	76
5.4	RESULTADOS.....	79
5.4.1	Sistemas construtivos .....	82
5.5	CONCLUSÃO DA FASE 2.....	86
<b>6</b>	<b>FASE 3 – ESTUDO FINAL DE ACV.....</b>	<b>88</b>
6.1	DEFINIÇÃO DO MÉTODO .....	88
6.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	90
6.2.1	Requerimentos incorporados .....	90
6.2.1.1	Concretos, argamassa, aglomerantes e agregados.....	95
6.2.1.2	Blocos e telhas cerâmicas .....	99
6.2.1.3	Aço carbono e aço galvanizado.....	99
6.2.1.4	Esquadrias de alumínio .....	101
6.2.1.5	Gesso em pó e acartonado .....	102
6.2.1.6	Tintas PVA e Acrílica .....	103
6.2.1.7	Transporte.....	104
6.2.1.8	Fim de vida .....	105
6.3	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	106
6.3.1	Impactos incorporados iniciais .....	110
6.3.2	Impactos incorporados recorrentes .....	118
6.3.3	Comparação com resultados da ACV preliminar .....	121
6.3.4	Discussão com outros autores.....	123
6.4	CONCLUSÃO DA FASE 3.....	130
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>134</b>
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	137
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>149</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>151</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica por setor desconsiderando perdas de geração e transmissão (adaptado de EPE, 2015). .....	22
Figura 2 - Emissões do ciclo de vida dos edifícios (adaptado de Ibn-Mohammed et al., 2013) .....	29
Figura 3 - Energia em todo o ciclo de vida de um edifício (adaptado de Dixit et al., 2010) .....	31
Figura 4 – Energia mínima de um sistema é resultado da interação entre energia incorporada e energia operacional (adaptado de Gool, 1980 apud Hammond, 2007) .....	32
Figura 5 - Consumo energético residencial dos EUA em porcentagem relativa no ano de 2013 com projeção para 2040 (adaptado de U.S.DOE, 2015). .....	33
Figura 6 - Consumo final de energia elétrica residencial brasileira (adaptado de PROCEL, 2007) .....	33
Figura 7 - Evolução de índices macroeconômicos no período de 2000 a 2016.....	34
Figura 8 - Sistema de produto em ACV do berço ao túmulo, demonstrando um processo elementar (adaptado de HAUSCHILD, 2005) .....	42
Figura 9 - Sistema de produto delimitado pela fronteira de sistema (fonte: ABNT, 2009a) .....	44
Figura 10 – Fronteira do sistema, em azul, delimitando quais processos serão analisados dentro da cadeia de suprimentos do produto. A exclusão de processos que podem ser importantes cria o chamado erro de truncamento (adaptado de SIMMONS; DEY, 2008). .....	46
Figura 11 - Diagrama do programa experimental em ordem sequencial, os resultados de uma fase são definidores da fase seguinte.....	51
Figura 12 - Planta baixa do estudo de caso .....	53
Figura 13 - Esquema demonstrando os sistemas construtivos do estudo de caso.....	54
Figura 14 - Diagrama do programa experimental da Fase 1 .....	56
Figura 15 – Carta psicrométrica para 8760h do ano em Porto Alegre .....	58
Figura 16 - Esquema de ocupação do dormitório 1.....	60
Figura 17 - Esquema de ocupação do dormitório 2.....	61
Figura 18 - Esquema de ocupação Sala / Cozinha .....	61
Figura 19 - Esquema de iluminação da residência.....	62
Figura 20 - Esquema de utilização de equipamentos elétricos .....	62

Figura 21 - Esquema de funcionamento do sistema PTHP (fonte: LBNL, 2004) .....	63
Figura 22 – Média mensal do consumo de energia para o m <sup>2</sup> de edificação durante o uso no período de 50 anos para diversos autores (kWh.(m <sup>2</sup> .mês) <sup>-1</sup> ).....	64
Figura 23 - Contribuição de cada sistema para o consumo energético das diferentes envoltórias analisadas para toda residência (kWh . ano <sup>-1</sup> ) .....	66
Figura 24 - Contribuição mensal do consumo de climatização em todas as envoltórias analisadas para toda residência (kWh . mês <sup>-1</sup> ).....	66
Figura 25 - Sistema de produto e fronteiras do sistema da Fase 2, os sistemas de produto detalhados da construção e operação são apresentados posteriormente. ....	69
Figura 26 - Sistema de produto e fronteiras do sistema na Fase 2 da etapa de construção da edificação .....	70
Figura 27 - Sistema de produto e fronteiras do sistema na Fase 2 da etapa de operação da edificação .....	71
Figura 28 - Análise das temperaturas de bulbo seco médias e absolutas mensais com a faixa de conforto térmico mensal e anual calculada. ....	75
Figura 29 - Contribuições totais dos projetos analisados, normalizados pelos impactos da construção com paredes de concreto ParC (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico). ....	79
Figura 30 - Contribuições dos impactos incorporados iniciais e recorrentes do sistema de paredes de concreto (ParC) e alvenaria (ParA), normalizados pelos impactos da casa ParC (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico).....	80
Figura 31 - Contribuições incorporadas iniciais e recorrentes dos sistemas construtivos no modelo com paredes de concreto (ParC). ....	81
Figura 32 - Contribuições relativas incorporadas e recorrentes dos sistemas construtivos no modelo de paredes de alvenaria ParA.....	82
Figura 33 - Contribuições relativas para o sistema de fundação tipo <i>radier</i> .....	83
Figura 34 - Contribuições relativas para o sistema de paredes de concreto no modelo ParC. ....	83
Figura 35 - Contribuições relativas para o sistema de paredes de alvenaria ParA.....	84
Figura 36 - Contribuições relativas para o sistema de forro. ....	85
Figura 37 - Contribuições relativas para o sistema de paredes telhado.....	85

Figura 38 – Sistema de produto e fronteiras do sistema da Fase 3, os sistemas de produto detalhados da construção e operação são apresentados posteriormente. ....	89
Figura 39 – Sistema de produto e fronteira do sistema da Fase 3 na etapa de construção da edificação. ....	89
Figura 40 - Sistema de produto e fronteira do sistema da Fase 3 na etapa de operação da edificação. ....	90
Figura 41 - Resultados gerais para todos cenários do modelo com parede de concreto (ParC) e do modelo com parede de alvenaria, normalizados pelo modelo ParC C1. (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico). ....	108
Figura 42 - Resultados de impacto incorporado inicial, recorrente e de fim de vida para todos cenários da casa ParC, normalizados pelo cenário base Casa ParC C1.....	109
Figura 43 - Impactos incorporados iniciais por sistema construtivo avaliado para (a) Depleção de recursos abióticos fósseis (ADP f) e (b) potencial de mudança climática no horizonte de 100 anos (GWP).....	110
Figura 44 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para Depleção de recursos abióticos não fósseis (ADP nf) - (a) ADP nf, geral, e (b) ADP nf, sem apresentar os resultados para aço galvanizado. ....	113
Figura 45 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para (a) Acidificação potencial (AP) e (b) Eutrofização potencial (EP).....	115
Figura 46 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para (a) Depleção potencial da camada de Ozônio (ODP) e (b) Criação potencial de ozônio fotoquímico (POCP).....	117
Figura 47 - Impactos incorporados totais do sistema de parede de concreto para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de parede de concreto com manutenção C1. ....	119
Figura 48 - Impactos incorporados totais do sistema de parede de alvenaria para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de parede de alvenaria com manutenção C1. ....	119
Figura 49 - Impactos incorporados totais do sistema de forro para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de forro com cenário de manutenção C1. ....	120
Figura 50 - Impactos incorporados totais do sistema de cobertura para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de cobertura com cenário de manutenção C1. ....	121
Figura 51 - Impactos incorporados totais do sistema de esquadrias para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de esquadrias com cenário de manutenção C1. ....	121

Figura 52 – Comparação dos impactos incorporados totais dos dois modelos de casa analisados utilizando dados internacionais (Fase2) e adaptados (Fase 3). Ambos modelos utilizam o mesmo critério de manutenções, cenário C1. ....	122
Figura 53 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para ADP f (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis), ACVe (Análise de ciclo de vida energético, APD nf (Depleção de recursos abióticos, não fósseis), ADP (Depleção de recursos abióticos, fósseis e não fósseis).....	124
Figura 54 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para AP (Potencial de Acidificação) e EP (Potencial de Eutrofização).....	126
Figura 55 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para GWP (Potencial de mudança climática, IPCC 2007, horizonte de 100 anos) e CO <sub>2</sub> (Inventário de ciclo de vida). A figura da esquerda apresenta os resultados completos dos autores, a figura da direita não apresenta o resultado de impacto operacional com uso de energia elétrica para o caso do Reino Unido, Cuéllar-Franca e Azapagic (2012).....	128
Figura 56 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para ODP (Potencial de depleção de ozônio estratosférico) e POCP (Potencial de criação de ozônio fotoquímico). ....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas aplicadas em cada uma das Fases do PMCMV e subsídio relacionado (adaptado de AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015; ROLNIK et al., 2015; BRASIL, 2017) .....	49
Tabela 2 - Inventário quantitativo de materiais de construção .....	55
Tabela 3 - Composição e transmitância térmica utilizadas no sistema de cobertura ...	59
Tabela 4 - Composição e transmitância térmica utilizadas no sistema de paredes .....	59
Tabela 5 - Transmitância térmica utilizada nos sistemas de fundação e esquadrias...	60
Tabela 6 - Inventário quantitativo de materiais de construção para parede de alvenaria (fonte: adaptado de 1 -Lafontaine et al. 2012b; e 2 - projeto fornecido pela construtora) .....	72
Tabela 7 - Vida Útil de Projeto (VUP) e número de substituições à serem consideradas na Fase 2 (fonte: adaptado de NBR 15.575-1) .....	72
Tabela 8 - Métodos de AICV utilizados (adaptado de CEN, 2013). .....	76
Tabela 9 - Cenários de recorrência de manutenções para o fator $NR_j$ com base EN 15978 a partir de dados normativos (NBR 15.575-1) e bibliográficos (TAVARES, 2006) para anos de VUP ou durabilidade. ....	91
Tabela 10 - Transporte de materiais da extração até a indústria. ....	93
Tabela 11 - Transporte de materiais da indústria até a distribuição. ....	93
Tabela 12 - Transporte de materiais da distribuição até o local da obra. ....	94
Tabela 13 - Composição de materiais para 1 m <sup>3</sup> de concretos e argamassas. ....	95
Tabela 14 - Resultado gerais para os dois modelos de casa e três cenários manutenções .....	107
Tabela 15 – Fluxos elementares representado >99% de impacto em ADP nf para a produção de 1kg de aço galvanizado. ....	113



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ACVCO<sub>2</sub> – Avaliação do Ciclo de Vida de CO<sub>2</sub>

ACVe – Análise do Ciclo de Vida Energético

ADP – Depleção de recursos abióticos

ADP f – Depleção de recursos abióticos, fósseis

ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis

AICV – Avaliação de impacto de Ciclo de Vida

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

AP – Potencial de Acidificação de solos e água

BEN – Balanço Energético Nacional

CTA – Conforto Térmico Adaptativo

EP – Potencial de Eutrofização

FDV – Fim de Vida

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GWP – Potencial de mudanças climáticas

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

NBR – Norma técnica Brasileira

ODP – Potencial de Depleção da Camada de Ozônio

POCP – Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico

PPM – Partes por milhão

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Automotores

PMCMV – Programa Minha Casa, Minha Vida

VOC – Composto Orgânico Volátil

VUP – Vida Útil de Projeto

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Uma das mais importantes agendas do mundo atual está relacionada a problemas ambientais. Estudos indicam que o clima global está mudando rapidamente e que essa mudança continuará com o passar do tempo (IPCC 2014; NASA, 2016). Nesse sentido, a construção civil é reconhecida como um dos setores responsáveis pela geração de importantes impactos ambientais, extração de recursos não renováveis e consumo de energia (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009; CABEZA et al., 2014). Então, são urgentes mudanças no paradigma do modelo de vida atual para que a humanidade possa viver em harmonia com o meio ambiente.

Desde a definição de sustentabilidade do Relatório de Brundtland, satisfazer as necessidades presentes sem comprometer necessidades de gerações futuras (BRUNDTLAND et al., 1987), o desenvolvimento sustentável tem avançado em diversas áreas, aprimorando e criando ferramentas capazes de tornar mais consistentes os processos de mitigação e adaptação frente aos impactos ambientais. Na escala das edificações, o desenvolvimento sustentável permeia diversas iniciativas que ajudam a mensurar a qualidade ambiental da construção. Essas iniciativas tornam-se importantes na medida que o setor de edificações é maior potencial redutor de emissões de gases de mudança climática no longo prazo com custos viáveis (UNEP, 2009).

Na América Latina, os edifícios são responsáveis pelo consumo de 21% da água tratada e 42% da energia elétrica, produzindo 25% do CO<sub>2</sub> e 65% dos resíduos urbanos (CESANO; RUSSELL, 2013). Nesse sentido, existem pesquisas indicando que o maior impacto em edificações está relacionado à sua operação. Mesmo assim, a etapa de construção é mensurável e pode ter impactos importantes (MARJABA; CHIDIAC, 2016). Além disso, as decisões na escolha dos materiais de construção podem influenciar diretamente os impactos ambientais relativos à operação das edificações (ZABALZA et al., 2013).

Muitas iniciativas foram desenvolvidas para avaliar o impacto ambiental dos edifícios, seus materiais de construção, componentes e sistemas, explorando, dessa forma, oportunidades para reduzir impactos (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Dentre elas, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em edificações e materiais de construção tem sido usada com bons resultados na construção civil para tomada de

decisões sobre os impactos gerados pelo setor (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009; CHAU; LEUNG; NG, 2015; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

Considerando o uso de edificações, o consumo energético é um dos agentes mais importantes na geração de impactos. Somente o uso de edifícios residenciais e comerciais participa com 70% de todo o consumo mundial de eletricidade (U.S.DOE, 2015). Segundo a publicação citada, grande parcela do consumo residencial ocorre por condicionamento artificial dos edifícios.

No Brasil, embora as características climáticas sejam distintas, o consumo energético devido ao uso de condicionamento térmico representou 20% do consumo residencial nacional, em 2005, segundo o último levantamento de Hábitos e Consumo de Energia Elétrica do Setor Residencial (PROCEL, 2007). Ainda que o estudo citado demonstre a baixa presença de aparelhos de condicionamento de ar em edificações de baixa renda, além da distância temporal, estudos mais recentes inferem a possibilidade de mudança nesse cenário (DAVIS; GERTLER, 2015; SIVAK, 2013). Segundo os autores citados, com o aumento de eventos climáticos extremos, pelo aquecimento global, e maior poder de compra de populações de menor renda, o uso de energia com aparelhos de condicionamento artificial em países em desenvolvimento, como o Brasil, poderá superar o dos EUA, que é o maior consumidor mundial com esse uso de energia.

As habitações sociais no Brasil foram amplamente incentivadas pelo Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). De 2009 até 2016, foram construídas aproximadamente 2,3 milhões de unidades habitacionais (BRASIL, 2016) e, embora o programa tenha sido recentemente ampliado, com novos limites de financiamento (BRASIL, 2017), pouca atenção governamental foi dada à participação do impacto ambiental e energético dessas habitações sociais.

Neste sentido, estratégias de mensuração de eficiência em edificações, como etiquetagem energética residencial, têm auxiliado na redução do consumo de energia em diversos países. Mas, embora a quantificação dos impactos operacionais seja muito importante, diversos autores (CABEZA et al., 2014; IBN-MOHAMMED et al., 2013; KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009; MARJABA; CHIDIAC, 2016; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009) afirmam que os impactos gerados pela produção do edifício, conhecidos como impactos incorporados, podem representar parcela significativa no ciclo de vida das edificações. Já em edificações energeticamente mais eficientes, a parcela da energia incorporada tende a ser tão importante, ou mais, que a energia operacional, devido aos materiais utilizados para aumento de isolamento ou

geração de energia (DIXIT et al., 2010; HAMMOND; JONES, 2008; SARTORI; HESTNES, 2007).

Mesmo que a energia incorporada por materiais de construção seja importante, ela não é levada em consideração na análise da eficiência energética de edifícios. Concomitante a este fato, diversos impactos ambientais da cadeia de produção das edificações são relevados, como por exemplo, emissões relacionadas com mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, formação de chuvas ácidas, ilhas de calor, entre outros. Todos esses impactos criam riscos potenciais ao meio ambiente, saúde humana e para a disponibilidade de recursos naturais, tornando necessários estudos que considerem estes impactos na avaliação de edificações.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

É de senso comum relacionar maiores níveis de isolamento térmico à maior economia de energia (RODRIGUES; FREIRE, 2014), porém frequentemente os impactos gerados por maiores taxas de isolamento e aumento de energia incorporada em materiais não são quantificados (RODRIGUES; FREIRE, 2014; TAVARES; LAMBERTS, 2006).

Estudos indicam que impactos incorporados da edificação, ou seja, aqueles utilizados na produção do edifício e seus sistemas, podem influenciar diretamente os impactos operacionais durante o ciclo de vida de uma edificação (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; SARTORI; HESTNES, 2007). Desses impactos, a energia incorporada em materiais pode representar de 9% a 46%, desde a construção, até a demolição de um edifício (BRIBIÁN; VALERO; ARANDA, 2011; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; TAVARES; LAMBERTS, 2006). Entretanto, existem informações insuficientes relativas à energia incorporada e à energia de uso no Brasil (TAVARES, 2006).

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015), ano base 2014, o setor residencial foi responsável pelo consumo de mais de 18% de toda a energia elétrica produzida no país, ficando atrás apenas do setor industrial (Figura 1). Neste sentido, tornam-se importantes as estratégias de mensuração e qualificação de eficiência energética residencial, como as propostas pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica).

O PBE Edifica, todavia, classifica as edificações segundo o consumo de energia durante a fase de uso, não considerando a energia que é incorporada em outros momentos,

como construção, manutenções e fim de vida. O uso energético incorporado em materiais e sistemas também influencia a demanda energética brasileira. Além disso, a escolha de materiais tem importante influência sobre o uso de energia durante a operação da edificação (IBN-MOHAMMED et al., 2013).

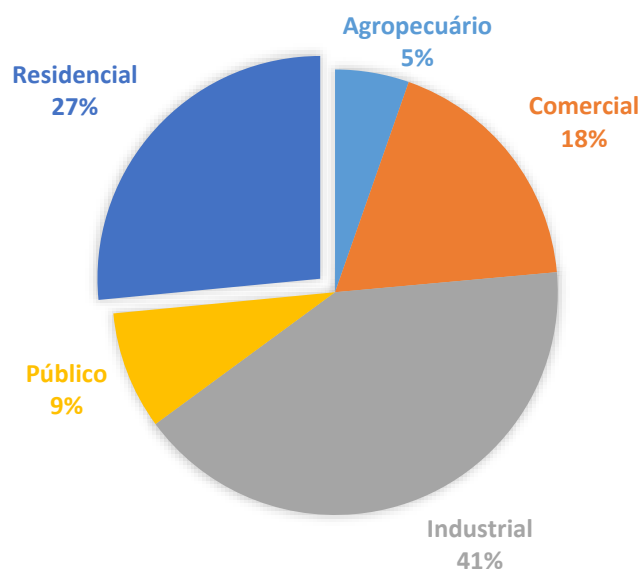


Figura 1 - Consumo de energia elétrica por setor desconsiderando perdas de geração e transmissão (adaptado de EPE, 2015).

No mesmo sentido, além do consumo energético, existem impactos ambientais associados à produção dos elementos de construção, que não são quantificados por etiquetas de eficiência energética. Estes impactos incorporados por materiais de construção, podem ser tão ou mais danosos ao meio ambiente e saúde humana do que o uso excessivo de energia primária. Mundialmente, além das significativas emissões de CO<sub>2</sub>, uma diversidade de outras emissões também está relacionada com as edificações, como por exemplo: halocarbonos (emitidos para produção de materiais de isolamento), clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs) e clorodifluorometanos (HCFCs) (para aplicações de resfriamento e refrigeração) (UNEP, 2009).

Diversas técnicas foram desenvolvidas para mensurar e quantificar impactos ambientais em edifícios, destacando-se a abordagem de ACV e de sistemas de certificação. Os sistemas de certificação são úteis, especialmente LEED e BREEAM, mas para tornar suas aplicações práticas e aumentar sua adoção, importantes lacunas e generalidades são necessárias (MARJABA; CHIDIAC, 2016). Segundo os últimos autores, a revisão de publicações dos últimos 27 anos sobre sustentabilidade em edificações permite

afirmar que ACV é o estado da arte na mensuração de sustentabilidade, sendo a única métrica que emprega método científico claro para esse fim.

A abordagem baseada em ACV pode dar suporte à seleção de alternativas tecnológicas com mínimo impacto ambiental em construções, desde a concepção, até a construção ou reforma (BRIBIÁN; VALERO; ARANDA, 2011). Além disso, diversos autores (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009; DIXIT et al., 2012; HERNANDEZ; KENNY, 2011) já demonstraram a importância e factibilidade de relacionar impactos incorporados por materiais e sistemas de construção com impactos da fase operacional de edificações.

No Brasil, embora existam levantamentos de inventário de energia e CO<sub>2</sub> incorporados e operacionais em edificações residenciais considerando todo o ciclo de vida (CALDAS, 2016; CALDAS et al., 2015; PAULSEN; SPOSTO, 2013; SILVA, 2012; TAVARES, 2006), foram encontradas poucas pesquisas utilizando a metodologia de ACV em residências, e apenas um artigo confrontando impactos operacionais e incorporados de maneira mais abrangente (EVANGELISTA; SOUZA; TORRES, 2014). Ao mesmo tempo, nenhuma pesquisa nacional integrou ACV com simulações termoenergéticas em edificações residenciais, considerando dados adaptados para o contexto nacional. Assim, tornam-se necessários estudos que possam mensurar os impactos do ciclo de vida de edificações residenciais brasileiras.

Para desenvolver a pesquisa, foi escolhida uma edificação de habitação de interesse social, tipo casa térrea, executada por uma construtora de atuação nacional para o PMCMV. Esse projeto foi repetido 714 vezes em 4 diferentes cidades do estado do Rio Grande do Sul<sup>1</sup>. Essa habitação representa o modelo mais simples atendido pelo programa habitacional, com área bruta de 44,5 m<sup>2</sup>, sendo composta por dois dormitórios, sala de estar/cozinha e banheiro.

O sistema construtivo do modelo analisado possui a particularidade de construção não convencional, com paredes estruturais em concreto armado. Dessa maneira, a construção será comparada com outro sistema de paredes mais convencionalmente utilizado em edificações deste porte. Assim, esta dissertação de mestrado se propõe a avaliar impactos ambientais de uma edificação do PMCMV, fazendo uso de ferramenta de ACV para comparar os impactos incorporados por materiais e operacionais pelo uso da edificação.

---

<sup>1</sup> Com informações de empresa de construção civil atuante em diversos estados brasileiros.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é **avaliar os impactos ambientais potenciais de uma unidade habitacional do programa Minha Casa Minha Vida situada na região metropolitana de Porto Alegre, comparando impactos incorporados pelos sistemas construtivos de fundação, paredes, cobertura e esquadrias com impactos operacionais ao longo do ciclo de vida.**

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) fazer uso de ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida para quantificar os impactos ambientais da edificação;
- b) adaptar dados de inventário do ciclo de vida de materiais de construção com informações que representem a realidade brasileira;
- c) fazer uso de ferramenta de simulação termoenergética para quantificar energia elétrica operacional da edificação;
- d) avaliar a relação entre os impactos causados por requerimentos incorporados e requerimentos operacionais, para uma edificação unifamiliar do PMCMV inserida na região metropolitana de Porto Alegre;
- e) comparar o resultado de impactos incorporados pelo sistema de paredes em concreto armado com o sistema de paredes em alvenaria, considerando sua influência no conforto ambiental dos usuários ao longo do ciclo de vida da edificação;
- f) comparar o resultado de impactos ambientais, com o inventário composto por dados internacionais não adaptados, e com inventário composto por dados adaptados para a realidade brasileira;
- g) verificar os sistemas e materiais de construção com impactos ambientais mais relevantes ao longo do ciclo de vida da edificação;
- h) comparar os resultados de ACV com aqueles realizados por autores em âmbito nacional e internacional.

### 1.4 DELIMITAÇÕES

Para a realização deste trabalho, no escopo de uma dissertação de mestrado, são definidas algumas delimitações:



- a) é feita a ACV apenas dos sistemas de fundação, paredes, cobertura e esquadrias de uma casa de 40,29 m<sup>2</sup> de área útil, do PMCMV;
- b) não são considerados trabalhos de terraplanagem e preparação do solo;
- c) não são analisados sistemas hidráulicos e elétricos;
- d) não são considerados revestimentos internos de piso;
- e) é considerada a cidade de Porto Alegre para as simulações de uso de energia e condicionamento artificial.

## 1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

A dissertação está organizada em sete capítulos, como segue:

O primeiro capítulo apresenta a introdução e contextualização ao tema de ACV e eficiência energética em edifícios, além de apresentar a justificativa do tema, os objetivos principal e secundários e as delimitações da pesquisa.

O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, apresenta uma abordagem crítica sobre o que é atualmente produzido nas áreas de Avaliação do Ciclo de Vida e Eficiência Energética em edifícios. Também são feitas considerações sobre o PMCMV.

Materiais e métodos são apresentados no terceiro capítulo, onde são caracterizados o estudo de caso e o programa experimental em três fases. As fases são interdependentes, dessa forma, os capítulos seguintes versam sobre método e resultado de cada fase.

O quarto capítulo apresenta a Fase 1 do programa experimental, em que é feita a simulação termoenergética da edificação estudada e de envoltórias alternativas. Dentre estas envoltórias é escolhida uma, como modelo alternativo à referência de estudo de caso.

O quinto capítulo apresenta a Fase 2, em que é realizada a ACV preliminar. Esta fase tem o objetivo de analisar quais os processos mais importantes no contexto da edificação, permitindo a identificação de *pontos de atenção* para adaptação de dados.

O sexto capítulo apresenta a Fase 3, que utiliza dados provenientes das fases anteriores, desenvolve e analisa os resultados da ACV final. No capítulo constam,

também, informações sobre o processo de adaptação de dados, além da apresentação e discussão dos resultados.

O capítulo 7 apresenta considerações finais sobre o trabalho e fases desenvolvidas, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFÍCIOS

O setor de edificações é considerado como importante consumidor de energia e recursos. Estudos afirmam que o setor é mundialmente responsável por 24% a 30% das extrações minerais (BRIBIÁN; VALERO; ARANDA, 2011), 20% a 40% do consumo energético (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008) e 33% das emissões de gases de efeito estufa (CHAU; LEUNG; NG, 2015). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido usada como ferramenta de avaliação ambiental de todo o ciclo de vida dos edifícios, desde sua origem (extração de matéria prima), até o seu fim de vida (disposição de resíduos de construção) (RODRIGUEZ, 2010).

De acordo com Heinonen (2016), existe amplo consenso de que a ACV fornece a visão mais adequada para avaliar impactos ambientais causados por edifícios. No Brasil, a normalização de ACV iniciou em 2001, com o lançamento da versão brasileira da ISO 14040 e, posteriormente, da ISO 14044 em 2004. A metodologia, embora tenha normas relativamente recentes, já possui aplicação consagrada (PASSUELLO, 2007). A NBR ISO 14040:2009 define que ACV tem condições de identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental, qualificar o nível de informação de tomadores de decisão, selecionar indicadores de desempenho relevantes em relação ao meio ambiente e subsidiar o *marketing*, como rotulagem ambiental.

Em uma ACV de edificação, três fases são passíveis de análise: construção, uso e fim de vida. Entretanto, autores divergem na metodologia de composição de cada uma das fases. É consensual que a fase de construção seja composta pela extração de matéria prima, transporte, manufatura e construção do edifício, enquanto que a fase de operação inclui a iluminação, condicionamento térmico, cocção e outros. Porém, a manutenção da edificação, com a substituição ou reparo de elementos construtivos ao longo do ciclo de vida, pode fazer parte da construção, como impacto incorporado (CABEZA et al., 2014; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010) ou integrando a fase de operação (RODRIGUEZ, 2010; TAVARES, 2006). A fase de fim de vida consensualmente inclui a demolição e o transporte para aterros ou centros de reciclagem.

Embora existam diferenças nos processos metodológicos, ambos podem ser considerados válidos, pois o impacto de toda a cadeia de produção do edifício é

considerado. Em uma proposta mais harmônica, é possível representar matematicamente a carga ambiental dos edifícios pela Equação 1, proposta por Chau, Leung e Ng (2015), em que a etapa de manutenção é dissolvida.

$$I = I_{\text{extração}} + I_{\text{manufatura}} + I_{\text{in situ}} + I_{\text{operação}} + I_{\text{demolição}} + I_{\text{deposição}} + I_{\text{reciclagem}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$I$ : representa o total de impacto do ciclo de vida da edificação;

$I_n$ : representa o impacto de cada uma das etapas, incluindo transporte.

Em análises energéticas de uma edificação, os impactos são normalmente divididos em incorporados e operacionais. A energia necessária para produzir os materiais de construção, bem como, para manutenções ou substituições é identificada como energia incorporada, enquanto que o consumo energético para funcionamento (operação) da edificação é identificado como energia operacional. Em relação ao fim de vida dos edifícios, novamente, autores divergem metodologicamente. Enquanto alguns defendem que energia incorporada deve considerar a demolição (DING, 2004; DIXIT et al., 2010), outros afirmam que a demolição deve ser considerada separadamente (CHAU; LEUNG; NG, 2015; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; SARTORI; HESTNES, 2007).

Com base na avaliação energética dos edifícios e conceito de carbono incorporado por materiais, Ibn-Mohammed et. al. (2013) definem como *emissões incorporadas* aquelas derivadas do consumo de energia direto, indireto, e pelas emissões de carbono na produção de materiais. Deste modo, as emissões incorporadas independem da forma de ocupação do edifício, enquanto que as operacionais estão diretamente relacionadas ao comportamento dos usuários. Ou seja, as emissões incorporadas são a soma das emissões iniciais, ou aquelas geradas na produção dos componentes, com as emissões recorrentes resultantes da manutenção, substituição e reparo dos componentes, como demonstrado pela Figura 2.

A Figura 2 destaca, inclusive, a diferenciação das decisões de projeto, daquelas que são relativas aos usuários ao longo do ciclo de vida. As decisões de projeto estão compreendidas no período de 2 a 3 anos, de emissões incorporadas iniciais. Estas, influenciam diretamente as emissões relacionadas com a operação ao longo do ciclo de vida de 40 a 60 anos das edificações, com iluminação e condicionamento artificial, e

emissões recorrentes, ligadas diretamente à durabilidade e substituição dos materiais de construção.

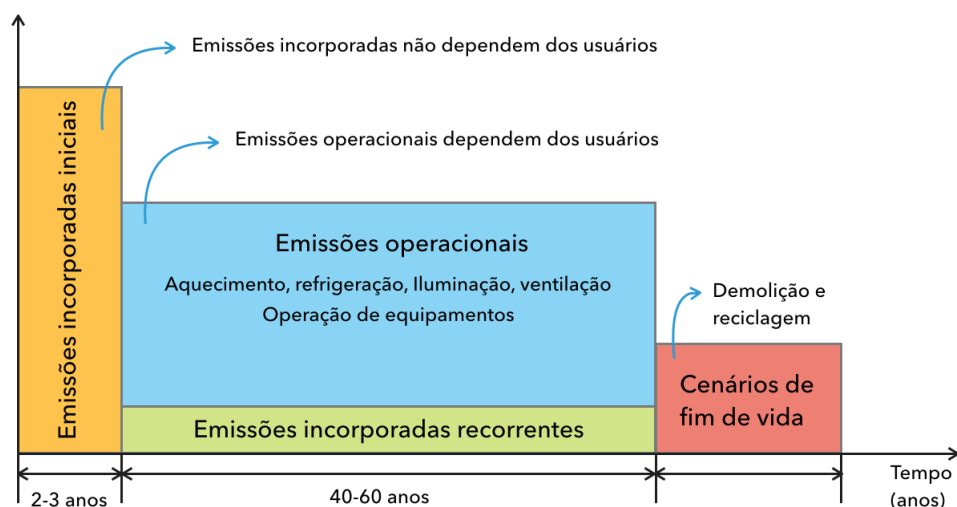


Figura 2 - Emissões do ciclo de vida dos edifícios (adaptado de Ibn-Mohammed et al., 2013)

De forma a definir o entendimento metodológico de que o uso de energia não é propriamente uma emissão, mas sim um impacto causado pela demanda de recursos energéticos que pode gerar emissões, esta pesquisa opta por convencionar o consumo energético e impactos ao meio ambiente como impactos totais. Os impactos totais são o resultado da soma de impactos incorporados iniciais, impactos incorporados recorrentes; impactos operacionais e impactos incorporados pelo fim do ciclo de vida.

Como um dos importantes requerimentos a causar impactos ao meio ambiente é aquele promovido pelo consumo energético, torna-se importante tecer considerações sobre o ciclo de vida energético das edificações. Principalmente, se for considerado que, uma das medidas de mitigação de impactos causados por edifícios está na promoção de estratégias de eficiência energética. No nível de política pública essa é uma das estratégias mais utilizadas por nações e recomendada por órgãos internacionais, como a ONU (UNEP, 2014). O item seguinte da dissertação tratará especificamente do ciclo de vida energético de edificações.

## 2.2 CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

A literatura sobre o ciclo de vida total energético das edificações é vasta. Diversos autores discorrem sobre o relacionamento entre energia incorporada e operacional (BRIBIÁN; VALERO; ARANDA, 2011; CABEZA et al., 2013; DIXIT et al., 2010; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; SARTORI; HESTNES, 2007). Além desses, no

Brasil, Tavares (2006) propõe uma metodologia para avaliação energética em edificações.

As pesquisas sobre impactos energéticos em edificações, porém, apresentam sensíveis diferenças metodológicas, principalmente no que se refere ao termo “energia incorporada”. O termo é tema de diversas interpretações, que podem levar a conclusões divergentes (DIXIT et al., 2010). Ramesh et al. (2010), propõem a definição como sendo o total energético utilizado na manufatura do edifício, ou seja, aquele relacionado a todos os materiais, instalações, transporte, construção e renovações de edifícios.

Adicionada à última definição, Ibn-Mohammed et al. (2013) assumem que a energia incorporada também inclua a fase de demolição do edifício, assim como a disposição dos resíduos. Já Hammond e Jones (2008) estabelecem a definição de que ela seria a soma de energias primárias, ou seja, sem transformação e até a fase de construção da obra, uma abordagem do berço ao portão.

Na mesma linha, Tavares (2006) estabelece que o ciclo de vida da edificação possui três fases, pré-operacional, operacional e pós-operacional. A primeira está relacionada com a construção da edificação e assume toda a energia incorporada por ela. Já, Dixit et al. (2010) propõem como incorporada toda a energia direta ou indireta, relacionada a todas as fases do ciclo de vida, que não sejam aquelas utilizadas exclusivamente em condicionamento térmico, iluminação e equipamentos, conforme é apresentado na Figura 3.

Comparada com a energia incorporada, a operacional é a maior responsável pela geração de impactos ao longo do ciclo de vida de uma edificação (DIXIT et al., 2012), possuindo uma definição mais consistente que a anterior. Isso principalmente porque seus primeiros estudos estão relacionados com as políticas públicas de economia de energia em edifícios no início da década de 1970 (BAYER et al., 2010). Recentemente, entretanto, pesquisas têm demonstrado a importância da energia incorporada no consumo total de edificações, principalmente com o aumento de edifícios energeticamente mais eficientes (DIXIT et al., 2012).

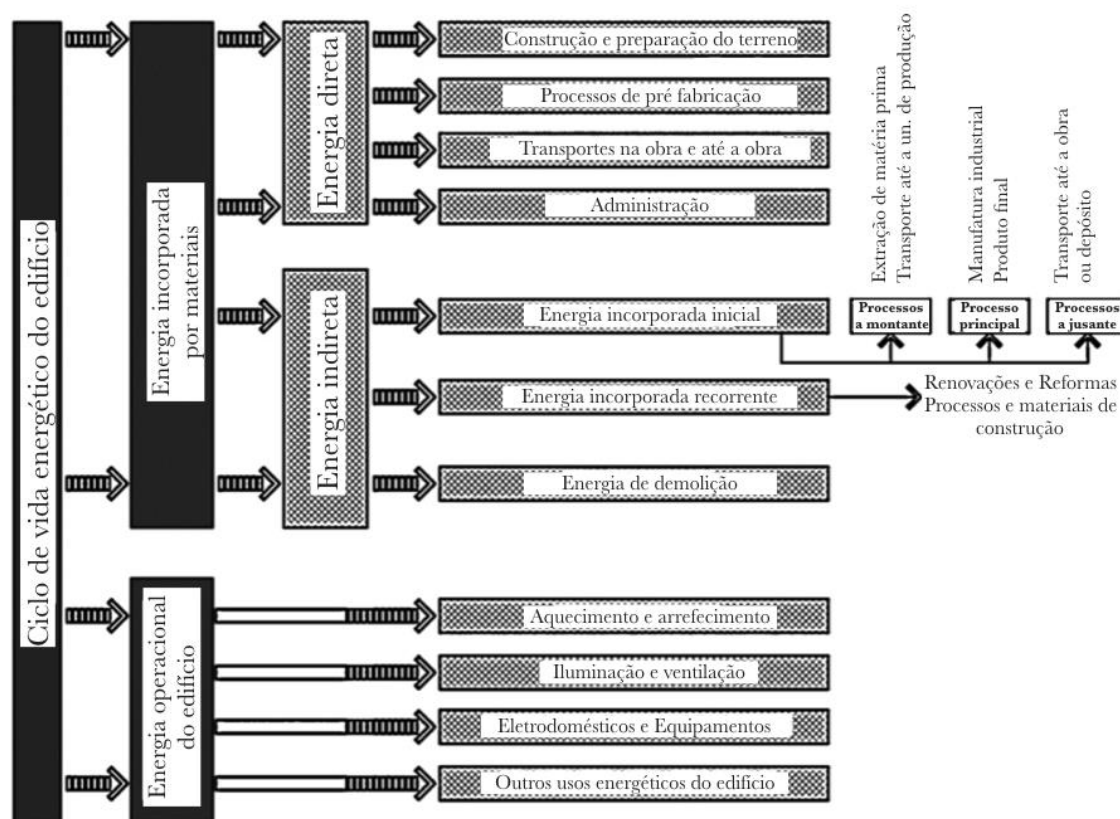


Figura 3 - Energia em todo o ciclo de vida de um edifício (adaptado de Dixit et al., 2010)

Existe um típico *trade-off* no processo de energia incorporada e de operação, em que a energia mínima em um sistema é alcançada por uma interação entre os requisitos operacionais e incorporados (GOOL, 1980 apud HAMMOND, 2007), como apresentado na Figura 4. Essa é, inclusive, uma das críticas mais contundentes a respeito dos edifícios com consumo nulo<sup>2</sup> da energia da rede de distribuição (CABEZA et al., 2013; DIXIT et al., 2012; SARTORI; HESTNES, 2007). Na contabilização de todo o ciclo de vida do edifício, a energia total consumida em edifícios passivos pode ser maior que a comparada a edifícios somente “mais eficientes”, e que dependem da rede de distribuição.

Conforme pode ser observado na Figura 4, o ponto ótimo de energia total de um produto, situa-se entre a interação de energia incorporada e energia de processo. O ponto de menor energia de processo, pela relação com a energia incorporada, pode apresentar energia total tão alta quanto os maiores pontos de energia de processo. Essa exemplificação teórica é consistente com a relação que pode haver entre a energia operacional e incorporada em edificações.

<sup>2</sup> O termo não possui tradução consistente na língua portuguesa, do inglês *Passive house*, *Net-zero* ou *Zero-energy buildings*.

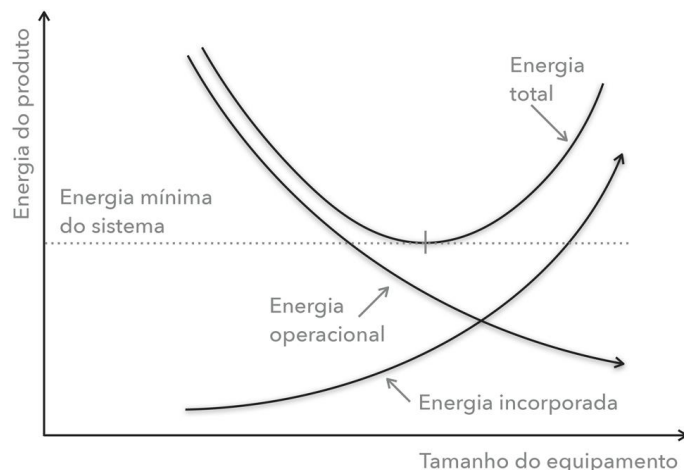


Figura 4 – Energia mínima de um sistema é resultado da interação entre energia incorporada e energia operacional (adaptado de Gool, 1980 apud Hammond, 2007)

Como a energia operacional tem grande influência no ciclo de vida das edificações, o próximo subcapítulo conduz uma revisão bibliográfica sobre a atenção à eficiência energética em edificações.

### 2.2.1 Eficiência energética em edificações residenciais

Eficiência energética, como uma consideração operacional nas edificações, por definição, significa usar menos energia para executar o mesmo serviço (LBNL, 2015; PÉREZ-LOMBARD et al., 2009). Em edificações, utilizar elementos construtivos que previnam trocas desnecessárias de calor são estratégias bastante utilizadas no sentido de criar melhores condições de eficiência energética (BRIBIÁN; VALERO; ARANDA, 2011; RODRIGUES; FREIRE, 2014).

A atenção à eficiência energética em edificações começou a ser dada nos anos 1970 nos Estados Unidos, em particular no estado da Califórnia onde uma série de regulamentos foram criados para reduzir o consumo energético de edificações (CARB, 2008; LEVINSON, 2014). Esses regulamentos, além de serem os primeiros no mundo com essa finalidade, conseguiram diminuir mais de 23% da necessidade energética daquele estado para residências (CARB, 2008), tornando-se uma referência internacional em política de uso de energia.

O uso de energia em edificações está atrelado a uma série de fatores, como requisitos de usuários, projeto arquitetônico, condições climáticas, condicionamento de ar, iluminação, entre outros (ABU BAKAR et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2011). Neste sentido, o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América cita que o condicionamento de ar e o aquecimento de água são alguns dos itens mais importantes



para os programas de eficiência energética em residências naquele país (U.S.DOE, 2015). A Figura 5 apresenta o consumo de energia por intensidade de uso nos EUA em 2013, com projeções para o consumo no ano de 2040.

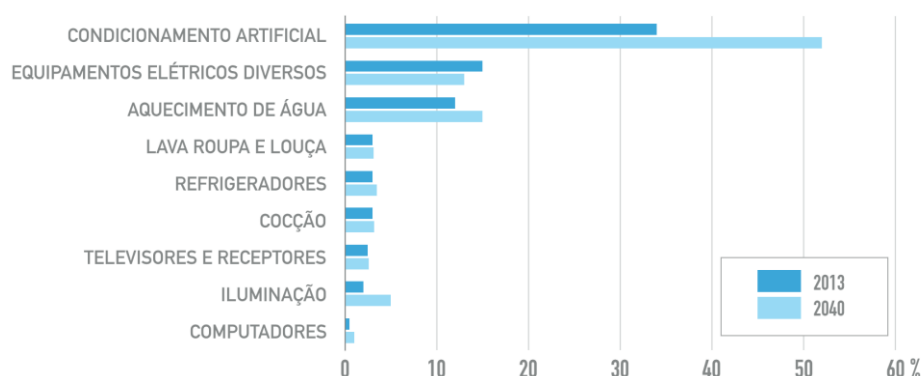


Figura 5 - Consumo energético residencial dos EUA em porcentagem relativa no ano de 2013 com projeção para 2040 (adaptado de U.S.DOE, 2015).

Os sistemas de ventilação e ar condicionado sempre foram muito importantes em edificações (ABU BAKAR et al., 2015). No Brasil, entretanto, segundo o último levantamento (ano base 2005) sobre a posse de eletrodomésticos e hábitos de uso de energia elétrica (PROCEL, 2007), aparelhos de ar condicionado estão presentes em apenas 10,5% das residências. Por outro lado, ainda que a presença do aparelho possa ser considerada baixa, segundo o mesmo levantamento, gastos de energia elétrica com condicionamento de ar representam em média 20% do consumo total residencial brasileiro (Figura 6), podendo chegar a 40% na região norte e 32% na região sul.

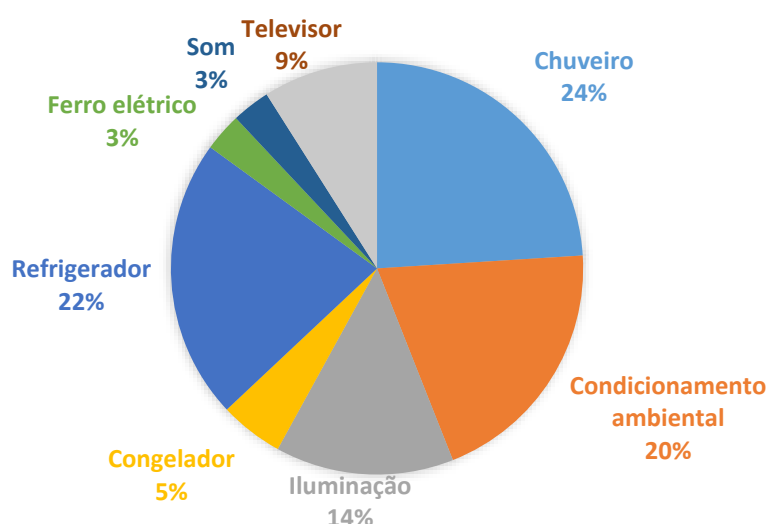


Figura 6 - Consumo final de energia elétrica residencial brasileira (adaptado de PROCEL, 2007)

Mesmo assim, segundo diversos autores (DAIOGLOU et al., 2012; ISAAC; VAN VUUREN, 2009; MCNEIL; LETSCHERT, 2008; SIVAK, 2013), o gasto energético com

refrigeração de países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, tende a se tornar muito importante. Os autores desenvolveram projeção no uso energético com modelos que consideram melhores condições de posse da população e cenários de mudança climática, especialmente de aquecimento global, que tendem a intensificar o uso de sistemas de refrigeração artificial. A maioria dos cenários energéticos mundiais descreve o futuro da demanda energética residencial como uma simples relação entre consumo de energia e aumento de renda per capita (DAIOGLOU et al., 2012). Nesse sentido, Sivak (2013) estima que somente a região metropolitana de Mumbai (Índia) tem potencial de consumo energético com resfriamento igual a um quarto de todo o consumo dos EUA para essa demanda, devido à combinação de uma grande população com um clima quente.

Autores brasileiros (PAULSEN; SPOSTO, 2013; SILVA, 2012; TAVARES, 2006; TAVARES; LAMBERTS, 2006), avaliando o ciclo de vida energético de edificações residenciais, não consideram energia para arrefecimento e aquecimento ambiental, embasados na pesquisa de posse de eletrodomésticos do PROCEL. Porém, atentando-se a índices macroeconômicos (Figura 7), o consumo residencial brasileiro de energia elétrica se manteve em constante crescimento desde o período de racionamento da *crise do apagão* (julho de 2001 a fevereiro 2002), chegando a valores 70% maiores que os da série inicial em 2015.

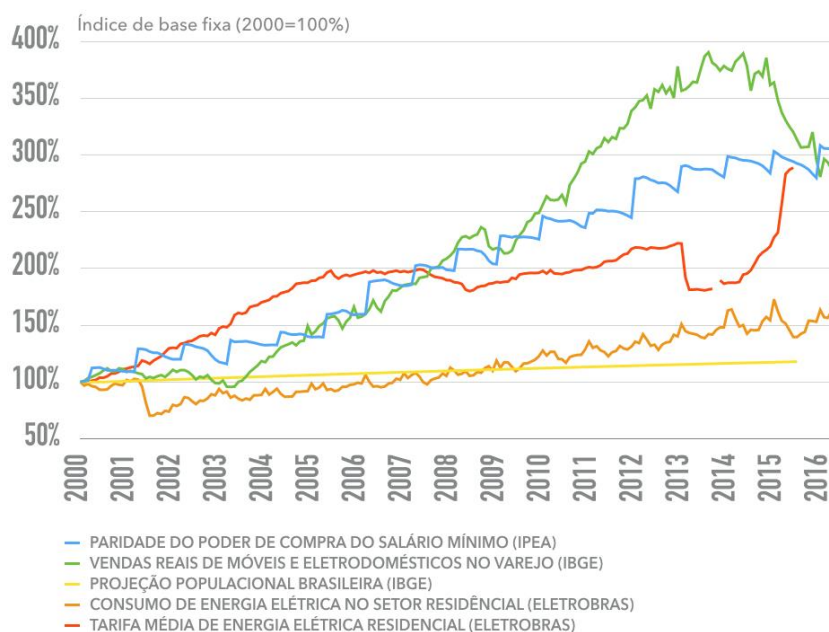


Figura 7 - Evolução de índices macroeconômicos no período de 2000 a 2016

Concomitante a isso, enquanto o poder de compra do salário mínimo (em azul na Figura 7) e a venda de eletrodomésticos no varejo cresceram (em verde), respectivamente, três e quatro vezes, a tarifa de energia elétrica (vermelho) se manteve praticamente

constante entre 2005 e 2013. Comparando a projeção de crescimento populacional no período ao consumo de energia elétrica do setor residencial, é possível verificar que o aumento da população (em amarelo na Figura 7) pode não ter sido o único responsável pelo crescimento no consumo de energia elétrica (em laranja). Neste cenário, atentando-se ao esforço para eficiência energética de equipamentos com a política de uso racional de energia (BRASIL, 2001), é possível que a diferença de consumo esteja relacionada também ao maior uso de aparelhos elétricos, inclusive de ar condicionado.

É possível, ainda, que parte da população tenha investido em aparelhos de ar condicionado em função do maior acesso às compras de crédito, e que a estabilidade de tarifa de eletricidade tenha propiciado a manutenção do custo de uso. O investimento inicial na compra também pode ter sido financiado por programas governamentais para a compra de móveis e eletrodomésticos da linha branca (em que estão incluídos aparelhos de ar condicionado). Por exemplo, o Programa Minha Casa Melhor que foi destinado a usuários do PMCMV na compra de equipamentos domésticos. Esse programa teve aporte inicial de R\$ 2 bilhões pela Caixa Econômica Federal em 2012<sup>3</sup> (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015).

Atenta-se que os efeitos de mudança climática e aquecimento global, com médias de temperatura acima do normal, também estimulam o aumento do uso de arrefecimento (MCNEIL; LETSCHERT, 2008). Este cenário é substancialmente preocupante, já que o consumo excessivo de energia está relacionado às dificuldades no suprimento da demanda energética além de importantes impactos ambientais, tais como depleção da camada de ozônio, aquecimento global, mudanças climáticas, entre outros (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009).

Somado a isso, no Brasil, o setor de edificações contribui com mais de 50% de todo o consumo de energia elétrica, sendo que as edificações residenciais são responsáveis por mais da metade desse consumo, como foi demonstrado na Figura 1 (EPE, 2015). No entanto, mesmo sob um cenário alarmante, essas informações dão condições para o planejamento de estratégias mais sustentáveis, que se fazem especialmente necessárias no uso de energia (ABU BAKAR et al., 2015). Dentre estas estratégias, etiquetas de ranqueamento de eficiência e simulações termoenergéticas têm papel importante na melhoria de eficiência em edifícios (GONZÁLEZ et al., 2011; LBL, 2015).

---

<sup>3</sup> Valores segundo informações de imprensa. Caixa cria financiamento especial para móveis e linha branca. Revista *Veja*. Disponível em <<http://veja.abril.com.br/economia/caixa-cria-financiamento-especial-para-moveis-e-linha-branca/>>. Acesso em outubro de 2016.

## 2.2.2 Simulações termoenergéticas

A mensuração quantitativa de uso energético é importante. Porém, o grande número de variáveis contidas em um edifício que podem influenciar o consumo energético, individual ou interativamente (como paredes, aberturas, cobertura, iluminação, sistema de climatização, requisitos de usuários), torna esses cálculos difíceis. Neste sentido, simulações manuais são instrumentos custosos e frequentemente associados a erros de estimativa (HONG; CHOU; BONG, 2000), já que usualmente negligenciam vários parâmetros, como trocas de calor por radiação, invariabilidade térmica de materiais, e variabilidade de condições climáticas (CLARKE, 2001).

Simulações computacionais, por outro lado, evitam os problemas associados a estimativas manuais, gerando dados mais fidedignos à realidade do consumo energético em edificações (CLARKE, 2001). Pisello et al. (2012) afirmam que as simulações termoenergéticas são atualmente um procedimento bem estabelecido para o estudo de eficiência energética em edifícios, considerando as condições reais de clima.

Um dos algoritmos de simulação mais antigos e um dos mais utilizados para avaliar eficiência energética em edifícios é o DOE-2 (LBNL, 2015), criado pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (*Lawrence Berkeley National Laboratory*), nos anos 1970. O DOE-2 implementou predições computacionais para consumo de energia em edifícios, tomando como entrada a descrição detalhada de elementos do edifício (materiais de construção, geometria da envoltória, localização geográfica, etc.), da sua operação (agendas de utilização, taxas no fornecimento de energia), dos sistemas de condicionamento (ar condicionado, ventilação, iluminação), além das condições climáticas locais (GONZÁLEZ et al., 2011).

Nos dias de hoje, o DOE-2 sofreu diversas atualizações, mas continua funcionando como um dos principais algoritmos de cálculo em programas computacionais de simulação energética, como o programa *EnergyPlus* (CRAWLEY et al., 2001). Este último tem condições de calcular cargas de aquecimento e refrigeração necessárias para manter o controle de termostatos dos sistemas de condicionamento de ar. Além disso, simula uma série de outros sistemas consumidores de energia que um edifício teria na realidade (CRAWLEY et al., 2001).

Além dele, existem uma série de outros assistentes computacionais de simulação termoenergética. Muitos desses assistentes utilizam os algoritmos do *EnergyPlus*, como

o *OpenStudio* e *DesignBuilder*, atrelando outras funcionalidades, como facilitação de modelagem e visualização, à confiabilidade do método de cálculo do primeiro. A Associação Norte Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado (ASHRAE), propõe um método de avaliação para qualidade mínima a ser atingida por estes programas na normativa ASHRAE/ANSI Standard 140 (2011).

## 2.3 ACV EM EDIFICAÇÕES

Edifícios são produtos complexos, assim como a sua avaliação ambiental (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009). O estado da arte em ACV relacionada à construção civil compreende dois tipos de escopo: (i) materiais de construção e sistemas; e (ii) todo o processo de construção (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Além disso, eles se dividem três vertentes: ACV, considerando diversos impactos ambientais; análises do ciclo de vida energético (ACVe); e avaliações considerando emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>) (CHAU; LEUNG; NG, 2015). A ACV segue estrutura metodológica normatizada pelas ISO 14040/44 (2006a, 2006b), que desenvolve o estudo em quatro partes. Todavia, a ACVe e a ACVCO<sub>2</sub> não necessariamente seguem essa estrutura (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

A ACVe é utilizada para a contabilização de toda a energia primária do ciclo de vida da edificação (CHAU; LEUNG; NG, 2015), e tem sido usada com frequência para esse propósito em função da simplificação de escopo (CABEZA et al., 2014). A metodologia de ACVe está alinhada à análise de inventário dos processos energéticos do ciclo de vida, entretanto, é importante considerar que os esquemas de contabilização de energia falham em representar impactos ambientais. Análises de inventário de energia permitem, por exemplo, o entendimento de que 1 kWh eletricidade gerada com carvão mineral tem o mesmo impacto ambiental que 1 kWh eletricidade gerada com fusão nuclear de urânio (FRISCHKNECHT; HEIJUNGS; HOFSTETTER, 1998). Por isso, estes autores defendem que inventários de energia devem ser avaliados sem agregação de dados de diferentes fontes energéticas.

No mesmo sentido, a ACVCO<sub>2</sub> não possui estrutura metodológica clara. Em alguns estudos, pode estar ligada à fase de avaliação de impacto de ciclo de vida, por considerar as equivalências de CO<sub>2</sub> para gases de efeito estufa antropogênico, desenvolvidas pelo Protocolo de Kyoto (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Em outros estudos, todavia, pela relação entre emissões de CO<sub>2</sub> e uso de energia primária de origem fóssil,

a ACVCO<sub>2</sub> pode estar relacionada à equivalência de emissões de carbono pela conversão do uso de energia primária (CABEZA et al., 2013).

Tendo em vista que os trabalhos de avaliação ambiental em edificações se dividem nessas três vertentes, não é claro se os resultados entre autores são comparáveis ou não (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Além disso, nem sempre existe clareza na estrutura metodológica das vertentes de ACVe e ACVCO<sub>2</sub>, de tal maneira que, Cabeza et al. (2013) propõem que sejam consideradas incertezas de até 20% só pelo uso das metodologias.

Pelos motivos citados, a revisão bibliográfica de autores pressupõe algumas considerações no presente trabalho. Para ACV, são considerados somente trabalhos que declarem a aplicação de alguma versão da ISO 14040. Para ACVe e ACVCO<sub>2</sub>, são considerados somente trabalhos nacionais, já que estas vertentes são apenas tangenciais a esta dissertação. Em todos os casos, são considerados escopos abrangendo todo o processo de construção para edificações habitacionais, preferencialmente térreas e com função social.

Ortiz, Castells, Sonnemann (2010) desenvolveram a ACV para duas casas, uma na Espanha (Barcelona) e outra na Colômbia (Pamplona). Os autores utilizaram como unidade funcional um metro quadrado de área útil pelo período de 50 anos de vida útil da edificação com 4 habitantes, quantificaram impactos pelo consumo energético operacional e impactos incorporados por materiais e sistemas de construção. O uso de energia no caso colombiano foi baseado em estimativas bibliográficas, não sendo considerado condicionamento artificial. Já no caso espanhol, a energia é quantificada com uso de software de simulação energética (*Designbuilder*), considerando condicionamento artificial. Os dados de ICV foram retirados da base *Ecoinvent v.2.0*. A AICV considerou cinco impactos potenciais do método CML 2001: acidificação potencial; mudanças climáticas (GWP); toxicidade humana; depleção de recursos abióticos; e depleção de ozônio estratosférico. Em ambos os casos, impactos operacionais foram mais importantes, representando aproximadamente 60% em GWP no caso colombiano e  $\approx 90\%$  para o mesmo impacto no caso espanhol. Os autores concluíram que a diferença nos resultados de impactos entre as edificações não se relacionou, apenas, às diferenças bioclimáticas entre os países, mas, principalmente, com hábitos de consumo e necessidades construtivas. Na casa colombiana foram seguidas normas de proteção contra terremotos, enquanto que nas construções espanholas foram seguidas normas relativas à proteção térmica de envoltória, definições que afetaram o resultado final.

Cuéllar-Franca e Azapagic (2012) desenvolveram a ACV de três residências no Reino Unido. Utilizaram como unidade funcional a construção e ocupação de uma casa durante o ciclo de vida de 50 anos. Foram consideradas três tipologias de casa: isolada no terreno, geminada e em fita. Para impactos relacionados com o consumo energético operacional, os autores utilizaram estimativas setoriais de uso de energia. Para impactos incorporados por materiais e sistemas de construção, utilizaram informações da base de dados *Ecoinvent* v2. A AICV considerou o método CML 2001 com 10 categorias de impacto. Os resultados indicaram a fase de uso como o maior contribuinte para os impactos de ciclo de vida. Para GWP, aproximadamente 90% do impacto foi relativo à etapa operacional,  $\approx 9\%$  relativo à construção e  $\approx 1\%$  relativo ao fim de vida. Os autores consideraram que o impacto evitado, pela reciclagem de materiais nos cenários de fim de vida, pode gerar reduções de até cerca de 28% para os impactos incorporados de GWP.

Monteiro e Freire (2012) realizaram a ACV de uma casa portuguesa variando sete alternativas de envoltória externa, com o objetivo de identificar soluções melhores ambientalmente. A unidade funcional foi a área útil de uma casa ocupada por uma família de 4 pessoas durante o período de 50 anos. O escopo considerou as etapas de produção de materiais, transportes, construção, manutenções, operação (somente condicionamento artificial) e fim de vida. Os dados foram retirados da base *Ecoinvent* v.2 e a AICV considerou três métodos (CML 2001, CED e Eco-indicator'99) para diversas categorias de impacto. Os resultados apontaram a maior importância dos impactos relativos à operação da edificação, dependendo do padrão de uso assumido. O resultado para os impactos de GWP, depleção da camada de ozônio, depleção abiótica, acidificação e eutrofização foi similar entre os métodos CML 2001 e Eco-indicator'99. Segundo os autores, essa comparação permite a comparação direta entre métodos, para as categorias citadas.

Evangelista, Souza e Torres (2014) desenvolveram a ACV para um edifício residencial de 16 andares em Salvador (BA). Utilizaram como unidade funcional “o metro quadrado de área construída total, para uma vida útil de 50 anos”. O escopo considerou materiais de construção, manutenção, consumo de energia elétrica, gás de cozinha e água, mas não foi considerado o impacto com transportes. O consumo de energia elétrica foi baseado em estimativas do balanço energético nacional (BEN). Os dados utilizados são oriundos da base *Ecoinvent* v.2.2, porém, não está explícito se houve adaptação para a regionalização de dados. Avaliaram impactos de aquecimento global, depleção da camada de ozônio, eutrofização, acidificação e ecotoxicidade. No estudo, a etapa de

uso (impactos operacionais e impactos incorporados recorrentes) foi responsável pela maioria dos impactos totais. Por fim, os autores ponderaram que os métodos de avaliação de impacto deveriam considerar incertezas relacionadas a realidades regionais.

Caldas et. al (2015) realizaram uma ACVCO<sub>2</sub> para uma habitação social do tipo casa térrea. Não declararam unidade funcional, mas os resultados são relatados para 1 m<sup>2</sup> de área útil durante o período de 50 anos. O escopo incluiu a produção de materiais, construção, operação, manutenção e demolição da edificação. O consumo operacional de energia foi baseado no levantamento do PROCEL, para posse de equipamentos e hábitos de uso, e em dados bibliográficos, em que, o uso de gás de cozinha foi estimado em 13 kg/mês. Consideraram o cenário de manutenção e reposição de materiais baseado na NBR 15.575 para vida útil de projeto mínima. Os resultados demonstraram que a operação foi a fase mais importante, principalmente pelo uso de gás de cozinha (25,9%) e eletricidade (11,1%). Entretanto, com resultado não muito distante da manutenção, que foi responsável por 35,8% das emissões. Já, a produção da edificação e materiais de construção somou 26,5%, enquanto que o transporte foi responsável por 0,3% das emissões.

Tavares (2006) desenvolveu uma metodologia para ACVe de edificações residenciais. O método foi aplicado em cinco modelos residências, com variações construtivas e de perfil de operação. Não declarou unidade funcional, mas ela pode ser presumida na apresentação dos resultados como sendo o ciclo de vida de unidade de habitação pelo período de 50 anos. Mesmo assim, os resultados também são apresentados com a ponderação pela área bruta. O autor concluiu que a energia incorporada em materiais e sistemas de construção pode representar de 29% a 49% da energia total, variando em função do tipo de edificação, da área construída, de condições socioeconômicas, entre outros fatores. A metodologia também considerou um fator de conversão de CO<sub>2</sub> aplicado sobre o resultado de energia total para a quantificação desse tipo de emissões.

Paulsen e Sposto (2013) consideraram a ACVe de uma casa térrea do PMCMV. Utilizam a unidade funcional de “uma casa de 3,3 habitantes e área útil de 48 m<sup>2</sup> com vida útil de 50 anos”. Como resultado, a edificação contabilizou o total de 25,4 GJ/m<sup>2</sup> de energia, sendo que deste total 30% foi relativo à energia incorporada (inicial e recorrente), 69% foi relativo e energia operacional e 1% foi relativo ao fim de vida. Para a energia incorporada, 41,5% foi relativo à construção da edificação, considerando extração e produção de materiais de construção, e 41,1% foi relativo à manutenção. O sistema de paredes (alvenaria de blocos cerâmicos com reboco de cimento e areia) foi o que mais



contribuiu para energia incorporada, aproximadamente 81%, seguido do telhado (telhas cerâmica com estrutura de madeira). Já a energia operacional foi calculada utilizando estimativas de uso energético, sendo 66% oriunda do uso de energia elétrica, e 34% pelo uso de gás de cozinha.

Além dos trabalhos citados, diversos autores realizaram a ACV de materiais de construção e sistemas, alguns deles são brevemente citados para o contexto nacional. Grigoletti (2001) avaliou os impactos ambientais relacionados à produção de tijolos, blocos e telhas no RS. Guerreiro (2014) avaliou os impactos dos diversos tipos de cimentos produzidos no país. Condeixa (2013) comparou os sistemas parede de gesso acartonado com alvenaria de vedação. Finalmente, a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (LAFONTAINE et al., 2012a, 2012b) divulgou inventário relativo à produção de blocos e telhas cerâmicos das indústrias nacionais.

No Brasil, existem algumas iniciativas para o desenvolvimento de inventários de ciclo de vida. A principal delas é o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. O SICV Brasil é um sistema de banco de dados com objetivo de abrigar e divulgar informações padronizadas de inventários nacionais de ciclo de vida (IBICT, [s.d.]). Por fim, é importante mencionar o projeto SRI (*Sustainable Recycling Industries*) do *Ecoinvent*, que objetiva, dentre outros, inventariar a produções industriais para o Brasil, Egito, Índia e África do Sul (ECOINVENT, [s.d.]).

## 2.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A metodologia de ACV, seja para sua aplicação em edifícios ou qualquer outro processo ou produto, pressupõe o cumprimento normativo dos protocolos estabelecidos pela série NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b). A metodologia de ACV deve incluir quatro fases iterativas, ou seja, em que a evolução da avaliação pode propiciar a revisão das fases anteriores. São elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação. Cada uma das fases é brevemente analisada nos itens a seguir, conforme a série NBR ISO 14040, pontuando considerações sobre a indústria da construção.

### 2.4.1 Definição de objetivo e escopo

Na primeira fase, são definidos e justificados o objetivo e o escopo do estudo de ACV. O objetivo diz respeito à definição da aplicação pretendida da ACV, razões para sua

execução, público alvo que a ACV pretende atingir, além da definição de utilização do estudo para asserções comparativas, de maneira pública. Já na definição de escopo são estabelecidos os principais procedimentos característicos do estudo de ACV, em uma descrição temporal, geográfica e tecnológica, além do tipo de análise e do nível de sofisticação do estudo (GUINÉE et al., 2001).

A definição de escopo inclui o sistema de produto, unidade funcional, fronteiras do sistema, categorias de impacto, qualidade de dados, pressupostos e limitações. Essa etapa pode incluir outras definições, como procedimentos de alocação, que não são tratados nessa revisão, por não fazerem parte do estudo posterior.

Uma ACV tem como ponto inicial a função compreendida em um sistema de produto (GUINÉE et al., 2001). Esse sistema é composto por todos os processos e fluxos de materiais e de energia, conectados por fluxos intermediários de produtos executando uma função. A Figura 8 apresenta o sistema de produto com ampliação do processo elementar, em que os dados de entrada e saída são relacionados.

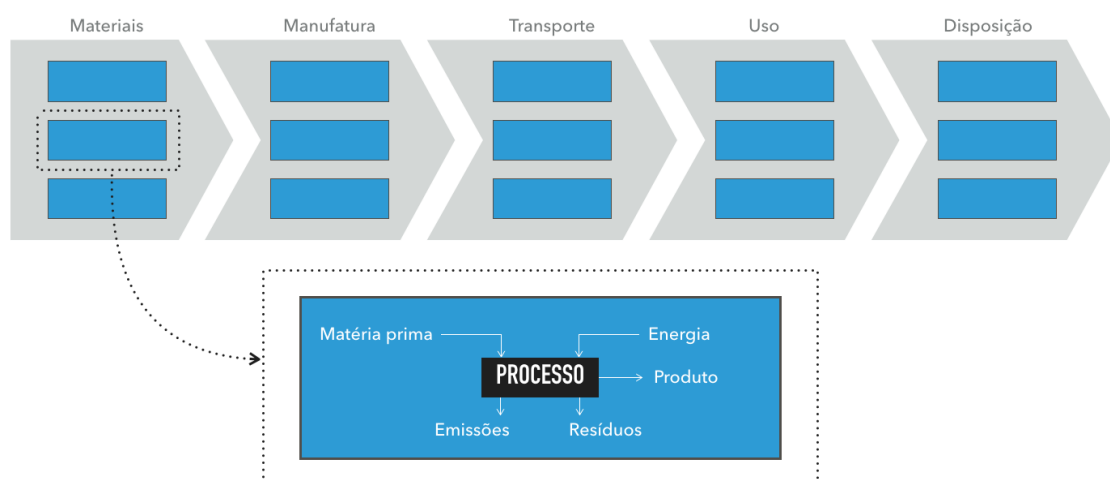


Figura 8 - Sistema de produto em ACV do berço ao túmulo, demonstrando um processo elementar (adaptado de HAUSCHILD, 2005)

A unidade funcional relaciona a função que o produto estudado deve cumprir com uma unidade de medida, servindo de referência para as entradas e saídas elementares, e podendo servir de métrica comparativa com outros estudos. Este é o item central da metodologia de ACV, pois com a unidade funcional é possível comparar produtos diferentes dentro da mesma condição funcional ou de serviço (LAGERSTEDT; LUTTROPP; LINDFORS, 2003). Por exemplo, para comparar diferentes edifícios residenciais, a UF poderia ser “metro quadrado de edifício residencial do projeto à demolição por 50 anos de vida útil”. Essa comparação independe do tamanho total do

edifício, tipo de estrutura ou vedação, permitindo comparações de melhor qualidade em um sentido temporal, considerando, por exemplo, a recorrência de manutenções.

Apesar das tentativas de criar padronizações para as unidades funcionais que avaliam todo o edifício, ainda não existem repostas válidas para esse caso (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009). Na literatura, a unidade funcional na construção civil pode ser bastante variável, desde o edifício inteiro (ASIF; MUNEER; KELLEY, 2007), ao metro quadrado de área de piso (PEUPOORTIER, 2001). Existem casos em que a medida foi modificada para incluir outras definições necessárias ao estudo, como o edifício inteiro com ocupação (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012), área ocupada (RODRIGUES; FREIRE, 2014), unidade de volume (PUETTMANN; WILSON, 2007), número de ocupantes (KUMAR; HEWAGE; SADIQ, 2015), entre outros.

A EN 15.804 (CEN, 2013), norma europeia que define as regras centrais para a criação de Declarações Ambientais de Produto (DAP) na indústria da construção civil, apenas descreve que a unidade funcional deve estar em acordo com a equivalência funcional do edifício. Essa última definição é descrita pela EN 15.878 (CEN, 2011), como sendo as características mínimas sob as quais o edifício é concebido, como por exemplo, tipo de edifício, características técnicas ou de desempenho (normativas ou requisitadas pelo usuário), padrões de uso e vida útil de projeto. A equivalência funcional é importante na medida que edifícios somente devem ser comparados quando houver equivalência de suas funções (CEN, 2011).

Os limites do sistema definem quais unidades de processo serão avaliadas dentro do sistema de produto estudado. Por exemplo, em uma ACV de envoltória de edifício, a fronteira do sistema pode incluir paredes de vedação, esquadrias, elementos de sombreamento e cobertura; podendo excluir elementos estruturais que podem ser independentes da envoltória do edifício, como pilares e vigas internos. Nesse nível é delimitado o grau de abrangência do estudo, considerando itens com menor uso, ou menor massa relativa em relação ao conjunto, como, por exemplo, parafusos, ganchos de ancoragem ou pingadeiras. A Figura 9 apresenta uma exemplificação de fronteira do sistema para uma ACV, onde são delimitados os processos estudados em cada uma das fases.

A verificação na qualidade de dados é fundamental no desenvolvimento de estudos confiáveis de ACV. De maneira a facilitar a identificação de qualidade de dados, existem indicadores de confiabilidade, como representatividade estatística dos dados, idade do levantamento, método de coleta, representatividade geográfica, tecnológica e temporal

(LUNDIE; CIROTH; HUPPES, 2007). Esses indicadores de confiabilidade tornam-se fundamentais na medida em que bancos de dados internacionais, nacionais e regionais fornecem dados de inventário sobre diversos produtos e serviços necessários em uma ACV (FINNVEDEN et al., 2009).

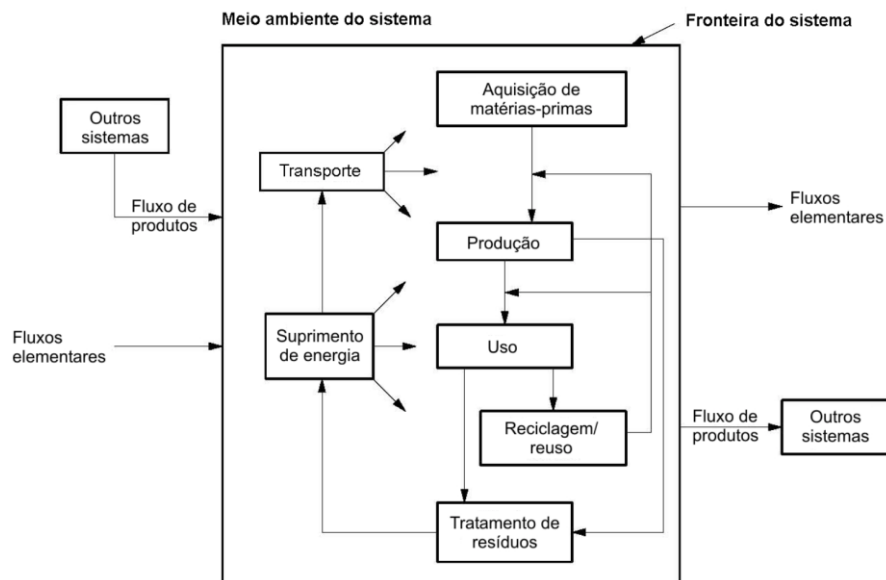


Figura 9 - Sistema de produto delimitado pela fronteira de sistema (fonte: ABNT, 2009a)

## 2.4.2 Análise de inventário de ciclo de vida

Na análise de inventário de ciclo de vida (ICV) é feita a coleta de dados, seguida dos procedimentos de cálculo, para quantificar as entradas e saídas relevantes em fluxos elementares e de energia no sistema de produto (ABNT, 2009a). Em outras palavras, toda a energia; matérias-primas; emissões para atmosfera, água e solo são quantificados para cada processo e então combinados no sistema de produto e relacionados com a unidade funcional (BAYER et al., 2010). Por exemplo, na calcinação de clínquer para produção de cimento, as entradas podem incluir energia e calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e outras matérias primas, enquanto que as saídas podem incluir emissão de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  e material particulado, sendo que todos estão descritos como fluxos elementares.

Nesta fase, programas computacionais dão suporte à gestão dos dados e são de grande relevância, já que o volume de informações em uma ACV não permite análises manuais (BAYER et al., 2010). Além disso, também em ICV são feitos os cálculos com os dados coletados, onde são validados e correlacionados aos fluxos elementares e à unidade funcional.

A literatura referencia três métodos para ICV: processo, *input-output* e híbrido (FINNVEDEN et al., 2009). O método de processo é o mais comumente utilizado, inclusive na construção civil, sendo considerado o que fornece resultados mais confiáveis (BAYER et al., 2010; DIXIT et al., 2010). O método parte de um sistema *bottom-up*, com análise de cada processo de maneira individual, permitindo o exame detalhista dos processos (RODRIGUES; FREIRE, 2014). O método baseia-se no material de construção como produto final, contabilizando todos os principais processos *background*, considerando as diversas emissões relacionadas (DIXIT et al., 2010).

O método de processo, mesmo sendo convencionalmente utilizado, sofre de erros causados pela truncagem (corte) dos processos o sistema de produto (LENZEN, 2001). Normalmente, não é possível analisar toda a cadeia processual de um determinado produto, então, alguns cortes precisam ser realizados (FINNVEDEN et al., 2009). Ou seja, esse método possui limitações, que estão relacionadas à dificuldade de um estudo abranger todos os processos existentes em um produto. Essa limitação é chamada de “erro de truncamento”, e está associada à exclusão de processos que marcam uma definição finita das fronteiras do sistema em estudo (DIXIT et al., 2010).

Como pode ser verificado pela Figura 10, a designação da fronteira do sistema pode gerar a exclusão de processos, pela necessidade de delimitação do estudo, abrangendo somente aqueles processos considerados mais relevantes ao estudo. Estas exclusões ou simplificações podem afetar os resultados do estudo de ACV, entretanto, a própria metodologia normativa (ABNT, 2009a, 2009b) cria instrumentos que podem reduzir inconsistências, tais como o erro de truncamento, como verificação de completeza, consistência e sensibilidade.

O método de *Input-Output* (I-O) estima os materiais e a energia requeridos para uma atividade e as emissões resultantes para o meio ambiente a partir de dados macroeconômicos (BAYER et al., 2010). Esse sistema usa informações econômicas de fluxo monetário entre diversos setores, que são disponibilizadas por organizações governamentais em formas de tabelas de entrada e saída (DIXIT et al., 2010). A cada fluxo de troca monetária é atribuído um vetor de impacto ambiental, descrevendo, por exemplo, o quanto um dólar da venda de cimento emite de CO<sub>2</sub>. Essa é uma metodologia *top-down*, que não detalha informações para cada processo, mas que é considerada relativamente completa (RODRIGUES; FREIRE, 2014), pois tem a capacidade de fornecer dados médios da indústria por aproximações específicas aos produtos (FINNVEDEN et al., 2009).

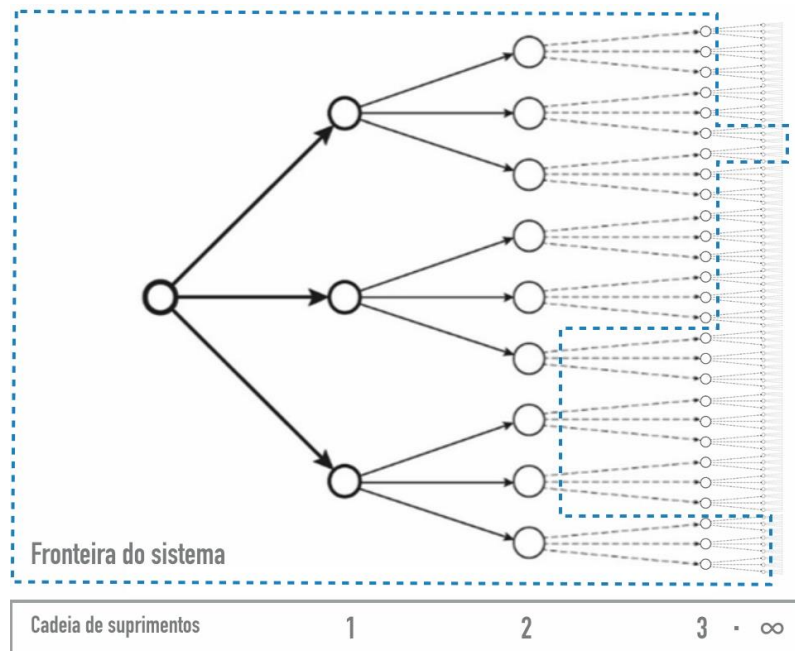


Figura 10 – Fronteira do sistema, em azul, delimitando quais processos serão analisados dentro da cadeia de suprimentos do produto. A exclusão de processos que podem ser importantes cria o chamado erro de truncamento (adaptado de SIMMONS; DEY, 2008).

A metodologia híbrida foi desenvolvida para unificar os benefícios dos dois métodos, eliminando erros fundamentais e limitações de ambos. Entretanto, a mesma ainda precisa ser melhor desenvolvida e validada (DIXIT et al., 2010). O método propõe iniciar com análise de processo para os requerimentos mais importantes e que necessitam maior detalhamento, e então, utilizar a análise I-O com os requerimentos que possuem dados menos consistentes, ou inexistentes (LENZEN, 2001).

Como não existem dados brasileiros públicos de inventário I-O, já que não existem vetores nacionais para atribuição de impacto, ainda não é possível realizar esse tipo de análise, nem utilizando a metodologia híbrida. Dessa maneira, a metodologia de processo é aplicada para dados brasileiros, tanto em bancos de dados internacionais, como em levantamentos da indústria nacional. Mesmo assim, um dos grandes desafios na condução de uma ACV com uso de dados secundários continua sendo de obstáculos na discrepância entre a construção do edifício e a localização de onde o dado foi obtido, falta de transparência ou o uso de dados incorretos (MARTÍNEZ-ROCAMORA; SOLÍS-GUZMÁN; MARRERO, 2016).

Em estudo realizado por Takano et al. (2014), cinco bancos de dados foram comparados quanto ao impacto de aquecimento global para diferentes materiais de construção em três edifícios. Essas bases foram *GaBi* (alemã), *Ecoinvent* (suíça), *IBO* (austríaca), *CFP* (japonesa) e *Synergia* (finlandesa). Os resultados demonstraram diferenças entre os bancos de até 51% para todo o edifício, e até 184% para componentes individuais.

Mesmo assim, os resultados apresentaram tendências similares, tendo sido vista a mesma ordem de magnitude entre os bancos de dados e o banco referência na avaliação dos resultados para cada um dos edifícios.

Em revisão de dez bancos de dados internacionais (*Ecoinvent*, *ELCD*, *Gabi*, *PlasticsEurope*, *Athena*, *U.S.LCI*, *Carbone*, *Bedec*, *COM*, *ProBas*) considerando materiais de construção, Marínez-Rocamora, Solís-Guzmán e Marrero (2016) afirmam que a base *Ecoinvent* consegue se sobrepôr pela integridade e qualidade de recursos. Nesse sentido, informações consistentes sobre transparência e rastreabilidade metodológica do levantamento são essenciais, já que dados de bases são passíveis de adaptações para refletir as realidades regionais.

De maneira a aumentar a confiabilidade do estudo, é importante que no momento de definir o sistema de produto exista garantia de que não sejam ignorados processos de alto impacto ambiental, mesmo que possuam baixa representação mássica ou energética (ABNT, 2009b). Um critério de corte normalmente aceito é desconsiderar processos de fluxo mássico menores que 1%, desde que a soma de todos esses processos não ultrapasse 5% de energia e massa do sistema de produto (CEN, 2013).

### 2.4.3 Avaliação de impactos do ciclo de vida

A avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) traduz os resultados de entrada e saída de inventário em informações sobre os impactos causados pelo sistema de produto, ao mesmo tempo que reduz os numerosos dados de ICV em um grupo reduzido de impactos (HAUSCHILD, 2005). Por exemplo, os resultados de emissões de  $\text{NO}_x$  pela queima de combustíveis fósseis na produção de cimento, podem ser associados tanto à formação de chuva ácida (pela reação  $2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{HNO}_3$ ), quanto à formação de nevoeiro fotoquímico (pela reação com compostos orgânicos voláteis e luz solar).

Nesta fase, é importante uma análise crítica sobre os itens anteriores, pois neste ponto é definido se os dados de inventário são suficientes para a condução da AICV de acordo com o escopo definido, mas também se a fronteira do sistema e as definições de corte foram criticamente analisadas para certificar a qualidade dos cálculos posteriores (ABNT, 2009b). Devem ser escolhidas categorias de impacto abrangentes e coerentes com as definições especificadas. Na construção civil, por exemplo, são frequentemente relacionados impactos causados pela emissão de  $\text{CO}_2$ , considerando entre outros, o intenso uso do cimento que tem importantes emissões de dióxido de carbono em sua

produção, tanto pelo processo de descarbonatação do calcário ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), como pelo consumo energético da produção do clínquer.

#### 2.4.4 Interpretação

A etapa final de ACV, a Interpretação, permeia todas as anteriores em um processo iterativo de análise crítica sobre as outras fases, permitindo revisões, mudanças, subtrações e adições de escopo (ABNT, 2009a). Ao final do ICV ou do AICV, a norma demanda que os resultados sejam reportados de forma informativa ao público alvo do estudo, demonstrando maneiras de reduzir os impactos ambientais associados ao produto (BAYER et al., 2010). Finalmente, a interpretação responde os objetivos traçados inicialmente no estudo (HELLWEG; CANALS, 2014).

### 2.5 PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA

O PMCMV foi criado pelo governo federal em 2009, como medida para diminuição do déficit habitacional, com incentivos para a produção de novas unidades de moradia. O programa foi pausado em 2016, mas recentemente retomado. Até 2016, produziu 2,3 milhões de unidades habitacionais (BRASIL, 2016), sendo, em quantidade, o mais importante programa de habitação social já desenvolvido no Brasil. Além disso, é um dos principais programas de habitação social do mundo em aporte financeiro investido, totalizando aproximadamente 150 bilhões de reais (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015).

O PMCMV foi criado como um programa econômico. Foi concebido pelo Ministério da Casa Civil e da Fazenda como forma de estimular a economia, com ação anticíclica ao aprofundamento da crise norte americana dos *subprimes* em 2008 (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015; MOREIRA; SILVEIRA, 2015). O setor da construção civil foi escolhido como propulsor do incentivo econômico, pela sua capacidade mobilizadora na geração de empregos e incentivo a diversos setores, como indústria extrativista e de produção, além do varejo, na entrega dos imóveis (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015).

O PMCMV inicialmente atendia famílias com renda total de até 10 salários mínimos, compreendendo 3 faixas. Posteriormente, a renda das famílias atendidas passou a ser nominal, atendendo 4 faixas, conforme a Tabela 1. A prioridade do programa sempre foi de atendimento às famílias de mais baixa renda, 40% do orçamento da fase 1 e 60% da fase 2 foram destinados ao atendimento da Faixa 1. Atualmente o programa atende quatro faixas de renda.



Mesmo sendo bom como promotor econômico, o PMCMV enfraqueceu a qualificação de política urbana, de promoção à diversidade e qualidade habitacional, apresentando padrões de segregação socioespacial e má utilização da infraestrutura urbana existente (ROLNIK et al., 2015). Embora seja cedo para avaliar durabilidade e qualidade das edificações do programa, estudos indicam que existem empreendimentos com problemas de execução, apresentando manifestações patológicas precoces (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015).

Tabela 1 - Faixas aplicadas em cada uma das Fases do PMCMV e subsídio relacionado (adaptado de AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015; ROLNIK et al., 2015; BRASIL, 2017)

	Fase 1 (salários mínimos)	Fase 2 (Reais)	Fase 3 (Reais)	Subsídio (2017)
<b>Faixa 1</b>	0-3	< R\$ 1.800	< R\$ 1.800	Até 96%
<b>Faixa 1,5</b>	-	< R\$ 2.350	< R\$ 2.350	Até R\$ 47.500
<b>Faixa 2</b>	3-6	< R\$ 3.100	< R\$ 4.000	Até R\$ 29.000
<b>Faixa 3</b>	6-10	< R\$ 6.500	< R\$ 9.000	-

Devido à grande dimensão, seja financeira, seja de unidades produzidas, o PMCMV é um importante gerador de impactos. Impactos sociais, urbanísticos e arquitetônicos foram detalhados por alguns autores (AMORE; SHIMBO; RUFIN, 2015; MOREIRA; SILVEIRA, 2015; ROLNIK et al., 2015), entretanto, ainda existe escassez de estudos acadêmicos que avaliem seus impactos ambientais. Além das pesquisas de ACV elencadas na revisão bibliográfica, considerando energia e emissões de CO<sub>2</sub> (PAULSEN; SPOSTO, 2013; CALDAS et al., 2015), não foram encontradas, até o momento, outras pesquisas que detalhem impactos ambientais do ciclo de vida de edificações para o PMCMV.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO

O capítulo 2, de revisão bibliográfica, teve o objetivo de englobar os assuntos tratados nesta dissertação. Foi visto que a ACV em edificações é, ainda, um tema relativamente novo, mas já existem diversos estudos internacionais e nacionais que demonstram a importância e eficácia da metodologia, seja para a quantificação de impactos, seja como suporte para a tomada de decisão, na melhora de processos ou políticas públicas.

O PMCMV promoveu o desenvolvimento de diversas unidades de habitação e, nesse sentido, torna-se importante a avaliação ambiental do ciclo de vida dessas habitações. A aplicação de ACV em um estudo de caso do PMCMV é relevante na quantificação dos impactos ambientais, mas, também, de maneira a compreender quais são sistemas

e materiais de maior impacto, uma informação ainda inexistente no contexto deste programa social. A integração de ACV com ferramentas de simulação termoenergética pode, ainda, ajudar a identificar a relação entre os impactos incorporados e os operacionais ao longo do ciclo de vida da edificação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida em um programa experimental com três fases sequenciais, que fazem referência à edificação do estudo de caso. A Fase 1 apresenta a simulação termoenergética; a Fase 2, a ACV preliminar, com uso de dados de inventário não adaptados; e a Fase 3, o desenvolvimento da ACV final, como o uso de dados regionalizados. A Figura 11 ilustra resumidamente o programa experimental.

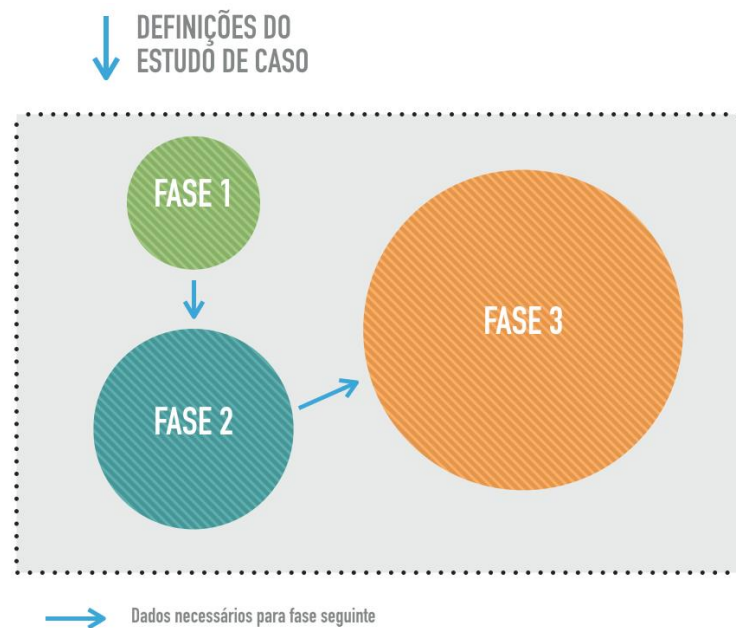


Figura 11 - Diagrama do programa experimental em ordem sequencial, os resultados de uma fase são definidores da fase seguinte.

Cada fase do programa experimental é dependente dos resultados da fase anterior, ou seja, a Fase 2 depende dos resultados da Fase 1 e a Fase 3, dos resultados da Fase 2. Por esse motivo, definições metodológicas específicas são apresentadas em conjunto com os resultados no mesmo capítulo. Como todas as fases são dependentes do estudo de caso da edificação do PMCMV, sua caracterização é apresentada no subcapítulo 3.1.

Por ser uma definição central desta dissertação, que abrange todas as fases do programa experimental, os impactos ambientais totais de uma edificação são definidos pela Equação 2:

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n (I_{incorporado})_i + \sum_{j=1}^p (I_{operacional})_j \quad \text{Equação 2}$$

onde:

$I_{total}$  é resultado da soma dos diversos impactos incorporados e operacionais em uma edificação;

$I_{incorporado}$  é o impacto relativo à construção (inicial), manutenções (recorrente), ou de fim de vida (FDV) de cada um dos  $n$  materiais de construção;

$I_{operacional}$  é impacto relativo à operação da edificação com uso de energia com cada uma das  $p$  aplicações;

$n$  é o número de materiais de construção da edificação;

$p$  é o número de aplicações com operação de energia, como por exemplo iluminação, condicionamento artificial, energia de cocção e qualquer outro uso energético dos habitantes da edificação.

### 3.1 DEFINIÇÕES DO ESTUDO DE CASO

A ACV deste trabalho será baseada em um estudo de caso para residência unifamiliar do PMCMV. Esta edificação foi desenvolvida por construtora do estado do Rio Grande do Sul com atuação nacional. O projeto é utilizado sem modificação geométricas e de materiais construtivos em diferentes empreendimentos. As únicas considerações relativas a modificações são pontuais à cor da pintura da fachada externa, para efeito de absorvância à radiação solar nos cálculos de transmitância térmica da NBR 15.575.

Até o presente momento, o projeto estudado já foi executado no total de 714 vezes em empreendimentos do PMCMV nas cidades de Santa Cruz do Sul, Pelotas, Santa Maria e Alvorada, todas com características climáticas diferentes, e localizadas no estado do Rio Grande do Sul. Estes empreendimentos possuem a característica em comum de estarem em zonas de baixa urbanização, com recorrente afastamento dos centros das cidades em questão.

O empreendimento estudado fica na cidade de Alvorada, região metropolitana de Porto Alegre. Localizado em uma zona de conurbação na continuação de uma das principais vias da capital do estado, ficando aproximadamente 8 km distante do centro de Alvorada, 8 km do centro de Viamão e 17 km do centro de Porto Alegre. Este perfil de localização é comum dos empreendimentos do PMCMV, onde normalmente estão distantes o suficiente das zonas mais urbanizadas para tornar financeiramente atrativa a aquisição do terreno pelo empreendedor, mas não suficientemente longe para torná-lo inviável em função das distâncias ou legislação (ROLNIK et al., 2015).

O empreendimento em questão é um condomínio fechado composto por casas de 2 e 3 dormitórios, sendo que 315 casas são iguais ao modelo em estudo. As casas estão dispostas em fita, ou seja, em conjuntos sequenciais, em terrenos de 6,5 m de largura por 22 m de comprimento, sob diferentes orientações solares. A residência é composta por quatro ambientes que totalizam 44,45 m<sup>2</sup> totais, ou 40,29 m<sup>2</sup> de área útil, sendo uma sala de estar integrada à cozinha, dois dormitórios e um banheiro social. Uma pequena circulação permite o acesso da zona social à zona íntima, mas como não possui divisórias será tratada como parte da área de estar/cozinha. A Figura 12 apresenta a planta do imóvel em questão.



Figura 12 - Planta baixa do estudo de caso

Para facilitar a compreensão, a edificação será descrita em 4 sistemas, como apresentado na Figura 13: cobertura, forro, paredes e fundação. A cobertura é composta por telhado de telhas cerâmicas, tipo portuguesa, suportado por estrutura composta por perfis dobrados em chapa de aço carbono (terças em Perfil U 10x5, caibros em Perfil U 20x7,5 e ripas Perfil OM 5x7). A estrutura metálica do telhado é apoiada diretamente sobre os oitões da casa. Não são especificados, no detalhamento do projeto, sistemas de proteção adicional contra intempérie, mas, é prevista a instalação de tela plástica, para evitar o acesso de animais pelas frestas entre o apoio de estrutura e as telhas.

O sistema de forro é composto por chapas de gesso acartonado de 12,5 mm, com sistema de suporte aramado, fixado na estrutura do telhado. O acabamento é feito com regularização de pasta de gesso e pintura com tinta PVA branca.

As paredes são compostas por concreto autoadensável, com resistência característica à compressão de 20 MPa, consistência por abatimento de  $22 \pm 2$  cm, relação água/cimento menor que 0,65 e densidade de  $2300 \pm 50$  kg/m<sup>3</sup>. A espessura externa

das paredes é de 10 cm, enquanto que internamente é de 8 cm. Ambas são armadas com tela nervurada de aço soldado para concreto armado (Q 61). As paredes são executadas com uso de formas metálicas de alta durabilidade (até 1.000 execuções, de acordo com a construtora). As características específicas de dosagem serão apresentadas nas pressuposições das Fases 2 e 3 do programa experimental.

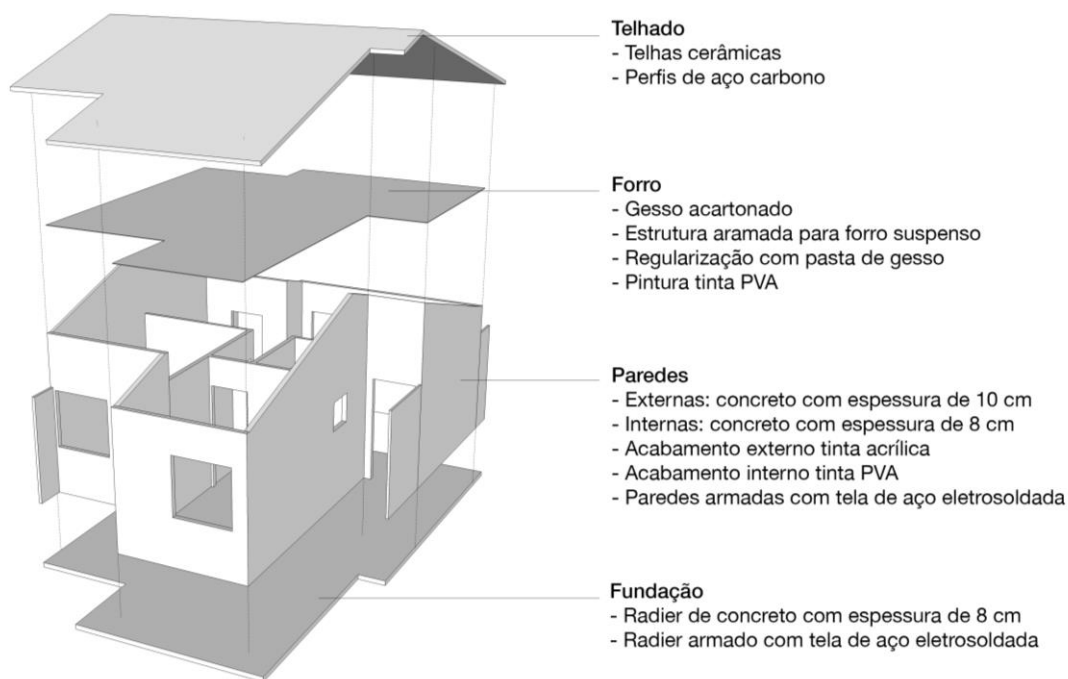


Figura 13 - Esquema demonstrando os sistemas construtivos do estudo de caso

O acabamento externo das paredes é feito apenas com a pintura em tinta acrílica, enquanto que, internamente, é feita regularização com pasta de gesso e pintura com tinta PVA branca. As esquadrias externas são compostas por janelas com perfil de alumínio anodizado, possuindo vidro simples de 4mm e fechamento externo com veneziana de alumínio. As portas externas têm folhas e guarnições em alumínio e, internas com folha semi-oca e guarnição em madeira.

A fundação é do tipo *Radier*, com concreto de espessura de 8 cm, com resistência característica à compressão de 25 MPa, abatimento de  $10 \pm 2$  cm, relação água/cimento menor que 0,65 e densidade de  $2300 \pm 50$  kg/m<sup>3</sup>. A estrutura é armada com tela nervurada de aço soldado para concreto armado (Q 138). As características específicas de dosagem são apresentadas na metodologia específica das Fases 2 e 3 do programa experimental.

O inventário quantitativo de materiais é elaborado a partir das tabelas de orçamento de obra. Nessas tabelas, já são consideradas perdas de material relativas à construção da

casa. A Tabela 2 apresenta o inventário de materiais, considerando a conversão para a massa em kg, a partir das dimensões e propriedades físicas dos mesmos. Por delimitação deste trabalho não serão descritos: revestimentos cerâmicos de piso e paredes, sistemas de impermeabilização, sistemas elétricos, hidráulicos e sanitários. Também não serão feitas considerações quanto ao preparo do terreno.

Tabela 2 - Inventário quantitativo de materiais de construção

Sistema	Item	Comp. (m)	Esp. (mm)	kg/m	kg/m <sup>2</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	Área (m <sup>2</sup> )	Vol. (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)
<b>Fundação</b>	Concreto 25 MPa		80,00			2,30		6,26	14398,00
	Aço Tela soldada				2,20		71,03		156,26
<b>Paredes</b>	Concreto 20 MPa		100,00			2,30		11,34	26082,00
	Aço Tela soldada				1,71		130,82		223,80
	Pasta de gesso					1,15			664,77
	Tinta acrílica				0,26		69,38		18,04
	Tinta PVA				0,26		150,13		39,03
<b>Forro</b>	Gesso acartonado		12,50			0,64	43,16		366,86
	Pasta de gesso					1,50			219,26
	Tinta PVA				0,26		43,16		10,92
<b>Telhado</b>	Telhas		13,00		38,40		60,78		2333,95
	Perfil U 10x5	72,25	0,15	4,45					321,51
	Perfil U 20x7,5	18,60	0,19	5,60					104,16
	Perfil OM 5x7	72,25	0,15	2,71					444,44
<b>Esquadrias</b>	Jan. Alumínio 160x220 (1 un.)				14,20		3,52		49,98
	Jan. Alumínio 120x120 (3 un.)				14,20		4,32		61,34
	Jan. Alumínio 60x60 (1 un.)				10,89		0,36		3,92
	Porta alumínio 70x220 (1 un.)				12,00		1,54		18,48
	Porta alumínio 80x220 (1 un.)				12,00		1,76		21,12
	Vidro simples		4,00				4,25		70,20

## 4 FASE 1 – SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

### 4.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO

Inicialmente considera-se a premissa de que a etapa operacional da edificação é normalmente elencada como a mais impactante ao longo do ciclo de vida da edificação (ao menos em edifícios que não se propõe a gerar a energia que consomem). Dessa forma, a primeira fase do programa experimental apresenta um estudo preliminar, baseado em simulações termoenergéticas de alternativas de envoltória. Frente ao resultado das simulações, é selecionada uma alternativa de envoltória para ser comparada, nas fases posteriores, com o modelo descrito no estudo de caso, conforme pode ser observado pela Figura 14.

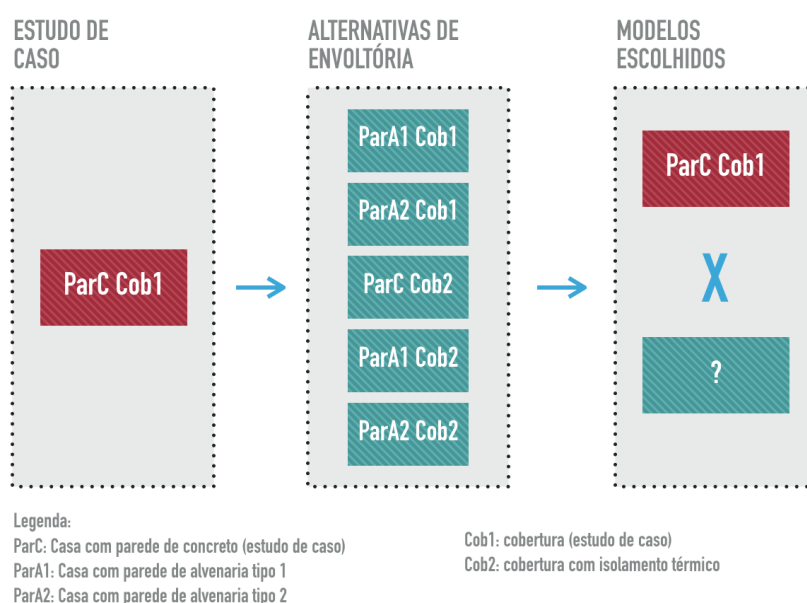


Figura 14 - Diagrama do programa experimental da Fase 1

A alternativa de envoltória foi escolhida com base nos resultados de uso energético e em ponderações sobre a aplicabilidade das alternativas por empreendimentos do PMCMV. Os modelos escolhidos compõem a base para o desenvolvimento da Fase 2, de ACV preliminar. As características propostas de envoltória modificada para paredes e cobertura são definidas no item a seguir, sistemas construtivos.

O modelo de simulação termoenergético foi composto pela mesma geometria do estudo de caso, utilizando o auxílio dos softwares *OpenStudio* e *EnergyPlus*. Ambas ferramentas foram desenvolvidas pelo Departamento de Energia do EUA, e são internacionalmente reconhecidas para utilização neste tipo de avaliação. Os dados



climáticos serão aqueles descritos no estudo de caso, do levantamento e compilação INMET/UFSC, para Porto Alegre.

Este modelo inicial também parte do pressuposto de que o sistema de condicionamento artificial ficará ligado durante as horas de ocupação, para atingir a faixa de conforto térmico, definida entre 21 °C e 24 °C. Esse pressuposto é assumido para que a avaliação do pior cenário seja mensurada e comparada entre as alternativas, onde o consumo seria o máximo possível aos usuários.

#### 4.1.1 Caracterização climática de Porto Alegre

Para a simulação termoenergética, é preciso caracterizar o microclima local da edificação estudada. Como a cidade de Alvorada está na microrregião climática de Porto Alegre, fazendo inclusive parte da conurbação da região metropolitana, é descrito e detalhado o clima para a capital do estado, que pela proximidade, é representativo do ponto de vista climático.

Para tanto, são utilizadas bibliotecas com uma compilação de informações meteorológicas. Estes dados são levantados a cada hora, por 8760h, ou um ano. Através da análise desse arquivo climático, é possível caracterizar o clima estudado, no que se refere a temperatura, umidade do ar, índice de precipitação, entre outros.

Para a cidade de Porto Alegre, as informações foram levantadas pela Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, a partir de dados coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, entre 2001 e 2010. O arquivo é disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE, 2012).

Com base no dado climático é possível plotar a carta psicrométrica para o clima estudado, com as informações horárias (Figura 15). Carta psicrométrica é um gráfico que relaciona variações de temperatura e umidade para que se compreendam as influências nos processos de transferência de calor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Pela nuvem de pontos presentes na carta, é possível perceber que grande parte dos pontos estão agrupados entre 10 °C e 25 °C, que podem ser consideradas temperaturas relativamente amenas. Entretanto, esses pontos estão, também, em sua maioria, entre 70% e 90% de umidade relativa do ar, que pode ser considerada alta, já que as condições de umidade são essenciais para a realização de troca térmica do ser humano

com o ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Com umidades altas, a condição de evaporação do suor é reduzida, o que leva à sensação de desconforto (LAMBERTS et al., 2011).

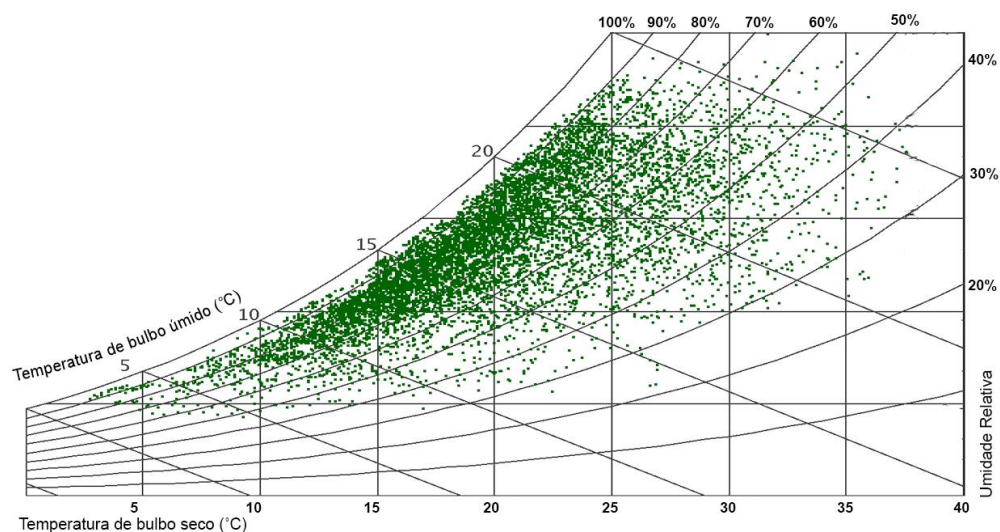


Figura 15 – Carta psicrométrica para 8760h do ano em Porto Alegre

#### 4.1.2 Sistemas construtivos

A definição dos materiais alternativos de envoltória foi feita empiricamente, sendo baseada na escolha de sistemas que pudessem contrastar com aqueles utilizados no estudo de caso. De forma a comparar a casa com paredes de concreto (ParC), foram escolhidos alguns sistemas de parede comumente utilizados. O sistema paredes de alvenaria de bloco cerâmico, com variações de revestimento interno, definem os modelos de casa (ParA1 e ParA2). Já para o sistema de cobertura do estudo de caso (Cob1), foi escolhida uma alternativa de envoltória com uso de isolamento térmico (Cob2).

A nível de verificação são descritos os requisitos prescritivos de transmitância térmica e capacidade térmica previstos pela norma de desempenho em edificações (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c). O não cumprimento dos requisitos prescritivos servem de medida para a necessidade de comprovar a eficiência do sistema proposto através de simulação termoenergética. No entanto, como a comprovação do desempenho normativo do sistema delimita-se fora dos objetivos desta dissertação, essa aferição não será realizada. A transmitância térmica dos sistemas foi calculada considerando a resistência superficial interna e externa com fluxo de calor horizontal para as paredes e fluxo de calor vertical para cobertura.

Para as definições dos sistemas, não serão propostas modificações ao nível arquitetônico, tendo em vista que este trabalho não buscará propor uma edificação mais eficiente, mas sim, mensurar os impactos ambientais de uma edificação comumente construída. Para o sistema de cobertura alternativo (telhado e forro) é sugerida a composição com manta de subcobertura em lã de vidro, aluminizada em uma das faces, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição e transmitância térmica utilizadas no sistema de cobertura

Cobertura	Componente	Espessura (m)	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Requisitos prescritivos NBR 15.575
<b>Cob1</b>	Telha cerâmica	0,0130	2,58	U ≤ 2,3 W/m <sup>2</sup> K
	Gesso acartonado	0,0125		
	Pasta de gesso	0,0035		
<b>Cob2</b>	Telha cerâmica	0,0130	0,91	U ≤ 2,3 W/m <sup>2</sup> K
	Lã de fibra de vidro aluminizada	0,0200		
	Gesso acartonado	0,0125		
	Pasta de gesso	0,0035		

Para alternativas de envoltória das paredes externas são propostas duas soluções de alvenaria com blocos cerâmicos. Paredes de alvenaria foram escolhidas por serem convencionalmente mais usadas e difundidas que paredes de concreto em envoltórias residenciais. Ambas as paredes de alvenaria são compostas de bloco estrutural cerâmico de 14 cm de espessura, recebendo externamente argamassa de emboço e reboco de 2 cm. Um dos sistemas recebe acabamento interno com pasta de gesso (ParA1), o mesmo acabamento utilizado pelo sistema de paredes de concreto, já o outro, acabamento interno com argamassa de reboco (ParA2). Composição das paredes é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição e transmitância térmica utilizadas no sistema de paredes

Paredes	Componente	Espessura (m)	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Requisitos prescritivos NBR 15.575
<b>ParC</b>	Concreto externo	0,1000	4,77	U ≤ 2,5 W/m <sup>2</sup> K CT ≥ 130 kJ/m <sup>2</sup> K
	Pasta de gesso	0,0035		
<b>ParA1</b>	Argamassa de emboço e reboco	0,0200	1,77	U ≤ 2,5 W/m <sup>2</sup> K CT ≥ 130 kJ/m <sup>2</sup> K
	Bloco cerâmico estrutural	0,1400		
	Argamassa de assentamento	0,0100		
	Pasta de gesso	0,0035		
<b>ParA2</b>	Argamassa de emboço e reboco	0,0200	1,75	U ≤ 2,5 W/m <sup>2</sup> K CT ≥ 130 kJ/m <sup>2</sup> K
	Bloco cerâmico estrutural	0,1400		
	Argamassa assentamento	0,0100		
	Argamassa de emboço e reboco	0,0200		

Para o modelo de energia serão consideradas como adiabáticas as paredes de divisa entre as unidades habitacionais, ou seja, serão desconsideradas as trocas de calor entre as residências. Serão mantidas fixas as propriedades da fundação de concreto e das esquadrias de portas e janelas. Os dados de transmitância térmica são apresentados na Tabela 5. Não serão avaliados efeitos de troca térmica com o solo.

Tabela 5 - Transmitância térmica utilizada nos sistemas de fundação e esquadrias

Sistemas fixos	Componente	Espessura (m)	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Requisitos prescritivos NBR 15.575
Fundação	Concreto	0,08	4,71	-
Esquadrias	Alumínio e vidro		5,89	-

#### 4.1.3 Esquemas de ocupação, iluminação e equipamentos

As agendas de funcionamento da residência estão baseadas na ocupação por uma família composta por quatro integrantes, sendo dois adultos que trabalham durante o dia e duas crianças que estudam em turno integral. Dessa maneira, durante os dias de semana não existe ocupação entre 9h e 19h, mas durante os fins de semana foi atribuída ocupação de 100%.

Em cada um dos ambientes de permanência prolongada é definido um detalhamento de ocupação conforme distribuição de atividades comuns. A ocupação com duas pessoas adultas é definida para o dormitório 1 (Figura 16). A agenda de ocupação nos dias de semana é total das 0h às 6h e das 23h às 24h. Nos fins de semana, a ocupação é total das 0h às 8h e de 12,5% no restante do dia.

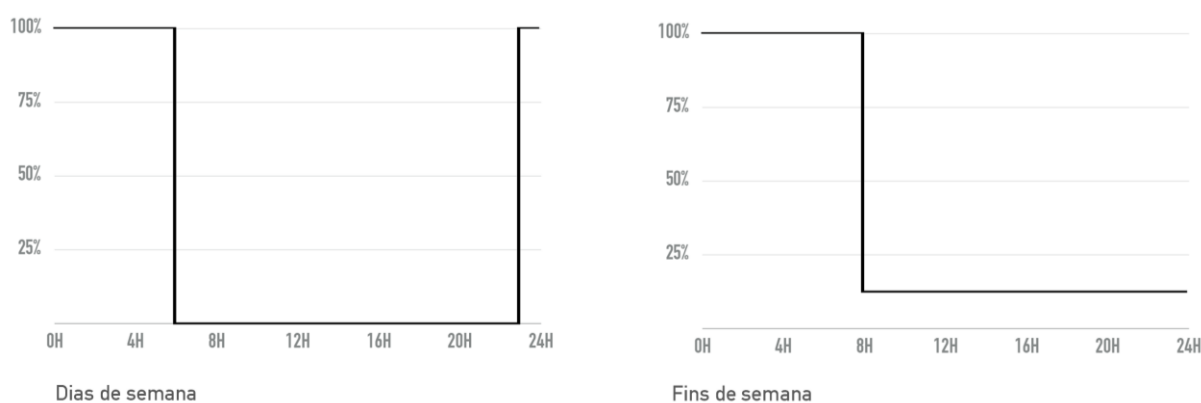


Figura 16 - Esquema de ocupação do dormitório 1

A ocupação do dormitório 2 é definida para duas crianças (Figura 17). A agenda de ocupação é total das 0h às 7h e das 22h às 24h dos dias de semana. Nos fins de

semana, a ocupação é total das 0h às 8h e de 12,5% no restante do dia. O percentual de 1/8 (12,5%) para ocupação da edificação ocorre para definir que uma pessoa está ou em um dormitório ou em outro, enquanto que as outras três estão na dependência Sala / Cozinha.

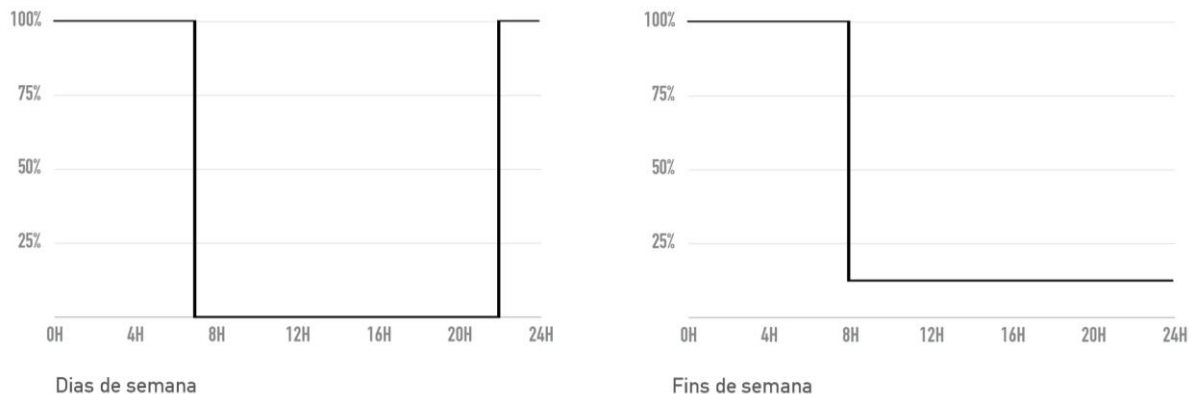


Figura 17 - Esquema de ocupação do dormitório 2

Na área de sala de estar e cozinha é definida população total de 4 pessoas (Figura 18). A agenda de ocupação é realizada em composição com a agenda dos dormitórios, sendo assim, se as pessoas estão em casa, elas estão ou na sala ou nos quartos. Além disso, os adultos acordam mais cedo e dormem mais tarde no esquema proposto.

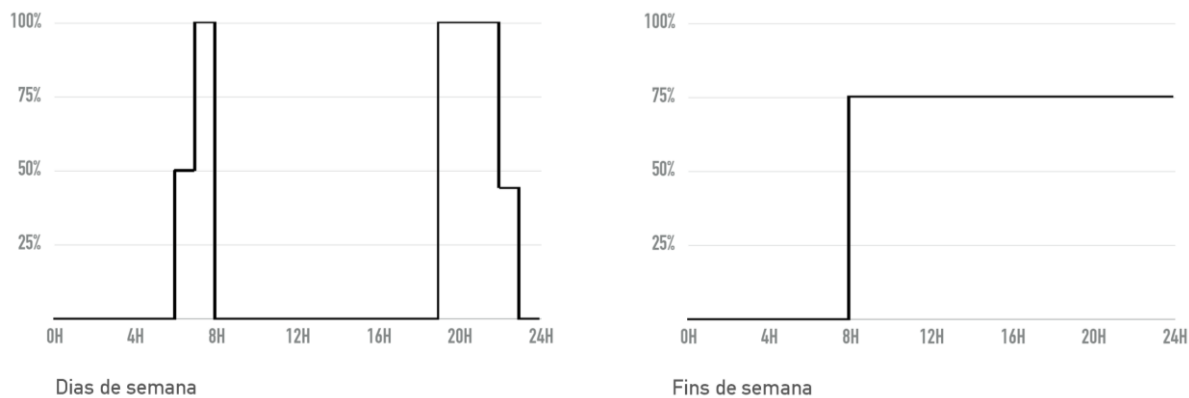


Figura 18 - Esquema de ocupação Sala / Cozinha

O esquema de iluminação é comum para todos os ambientes e refere-se ao total da potência instalada na residência que está em utilização (Figura 19). É mantido para os dias de semana uso mínimo de 10%, com pico entre 19h e 22h com uso de 80%. Já nos fins de semana em função da ocupação ficar mais concentrada no ambiente da sala, o uso máximo é de 60% entre 19h e 24h. A iluminação instalada é de 6 W/m<sup>2</sup>, o que significa dizer que em cada dormitório está instalada uma lâmpada fluorescente

compacta com 25 W para iluminação geral e dois abajures com 12 W para iluminação auxiliar.

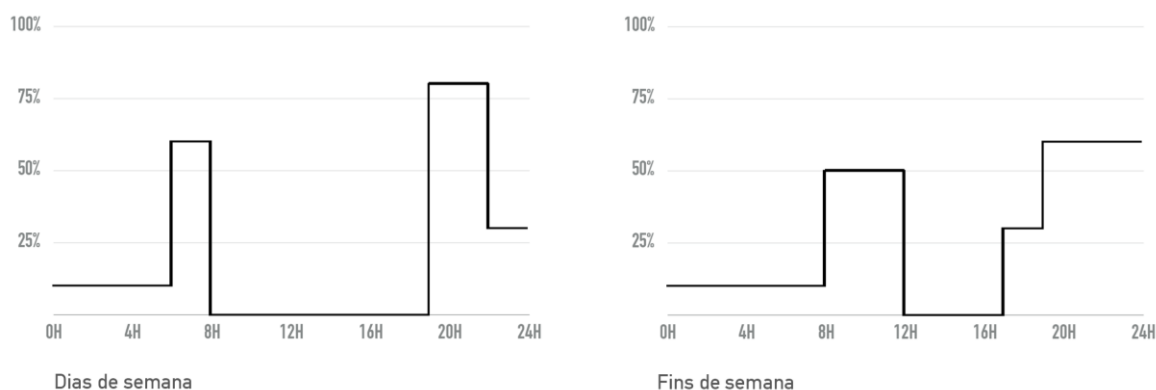


Figura 19 - Esquema de iluminação da residência

Os equipamentos elétricos, como geladeira, forno de micro-ondas, máquina de lavar roupas, computador, televisor, celulares entre outros aparelhos, são estimados para a média de 5 W/m<sup>2</sup> (Figura 20). O esquema de utilização, assim como o anterior, refere-se à potência total instalada, e é mantido funcionamento mínimo de 20% para equipamentos que ficam sempre ligados, como geladeira.

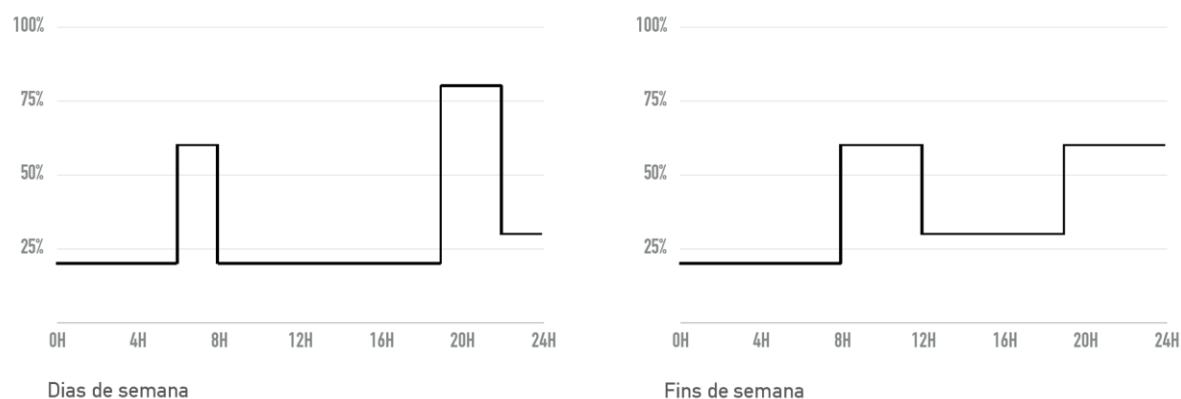


Figura 20 - Esquema de utilização de equipamentos elétricos

Não são considerados chuveiros elétricos para aquecimento de água, nem sistema de gás liquefeito de petróleo ou gás natural, seja para aquecimento, seja para cocção. Embora estas informações sejam relevantes, elas já foram tratadas em outros trabalhos. Além disso, o uso com estes equipamentos não é influenciado pelo tipo de envoltória.

#### 4.1.4 Sistema de condicionamento térmico artificial

Para o sistema de condicionamento térmico é utilizado um aparelho padrão do programa de simulação. O sistema *Packaged Terminal Heat Pump Air Conditioner* (PTHP) é um

aparelho autônomo, similar aos aparelhos comercializados como “ar condicionado de janela”. Ele se diferencia dos sistemas tipo *Split* por ter todos os componentes, ventiladores, compressor e condensador, em uma única unidade. O PTHP realiza resfriamento por expansão direta e aquecimento pelo fluxo reverso do gás refrigerante. Na Figura 21 é apresentado um esquema do funcionamento do sistema de condicionamento de ar utilizado.

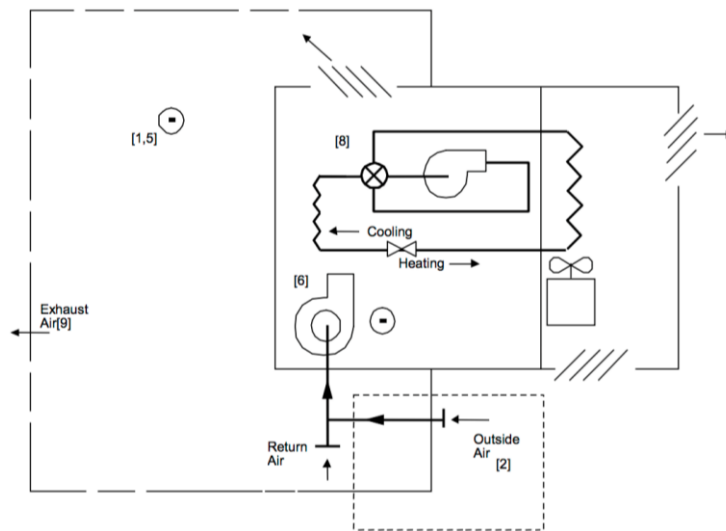


Figura 21 - Esquema de funcionamento do sistema PTHP (fonte: LBNL, 2004)

Por ser um sistema de expansão direta, o PTHP requer dados climáticos de temperatura de bulbo seco e úmido para calcular o consumo energético necessário para as trocas de calor nos ambientes. Também, é importante a definição do coeficiente de *performance* ou desempenho (COP) do compressor. O COP é a razão adimensional entre a capacidade do aparelho de remover o calor e a energia requerida pelo compressor para realizar esse trabalho. Para esta fase será adotado COP de 3,5, que significa dizer que, para cada unidade de energia consumida, serão fornecidas 3,5 unidades de energia térmica.

No modelo, o sistema PTHP funciona sempre que houver ocupação, de forma a atingir a temperatura de 24 °C, em caso de resfriamento, e 21 °C, em caso de aquecimento dos ambientes. O sistema é modelado com potência de autodimensionamento, ou seja, a potência é calculada conforme a necessidade dos ambientes. Além disso, estão previstos três aparelhos para a residência, um para cada ambiente de permanência prolongada.

## 4.2 RESULTADOS

Os resultados da simulação termoenergética da etapa de operação da edificação de estudo de caso e suas alternativas de envoltória são apresentados e discutidos a seguir. Inicialmente, o resultado da edificação de estudo de caso é comparado com diversos autores, brasileiros e internacionais, no sentido de aferir a qualidade do resultado, apresentado na Figura 22. Os resultados de energia de cada estudo foram convertidos para kWh para permitir comparações.

O consumo em energia elétrica para o estudo de caso (01 ParC Cob1) é apresentado considerando a climatização mecânica e consumos energéticos fixos em iluminação e equipamentos. O resultado apresentado por Tavares (2006) em uma residência de 60m<sup>2</sup> e Paulsen e Sposto (2013) em uma residência de 48 m<sup>2</sup> do PMCMV não consideram carga de climatização para edificações brasileiras e podem ser comparados diretamente ao resultado de consumos fixos do modelo de estudo (02 ParC Cob1), que considera energia de iluminação e equipamentos.

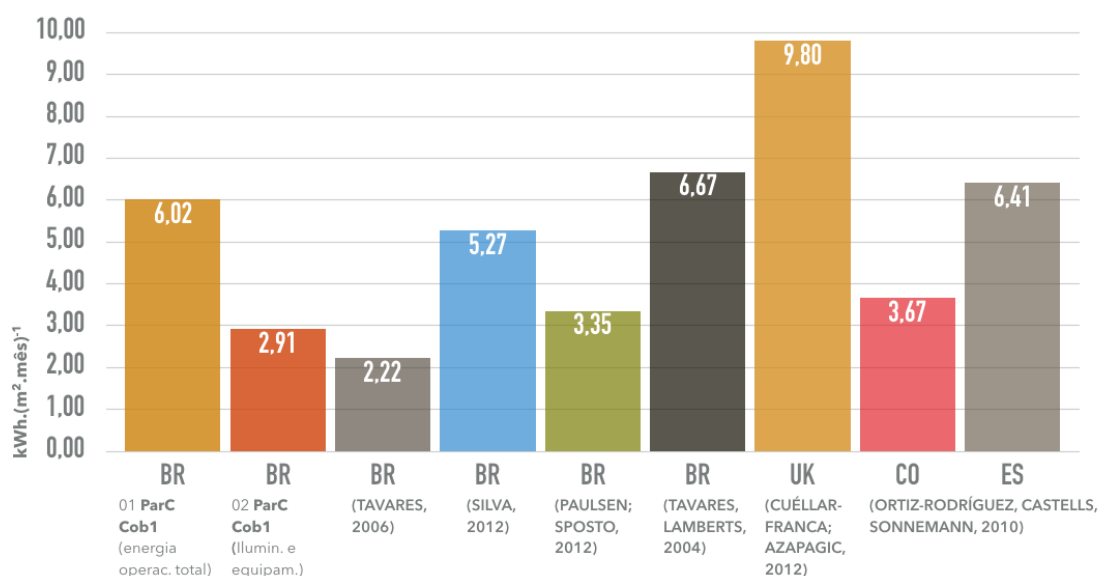


Figura 22 – Média mensal do consumo de energia para o m<sup>2</sup> de edificação durante o uso no período de 50 anos para diversos autores (kWh.(m<sup>2</sup>.mês)<sup>-1</sup>)

O resultado de Tavares e Lamberts (2004) utilizou médias gerais de todo consumo energético residencial, entre os anos de 1991 e 2001, os quais poderiam ser comparados com os resultados deste estudo de caso, considerando climatização. Mesmo assim, devem ser atentadas as diferenças de temporalidade e de escopo dos trabalhos, pois, no primeiro são avaliados energia elétrica e GLP. A comparação entre os resultados brasileiros demonstra que, nacionalmente, os consumos do estudo de caso aparentaram totais gerais comparáveis, atestando confiança sobre a resposta obtida.



Internacionalmente, Cuéllar-Franca e Azapagic (2012) avalia edificações no Reino Unido, compostas por paredes de alvenaria em bloco de concreto e cobertura com telhas de concreto, ambos sistemas com isolamento térmico. A edificação apresentada (60 m<sup>2</sup>), resulta nos maiores valores de consumo para o m<sup>2</sup> edificado, considerando que neste resultado estão expressas as mesmas categorias de consumo utilizadas no estudo de caso (01 ParC Cob1). Na edificação britânica, o elevado consumo energético com aquecimento é responsável por mais 80% do valor apresentado na Figura 22. Esse importante uso de energia pode ser visto pela diferença no maior consumo apresentada em relação aos outros estudos.

Ortiz-Rodrigues, Castells e Sonnemann (2010) apresentam resultados para uma residência na Colômbia e outra na Espanha. O caso colombiano não considera energia para climatização. Dessa forma, também, ajuda a aferir o resultado sem carga para condicionamento. Já o caso espanhol, considera climatização, mas parte de uma envoltória com alvenaria de tijolos cerâmicos e cobertura com telha cerâmica, ambos sistemas com isolamento térmico. Embora o resultado de consumo do último seja similar ao da casa de concreto, o isolamento térmico do modelo espanhol melhora o desempenho térmico da residência.

#### 4.2.1 Simulação termoenergética para as cinco envoltórias

Os resultados gerais dos sistemas descritos na primeira fase do programa experimental são apresentados na Figura 23. É possível perceber a tendência esperada, considerando o tipo de edificação e operação, de que valores menores de transmitância térmica estariam relacionados com menor consumo energia de climatização. Enquanto que na envoltória de estudo de caso (ParC Cob1), o consumo de climatização apresenta valores próximos à 50% do total, na envoltória ParA2 Cob2 estes valores são de 30%. Essa redução pode ser comparada com o estudo de Rodrigues e Freire (2014), em que para a ACV de um *retrofit* residencial em Portugal, os autores afirmaram redução de energia operacional entre 25% a 35%, em função da adição de isolamento do telhado (variações de espessura de lã de rocha, poliestireno e poliuretano). Por outro lado, não são percebidas diferenças importantes entre o sistema de paredes ParA1 e ParA2, com qualquer uma das configurações de cobertura (Figura 23).

A contribuição isolada dos consumos de climatização, para cada uma das envoltórias, é apresentada na Figura 24. Os maiores picos de consumo energético, para todos os modelos, ocorrem em janeiro e dezembro. A diferença no consumo de arrefecimento em janeiro para ParC Cob1 e ParA2 Cob2 é maior que 100%. No mesmo sentido,

grandes diferenças de consumo, entre os modelos citados, podem ser verificadas no período de inverno. Este resultado, também, confirma a baixa diferença entre as casas com paredes ParA1 e ParA2.

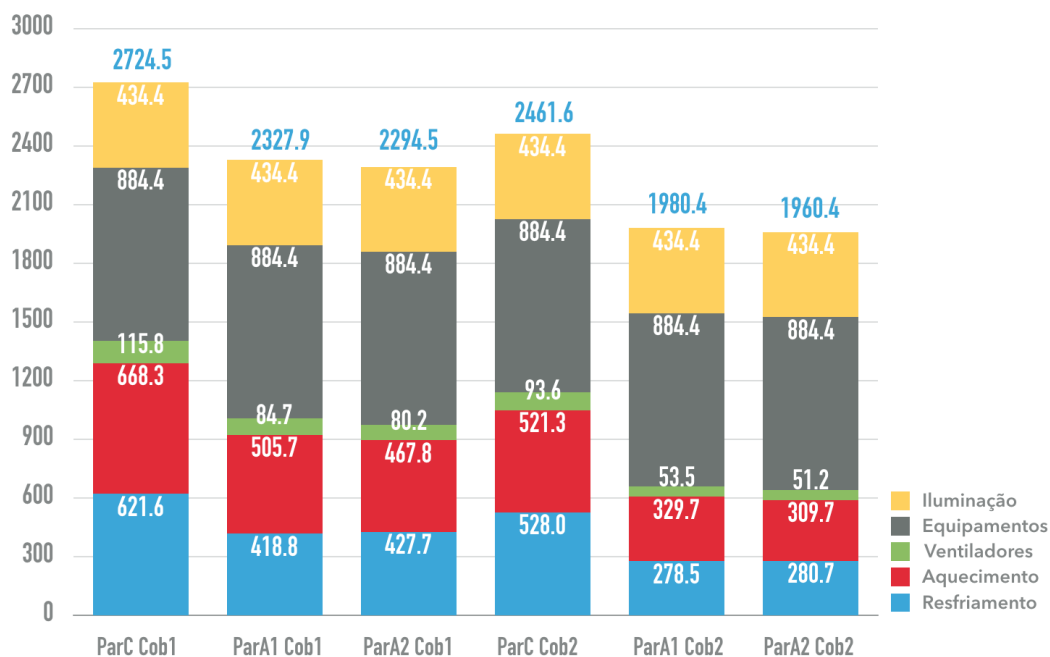


Figura 23 - Contribuição de cada sistema para o consumo energético das diferentes envoltórias analisadas para toda residência (kWh . ano<sup>-1</sup>)

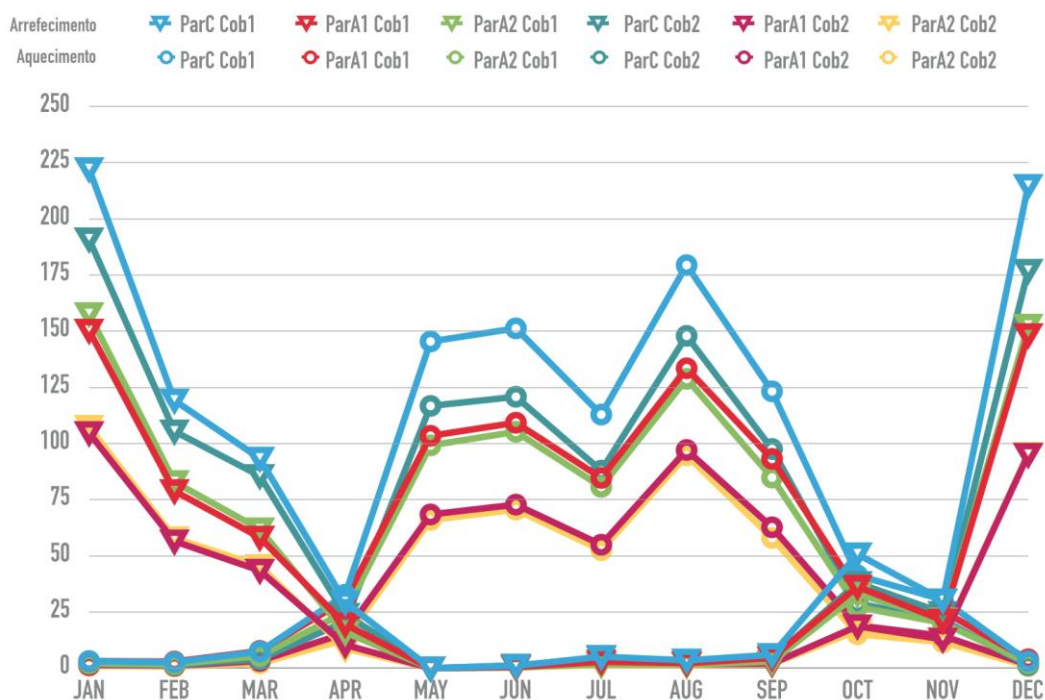


Figura 24 - Contribuição mensal do consumo de climatização em todas as envoltórias analisadas para toda residência (kWh . mês<sup>-1</sup>)

Frente aos resultados da simulação termoenergética das alternativas de envoltória é escolhida a envoltória de casa ParA1 Cob1 para ser comparada com a edificação referência, na próxima fase. A casa com ParA1 é escolhida por não apresentar diferenças importantes com a casa ParA2. Já cobertura Cob1 é escolhida em função das condições do mercado brasileiro de construção de habitações sociais. Embora a Cob1 gere consumo mais alto, frequentemente habitações sociais são marcadas por baixa qualidade térmica.

### 4.3 CONCLUSÃO DA FASE 1

O objetivo da Fase 1 foi testar diferentes alternativas para envoltória do estudo de caso. Para obter resultados que facilitassem a leitura e pudessem demonstrar a diferença que os sistemas de vedação proporcionam no uso de energia, foram assumidas simplificações. Por esse motivo, as simulações termoenergéticas partiram de um pressuposto que de uso intenso de condicionamento artificial, todas as horas ocupadas com faixa de conforto entre 21 °C e 24 °C. Esse pressuposto não é adequado, mas serve de orientação para validar o uso energético doméstico. O conforto térmico é uma condição individual e de difícil mensuração, especialmente em residências, onde as pessoas podem operar janelas e adaptar a vestimenta às condições climáticas.

Embora o resultado apresentado sirva aos objetivos da etapa, ele não pode ser usado integralmente como definição de uso de energia elétrica nas etapas seguintes, já que poderá mascarar resultados relacionados a outros impactos. Dessa forma, a Fase 2 fará uma revisão sobre o uso de energia elétrica residencial, definindo alguns novos parâmetros para as simulações.

De maneira geral, é possível afirmar que o comportamento de paredes de alvenaria é mais adequado ao clima da região de Porto Alegre, se comparado com a envoltória de paredes de concreto. Todavia, o impacto causado pelo uso de energia elétrica durante a operação da edificação não é o único impacto possível, por isso, as próximas fases consideram requerimentos relacionados a todo o ciclo de vida da edificação.

## 5 FASE 2 – ESTUDO PRELIMINAR DE ACV

A Fase 2 apresenta a ACV preliminar sobre as duas alternativas de envoltória, escolhidas na fase anterior: (a) o modelo de casa com paredes de concreto (ParC) e (b) o modelo de casa com paredes de alvenaria (ParA). Esta etapa tem o objetivo de afirmar, preliminarmente, quais componentes construtivos e fases da edificação terão maior impacto ambiental. A partir destes resultados, será possível priorizar o detalhamento de dados de ICV na fase seguinte. Assim, processos que tendem a influenciar mais o resultado poderão ser estudados com maior profundidade do que outros, que tenderão a influenciar menos.

### 5.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO

As decisões iniciais foram compostas pelos itens de *definição de objetivo e escopo* da NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, como *definição de sistema de produto, unidade funcional, fronteiras de sistema e limitações*. A avaliação de inventário desta etapa foi baseada em dados secundários extraídos da base internacional *Ecoinvent* v3.3 (WERNET et al., 2016), de abrangência global com processos tipo *Market*.

Os resultados da Fase 2 não representam diretamente o mercado nacional, mas sim o mercado global. Dessa forma, considerando que o erro de localização geográfica é o mesmo para todos os processos, eles podem ser comparados entre si, indicando tendências de contribuição. Na Fase 3, com o uso de dados adaptados para o contexto brasileiro, serão analisadas as diferenças dos resultados com dados internacionais.

O sistema de produto é composto pelos processos do ciclo de vida de uma habitação unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida com 40,29 m<sup>2</sup>, de área útil, pelo período de 50 anos. O ciclo de vida da edificação contempla as etapas de extração de matéria prima, produção de materiais de construção, construção da edificação, desperdício de substituição, desperdício em canteiro, manutenção dos sistemas construtivos, energia de operação da edificação, demolição e destinação final. Uma descrição geral do sistema de produto é apresentada na Figura 25.

A seleção da Fronteira do sistema da Fase 2 considera as etapas mais importantes para as análises e comparações deste trabalho, levando em conta as premissas supostas pelo programa experimental. Nesta fase do trabalho não é considerada a etapa de demolição no fim de vida, nem a disposição de resíduos ou reciclagem. Essa decisão

foi tomada baseada em diversos estudos anteriores. Para Ortiz, Castells e Sonnemann (2010) a etapa de fim de vida impactou menos de 1%, em todas as categorias analisadas, para uma residência localizada no Mediterrâneo europeu e outra na Colômbia, utilizando três bases de dados distintas.

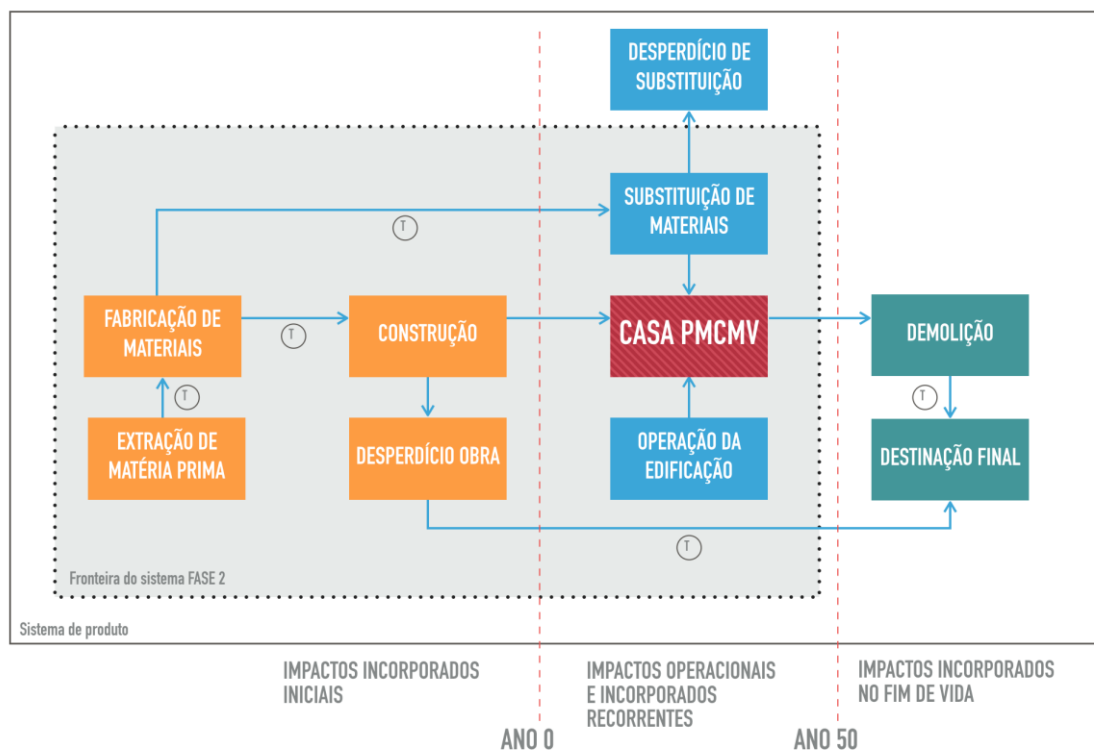


Figura 25 - Sistema de produto e fronteiras do sistema da Fase 2, os sistemas de produto detalhados da construção e operação são apresentados posteriormente.

Cuéllar-Franca e Azapagic (2012) avaliaram o fim de vida, variando entre menos de 1% até 4%, entre categorias de impacto para três casas no Reino Unido. Por fim, para sistemas específicos, Rodrigues e Freire (2014) consideraram o fim de vida como sendo representativo de 1% até 3% para telhados.

Especificamente à construção da edificação, o sistema de produto é apresentado na Figura 26. Na Fase 2 não foram analisados os impactos relativos às esquadrias de portas e janelas, nem o processo de galvanização da estrutura, em perfis de aço carbono do telhado. Essa escolha ocorre devido às simplificações inerentes ao processo escolhido de construção de inventário desta etapa, detalhados no subcapítulo seguinte. Como a base de dados utilizada possui processos de esquadrias adaptadas somente para a realidade europeia, esse dado foi considerado não representativo para o cenário brasileiro, e não será analisado neste momento.

Sobre a etapa de operação da edificação, a Fronteira do sistema da Fase 2 considera três dos principais elementos de consumo de energia elétrica para o setor residencial brasileiro, incluindo a energia para climatização, iluminação e equipamentos. Entretanto, novos dados de climatização artificial são gerados com base em definições mais recorrentes de uso energético. O método é detalhado na etapa de inventário de ciclo de vida, item 4.1.4.

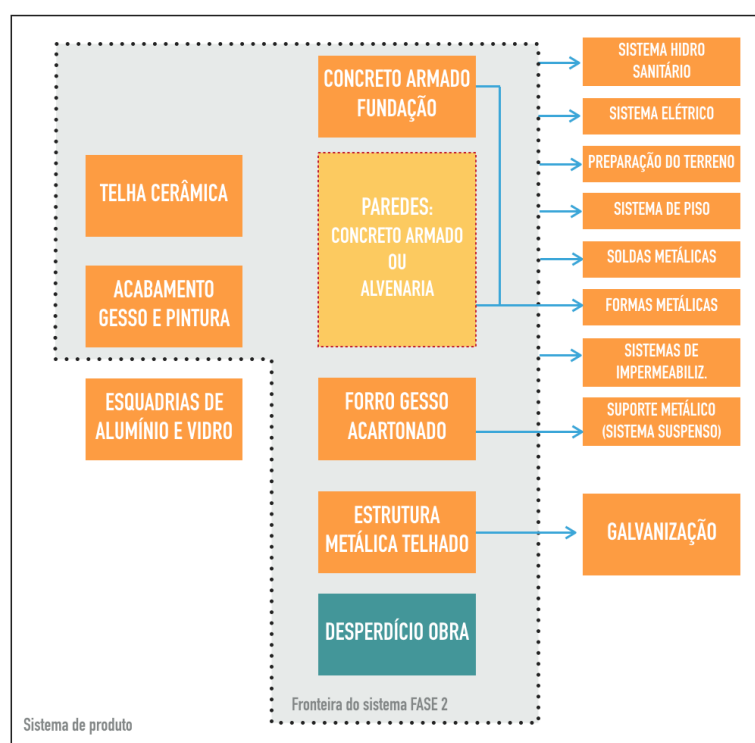


Figura 26 - Sistema de produto e fronteiras do sistema na Fase 2 da etapa de construção da edificação

Por estar fora do escopo deste trabalho, não são considerados o ciclo de vida de: aparelhos eletrodomésticos (sendo considerado somente o uso de energia elétrica); sistemas de geração e uso de calor para cocção e aquecimento de água; sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário; mobiliário e processos de limpeza. O sistema de produto da etapa mencionada é apresentado pela Figura 27.

A unidade funcional definida para a pesquisa foi *1 m<sup>2</sup> de área útil de edificação unifamiliar residencial do programa Minha Casa Minha Vida, pelo período de 50 anos*. A escolha desta unidade funcional se deu de maneira a facilitar futuras comparações com outros autores. Ainda, essa unidade independe da área de edificação construída, podendo servir como um indicador do potencial de impactos ambientais do ciclo de vida de empreendimentos do PMCMV.

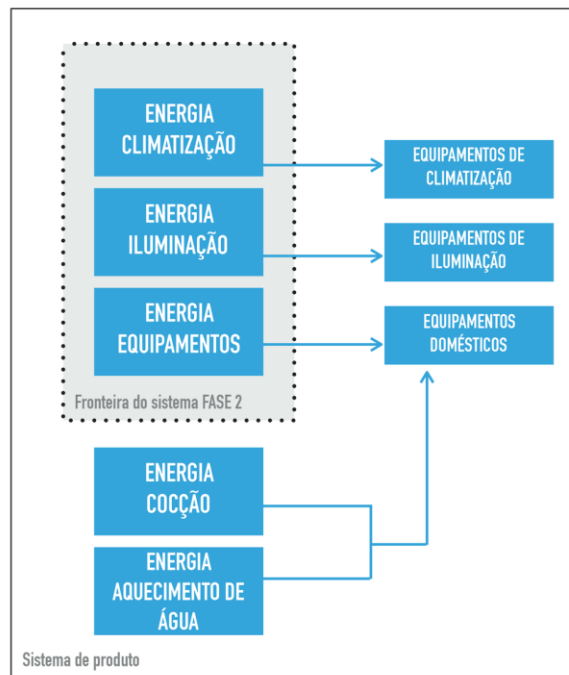


Figura 27 - Sistema de produto e fronteiras do sistema na Fase 2 da etapa de operação da edificação

Este trabalho terá como público alvo três agentes. O setor residencial, de maneira que possa servir como mais uma referência na conscientização do uso racional e eficiente de energia, e também na tomada de decisão sobre algumas possibilidades de manutenção. O setor da construção civil, de forma a colaborar na obtenção de dados sobre a repercussão que decisões de projeto e construção podem refletir no impacto ambiental total do ciclo de vida das edificações. E o setor público, onde poderá servir na atualização de alguns dos impactos dos setores citados anteriormente, especificamente nos impactos potenciais que a tipologia de projeto do estudo de caso do PMCMV pode gerar ou evitar.

## 5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Este subcapítulo é dividido em duas partes, requerimentos incorporados e operacionais. O primeiro definirá os materiais e processos relativos à construção (requerimentos incorporados iniciais), e manutenções (requerimentos incorporados recorrentes). Já a segunda parte realiza a quantificação de energia para o funcionamento da edificação durante seu ciclo de vida.

### 5.2.1 Requerimentos incorporados

O inventário de materiais de construção para a edificação de estudo de caso foi apresentado na Tabela 2. Adicionalmente, na Tabela 6, é apresentado o inventário quantitativo dos materiais componentes da parede de alvenaria.

Tabela 6 - Inventário quantitativo de materiais de construção para parede de alvenaria (fonte: adaptado de 1 -Lafontaine et al. 2012b; e 2 - projeto fornecido pela construtora)

Sistema	Item	Esp. (cm)	Dens. (kg/dm <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Vol. (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Fonte
Paredes	Bloco cerâmico	14,00	97,50	119,33		11634,68	(1)
	Barra de aço		0,40	119,33		47,73	(1)
	Arg. assentamento	1,00	15,00	2,20	119,33	0,81	1789,95 (1)
	Arg. Reboco (1 face)	2,00	62,50	2,20	40,80	1,16	2550,24 (1)
	Pasta de gesso			1,15		664,77	(2)
	Tinta acrílica		0,26	69,38		18,04	(2)
	Tinta PVA		0,26	150,13		39,03	(2)

As manutenções ao longo do ciclo de vida serão fixadas como a vida útil de projeto (VUP) mínima definida na NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a), em referência aos exemplos do Anexo C. Na Tabela 7 é apresentado o resumo dos materiais em que serão consideradas substituições ao longo da vida útil de 50 anos da edificação.

Tabela 7 - Vida Útil de Projeto (VUP) e número de substituições à serem consideradas na Fase 2 (fonte: adaptado de NBR 15.575-1)

Item	VUP	Substituições em 50 anos
Telha cerâmica	13	3
Gesso acartonado	8	6
Gesso em pasta	8	6
Argamassa de reboco	13	3
Pintura interna	3	16
Pintura externa	8	6

O ICV foi feito com dados extraídos da base internacional *Ecoinvent* v3.3 (WERNET et al., 2016), para processos com levantamento em nível global, em que é assegurada uma aproximação estatística das médias de produção para todo o planeta, seja com o uso de dados regionais, seja com o uso de extrapolações de outras bases geográficas ou ano (WEIDEMA et al., 2013). Estas extrapolações podem gerar incertezas, mas considerando que todos os dados tenderão ao mesmo erro, os resultados poderão ser comparadas entre si. Por outro lado, comparar os resultados de processos com



extrapolações, com dados regionalizados ou mais detalhados, não é aconselhável já que a qualidade no levantamento de inventário tende a diferenças.

Nos processos da base *Ecoinvent* são diferenciadas atividades de mercado (*Market*), de atividades puramente de transformação. As atividades de mercado são atividades de transformação (processos industriais, por exemplo), acrescidas de transporte e outras atividades de venda. Os dados analisados nesta etapa do trabalho serão atividades de mercado a nível global produzidas pelo *Ecoinvent*. Desta maneira, serão contabilizados aos processos atividades de transporte médio dos produtos, até o local da obra. Novamente, os dados de transporte referem-se a dados médios globais de diversos modais, que poderão ser comprados entre si, mas não com trabalhos de outro escopo.

Os sistemas de esquadria não foram avaliados, pois os sistemas disponíveis na base de dados são significativamente diferentes dos aplicados no MCMV. Além disso, a tinta avaliada para os processos de pintura, foi do tipo alquídica à base de solvente, similar às tintas à base de óleo. Essa tinta não é comumente utilizada em pinturas de parede para empreendimentos sociais no Brasil, mas segundo as normas técnicas NBR 15.494, ela é uma das possibilidades para cobrimento de pintura interna ou externa (ABNT, 2015).

## 5.2.2 Requerimentos operacionais

Frente aos resultados da Fase 1 para o uso de energia, são feitas algumas novas considerações para refinar a simulação termoenergética. A primeira diz respeito à definição de novos controles de temperatura para o condicionamento artificial. A segunda consideração diz respeito ao uso de ventilação natural pela abertura de janelas, pois essa é uma das principais estratégias de condicionamento passivo na região de Porto Alegre, como visto na caracterização climática apresentada Fase 1. Além disso, são consideradas taxas de infiltração por frestas em janelas. Todas as outras definições e agendas de funcionamento seguem iguais às da Fase 1.

A definição do conforto térmico de temperatura é complexa, pois depende de diversos fatores que não são de domínio do projetista. Pessoas em um mesmo ambiente, sujeitas ao mesmo clima e com condições culturais semelhantes, terão opiniões diferentes sobre conforto térmico. Mesmo com diversos estudos sobre o assunto, não existe um padrão absoluto para conforto térmico (DJONGYANG; TCHINDA; NJOMO, 2010).

Com isso em mente, todavia, para considerar o uso possível de condicionamento artificial na habitação, uma faixa de conforto de ar interna é definida como o intervalo

entre 20 °C e 28 °C. Abaixo ou acima destes limites, o condicionamento artificial é ativado quando houver ocupação. A escolha desta definição se deu pela leitura e análise do arquivo climático de Porto Alegre utilizado abordagem de conforto térmico adaptativo (CTA). O CTA considera que o ambiente externo influencia o conforto interno e que os usuários podem adaptar-se às diferentes temperaturas, dessa forma, verifica-se a aceitabilidade do ambiente frente sua dependência de contexto, comportamento e expectativas dos usuários (DJONGYANG; TCHINDA; NJOMO, 2010).

A ASHRAE 55 (2010) define um modelo adaptativo em que os ocupantes podem abrir e fechar janelas, e que os usuários podem adaptar suas vestimentas (0,5 – 1,0 clo<sup>4</sup>) em função das condições térmicas, sendo que o nível de atividade é de estado sedentário (1 – 1,3 MET<sup>5</sup>). A Equação 3 está baseada do modelo adaptativo da norma americana (TOE; KUBOTA, 2013).

$$T_{conf} = 0,31 \cdot T_{ext.m} + 17,8 \quad \text{Equação 3}$$

onde:

$T_{conf}$  : é a temperatura operativa de conforto;

$T_{ext.m}$  : é a média da temperatura externa de bulbo seco.

Para definir a faixa de conforto foram consideradas as médias mensais mínima e máxima de temperaturas. A faixa de conforto anual compreende então as temperaturas de conforto mensal máxima e mínima. A Figura 28 apresenta as faixas de conforto mensal e a faixa de conforto anual que é utilizada, em conjunto com as médias as médias de temperatura utilizadas no cálculo.

---

<sup>4</sup> A unidade “clo” (*Clothing Insulation*) representa o isolamento térmico promovido pelo uso de roupas.

<sup>5</sup> A unidade “MET” (*Metabolic Equivalent of Task*) representa a energia requerida para exercer alguma atividade.

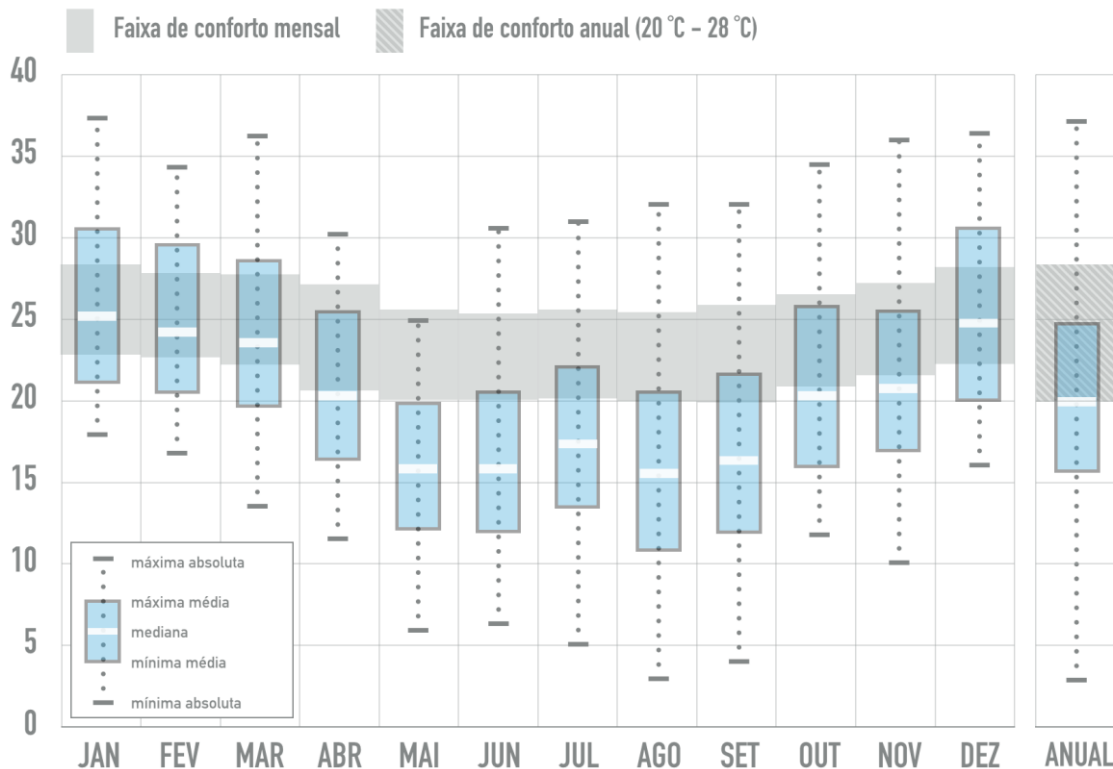


Figura 28 - Análise das temperaturas de bulbo seco médias e absolutas mensais com a faixa de conforto térmico mensal e anual calculada.

A ventilação natural é uma das premissas do CTA, pois pode diminuir a temperatura dos ambientes quando houver condições propícias de umidade e troca de ar. Para a ventilação natural foi utilizado o módulo “*wind and stack open area*” dentro da ferramenta *OpenStudio*. Esse módulo permite a abertura do vão operável das janelas se algumas condições são atingidas, a Equação 4 expressa tais condições.

$$f(Abr_{jan}) = \begin{cases} \text{sim,} & \text{se } T_{int} > 21^\circ\text{C e } 20^\circ\text{C} < T_{ext} < 28^\circ\text{C} \\ \text{não,} & \text{qualquer outra condição} \end{cases} \quad \text{Equação 4}$$

onde:

$f(Abr_{jan})$ : é a função que determina se a janela é aberta;

$T_{int}$ : é a temperatura interna do ar;

$T_{ext}$ : é a temperatura externa de bulbo seco.

A  $T_{ext}$  do ar é condicionada conforme a temperatura da faixa de conforto anual. Além disso, a taxa de infiltração de ar para esquadrias é calculada conforme a NBR 10821 (ABNT, 2002), que define exigência máxima de permeabilidade ao ar em 5 m<sup>3</sup>/h a cada metro linear de juntas abertas em edifícios condicionados artificialmente. Ainda segundo

a norma, juntas abertas são os encontros entre as partes móveis da esquadria e o encontro entre as partes móveis e fixas da mesma.

### 5.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

Os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) utilizados são aqueles recomendados pela EN 15804 (CEN, 2013), que estipula as regras para declaração ambiental de produtos de construção civil. Os métodos de avaliação estão dispostos em sete categorias de impacto no nível *midpoint* e são apresentados pela Tabela 8.

Embora as categorias de impacto sejam descritas pela norma, a definição específica da metodologia a ser utilizada nesta dissertação é definida individualmente abaixo. Os fatores de caracterização foram retirados da compilação de categorias de impacto do CML 2001, desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden.

Tabela 8 - Métodos de AICV utilizados (adaptado de CEN, 2013).

Sigla	Categoria de impacto	Unidade
<b>ADP f</b>	Depleção potencial de recursos abióticos – combustíveis fósseis	kg Sb eq.
<b>ADP nf</b>	Depleção potencial de recursos abióticos – elementos não fósseis	MJ
<b>AP</b>	Potencial de acidificação de solo e água	kg SO <sub>2</sub> eq.
<b>EP</b>	Potencial de Eutrofização	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq.
<b>GWP</b>	Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos	kg CO <sub>2</sub> eq.
<b>ODP</b>	Potencial de depleção da camada de ozônio estratosférico	kg CFC-11 eq.
<b>POCP</b>	Potencial de formação de ozônio fotoquímico	kg Etileno eq.

As categorias ADP f e ADP nf, segundo a norma, seguem a metodologia de depleção de recursos (última reserva) desenvolvido por OERS et al. (2002). A metodologia considera a depleção de recursos em quatro tipos, última reserva, última reserva extraível, reserva base e reserva econômica. A definição de *última reserva* é a quantidade de um recurso (elemento químico ou componente) estimado pela média de sua concentração natural na crosta terrestre, assumindo uma profundidade de 10 km (OERS et al., 2002). Ou seja, essa definição considera a existência quantitativa dos recursos, não importando se a extração é possível ou não. Ao passo que a *última reserva extraível* considera todas as possibilidades técnicas (presentes e, até mesmo, futuras) para extração dos recursos na crosta do planeta. Além delas, a *reserva base* considera os recursos que podem ser extraídos com uso de todas as tecnologias

correntes. Enquanto a *reserva econômica* considera as tecnologias correntes e economicamente viáveis para extração (OERS et al., 2002).

Frente a essas definições, a melhor escolha seria utilizar a *última reserva extraível*, pois ela está melhor relacionada com os problemas causados pela depleção de recursos. Todavia, é impossível prever quais tecnologias futuras poderão ser utilizadas para extrair elementos em concentrações dispersas (OERS; GUINÉE, 2016). Dessa forma, esse método não pode ser utilizado ou até mesmo calculado.

A *última reserva extraível* está em algum ponto entre a última reserva e a reserva base, sendo então os dois últimos frequentemente utilizados. Como a EN 15804 cita que a definição de ADP f e ADP nf ainda está em análise e pode ser alterada em sua próxima revisão, nesta dissertação são utilizadas as recomendações de AICV, para ADP, do Manual do Sistema Internacional de Referência de Dados sobre Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD, 2011). O ILCD recomenda o uso da *reserva base* como metodologia de depleção de recurso. Dessa forma, ADP f (com equivalência em poder calorífico inferior) e ADP nf são calculados separadamente com referência em *reserva base*, pelo CML 2001 *non-baseline*.

O AP utiliza o cálculo de Huijbregts (1999) como referência na média europeia (*average Europe total*). O impacto de AP está relacionado com a emissão de poluentes ácidos, que no ar são absorvidos pela precipitação atmosférica e caem na forma de chuva ácida, afetando solo, corpos de água, fauna, flora e materiais, como edifícios e esculturas (GUINÉE et al., 2002). AP tem abrangência local ou regional, já que as nuvens ácidas podem ser carregadas por correntes de ar e precipitar em locais diferentes da emissão inicial. Os principais poluentes estão relacionados com óxidos sulfúricos (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e amônia (NH<sub>4</sub>) (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015). Os fatores de caracterização utilizados são os mesmos do CML 2001 *baseline*.

O EP considera o método desenvolvido por Heijungs et al. (1992) com base em fatores europeus de caracterização, considerando uma cobertura espacial e temporal genérica. EP é a nutrificação excessiva de ecossistemas aquáticos com nutrientes de nitrogênio (N) e fosforo (P) (ILCD, 2011). A EP aumenta a quantidade de algas e flora, essas reduzem o oxigênio disponível na água, podendo acarretar no colapso da fauna marinha (BAYER et al., 2010). EP é considerado um impacto local e os principais poluentes estão relacionados com emissões de fosfato (PO<sub>4</sub>), NO<sub>x</sub>, nitratos e NH<sub>4</sub> (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015). Os fatores de caracterização utilizados são os mesmos do CML 2001 *baseline*.

O GWP é calculado com base no método IPCC 2007 para mudanças climáticas no horizonte de tempo de 100 anos. As mudanças climáticas<sup>6</sup> estão relacionadas principalmente com o aumento da temperatura terrestre causada pelo efeito estufa de causas antropogênicas<sup>7</sup> (NASA, 2016). GWP é considerado um impacto global e os principais poluentes são relacionados com emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, hidrocarbonetos, entre outros (GUINÉE et al., 2002). Os fatores de caracterização utilizados são os mesmos do CML-2001 *baseline*.

O ODP tem base no modelo de estado estacionário divulgado pela Organização Meteorológica Mundial para depleção da camada de ozônio em 2003. A ODP é a diminuição da camada de ozônio estratosférico pela emissão de químicos, o que permite menor proteção contra radiação ultravioleta solar, esse efeito tem causas adversas em humanos e biosfera, como câncer de pele, catarata, inibição do crescimento de plantas, entre outros (WMO, 2011). Os fatores de caracterização utilizados são os mesmos do CML 2001 *baseline*.

O POCP tem base no modelo desenvolvido por Derwent et al. (1998) e adaptado por Jenkin e Hayman (1999). A formação de oxidantes fotoquímicos (como ozônio) no nível da troposfera ocorre pela reação entre alguns químicos (de causas naturais e antropogênicas, VOCs, CO, NO<sub>x</sub>) com a luz solar (LABOUZE et al., 2004). Entretanto, POCP é diretamente dependente da pré-existência de poluentes de base (“*background pollutants*”), nomeadamente NO<sub>x</sub>, e condições meteorológicas locais, o que torna complexos os métodos de avaliação (GUINÉE et al., 2002). Existem dois modelos de POCP, um de baixa concentração de poluente base (*low-NO<sub>x</sub>*, < 0,02 mg/m<sup>3</sup>) e outro com alta concentração (*high-NO<sub>x</sub>*, > 0,02 mg/m<sup>3</sup>), estes modelos estão relacionados com as taxas de concentração europeia (HAUSCHILD; WENZEL, 1998). A EN 15804 recomenda o uso de POCP para alta concentração do poluente base (CEN, 2013), entretanto, a região metropolitana de Porto Alegre pode ser considerada como de baixa concentração do poluente. A média anual de NO<sub>2</sub> da região metropolitana de Porto Alegre é de 0,014, 0,013 e 0,008 mg/m<sup>3</sup> para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente (FEPAM, 2016). Dessa forma, esta dissertação considera o método POCP (*low-NO<sub>x</sub>*) com fatores de caracterização retirados do CML 2001 *non baseline*.

---

<sup>6</sup>Por exemplo, aumento do nível do mar, aumento de temperatura do ar, aumento da temperatura dos oceanos, eventos extremos, entre outros (NASA, 2016).

<sup>7</sup> Efeito estufa natural é uma das causas para a existência e manutenção da vida no planeta.

## 5.4 RESULTADOS

Os resultados da ACV preliminares são apresentados em três diferentes grupos de impactos, quais sejam, incorporados iniciais, incorporados recorrentes e operacionais. Os requerimentos operacionais se confirmam como os mais importantes ao longo do ciclo de vida de 50 anos, para a maioria dos impactos analisados, chegando em até 65% para OPD. Já as contribuições de impacto incorporado inicial são as mais baixas, 13% a 20%. Entretanto, as contribuições do impacto incorporado total (inicial e recorrente) podem chegar em até 78% em ADP nf, e entre 43% a 56%, nas categorias ADP f, AP, EP e GWP. O resultado geral de contribuições das fases analisadas é apresentado na Figura 29.

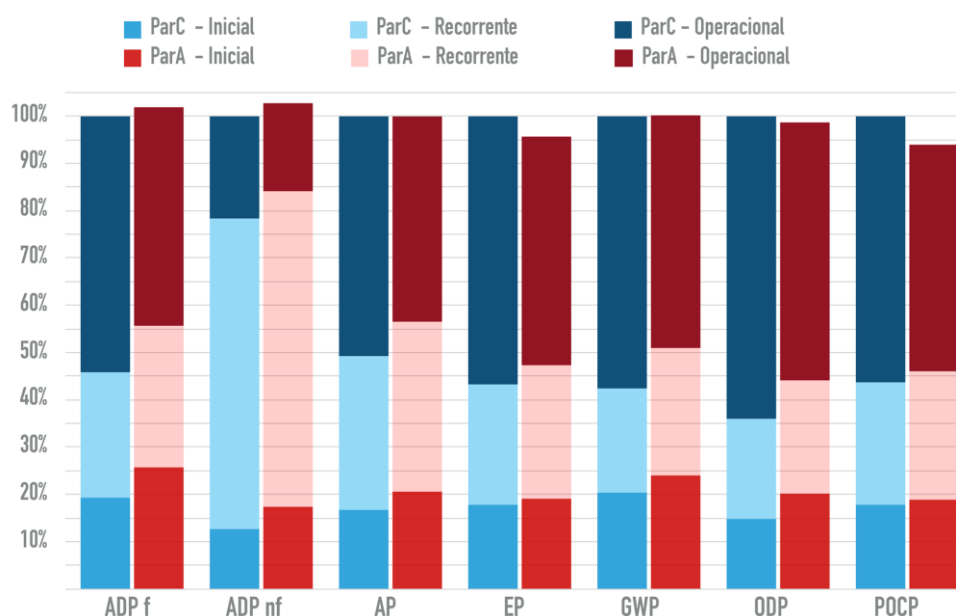


Figura 29 - Contribuições totais dos projetos analisados, normalizados pelos impactos da construção com paredes de concreto ParC (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico).

Em termos gerais, os impactos incorporados recorrentes, produto das substituições dos sistemas da edificação, aparecem como segundo mais importante contribuinte de impactos, para qualquer modelo analisado. O resultado mais alto para os impactos incorporados recorrentes, em relação aos iniciais, é relacionado ao número de substituições dos sistemas ao longo do ciclo de vida. A NBR 15.575 estabelece valores mínimos de vida útil de projeto (VUP) para materiais e sistemas. Se esses valores de durabilidade mínima forem seguidos de forma irrestrita pela indústria, o resultado ambiental pode ser majorado na construção de edificações.

De maneira geral, considerando todo o impacto no ciclo de vida, o modelo ParA tem menor impacto ambiental em 3/7 categorias, enquanto o ParC tem impacto menor em 2/7 categorias, sendo que ambos possuem impactos similares em 2/7 categorias. É interessante notar que na fase anterior, embora o impacto operacional do modelo ParA tenha sido da ordem de 14% menor que ParC, o resultado do estudo preliminar de ACV não apresenta distanciamentos tão grandes. A diferença chega no máximo em 6% considerando os impactos totais. Esse resultado se deve a dois motivos: as novas definições de energia, com padrão menos intensivo para condicionamento artificial; e o resultado mais impactante dos requerimentos incorporados para o sistema de parede de alvenaria, em relação à parede de concreto, em todas as categorias analisadas (Figura 30).

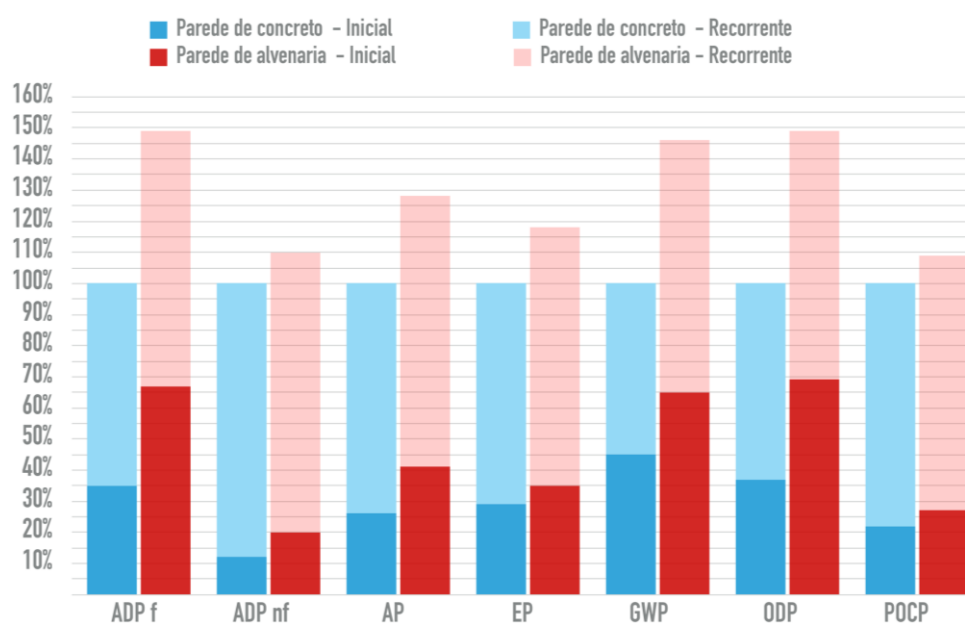


Figura 30 - Contribuições dos impactos incorporados iniciais e recorrentes do sistema de paredes de concreto (ParC) e alvenaria (ParA), normalizados pelos impactos da casa ParC (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico)

O resultado de comparação de paredes não era inicialmente esperado, tendo em vista a ACV de produtos cerâmicos divulgados pelo Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) (LAFONTAINE et al., 2012b). No estudo citado são comparadas paredes de blocos cerâmicos, de blocos de concreto e de concreto armado. O resultado publicado pela ANICER apresenta menores impactos para alvenaria cerâmica em todas as categorias analisadas e os piores impactos para a parede de concreto.

Essa diferença nos resultados expõe uma característica inerente ao processo de produção de qualquer concreto, o método de dosagem. Em trabalho de Oliveira et al.



(2014) são calculadas as emissões de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de diversos tipos de concretos produzidos no país e, em função da quantidade e tipo de cimento utilizado (CP II-F, CP II-E, CP III, CP V), essas emissões podem variar de 50 kg a até 400 kg de CO<sub>2</sub> para concretos com a mesma resistência à compressão. Essa diferença também ajuda a localizar um dos primeiros pontos de ação deste trabalho, que exigirá um detalhamento preciso dos sistemas de parede ParC e ParA.

Outro argumento que explicita a diferença é o dado de ICV de bloco cerâmico utilizado. No processo de referência da base de dados, a produção ocorre com uso de energias não renováveis. Já no estudo da ANICER, houve adaptação da produção do bloco, considerando, entre outras coisas, o uso de energias alternativas.

Em relação às contribuições incorporadas iniciais e recorrentes dos sistemas que compõe a casa ParC (Figura 31), os requerimentos mais importantes são relativos à substituição dos revestimentos de parede. Em relação aos impactos incorporados iniciais, o sistema de paredes e telhado dividem os principais impactos, esse comportamento é dado principalmente pela contribuição mássica mais alta dos sistemas.

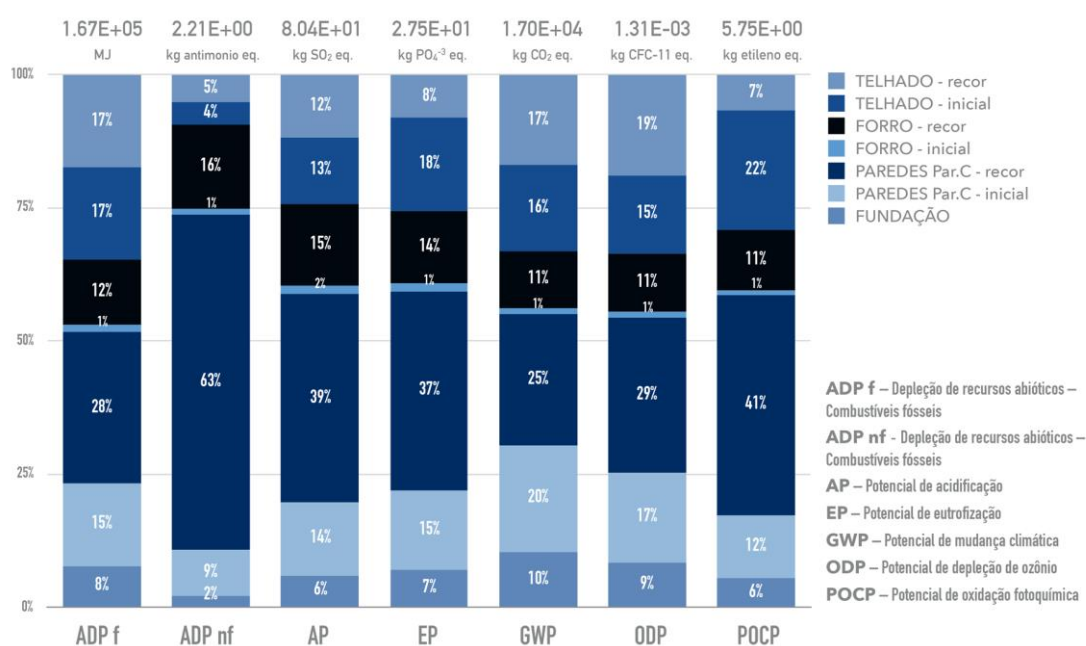


Figura 31 - Contribuições incorporadas iniciais e recorrentes dos sistemas construtivos no modelo com paredes de concreto (ParC).

No mesmo sentido, as contribuições dos sistemas construtivos no modelo com paredes de alvenaria (Figura 32), demonstra que as manutenções da parede são responsáveis pelos principais impactos. Entretanto, observa-se que a construção da parede também é bastante representativa no conjunto.

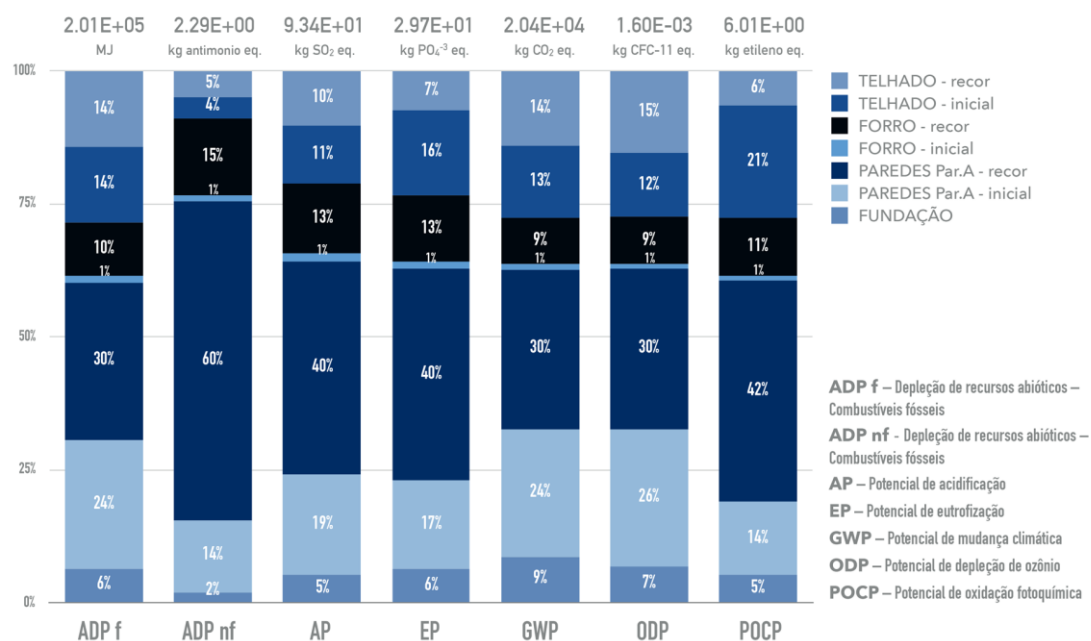


Figura 32 - Contribuições relativas incorporadas e recorrentes dos sistemas construtivos no modelo de paredes de alvenaria ParA

As contribuições dos materiais de construção para os diferentes sistemas construtivos são detalhadas a continuação.

### 5.4.1 Sistemas construtivos

Para o sistema de fundação (Figura 33), onde não se consideram impactos recorrentes, o concreto é o material que mais impacta. Como o aço tem uma representação de massa relativamente pequena, apenas o impacto de oxidação fotoquímica (POCP) fica mais alto, pois sua caracterização é especialmente sensível à produção do aço, em função da queima de combustíveis fósseis. Novamente, a dosagem do concreto é importante. As categorias de impacto mais significativas nesse processo também estão relacionadas a quantidade e tipo de cimento utilizado. Por exemplo, em GWP, pela emissão de CO<sub>2</sub>, em ADP f, pelo alto consumo energético da indústria.

Sobre o sistema de paredes de concreto (Figura 34) e de alvenaria (Figura 35), os impactos recorrentes estão entre os mais importantes, como citado anteriormente. Entretanto, os processos de pintura ao longo do ciclo de vida se sobrepõe a todos os outros. Esse resultado guarda as proporções do método de inventário utilizado, especialmente, do tipo de tinta escolhido para representar o processo de pintura. Por limitação do banco de dados, a tinta disponível é do tipo alquídica em solução de 60%, desconsiderando o solvente. Esse tipo de produto representaria melhor as tintas à base

de óleo, que não são utilizadas com frequência para pintura de paredes no Brasil, mas foram utilizadas neste modelo como um indicativo.

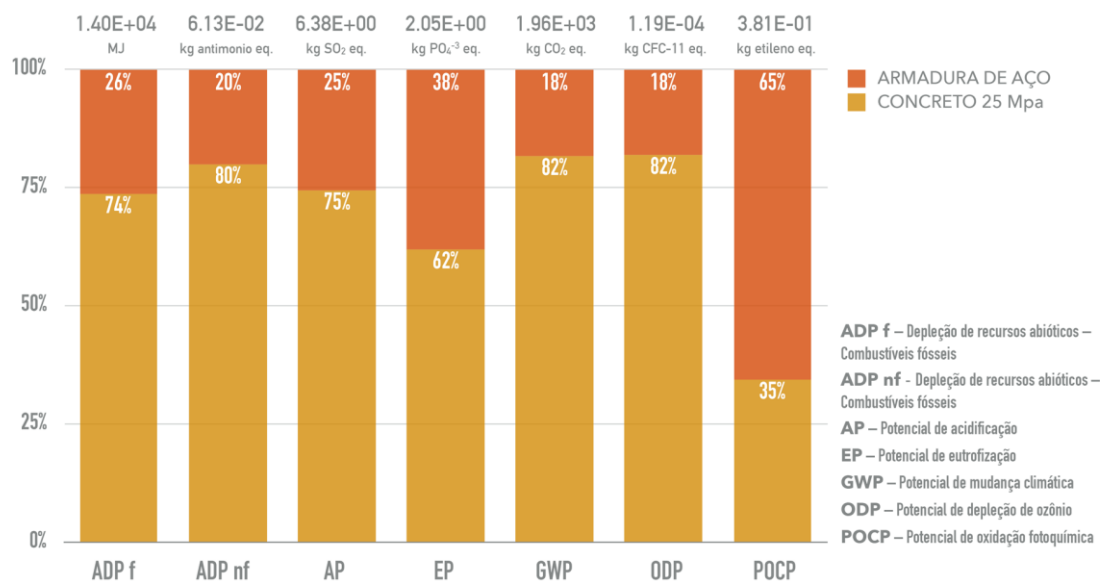


Figura 33 - Contribuições relativas para o sistema de fundação tipo *radier*.

Além disso, por conta do baixo requisito de VUP dos processos de pintura na norma de desempenho, 3 anos internamente e 8 anos externamente, a tinta acaba por agravar sua relação aos impactos. Nesse sentido, os processos de pintura são mais um ponto de ação desta dissertação.

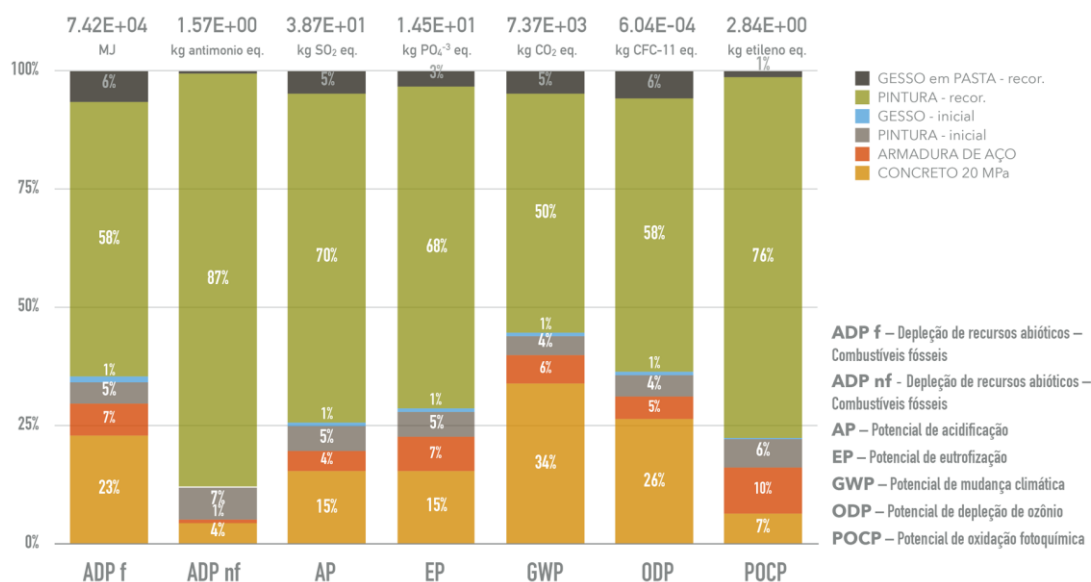


Figura 34 - Contribuições relativas para o sistema de paredes de concreto no modelo ParC.

Em ambas as paredes também é possível notar o reduzido impacto relativo ao uso de armadura de aço. A baixa contribuição do aço era esperada pela pequena representação mássica em ambos os sistemas de parede. Esse resultado destoa

parcialmente do já citado estudo da ANICER (LAFONTAINE et al., 2012b), onde em mudanças climáticas, o aço representa 30% das contribuições do sistema de paredes de concreto. O estudo da ANICER considera o uso de aproximadamente 9,5 kg de aço de construção por metro quadrado de parede de concreto. Já o inventário quantitativo de materiais do estudo de caso, na Tabela 2, apresenta o uso de apenas 1,71 kg de aço/m<sup>2</sup>. No projeto é utilizada uma tela de aço soldada nervurada com 15 cm de espaçamento entre barras, que possuem 3,4 mm de diâmetro. Por isso, o processo de armadura das paredes acaba não sendo tão importante nos resultados preliminares. Além disso, o cenário de manutenções do estudo citado é substancialmente diferente, pois não são consideradas substituições de pinturas e a durabilidade da argamassa de reboco é igual à da parede (40 anos).

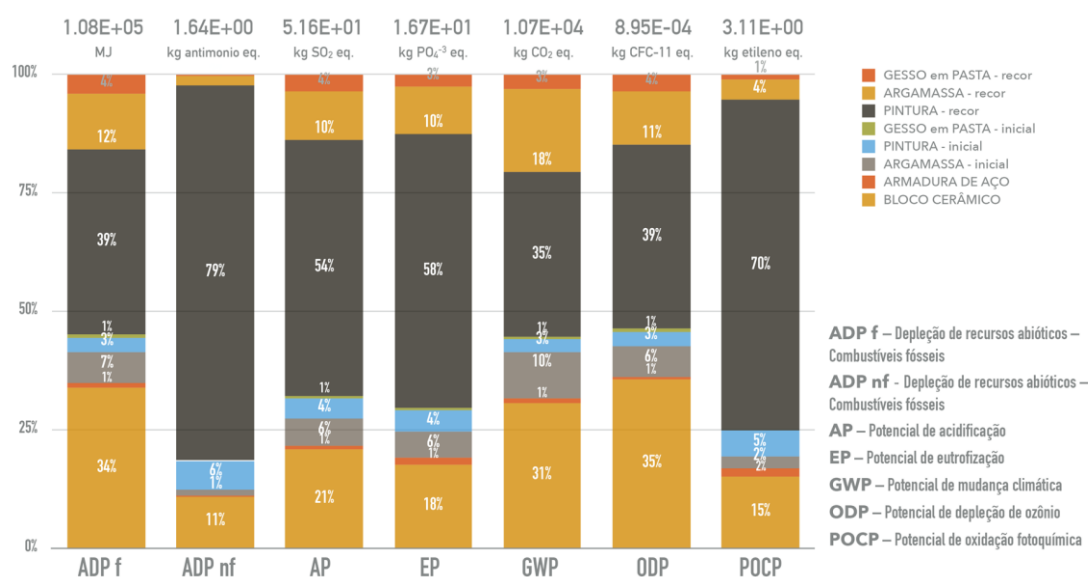


Figura 35 - Contribuições relativas para o sistema de paredes de alvenaria ParaA.

O sistema de forro (Figura 36) teve as menores contribuições de impacto incorporado inicial dentre todos os sistemas. Os resultados de impacto inicial ficaram em aproximadamente 1%, mas podem chegar em 17% se considerados os impactos recorrentes. O baixo resultado de contribuição inicial se dá principalmente pela baixa quota mássica do forro. Entretanto, pela recorrência de pinturas, o principal material na contribuição de impactos recorrentes é a tinta alquídica. Além da pintura, o gesso acartonado também possui impactos importantes pelo número de substituições ao longo do ciclo de vida.

Em relação ao sistema de telhado (Figura 37), o impacto incorporado inicial tem contribuição importante, com até 22% em qualquer um dos modelos de casa. Os impactos da estrutura de aço são importantes, mas especialmente para Eutrofização

(EP) e Oxidação fotoquímica (POCP). Considerando os impactos incorporados totais, o material que mais contribui é a telha cerâmica, pois possui 3 substituições ao longo do ciclo de vida (VUP de 13 anos).

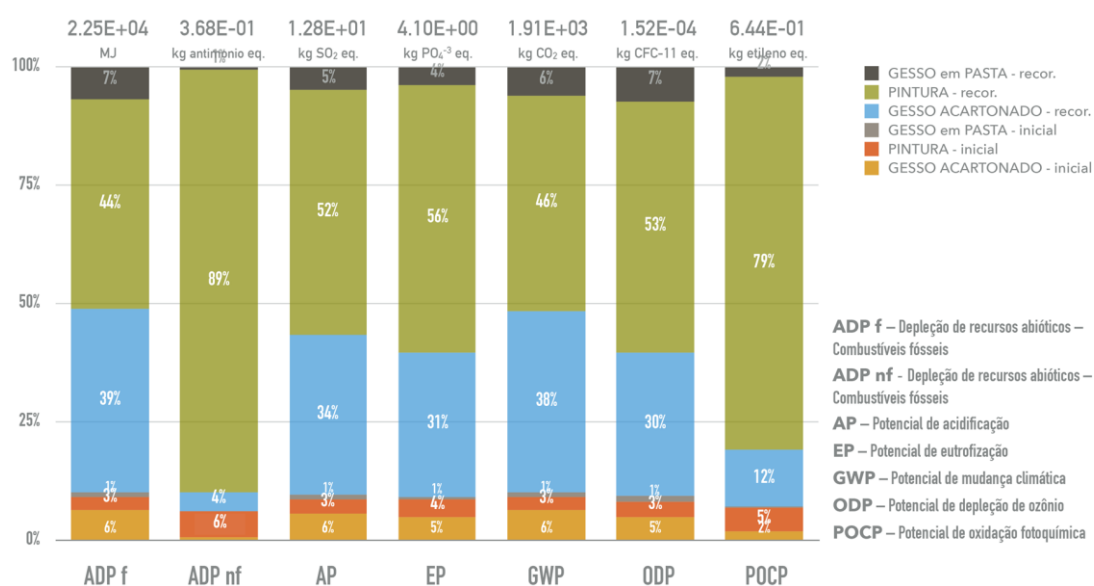


Figura 36 - Contribuições relativas para o sistema de forro.

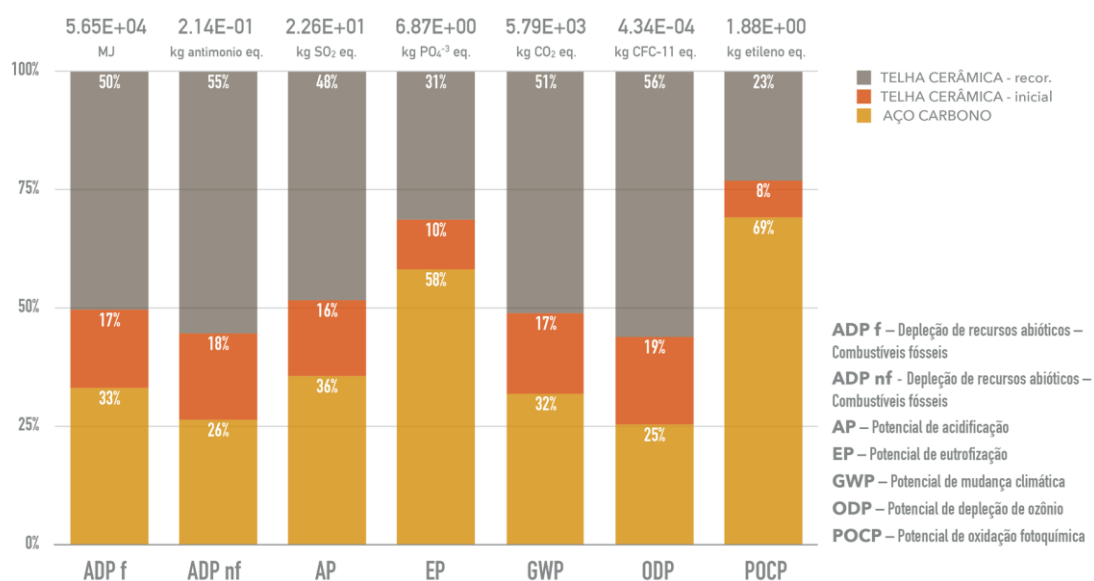


Figura 37 - Contribuições relativas para o sistema de paredes telhado

No resultado, verifica-se a importância que o processo de telhas cerâmicas pode gerar, devido ao razoável valor mássico do processo. Embora a durabilidade de telhas cerâmicas seja descrita pela ANICER como 20 anos (LAFONTAINE et al., 2012a), a norma de desempenho define VUP mínima de 13 anos (ABNT, 2013a). O precedente de VUP normativo mais baixo possibilita o desenvolvimento de produtos que passam pela chamada lavagem verde (*greenwashing*). Significa dizer, por exemplo, que o

fabricante pode comercializar produtos com menor impacto ambiental de produção, mas durabilidade inferior. Produtos com durabilidade menor necessitarão de mais substituições, podendo gerar um impacto ambiental potencial superior aos outros, que possuam durabilidade maior.

## 5.5 CONCLUSÃO DA FASE 2

A Fase 2 do programa experimental compôs um estudo de ACV preliminar com as envoltórias escolhidas na fase anterior. Os resultados demonstram a importância do uso de energia ao longo do ciclo de vida, que responde por até 65% dos impactos ambientais da residência de referência. A casa modificada com alvenaria apresentou resultados de impacto mais baixos em 3/7 categorias, pela redução do consumo energético operacional.

O menor uso de energia do projeto modificado ocorre devido à menor necessidade de condicionamento artificial, em função do melhor desempenho térmico geral do sistema de alvenaria, comparado ao sistema de concreto. Embora os sistemas avaliados não sejam termicamente equivalentes, ambos são usados no cenário brasileiro de construção habitacional. A parede de concreto com 10 cm de espessura está em desacordo com os requisitos prescritivos da norma de desempenho, como visto anteriormente. O resultado no uso de energia confirma um pressuposto inicial de que decisões de projeto influenciam os impactos ambientais da edificação.

Ainda que o desempenho geral do modelo ParA tenha sido melhor, o seu sistema de paredes apresentou impactos ambientais potenciais mais elevados, comparado com a referência em concreto. Embora existam estudos que demonstrem o resultado oposto, esta etapa da pesquisa utilizou dados globais de ICV não adaptados que respondem por essa diferença. O tipo e proporções no uso do cimento são determinantes no impacto do concreto, que tem na variabilidade de dosagens a versatilidade do seu uso. Dessa forma, os resultados podem variar conforme as aplicações do concreto e principalmente entre as definições do estudo.

O resultado de cada sistema construtivo permitiu a identificação de *pontos de ação* em processos mais importantes na contribuição dos impactos ambientais. Esses processos serão essenciais no desenvolvimento da Fase 3 do programa experimental. Dentre eles destacam-se: tipo de concreto, blocos cerâmicos, telhas cerâmicas, estrutura metálica do telhado e tinta de acabamento.

Como o resultado preliminar apresentou impactos altos em relação à recorrência de substituições, soma-se à importância dos dados de inventário, a necessidade de levantamento mais aprofundado sobre durabilidade dos materiais e sistemas construtivos na edificação.

## 6 FASE 3 – ESTUDO FINAL DE ACV

A última fase do programa experimental considera o desenvolvimento da ACV detalhada do estudo de caso, utilizando informações provenientes das fases anteriores e melhora nos dados de inventário. Nesta etapa, os dados de ICV mais impactantes da fase anterior são adaptados com informações representativas para o cenário brasileiro. Adicionalmente, esta fase incorpora informações das distâncias de transporte considerando a localização da edificação e a produção dos materiais de construção e extração de matérias primas. Além desses, são considerados os impactos da destinação de resíduos de construção e demolição da edificação ao final da vida útil.

Quanto às manutenções de materiais, são apresentados três cenários de substituições. Dessa forma, o resultado melhora o entendimento sobre os impactos incorporados recorrentes na edificação. A análise dos resultados envolve a comparação entre os impactos incorporados apresentados na fase anterior, além de comparações com outros autores.

### 6.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO

As definições de objetivo e escopo da Fase 3 são similares à fase anterior, mas têm abrangência ampliada. No sistema de produto (Figura 38), a fronteira do sistema contempla requerimentos incorporados pelo fim de vida (FDV), considerando a demolição e destinação final dos resíduos. O inventário de ciclo de vida (ICV) é baseado em dados secundários da base *Ecoinvent*, com adaptações para a realidade brasileira, aspectos de ICV são tratados no subcapítulo 6.2. Os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) são os mesmos da Fase 2, baseados na norma EN 15804, como descrito anteriormente.

Especificamente em relação à construção da edificação, o sistema de produto (Figura 39) tem a fronteira do sistema ampliada para abranger os sistemas de esquadrias de alumínio e o processo de galvanização da estrutura metálica do telhado. Este trabalho não considera a análise de esquadrias internas de madeira (portas semi-ocas) em função da dificuldade no acesso de dados bibliográficos representativos para o Brasil. Entretanto, a baixa representatividade mássica (três portas com aproximadamente 30 kg/cada) também justifica essa escolha. Para Cuéllar-Franca e Azapagic (2012), portas internas maciças representam aproximadamente 2% dos impactos de mudança



climática, enquanto que para Ortiz, Castells e Sonnemann (2010), são menores que 0,5% para uma residência na Colômbia.

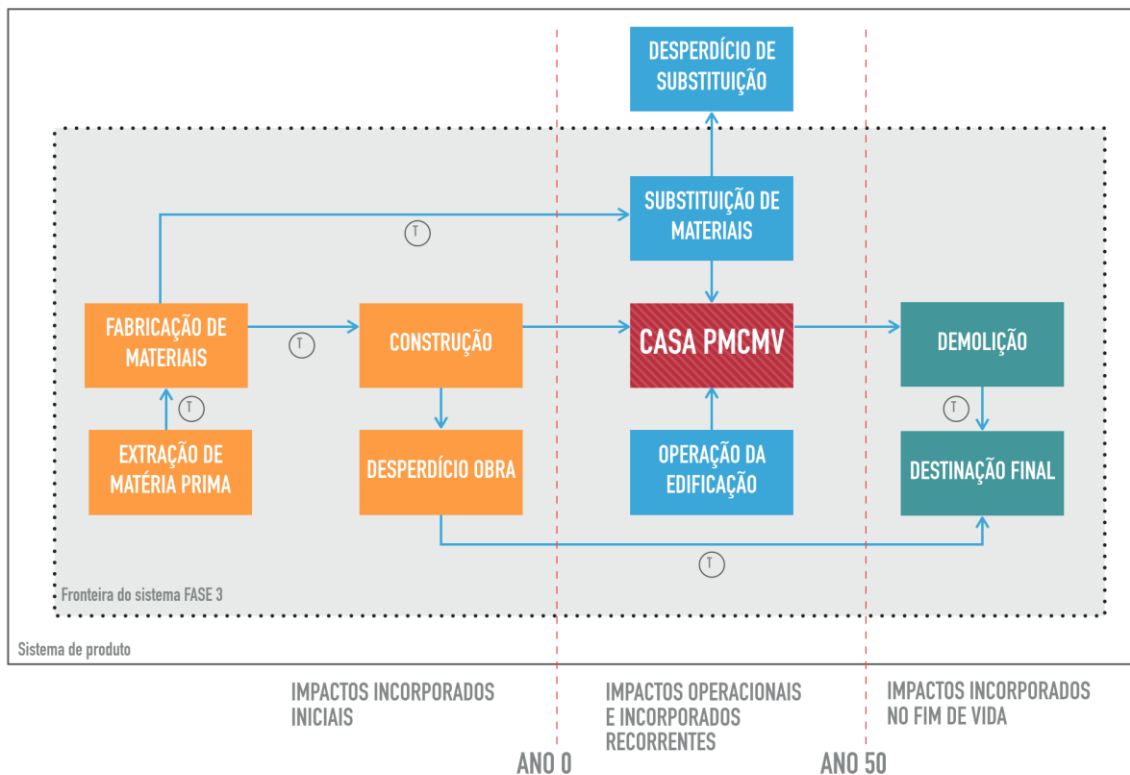


Figura 38 – Sistema de produto e fronteiras do sistema da Fase 3, os sistemas de produto detalhados da construção e operação são apresentados posteriormente.

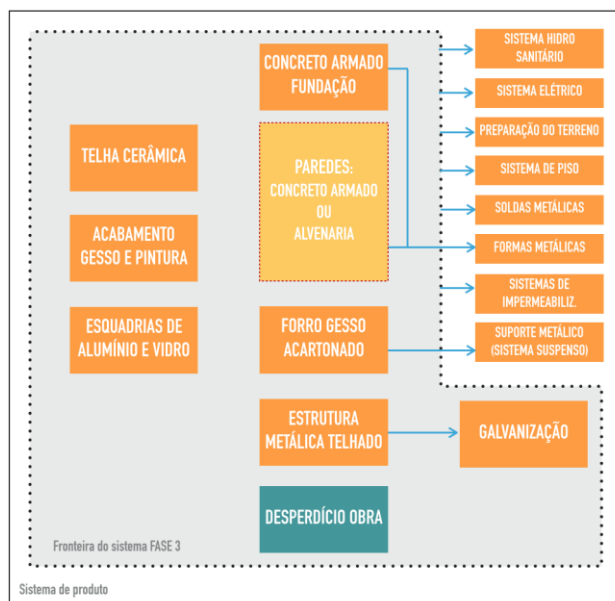


Figura 39 – Sistema de produto e fronteira do sistema da Fase 3 na etapa de construção da edificação.

A etapa de uso considera os mesmos itens da Fase 2 (Figura 40). O uso de energia para cocção, embora, seja relevante no cenário residencial brasileiro, não é considerado nessa dissertação por estar além do escopo de levantamento. Relembrando que, a unidade funcional (1 m<sup>2</sup> de área útil de edificação unifamiliar residencial do PMCMV pelo período de 50 anos) e público alvo são os mesmos da fase anterior.

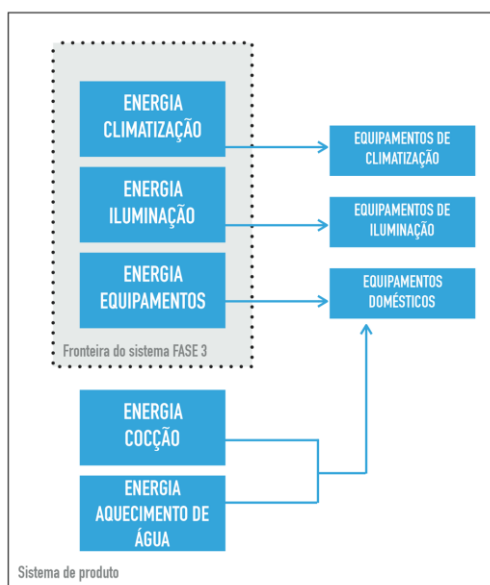


Figura 40 - Sistema de produto e fronteira do sistema da Fase 3 na etapa de operação da edificação.

## 6.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Assim como na fase anterior, o ICV é apresentado em relação a requerimentos incorporados (iniciais, recorrentes e de FDV) e requerimentos operacionais. As adaptações de dados de ICV para a realidade brasileira foram construídas em esforço conjunto de estudantes de pós-graduação e graduação dentro do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE/UFRGS). O detalhamento das adaptações é relatado parcialmente, a descrição completa dos dados pode ser consultada no relatório técnico de adaptação de ICV elaborado<sup>8</sup>.

### 6.2.1 Requerimentos incorporados

O inventário quantitativo de materiais de construção é apresentado na Tabela 2 e na Tabela 6 da Fase 2 para as casas analisadas com duas possibilidades de envoltória, uma

<sup>8</sup> MORAGA, G.; MORALES, M.; KIRCHHEIM, A.; PASSUELLO, A. (Org.). **Relatório técnico de adaptação de dados de Inventário de Ciclo de Vida de materiais de construção**. Porto Alegre: [s.n.], 2017.

com paredes de concreto (ParC) e outra com paredes de alvenaria (ParA). Na Fase 3 são definidos três cenários de substituição de materiais durante os 50 anos de vida útil, essa decisão está relacionada com o resultado de impactos incorporados recorrentes obtidos na fase anterior. Dois cenários são baseados na VUP proposta pela NBR 15.575 (ABNT, 2013a), sendo um, a “VUP mínima” (utilizada na fase anterior) e outro, a “VUP superior”. Ambas definições normativas dizem respeito à durabilidade mínima de materiais e sistemas, e devem ser cumpridos por fabricantes, projetistas e construtores de edifícios. Além desses, é definido um cenário de durabilidade retirado de bibliografia nacional, sendo essa, Tavares (2006), que se baseia em dados nacionais e internacionais para durabilidade de materiais de construção.

Para a definição da recorrência de substituições é criado um fator de multiplicação para cada material a ser substituído ao longo da vida útil do edifício. Esse fator é calculado com base na EN 15978 (CEN, 2011), um dos documentos da série de sustentabilidade em construção civil do órgão europeu de normatização. O fator de recorrência de substituições  $N_R(j)$  é expresso pela Equação 5:

$$N_R(j) = E \left[ \frac{ReqVU}{EVU(j)} - 1 \right] \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$N_R(j)$ : é o número de recorrência de substituição do material ( $j$ );

$E [ ]$ : é a função de arredondamento para o próximo valor natural mais alto;

$ReqVU$ : é a vida útil estimada da edificação em anos;

$EVU(j)$ : é vida útil estimada do material ( $j$ ) em anos.

Com base nessas informações são montados os cenários C1, C2 e C3 para recorrência de manutenções (Tabela 9). Para cada cenário são apresentados a vida útil mínima normativa (C1 e C2) ou durabilidade do material (C3), em anos.

Tabela 9 - Cenários de recorrência de manutenções para o fator  $N_R(j)$  com base EN 15978 a partir de dados normativos (NBR 15.575-1) e bibliográficos (TAVARES, 2006) para anos de VUP ou durabilidade.

Cenários	C1		C2		C3	
	VUP mínima NBR15575	$N_R(j)$	VUP superior NBR15575	$N_R(j)$	Tavares (2006)	$N_R(j)$
Arg. Reboco	13	3	20	2	60	0
Gesso em pasta	8	6	12	4	12	4
Telha cerâmica	13	3	20	2	34	1
Gesso acartonado	8	6	12	4	50	0
Pintura externa	8	6	12	4	8	6
Pintura Interna	3	16	4	12	12	4
Esquadrias externas	20	2	30	1	46	1

É importante mencionar que durabilidade e VUP são conceitos diferentes. Enquanto o primeiro garante o funcionamento integral do produto pelo período mínimo de (x) anos, o segundo indica menor durabilidade possível para um produto, baseado em critérios de segurança e custo. Em ambos os casos, devem ser respeitadas as condições de conservação dos elementos para que o fornecedor garanta a durabilidade dos sistemas. Nesse sentido, a recorrência de ações de manutenção aumenta a vida útil dos sistemas e até mesmo da edificação. Se o sistema de pinturas for substituído com mais frequência, por exemplo, a argamassa de reboco poderá ter menos problemas com intempéries, aumentando sua vida útil.

Para o caso de “VUP superior” de materiais e sistemas da NBR 15.575 são feitas referências para a VUP recomendada de 75 anos da edificação. Essa recomendação, todavia, não será considerada para o trabalho, pois o objetivo de utilizar a “VUP superior” é tão somente balizar um índice de durabilidade, já que informações nacionais a este respeito não são claras e frequentemente superestimadas.

Cabe mencionar que o manual de proprietário (edificação de estudo de caso) estipula garantia de 1 ano para qualidade do sistema de pintura. Essa garantia é possível pois a norma não é clara no sentido de materiais. A VUP é normatizada em anos para cada sistema construtivo, ou seja, estrutura, paredes, pisos, cobertura, etc., e, ao mesmo tempo, somente “exemplifica” a VUP de subsistemas e componentes, como revestimentos aderidos ou não, telhamento, impermeabilização, etc.). Dessa forma, a norma deixa em aberto a possibilidade de definição da VUP de materiais de construção para que o sistema tenha desempenho garantido pelo tempo mínimo possível. Em outras palavras, a VUP de subsistemas pode ser considerada tanto uma responsabilidade do fornecedor, quanto uma possibilidade de exigência, ou exemplificação.

Finalmente, a NBR 15.575 também considera a estrutura do sistema de cobertura com VUP mínima de 20 anos e superior de 30 anos. Neste trabalho, porém, é considerada durabilidade idêntica ao sistema principal de estrutura (50 anos). Essa decisão está alinhada com tipo de material utilizado na edificação, estrutura de perfis de aço com galvanização a fogo. A galvanização é um processo para recobrimento de metais passíveis à corrosão por oxidação, seu detalhamento é tratado posteriormente.

Na fase anterior, as distâncias de transporte foram consideradas de maneira agregada em dados de mercado (*market*) para médias mundiais. Na Fase 3 é feito o inventário de

distâncias e modais de transporte considerando toda a cadeia de produção para a maioria dos materiais de construção e matérias primas (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12). A localização do conjunto habitacional está distante 13 km em linha reta do acesso de Porto Alegre, a ponte do Lago Guaíba. Nesse sentido, as distâncias entre a produção e a extração são calculadas até o acesso da capital do estado, e complementarmente, são assumidas distâncias fixas do ponto de distribuição (venda de produtos) até o conjunto habitacional. Ao FDV da edificação todos os materiais são transportados por 15 km para disposição ou tratamento utilizando caminhões de 7 a 15 t.

Tabela 10 - Transporte de materiais da extração até a indústria.

<b>Material</b>	<b>Transporte (km)</b>	<b>Modal</b>	<b>Localização</b>
Minério de ferro (aço)	1730	Caminhão >30 t	Triângulo Mineiro - MG
Bauxita (alumínio)	4330	Caminhão >30 t	Trombetas - PA
Calcário (cal e cimento)	5	Caminhão >30 t	Diversas
Gipsita (gesso)	3500	Caminhão >30 t	Trindade - PE
Argila (blocos cerâmicos)	54	Caminhão >30 t	Grande POA
Polímeros (tintas)	50	Caminhão >30 t	Grande SP
Dióxido titânio (tintas)	50	Caminhão >30 t	Grande SP
Cinza volante (cimento)	10	Caminhão >30 t	Candiota - RS

Tabela 11 - Transporte de materiais da indústria até a distribuição.

<b>Material</b>	<b>Transporte (km)</b>	<b>Modal</b>	<b>Localização</b>
Cimento CPIV	400	Caminhão >30 t	Candiota - RS
Areia	30	Caminhão 15-30 t	Grande POA
Brita	30	Caminhão 15-30 t	Grande POA
Cal	50	Caminhão >30 t	Grande POA
Aço estrutural	30	Caminhão >30 t	Grande POA
Alumínio (tarugos)	960	Navio marítimo	Santos - SP
Alumínio (tarugos)	330	Caminhão >30 t	Rio Grande - RS
Gesso	1200	Caminhão >30 t	Grande SP
Gesso acartonado	1200	Caminhão >30 t	Grande SP
Tintas	1160	Caminhão 15-30 t	Grande SP
Vidros	570	Caminhão 15-30 t	Barra Velha - SC

A distância percorrida por insumos e tipos de modal são apresentados em três etapas. A Tabela 10 detalha a distância de extração de matérias primas até a indústria de materiais de construção. A Tabela 11 apresenta as distâncias entre a indústria e a distribuição. Por fim, a Tabela 12 apresenta distâncias da distribuição até a obra. Deve-se notar que em processos com insumos de pouca relevância mássica é utilizado o transporte padrão do Ecoinvent com dados de mercado.

Tabela 12 - Transporte de materiais da distribuição até o local da obra.

Material	Transporte (km)	Modal	Localização
Concreto	15	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Argamassa	15	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Bloco cerâmico	10	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Telha cerâmica	10	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Esquadrias	15	Caminhão comercial	Grande POA
Aço estrutural	10	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Brita	10	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Tintas	10	Caminhão comercial	Grande POA
Gesso	10	Caminhão 3,5-7 t	Grande POA
Gesso acartonado	10	Caminhão comercial	Grande POA

Finalmente, nos itens a seguir são descritos os processos de adaptação de inventário dos dados utilizados na ACV. Todos os dados são extraídos da base *Ecoinvent* v3.3 (WERNET et al., 2016) na versão *OpenLCA Nexus*<sup>9</sup>. A ferramenta *OpenLCA* v1.6 é utilizada para organização de inventário, adaptação de dados e cálculo de avaliação de impacto. Informações sobre as adaptações são baseadas em relatórios setoriais ou bibliografia acadêmica, sendo descritos no decorrer do trabalho. Nas adaptações são priorizados processos energéticos e os processos tecnológicos são explicitados quando modificados.

O critério de seleção dos dados na base é o de alocação com corte por classificação (*Allocation, cut-off by classification*). Esse critério pressupõe que produtos classificados como resíduos não recebem impactos de produção (*burden-free*). Sendo assim, todos os impactos são alocados para o produto principal, ou divididos entre os produtos principais de processos multifuncionais<sup>10</sup> com base em propriedades físicas. Dessa maneira, indústrias que utilizam resíduos como matéria prima não arcam com os impactos ambientais da produção do resíduo, sendo somente considerado o impacto de processamento posterior. Por exemplo, na produção de cimento pode ser utilizado um resíduo da indústria siderúrgica (escória de alto forno), este entra sem impacto na indústria cimenteira, mas seu processamento com secagem ou moagem é contabilizado.

Sob o mesmo critério, produtos recicláveis entram na indústria de transformação sem impacto. Nos processos de transformação de produtos reciclados são considerados somente impactos a partir da porta de entrada da indústria, além dos impactos de mercado e distribuição. Nesse sentido, deve haver cuidado para que os benefícios e

<sup>9</sup> OpenLCA Nexus. Disponível em <<http://nexus.openlca.org>>. Acesso em dezembro de 2016.

<sup>10</sup> Processos multifuncionais são aqueles em que o processo de produção gera dois ou mais produtos distintos.

impactos relativos ao uso de materiais reciclados seja levado em consideração de maneira correta, esse aspecto é tratado com mais detalhe no subitem 6.2.1.8.

### 6.2.1.1 Concretos, argamassa, aglomerantes e agregados

Os dados de concretos e argamassa são descritos em conjunto pois utilizam matérias primas similares (Tabela 13). Na obra de estudo de caso, todo o concreto utilizado é usinado. Dessa forma, as informações de projeto referem-se às propriedades físicas do concreto (como resistência e fluidez) e não à composição, que fica a cargo da empresa concreteira. As informações de dosagem do concreto convencional para a fundação *radier*, e do concreto autoadensável<sup>11</sup> para as paredes é baseado em informações de literatura.

Tabela 13 - Composição de materiais para 1 m<sup>3</sup> de concretos e argamassas.

1 m3 de material	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Fonte:
Concreto convencional	385	-	840	900	Cód. 51345 (FRANARIM, 2014)
Concreto autoadensável	270	-	877	1017	TKAF 1:7 (TUTIKIAN, 2007)
Argamassa	194	126	1680	-	Cód. 105040 (FRANARIM, 2014)

O concreto convencional é inventariado pela composição da planilha de orçamentos Franarin (2014) para concreto de resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias de cura. Já a composição do concreto autoadensável, que não está presente na planilha de orçamentos<sup>12</sup>, foi retirada de tese de doutorado sobre métodos de dosagem desse tipo de material (TUTIKIAN, 2007). Como os concretos autoadensáveis utilizados no trabalho citado possuem propriedades mecânicas diferentes da especificação do estudo de caso (20 MPa), é utilizado aquele com resistência mecânica à compressão mais próxima, 30 MPa aos 28 dias<sup>13</sup>. Já no caso da argamassa de revestimento e reboco, utilizada apenas nas paredes de alvenaria do projeto ParA, é considerada uma composição retirada da planilha orçamentária.

<sup>11</sup> Concretos autoadensáveis diferenciam-se dos convencionais por apresentar tecnologia com maior fluidez em estado fresco, que permite preenchimento do espaço de fôrmas apenas com o peso próprio (TUTIKIAN, 2007).

<sup>12</sup> O uso de concretos autoadensáveis é relativamente recente no Brasil, o primeiro empreendimento com essa tecnologia é de 2004 (TUTIKIAN, 2007). Dessa forma, ainda não é corrente encontrar composições dessa tecnologia em planilhas orçamentárias, especialmente para especificações residenciais, onde esse material é considerado inovador.

<sup>13</sup> Concretos de 20 MPa são utilizados em casos de pouca necessidade de carregamento. O estudo de caso possui paredes portantes, não suportando outra estrutura a não ser o telhado. Além disso, a especificação de projeto é uma especificação mínima, é comum que o dimensionamento da concreteira seja majorado para que o concreto entregue atinja com grau de segurança a especificação mínima.

Ambos concretos são adaptados com base no dado “*concrete production 20MPa, RNA*”. Esse dado faz referência à produção de concreto usinado com matérias primas mantidas em silos, a homogeneização do concreto ocorre em tambores com pás rotativas. No processo são modificados, além da matriz elétrica, as quantidades dos materiais citados para cada concreto. O cimento e a areia também são substituídos para seus respectivos módulos adaptados. Além disso, a quantidade de água e superplastificante são modificados para o concreto autoadensável, já que esta informação está disponível no trabalho de referência. No transporte do concreto fresco é considerado o uso de caminhão comum, os transportes são tratados no subcapítulo 6.2.1.7. Tabelas com a lista de dados originais e modificados estão no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

É importante salientar que trabalhos recentes analisando a influência de impacto de cada componente do concreto concordam que o principal contribuinte é o cimento, além desse, cinza volante e escória quando o impacto de sua coprodução é alocado (SCHEPPER et al., 2014; KIM; TAE; CHAE, 2016). Dessa forma, tanto agregados minerais, pelo baixo impacto ambiental de sua produção, quanto superplastificantes, pelas pequenas quantidades utilizadas, não representam impacto relevante neste contexto.

A argamassa utiliza o dado de referência “*cement mortar production*”. Nele, são modificados os dados de matriz elétrica, cimento e areia. Além disso, é adicionado módulo para o uso de Cal hidratada no processo. Os dados originais e modificados estão no Anexo A, citado anteriormente.

Em relação ao tipo de cimento do concreto autoadensável, a tese de Tutikian (2007) considera a adaptação de um método de dosagem com cimento CP-V (91-96% de clínquer e material pozolânico). A dosagem de referência (TUTIKIAN, 2004 *apud*. TUTIKIAN, 2007) usa o material pozolânico de forma a modificar a trabalhabilidade do concreto. Para representar esse processo no inventário, o cimento CP IV (cimento pozolânico) é utilizado, todavia, é necessário ponderar que a justificativa do uso desse cimento está na sua relação entre clínquer e material pozolânico. Normativamente, o CP IV pode ter diferentes taxas de substituição de clínquer (15-50%), entretanto, a taxa utilizada por cada indústria não é informada comercialmente. Assim, no ICV é utilizada a média aritmética da faixa normativa.

Em relação ao concreto convencional e argamassa, disponibilizados pela planilha orçamentária, é especificado o uso de cimento pozolânico, dessa forma, no ICV também



é adotado o cimento CP IV. Esse tipo de cimento, com resistências características de 25 e 32 MPa, é normatizado pela NBR 5736 (ABNT, 1991) e possui adições pozolânicas (cinza volante, argila calcinada, material vulcânico). A principal pozolana utilizada no CP IV no RS é a cinza volante, um resíduo da produção de eletricidade termoelétrica com carvão mineral<sup>14</sup>. O RS possui a maior reserva nacional de carvão mineral (CEEE, 2013), pela sua importante produção de energia de plantas termoelétricas. Para aproveitar a cinza volante gerada, diversas indústrias de cimento CP IV também estão instaladas no estado.

O cimento foi adaptado com dados do processo “*cement production, pozzolana and fly ash 11-35%, non-US*”. Os dados de energia foram retirados de relatórios nacionais do setor de cimento (CNI, 2010; SNIC, 2013), e referem-se tanto à produção de cimento quanto à produção de clínquer. A cinza volante, por ser um resíduo, não recebe alocação de impactos pela sua geração (o critério de seleção utilizado faz essa exclusão, como comentado anteriormente). Existe uma importante discussão metodológica em ACV sobre os modelos de consideração de impactos em processos multifuncionais, cada modelo utilizado irá gerar um resultado final diferente (PELLETIER; TYEDMERS, 2011). Como essa dissertação não tem o objetivo de entrar nesse nível de discussão para cada um dos materiais considerados, será mantido o critério de excluir o impacto de resíduos, sendo considerado somente o transporte até a indústria e processamento dentro da mesma<sup>15</sup>.

No dado de cimento, a produção de clínquer considera o processo de via seca com forno rotativo, ou seja, tecnologia similar à brasileira, diferenciando-se pelos combustíveis utilizados. No Brasil, utiliza-se principalmente coque de petróleo para sinterização, e eletricidade para moagem (SNIC, 2013). Junto com isso, algumas indústrias nacionais utilizam coprocessamento de resíduos na produção de clínquer, todavia, combustíveis alternativos não são considerados no ICV<sup>16</sup>.

Para produção de 1 kg de CP IV são considerados 0,610 kg de clínquer, 0,325 kg de cinza volante, ou seja, a média aritmética da faixa de variação normativa.

---

<sup>14</sup> A preferência de uso da cinza volante ocorre pelo baixo valor econômico atrelado à cinza. Chen et al. (2010), considerando alocação da cinza no cimento europeu, estimaram o custo da matéria prima em €20/t.

<sup>15</sup> Esse critério de corte é comum para o aproveitamento de resíduos em processos industriais, já que resíduos são considerados uma consequência do produto principal.

<sup>16</sup> Os relatórios sobre coprocessamento na indústria cimenteira, encontrados até o momento, limitam-se a definir quais tipo de resíduos são utilizados, mas não deixam claro qual taxa de substituição energética fóssil é utilizada nos processos industriais. A declaração dessa informação não é um processo simples. Os combustíveis alternativos (pneus, resíduos urbanos, biomassa, etc) têm origens diversas e podem precisar de tratamentos individualizados para garantir quantidades certas de umidade e combustão na queima do forno (SCHNEIDER, 2015).

Adicionalmente, 0,04 kg de sulfato de cálcio (valor fixo normativo) e 0,025 kg de calcário moído (faixa de variação normativa de 0-5%). Dessa forma, os valores utilizados fazem o balanço de massa em 1 kg. É importante sinalizar que o levantamento de dados relativos à indústria cimenteira são exaustivos, e houve um grande esforço anterior para adaptação dos dados de cimento na monografia de Guerreiro (GUERREIRO, 2014). Essas informações são parcialmente utilizadas nessa dissertação, dados específicos da adaptação de cimento e clínquer estão disponíveis no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

Ainda sobre os aglomerantes, o dado da Cal hidratada utiliza como referência o processo "*lime production, hydraulic*". Os dados de energia para a produção brasileira de cal foram retirados do estudo de John, Punhagui e Cincoto (2014). A produção de cal pode ter processo de calcinação similar à produção de clínquer, entretanto, é energeticamente menos intensiva. No Brasil, existem diversos tipos de forno para de produção de cal, sendo o forno rotativo um deles, dessa forma, similar ao processo europeu. Segundo o relatório citado da produção de cal, os principais combustíveis utilizados no Brasil são carvão vegetal (sendo 87% de madeira reflorestada), coque de petróleo e gás natural. Dados específicos da adaptação do processo de cal estão descritos no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

Sobre os agregados minerais utilizados nos concretos e argamassas, os dados originais consideram de areia britada, um material normalmente não utilizado no Brasil. A areia utilizada em diversas regiões do país tem origem na dragagem de leitos de rios e lagos, por isso, é utilizado um levantamento nacional com informações específicas desse processo. Nesse levantamento, Souza (2012) fez a ACV de areia de dragagem utilizando como estudo de caso uma empresa na região de São José do Rio Preto. O ICV do trabalho citado considera a extração em leito de rio, beneficiamento (secagem e peneiramento) e armazenagem.

As quantidades específicas de areia lavrada e beneficiada são baseadas em um levantamento realizado em mineradora na região de Porto Alegre. Atenta-se que o processo de produção de areia resulta em produtos com diferentes classes granulométricas, sendo dessa forma um processo multifuncional. De maneira a evitar alocação, é considerada a simplificação do processo, e por isso, não são adotadas classes granulométricas diferentes na areia de concretos e argamassa. Como resultado, o impacto de 1 kg de areia será igual para areia fina, média ou grossa. O detalhamento da produção desse dado é descrito no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

Por não ter sido possível coletar o dado de brita, de forma similar à areia, o agregado graúdo britado existente na base de dados é utilizado integralmente. O dado “*gravel, crushed, at mine*” considera o processo de extração e britagem de rocha granítica e usa estimativas de consumo energético similares à extração de rocha calcária.

#### 6.2.1.2 Blocos e telhas cerâmicas

No dado de blocos e telhas cerâmicas é utilizado o ICV com informações da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) para o mercado brasileiro (LAFONTAINE et al., 2012a, 2012b). O estudo foi conduzido pelo Grupo Agéco (antiga Quantis Canadá), empresa especializada no desenvolvimento de ACV, e recentemente, divulgado na forma de artigos científicos (SOUZA et al., 2015, 2016). Mesmo que todos os resultados de inventário estejam descritos no relatório, a ANICER gentilmente forneceu os dados digitais de ICV para esta dissertação.

O estudo da ANICER foi desenvolvido utilizando a base *Ecoinvent* na versão 2. Mas o ICV disponibilizado continha apenas entradas e saídas de unidades de processo, ou seja, sem fluxos elementares. Dessa forma, cada fluxo foi conectado individualmente aos vetores da base. Optou-se por realizar a transição dos dados para a versão 3.3. Dessa forma, embora o dado não seja mais idêntico ao original, o ICV desta dissertação é consistente na medida que usa dados com o mesmo nível de completude.

O estudo da ANICER foi desenvolvido considerando 1 m<sup>2</sup> parede de vedação pelo período 40 anos e 1 m<sup>2</sup> de cobertura no período de 20 anos. Como o interesse desta dissertação é relativo à produção do bloco e telha cerâmica dentro da indústria, são consideradas as etapas de berço ao portão do estudo original. Os transportes do inventário original utilizaram dados desenvolvidos para a América do Norte. Dessa forma, a adaptação considera somente as referências de distância apresentadas originalmente, enquanto que o vetor de transportes é o mesmo descrito no subcapítulo 6.2.1.7. O detalhamento da adaptação está descrito no Anexo 1.

#### 6.2.1.3 Aço carbono e aço galvanizado

O aço carbono é utilizado como armadura para o concreto na forma de tela soldada em fundação e paredes. Adicionalmente, é utilizado em alguns pontos da parede de alvenaria como reforço estrutural na forma de vergalhão. Segundo o relatório da indústria de aço no Brasil (IAB, 2014), o processo de produção tem início na extração

de minério de ferro e pelotas aglomeradas<sup>17</sup>. Na indústria siderúrgica, a redução da matéria prima ocorre utilizando coque (carvão mineral) e carvão vegetal no alto-forno. Os combustíveis são utilizados para aquecimento e os gases resultantes do processo, como agente redutor dentro do forno. O produto da redução do minério em alto-forno é o ferro gusa líquido.

O ferro gusa é transformado em aço pelo refinamento e adição de ligas em fornos de arco elétrico ou em conversores à oxigênio (LD). Nessa etapa, também pode ser adicionada ao ferro gusa a sucata de aço (aço secundário) ambos os fornos. Alternativamente, pode ocorrer a fundição quase exclusivamente de sucata na aciaria elétrica. Do aço em estado líquido são produzidos lingotes para laminação, como chapas, barras, perfis, fios, entre outros (IAB, 2014).

O dado “*reinforcing steel, production*” é utilizado como referência tanto para vergalhões, como para tela soldada. A produção do aço que o levantamento da base considera é similar à produção brasileira descrita anteriormente. O dado possui três processos, um para a produção de aço sem liga metálica, um para a produção de aço com liga metálica (utilizando principalmente sucata), e outro, o processo de laminação de produtos longos. O aço sem liga metálica é produzido por forno LD e usa principalmente ferro gusa como matéria prima, podendo ser adicionada uma parte de sucata para diminuir a temperatura do forno (CLASSEN et al., 2009). Já o aço com liga metálica é produzido exclusivamente com sucata por aciaria elétrica.

A adaptação do dado original considera a produção brasileira de ferro gusa pela correspondência com os relatórios setoriais. O ferro gusa é adaptado com base em levantamento de produção realizado para o Ministério de Indústria e Comércio (CGEE, 2014) e com base no relatório setorial do aço (IAB, 2012). As modificações são relativas aos combustíveis utilizados (coque de carvão mineral, carvão vegetal e coque de petróleo). O dado original considera carvão mineral, coque e gás natural. O processo de carvão mineral utilizado faz referência à localização de extração na região da América Latina.

Os percentuais de reciclagem de aço secundário foram mantidos iguais, pois a sua mudança acarretaria em modificação dos balanços de massa do processo. Embora o Brasil utilize percentuais de aço reciclado com aproximadamente 30%<sup>18</sup>, não foram

---

<sup>17</sup> A parte que de minério de ferro que se encontra em formato de pó é sinterizada formando pelotas aglomeradas (“*pelle*”).

<sup>18</sup> Aço e a economia circular. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em fevereiro 2017.

encontradas estimativas industriais sobre o percentual ferro gusa em relação ao de sucata dentro do forno LD. Na produção de 1kg de aço, o processo original considera 0,9 kg de ferro gusa para  $\approx 0,2$  kg de sucata (WERNET et al., 2016). O processo de laminação a quente para a produção dos aços longos é mantido igual ao dado original, não tendo sido diferenciado para vergalhões e telas. Informações detalhadas do processo de adaptação do aço estão no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

Com relação ao aço utilizado na cobertura, na forma de perfis metálicos zincados, o aço é idêntico ao anterior, com um processo de acabamento relativo à calandragem de perfis. O processo de laminação “*section bar rolling, steel*” é utilizado. A galvanização dos perfis utiliza o processo de “*zinc coating, pieces*”, onde os perfis finalizados são submersos em banho com liga de zinco, recebendo uma camada de 65  $\mu\text{m}$  por  $\text{m}^2$ , em cada lado da peça. Esse processo é similar à galvanização (por imersão) à quente e não foi adaptado. Dados relativos à extração do zinco também não foram modificados.

#### 6.2.1.4 Esquadrias de alumínio

As esquadrias de alumínio utilizadas no Brasil para habitações sociais são muito diferentes daquelas utilizadas na Europa. Esquadrias em países de clima frio podem ter isolamento térmico muito eficiente, com vedação de frestas, interruptores térmicos (*thermal breaks*), e vidros duplos ou triplos. Assim, se por um lado, essas proteções diminuem o consumo operacional com aquecimento, por outro, aumentam os impactos incorporados da janela, já que mais materiais e processos energéticos são envolvidos.

No Brasil, esquadrias de alumínio são mais simples, não é frequente o uso de isolamento térmico em perfis e os vidros são simples. Dessa forma, são necessárias modificações no dado de referência “*window frame production, aluminium,  $U=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$* ” para refletir a realidade local. Todos os processos relativos ao isolamento térmico são desconsiderados, o vidro é substituído por plano simples, e a massa de alumínio nos perfis entrudados é ajustada considerando esquadrias comercializadas no País.

Mesmo frente as diferenças nas esquadrias, a produção industrial do alumínio possui tecnologia similar à brasileira. O alumínio é produzido a partir da extração da bauxita que depois de passar por processo químico para remoção de impurezas é calcinado transformando-se em óxido de alumínio (alumina). Da redução da alumina por processo de eletrólise é gerado o alumínio primário líquido (ABAL, 2012). O alumínio secundário é adicionado ao alumínio primário na fase líquida, mas se a sucata possuir impurezas

(isto é, estiver em liga com outros metais) precisa ser refundida, e as impurezas são removidas ou recuperadas pela diferença de densidade entre os metais (UNEP, 2013).

A base de dados possui levantamento de produção de alumínio para a região da América Latina, sendo esse dado utilizado para o ICV. Diferentemente do aço, as taxas de reciclagem do alumínio são ajustadas para refletir a realidade nacional. Como o alumínio secundário é refundido antes de ser adicionado ao alumínio primário, o ajuste da reciclagem não irá influenciar o ajuste de massa entre entradas e saídas de material. De acordo com o anuário estatístico do setor (ABAL, 2011), o país recuperou 511 mil t de sucata, o que corresponde à  $\approx 26\%$  do total de alumínio produzido no mesmo ano.

O tratamento para melhorar a resistência à corrosão dos perfis extrudados é mantido igual ao processo original. Esse tratamento é feito com pintura em pó por via eletrostática. Esse é um dos tipos mais comuns de tratamento para alumínio em esquadrias no Brasil, em conjunto com anodização (REIS, 2011).

A produção de vidro não foi adaptada, o dado da base foi selecionado como vidro plano transparente “*flat glass, uncoted*” produzido com processo de flutuação em banho de estanho (“*float glass*”). É assumido que esse processo é idêntico ao utilizado no Brasil, pois apenas duas companhias (com composição acionária internacional) são responsáveis por todo o vidro plano produzido nacionalmente (MONTANO; BASTOS, 2013). Os detalhes sobre o processo de adaptação de esquadrias estão descritos no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

#### 6.2.1.5 Gesso em pó e acartonado

O gesso para construção no Brasil é produzido exclusivamente com gipsita proveniente de extração natural, sendo o estado de Pernambuco responsável por  $\approx 90\%$  da extração do minério no país (BEZERRA, 2009). A lavra ocorre em cavas à céu aberto utilizando explosivos e máquinas hidráulicas, processo similar ao Espanhol, um dos maiores produtores de gesso do mundo (BEZERRA, 2009). A gipsita é revendida em blocos ou moída, mas também pode ser calcinada em usinas integradas (BEZERRA, 2009).

A calcinação da gipsita pode ser feita em diversos tipos de fornos, utilizando uma diversidade de combustíveis (MELO, 2012). Sobre a calcinação, foram encontrados dados setoriais na região de Microrregião de Araripina, que concentra toda a calcinação em Pernambuco, representando  $\approx 11\%$  do gesso calcinado no país (BEZERRA, 2009). Dessa forma, por não terem sido encontrados dados consistentes do processo energético de calcinação do gesso, não é feita adaptação dos processos utilizados.

Soma-se a isso o fato da calcinação ser de baixa intensidade energética, 140 °C (MELO, 2012), enquanto que a indústria do cimento, por exemplo, ultrapassa 1200 °C.

O módulo do Ecoinvent utilizado para a produção de gesso de revestimento é o “*stucco, at plant*”, e no caso do gesso acartonado “*gypsum plaster board, at plant*”. Ambos processos usam gás natural como combustível para calcinação da gipsita em forno rotativo. Esse método é inclusive uma das possibilidades do processo brasileiro (MELO, 2012). A extração da gipsita é similar ao método citado anteriormente.

Embora os processos não tenham sido adaptados, o transporte do gesso e gipsita é considerado dentro do território nacional.

#### 6.2.1.6 Tintas PVA e Acrílica

O processo de pintura na Fase 2 é um dos mais impactantes. O resultado se relacionou com dois motivos possíveis: o tipo de tinta utilizada (alquídica, com base solvente); e número de repinturas. Sobre a produção de tintas, existe uma grande deficiência em encontrar dados confiáveis de composição e emissão. Os próprios processos de tinta alquídica do Ecoinvent consideram levantamento de somente uma indústria europeia e especificam que esse dado não deve ser usado como comparação entre diferentes tintas. A União Europeia realizou um relatório para informações de base em etiquetas ambientais de tintas e vernizes, mesmo assim, o inventário utiliza dados energéticos do *Ecoinvent* (KOUGOULIS et al., 2012).

Até o momento não foram encontradas divulgações setoriais da produção de tintas no Brasil. Todavia, foram encontrados trabalhos científicos nacionais, que incluem a caracterização química da produção de tintas vinílicas (PVA) e acrílicas (SILVA, 2005; UEMOTO, 1998). Esses dados são utilizados na adaptação dos processos de pintura no território brasileiro.

As tintas utilizadas possuem quatro componentes, resina, pigmento e solvente. A diferença entre as tintas está no tipo de polímero (vinílico ou acrílico) utilizado na resina (SILVA, 2005). A resina das tintas é do tipo látex, obtida por processo de polimerização em emulsão, sendo o látex o componente responsável pela aglutinação e homogeneização das partículas de pigmento (SILVA, 2005). Em tintas brancas, o pigmento utilizado é o dióxido de titânio; em outras cores, os pigmentos são provenientes de óxidos metálicos (Fe, Cr, Al, Ti, Zn, Mo, Pb) (ALTHAUS et al., 2007).

Tanto para o dado de tinta alquídica do *Ecoinvent*, quanto para o relatório de tintas vinílicas e alquídicas da União Europeia, o pigmento é o principal responsável pelos

impactos na produção, que utiliza dióxido de titânio em ambos os casos (KOUGOULIS et al., 2012; WERNET et al., 2016). O pigmento, no caso das tintas adaptadas, é de cor branca e possui volume de 50% do total de resina para tintas acrílicas e de 40% do total de resina para tintas vinílicas.

A adaptação dos dados de tinta considera o uso energético da referência “*alkyd paint production, white, water-based, product in 60% solution state*”, assim como o impacto relativo as instalações industriais. Detalhes sobre a adaptação estão no Anexo A, retirado de Moraga et al. (2017).

#### 6.2.1.7 Transporte

Dados de transporte de carga não foram adaptados, porém são necessárias algumas considerações sobre essa decisão e o modelo de transporte escolhido. Tanto no Brasil, quanto na Europa, os caminhões de carga são classificados segundo o nível de emissões máximo permitido no ano de produção. Essas emissões são relacionadas, principalmente, com o tipo de motor e o tipo de combustível utilizado. Os fatores de emissões controladas são NO<sub>x</sub>, CO, hidrocarbonetos não-metano, material particulado, metano e CO<sub>2</sub> (MMA, 2011).

No Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Automotores (PROCONVE) faz o controle de emissões e, desde 2012, está em vigor o modelo P7. Esse modelo de controle obrigou indústrias a usarem tecnologias menos emissivas em caminhões e outros veículos, como recirculações dos gases de escapamento e redutores catalíticos seletivos (ANFAVEA, 2012). Além disso, os novos motores passaram a utilizar diesel S-50 (posteriormente S-10) que limita em 50 p.p.m. a emissão de enxofre.

Na Europa é vigente o padrão de emissões “EURO VI”, para caminhões e ônibus a diesel, que é mais rigoroso que o atual modelo brasileiro. Segundo a Associação de Fabricantes de Veículos Automotores o modelo P7 é equivalente ao modelo EURO V (ANFAVEA, 2012). Segundo o último Inventário de Emissões de Veículos Automotores, em 2009, a frota brasileira era composta por 35% de caminhões com até 3 anos de idade, 28%, entre 4 e 8 anos, 31%, entre 9 e 18 anos, e 8%, com mais de 18 anos (MMA, 2011).

Frente às informações de idade da frota, simplesmente adotar o modelo vigente atualmente no país, para todos os caminhões utilizados, irá superestimar a qualidade da frota brasileira. Dessa forma, é considerado o modelo EURO III europeu, uma



classificação anterior, similar ao brasileiro P5 (que teve vigência de 2009 a 2011)<sup>19</sup>. O tamanho dos caminhões é especificado anteriormente e faz referência ao tipo de carga e distância considerada.

No caso do combustível, é considerado o diesel S-50, para caminhões de transporte, ou S-350, para equipamentos hidráulicos. A principal diferença do diesel revendido no Brasil, para o da Europa, é a obrigatoriedade de adições de biodiesel (> 5%). Existem vastas informações nacionais sobre o biodiesel brasileiro, inclusive de ICV, entretanto, o dado utilizado por esse trabalho não é adaptado.

Atualmente, existe uma discussão quanto aos benefícios do uso de diesel com mistura. Considerando todo o ciclo de vida de veículos e da produção do diesel e biodiesel, o uso do combustível misturado causa diferenças no desempenho e manutenção de motores, e esses podem acarretar em maior impacto ambiental que benefícios pelo uso do biocombustível (SUGAWARA, 2012). Além disso, a produção de soja e outras matérias primas para a refino do biodiesel ocorre em diversos pontos do país e precisa ser escoada por via rodoviária até as refinadoras. Dessa forma, não é feita uma defesa ou acusação do uso de biodiesel, entretanto, a adaptação desse tipo de dado deve levar em consideração as questões citadas, e elas estão além do limite pretendido por essa dissertação.

#### 6.2.1.8 Fim de vida

Os dados relativos ao fim de vida de materiais não estão adaptados, porém, algumas considerações são feitas na justificativa da escolha dos dados. Para cenários de fim de vida relacionados à construção civil, o *Ecoinvent* considera a gestão de separação de resíduos dentro da obra (DOKA, 2009). Isso significa dizer que, até onde é possível, os resíduos saem pré-selecionados da obra, podendo ter três destinos: centro de separação; reciclagem; ou disposição final (aterro inerte ou sanitário, queima, etc.). O centro de separação recebe materiais que precisam de manipulação mais pesada em sua separação, e, posteriormente, esses materiais são encaminhados a uma das duas outras opções. Nesse sentido, o sistema da base de dados não é essencialmente diferente das possibilidades legais de resíduos no Brasil.

A resolução 307, do Conselho Nacional de Meio Ambiente, separa os resíduos de construção em quatro classes: Classe A (recicláveis como agregado); Classe B (recicláveis para outras destinações, como papel, vidro, madeira, metais, gesso); Classe

---

<sup>19</sup> O modelo P6 entrou em vigor apenas para veículos leves (MMA, 2011).

C (resíduos sem tecnologia para reciclagem); e Classe D (resíduos perigosos, como, tintas, solventes, óleos) (CONAMA, 2002). Mesmo assim, é constatado que, por falta de fiscalização, as exigências da norma não são efetivas (DIAS, 2013).

Nesta dissertação, por motivo de simplificação, dois materiais são enviados para reciclagem: aço (cobertura e reforço estrutural) e alumínio das esquadrias. Esses materiais consideram, em sua produção, taxas de reciclagem de sucata secundária. Essa sucata, não tem carga ambiental quando entra na indústria (modelo “*Allocation, cut-off by classification*”). Dessa forma, a reciclagem desses produtos irá considerar a carga de sua separação e tratamento, até o ponto em que ela entra novamente no ciclo industrial.

Sobre a reciclagem, não são considerados impactos evitados. Essa decisão se fundamenta no entendimento de que dar benefícios de expansão do sistema (impactos evitados) para produtos com um longo ciclo de vida (edificações), pode incentivar resultados irreais de impacto. Por exemplo, na venda de uma casa com etiqueta ambiental, os impactos evitados se fundamentam na possibilidade futura do comprador se comprometer com reciclagem. Nesse sentido, o único beneficiário do impacto evitado seria a indústria de construção, que não se envolve com (ou promove) o uso de sucata na produção de aço ou alumínio e nem se compromete com a reciclagem ao fim do ciclo de vida da edificação (responsabilidade do usuário ou da empresa de demolição). Assim, em produtos da construção civil, fazer a suposição do impacto evitado pode beneficiar quem não se compromete com a reciclagem, seja no início, seja no fim da cadeia.

Os outros materiais são enviados para aterro sanitário inerte. Os módulos utilizados são: “*treatment of waste concrete, inert material landfill*”, “*treatment of waste reinforcement steel, recycling*”; “*treatment of waste gypsum, sanitary landfill*”; “*treatment of inert waste, inert material landfill*”; “*treatment of waste paint on wall, collection for final disposal*”; “*treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal*”; “*treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling*”.

### 6.3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados finais de ACV apresentam tendência que, assim como demonstrado pela fase anterior, confirmam os impactos operacionais como os mais importantes ao longo do ciclo de vida de 50 anos. Requerimentos operacionais são mais altos em 5/7 categorias de impacto, chegando em valores superiores à 50%, dependendo do cenário

de manutenções. Os resultados totais, para cada modelo de casa (ParC e ParA), e respectivos cenários de manutenção (C1, C2 e C3) são apresentados de forma condensada na Tabela 14, sendo discutidos posteriormente. Os resultados normalizados para a casa de concreto com cenário base de manutenção (ParC C1) são apresentados na Figura 41.

Tabela 14 - Resultado gerais para os dois modelos de casa e três cenários manutenções

Casa tipo	ADP f (MJ)	ADP nf (kg Sb eq.)	AP (kg SO <sub>2</sub> eq.)	EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.)	GWP-100 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	ODP (kg CFC11 eq.)	POCP (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.)
ParC C1	1,06E+04	4,89E-01	7,72E+00	1,59E+00	1,16E+03	1,10E-04	3,62E-01
ParC C2	9,45E+03	4,43E-01	6,47E+00	1,47E+00	1,05E+03	9,96E-05	3,38E-01
ParC C3	8,80E+03	4,36E-01	4,73E+00	1,40E+00	9,93E+02	9,37E-05	3,24E-01
ParA C1	9,87E+03	4,86E-01	7,35E+00	1,45E+00	1,08E+03	1,02E-04	3,74E-01
ParA C2	8,67E+03	4,40E-01	6,06E+00	1,32E+00	9,69E+02	9,09E-05	3,36E-01
ParA C3	7,84E+03	4,32E-01	4,23E+00	1,22E+00	8,79E+02	8,31E-05	2,96E-01

Também como esperado, existe a tendência de diminuição de impactos à medida que a edificação necessita de menores taxas de manutenção, com aumento de durabilidade de materiais de construção. A diferença entre os cenários de manutenção pode chegar em até 45%, como no caso do impacto de AP para o modelo ParA. Mesmo assim, se os impactos incorporados iniciais forem muito altos, essa diferença não é tão significativa, como no caso de ADP nf.

Considerando todos os impactos médios do ciclo de vida, é verificado que o modelo ParC impacta mais que o modelo ParA, na maioria das categorias analisadas. Este resultado está relacionado, principalmente, ao menor uso de energia elétrica para condicionamento artificial, proporcionado pela melhor adaptação da casa ParA para o clima da região metropolitana de Porto Alegre.

Se forem considerados somente os impactos incorporados totais (inicial, recorrente e de fim de vida), existem resultados variáveis dependendo do cenário de manutenção (Figura 42). Considerando o cenário C1, o modelo de concreto é menos impactante em 4/7 das categorias analisadas, ambos os modelos ficam próximos em 3/7. Ao passo que no cenário C3 de manutenção a tendência muda, o modelo ParA é menos impactante em 5/7 categorias, o modelo ParC é menor em 1/7 categoria, e similar em 1/7 categoria. Em C3 a diferença é pequena entre os modelos, chegando em até 7% em EP.

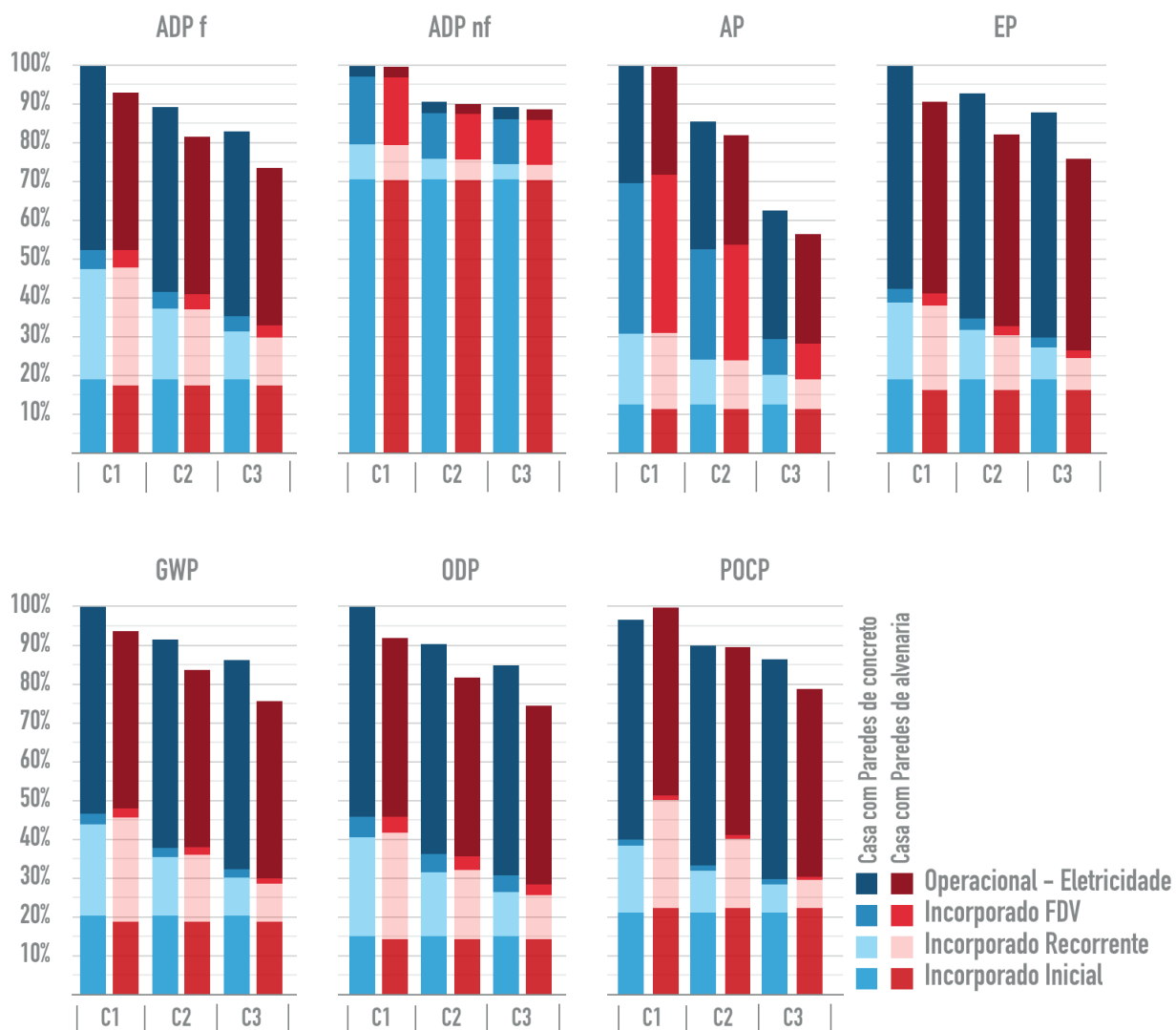


Figura 41 - Resultados gerais para todos cenários do modelo com parede de concreto (ParC) e do modelo com parede de alvenaria, normalizados pelo modelo ParC C1. (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis; ADP nf – Depleção de recursos abióticos, não fósseis; AP – Potencial de Acidificação; EP – Potencial de Eutrofização; GWP – Potencial de mudança climática; ODP – Potencial de depleção de ozônio estratosférico; POCP – Potencial de criação de ozônio fotoquímico).

Já na relação dos impactos incorporados iniciais (Figura 42), é verificado o menor impacto em 5/7 categorias do modelo ParA, ficando maior apenas em POCP. É possível notar também diferenças importantes entre os resultados de impactos incorporados iniciais da Fase 2, gerados com dados não adaptados. Essas diferenças podem ser explicadas principalmente por maior detalhamento do inventário de materiais de construção. Soma-se a isso, a consideração tanto de distâncias de transporte adaptadas para a região analisada, quanto ao uso de cenários de fim de vida da edificação, que modificam a relação dos impactos incorporados como um todo. Esse assunto é tratado em detalhes no subitem 6.3.3.

Os resultados mostram que a recorrência de manutenções é de grande importância para os impactos incorporados. Na maioria dos casos do C1, os impactos recorrentes são similares ou mais altos que os iniciais, 5/7 para o modelo de concreto e 6/7 para o modelo de alvenaria. Já no caso da relação entre o cenário com mais manutenções (C1) e aquele com menos intervenções (C3), pode haver redução de até 70% para a casa ParA na categoria de POCP (Impacto recorrente). Essa diferença entre os impactos recorrentes também influencia diretamente no contexto do fim de vida da edificação.

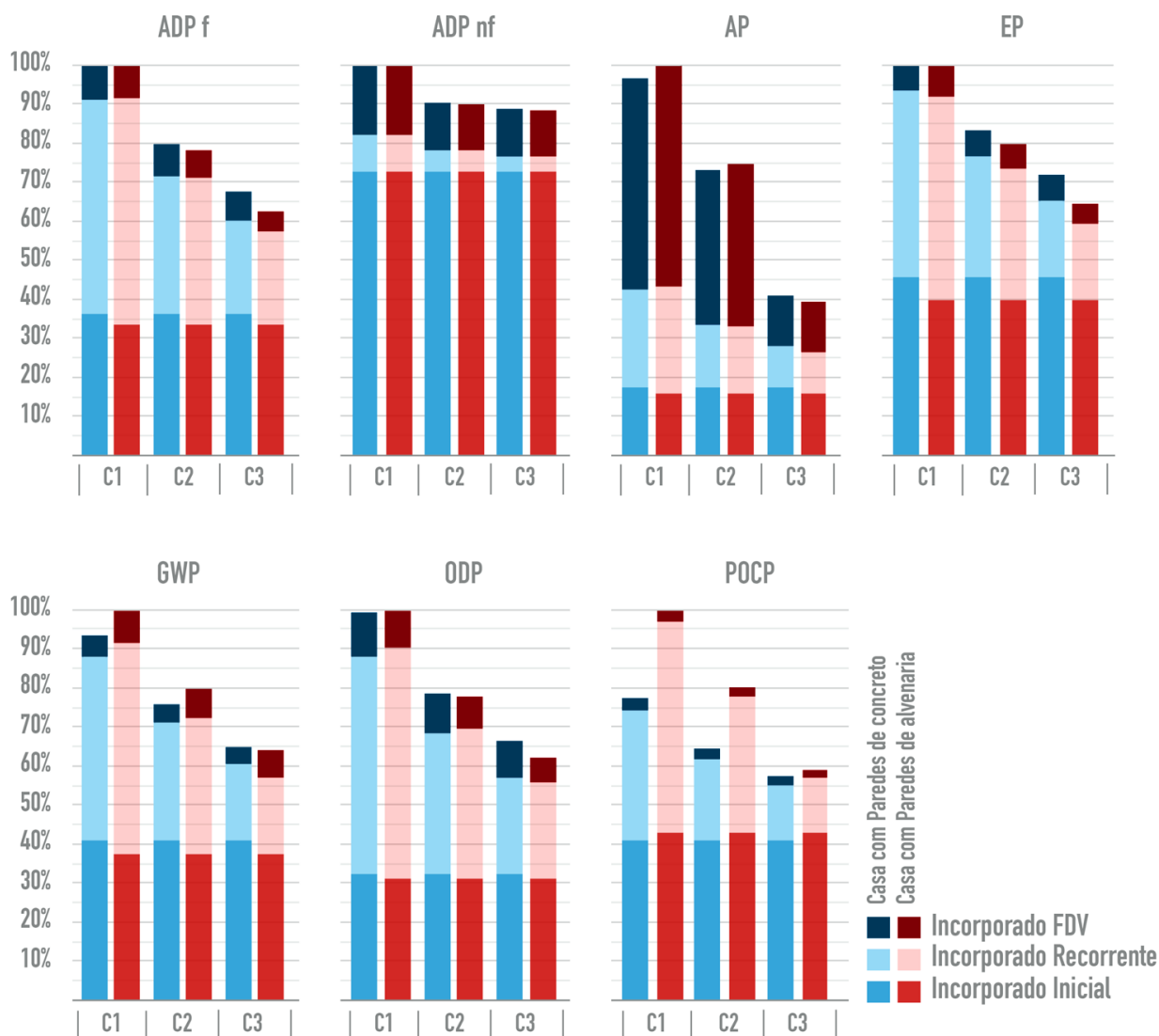


Figura 42 - Resultados de impacto incorporado inicial, recorrente e de fim de vida para todos cenários da casa ParC, normalizados pelo cenário base Casa ParC C1.

Os impactos incorporados pelo fim de vida da edificação em geral são os menos importantes em ambos modelos avaliados. Entretanto, no caso de AP, eles podem ser os mais importantes, em função de contaminação da água e solo para o tratamento de alguns materiais de construção, como gesso. Mesmo assim, a suposição inicial (Fase

2) de que o fim de vida representaria impacto próximo a 5% somente é confirmado em categorias como GWP e POCP.

### 6.3.1 Impactos incorporados iniciais

Os impactos incorporados iniciais são apresentados a seguir em valores absolutos para os sistemas construtivos utilizados nos modelos. Ambos os modelos de casa com paredes de concreto ou alvenaria possuem as mesmas definições de fundação, forro, telhado e esquadrias, dessa forma a única diferença está entre as paredes ParC e ParA.

Os resultados de ADP f e GWP são apresentados na Figura 43. Ambos possuem tendências similares, já que os fatores de caracterização de mudança climática são influenciados diretamente pelo uso de combustíveis fósseis. Mesmo assim, o resultado para ADP f mostra participação pronunciada dos transportes ao longo do ciclo de vida, especialmente em sistemas com maior valor em massa. É importante salientar que os impactos de transporte estão agregados para análise de berço ao portão e do portão ao túmulo dos sistemas. Assim, como vários materiais de construção têm produção ou extração de matéria prima em regiões distantes da localização da casa avaliada, é natural que a contribuição de transporte seja importante. Além disso, a maior parte dos produtos é deslocada com transporte rodoviário em todo o país, contribuindo para a representação em ambas categorias.

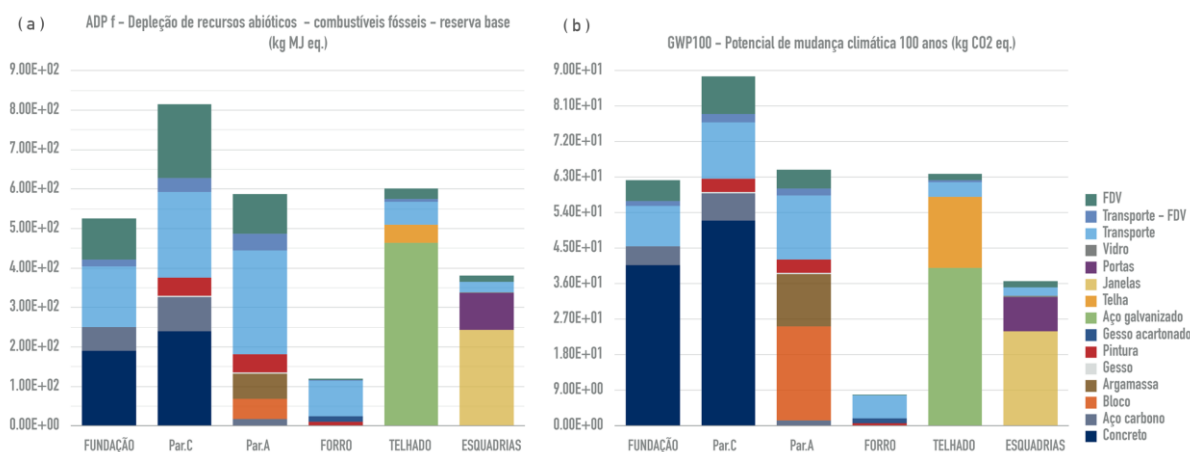


Figura 43 - Impactos incorporados iniciais por sistema construtivo avaliado para (a) Depleção de recursos abióticos fósseis (ADP f) e (b) potencial de mudança climática no horizonte de 100 anos (GWP).

Logicamente, os sistemas com maior representação mássica, como paredes e fundação, possuem as maiores contribuições com transporte. Todavia, é importante salientar o caso do forro de gesso, que embora seja o sistema com menor contribuição, é aquele que proporcionalmente tem o maior impacto de transporte em relação à produção do material, principalmente o gesso. Como comentado na estrutura

metodológica, quase 97% de toda a gipsita extraída no país tem origem no Nordeste e o escoamento da produção é exclusivamente rodoviário. Dessa forma o transporte até o Sul representa quatro vezes o impacto de produção para ADP f e três vezes para GWP.

Por outro lado, o sistema de esquadrias, com portas e janelas de alumínio, tem o processo de transportes como o menos representativo para todas as categorias de impacto analisadas. Tanto a extração de matéria prima, quanto os produtos beneficiados de alumínio, antes da extrusão de perfis, possuem trajeto modal marítimo na maior parte do transporte. Soma-se a isso a baixa representação mássica do sistema, que embora possa ter impacto alto de produção, possui pouca massa para transporte.

Em ambas as categorias, a produção de metais é também importante, pelos intensos processos energéticos envolvidos. Os metais estão presentes nas estruturas de cobertura em aço galvanizado, reforço estrutural de fundação e paredes, além do uso de alumínio nas esquadrias. Como o aço tem baixa relação mássica em paredes e fundação, aproximadamente 1% para concreto (paredes e fundação) e 0,3% para alvenaria (paredes), a contribuição de impacto é alta em proporção ao seu valor mássico. Já no caso da estrutura de telhado, a maior proporção mássica aumenta os impactos de produção do aço, que envolvem a sinterização do minério de ferro em altas temperaturas com uso de carvão mineral. Somado a isso, o processo de galvanização dos perfis metálicos é responsável por 40% dos impactos de produção da estrutura do telhado para GWP e 20%, para ADP f.

Igualmente, o processo de produção de alumínio para as esquadrias é relevante. No caso de ADP f, as contribuições principais são igualmente distribuídas entre a produção de alumínio e a pintura de tratamento. Já para GWP, a produção de alumínio é responsável por 60% dos impactos. A produção de alumínio é um processo intensamente energético, mesmo assim, utiliza eletricidade proveniente de plantas hidroelétricas como principal fonte na produção de alumínio primário. O uso de combustíveis fósseis está relacionado à etapa de produção de liga de alumínio e forjamento de tarugos. Nesse processo, o alumínio líquido é refundido a 750 °C com outros elementos em fornos cuja principal fonte energética é o gás natural (para o processo de alumínio primário elaborado pelo *Ecoinvent*, em conjunto com as indústrias Latino Americanas).

Já o tratamento de pintura das esquadrias utiliza tinta em pó eletrostática. Embora, o processo cause menos danos ambientais que outros tratamentos para alumínio

(CLASSEN et al., 2009), ainda assim produz impactos relevantes. A principal contribuição para os impactos relacionados com uso de combustíveis fósseis está relacionada com a etapa de cura térmica dos elementos pintados, que utiliza gás natural como fonte de calor.

O impacto incorporado inicial do concreto é o mais importante para a categoria GWP. Esse resultado era esperado, principalmente por dois fatores principais. Um deles, em função da importante representação mássica do material em paredes e fundação. O outro, o uso de cimento, um material que tem como base a produção de clínquer, cujo processo, além de ser intensamente energético, libera dióxido de carbono, pela descarbonatação do calcário com calor na formação de óxidos de cálcio. Em função do uso de combustíveis fósseis para calcinação do calcário, o concreto tem participação em ADP f relativamente importante.

Os sistemas de paredes de concreto e alvenaria também obtiveram resultado mais alto que os outros sistemas para os cenários de fim de vida, para as duas categorias de impacto. Esse resultado está relacionado com os equipamentos utilizados para a demolição das estruturas. Esses equipamentos, do tipo escavadeiras hidráulicas, possuem performance de desmantelamento de 0,2 h/m<sup>3</sup> para concreto armado, e utilizam diesel S500 como principal combustível.

Para os impactos relacionados com ADP nf (Figura 44), a produção da estrutura do telhado é expressiva, chegando a ser 7 vezes mais impactante que o segundo sistema mais importante, o de esquadrias. O principal contribuinte para esse resultado é o processo de galvanização da estrutura metálica, ou seja, aplicação de camada de zinco sobre a peça metálica para fins anticorrosivos. O ICV utilizou dados de extração e beneficiamento de zinco para as médias de produção mundial, disponível na base de dados, já que não foi possível encontrar dados setoriais brasileiros ou regionais.

De acordo com o relatório de metais da base de dados (CLASSEN et al., 2009), o zinco é um elemento que ocorre apenas em composição química com outros elementos, como cádmio, tálio, índio, na forma de sulfeto (ZnS). A maioria dos elementos presentes no ZnS pode ser recuperada durante o processamento do minério, especialmente porque estes metais podem ter alto valor de mercado. Entretanto, de maneira a abranger um cenário global, o dado de ICV assume que nem todos esses minerais são recuperados durante o beneficiamento do zinco. As taxas de não aproveitamento são de 20% para o índio, e 5% para o cádmio.



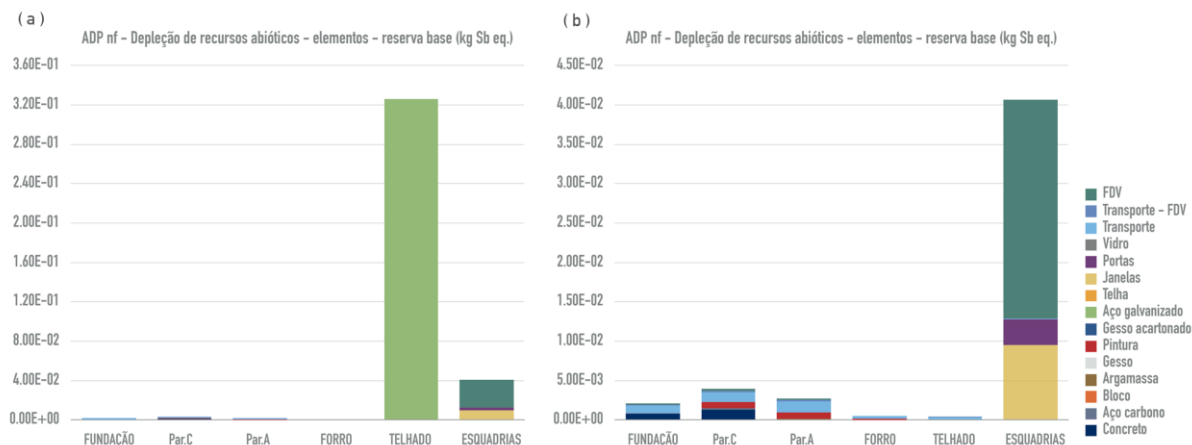


Figura 44 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para Depleção de recursos abióticos não fósseis (ADP nf) - (a) ADP nf, geral, e (b) ADP nf, sem apresentar os resultados para aço galvanizado.

A pressuposição citada é fundamental para a compreensão dos resultados. O método utilizado para avaliação de recursos abióticos minerais é o ADP nf, com referência em reservas base. Esse método de impacto atribui fatores de caracterização em função de requerimentos químicos e físicos mínimos para o elementos tornarem-se economicamente exploráveis, dada a disponibilidade tecnológica atual e futura (OERS et al., 2002). Essa definição acaba por atribuir fator de impacto especialmente alto para o índio, que só pode ser explorado em pequenas taxas (50 ppm) presentes na composição com ZnS. A Tabela 15 apresenta os fatores de caracterização recomendados em kg de antimônio (Sb), para os fluxos elementares mais importantes na produção de 1kg de estrutura em aço galvanizado. Na mesma tabela é apresentada a entrada de fluxos elementares para o inventário de produção, sua respectiva contribuição mássica e contribuição de impacto para ADP nf.

Tabela 15 – Fluxos elementares representado >99% de impacto em ADP nf para a produção de 1kg de aço galvanizado.

Fluxo elementar	Entrada (kg)	Massa (%)	Fator (kg Sb)	Impacto (%)
Índio, 0,005% em sulfeto, In 0,003%, Pb, Zn, Ag, Cd	2,29E-05	0,002%	5,55E+02	84,35%
Cádmio, 0.30% em sulfeto, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In	1,38E-03	0,138%	1,11E+00	10,14%
Chumbo, 5.0% em sulfeto, Pb 3.0%, Zn, Ag, Cd, In	2,29E-02	2,292%	1,48E-02	2,28%
Prata, 0,007% em sulfeto, Ag 0,004%, Pb, Zn, Cd, In	3,34E-05	0,003%	8,37E+00	1,87%
Zinco, 9,0% em sulfeto, Zn 5,3%, Pb, Ag, Cd, In	4,13E-02	4,126%	3,65E-03	1,00%
Ferro (soma das formas encontradas na natureza)	8,29E-01	82,896%	1,66E-06	0,01%
Alumínio (soma das formas encontradas na natureza)	9,90E-04	0,099%	2,53E-05	0,00%
<b>Total</b>	<b>8,96E-01</b>	<b>89,56%</b>	<b>-</b>	<b>99,65%</b>

O resultado apresentado pelas esquadrias tem situação similar ao processo de aço galvanizado. Dentre os metais utilizados para a liga de alumínio está o zinco, possuindo as mesmas taxas não recuperadas de elementos combinados do ZnS. No caso do fim de vida, como a modelagem de reciclagem foi colocada após a vida útil da edificação,

os impactos de refusão do alumínio secundário ocorrem nessa fase e com isso, também, a adição de zinco.

Como reflexão sobre os resultados obtidos para APD nf é possível inferir que o uso da metodologia de reserva base é suscetível para avaliar minerais com alta demanda e baixas reservas. O resultado com esse método mascarou o impacto de minerais mais comuns à construção civil, mesmo que a extração destes possa causar efeitos colaterais em reservas mais raras. Os recursos minerais utilizados em grande volume pela indústria da construção têm fatores baixos de caracterização. Além disso, a bibliografia acadêmica não é clara no que a depleção de recursos deveria refletir exatamente (ILCD, 2011). Nem a metodologia com referência em últimas reservas, nem aquela com referência em reservas base, representam corretamente as reservas ainda disponíveis para extração (OERS; GUINÉE, 2016).

A discussão sobre como avaliar recursos abióticos em edificações não é conclusiva no método proposto por Oers et al. (2002). Estes autores afirmaram que a depleção de recursos para materiais de construção (concreto, calcário, argila, granito, vidro, areia, etc.) pode ser considerada negligenciável, já que esses recursos são geralmente (nas palavras do autor) qualificados como infinitos. Mesmo assim, os edifícios usam outros materiais, que podem causar influência na disponibilidade de recursos, e ainda não é claro como caracterizar essa relação.

Os resultados relacionados com acidificação (AP) e eutrofização (EP) são apresentados pela Figura 45. No caso de AP, existe uma interessante resposta sobre o fim de vida para o sistema de forro de gesso, que causa o maior impacto entre os sistemas analisados. Em todas as outras categorias, o forro apresenta os menores impactos. Além disso, o fim de vida é frequentemente relacionado como o impacto incorporado menos representativo em edifícios. Todavia, a disposição do gesso pode ser considerada diferente.

O gesso utilizado para construção civil ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é um mineral com excelentes propriedades. Não interfere na qualidade do ar de ambientes internos e, frequentemente, é relacionado como material ambientalmente favorável, já que sua produção demanda pouca energia, além de ser potencialmente reciclável (DOKA, 2009). Ocorre que, na disposição, o gesso pode ter seus sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) lixiviados, ou convertidos em sulfetos ( $\text{S}^{2-}$ ), sendo potencialmente perigosos se assumirem a forma gasosa de sulfeto de hidrogênio ( $\text{S}_2\text{O}$ ) (DOKA, 2009). Esse último é um composto corrosivo, venenoso e explosivo, que pode ser gerado se o gesso for disposto em aterro

sanitário comum, tendo contato com ambiente úmido, anaeróbico e biologicamente ativo.

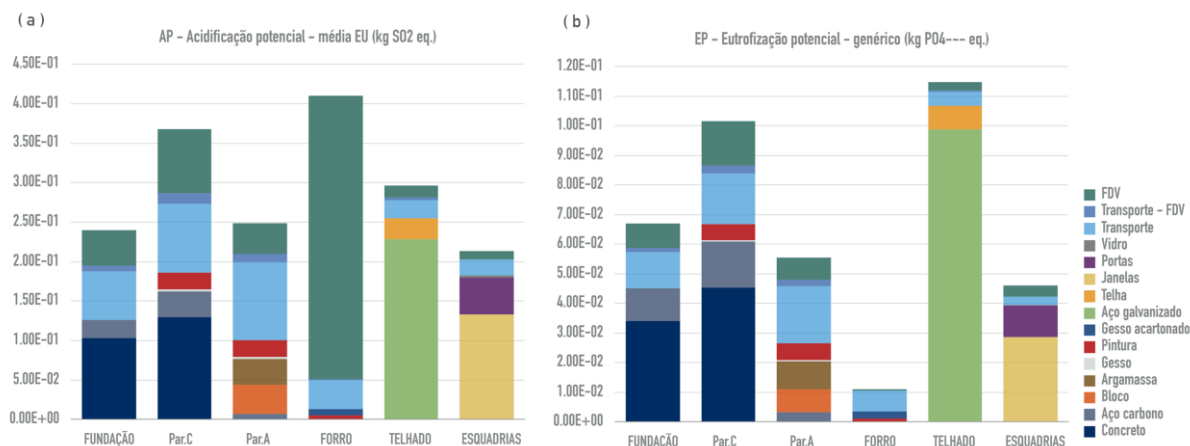


Figura 45 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para (a) Acidificação potencial (AP) e (b) Eutrofização potencial (EP).

Embora a legislação brasileira obrigue a reciclagem do gesso em sua destinação final, frequentemente não existe controle sobre as empresas que geram o resíduo, nem sobre as empresas que fazem a destinação. Não obstante, o país ainda tem importante dificuldade em acabar com o uso de aterros não controlados a céu aberto<sup>20</sup>. Soma-se a isso, a situação de que na região metropolitana de Porto Alegre existe apenas uma empresa de reciclagem de gesso<sup>21</sup>. Sendo assim, é possível supor que, muitas vezes, a melhor destinação para os resíduos de gesso serão aterros sanitários, já que a falta de controle e estrutura pode proporcionar formas ainda mais inadequadas. O resultado de AP da destinação final de gesso (Figura 45) ilustra o problema decorrente da gestão incorreta desse resíduo. O material representa apenas 1% da massa da edificação base, mas o risco de contaminação é alto, tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana.

Além da disposição do gesso, os cenários de fim de vida para paredes de concreto, alvenaria e fundação são altos para AP por razões similares. Mesmo que esses materiais sejam considerados inertes, traços de componentes não inertes não são dissociados do volume de RCD. O dado de fim de vida para esses elementos considera frações não inertes, que geram poluição sensível a essa categoria de impacto.

<sup>20</sup> Como exemplo da dificuldade de atenuar o déficit de aterros sanitários no Brasil, somente a capital federal ainda possui o maior lixão (*sic.*) a céu aberto da América Latina.

Os desafios da destinação de resíduos. CNI, 2016. Disponível em <<http://www.portaldaindustria.com.br/agenciacni/noticias/2016/03/entrevista-os-desafios-da-destinacao-de-residuos/>>. Acesso em fevereiro de 2017.

<sup>21</sup> Mercado da reciclagem investe em expansão. Jornal do Comércio, 2014. Disponível em <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=170855>>. Acesso em fevereiro de 2017.

No caso da estrutura metálica do telhado, que apresenta impacto alto para EP e AP, a principal causa são os processos energéticos envolvidos na produção do aço carbono e galvanização de peças. Para AP, os processos contribuem igualmente para a emissão de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ , enquanto que, para EP, a mineração do carvão mineral utilizado para sinterização do ferro gusa é o principal responsável pelas emissões de  $\text{PO}_4^{3-}$ . Em função da queima de combustíveis fósseis (emissão de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ), o transporte é relevante, tanto para AP, quanto para EP.

Na produção de concreto, a maior contribuição para EP provém da sinterização do clínquer. Assim como na produção do aço, a extração do carvão mineral é a maior responsável. Embora este combustível esteja em desuso pela indústria brasileira, que gradualmente utiliza taxas maiores de coque de petróleo, o carvão ainda contribui para o processo (SNIC, 2013).

Os impactos de ODP e POCP são apresentados na Figura 46. O principal contribuinte para a ODP está relacionado com os transportes, em conjunto com outros processos de queima de combustível, como diesel para desmantelamento. Os principais contribuintes para o impacto estão na produção do diesel, pois quando o petróleo é extraído são liberados halogênios (Halon 1301 e 1211) que reagem com o  $\text{O}_3$  estratosférico (SUGAWARA, 2012).

Além disso, é importante salientar que o método de avaliação de impacto de ODP utilizado<sup>22</sup> (CML 2001, *steady state*) não considera a caracterização de emissões de  $\text{NO}_x$ . A queima de combustíveis para transporte é uma das maiores causas para emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  antropogênico e a ação dessa substância é uma das causas de depleção do ozônio na estratosfera (WMO, 2011). O  $\text{N}_2\text{O}$  é a fonte primária de  $\text{NO}_x$  estratosférico, reagindo com o  $\text{O}_3$  por via catalítica, de maneira similar aos halocarbonos ( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ;  $\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$ ) (RAVISHANKARA; DANIEL; PORTMANN, 2009). Inclusive, segundo o mesmo autor, em função das regulações para eliminação do uso de CFC, surgidas com o Protocolo de Montreal, atualmente, o  $\text{NO}_x$  é mais a importante emissão para depleção de  $\text{O}_3$ . Como citado por Lane e Lant (2012), os modelos de ODP deveriam incluir caracterização para emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ , pois já existe claro entendimento científico sobre a ação da substância na depleção da camada de ozônio.

---

<sup>22</sup> Método ODP recomendado pela EN 15804:2012+A1:2013

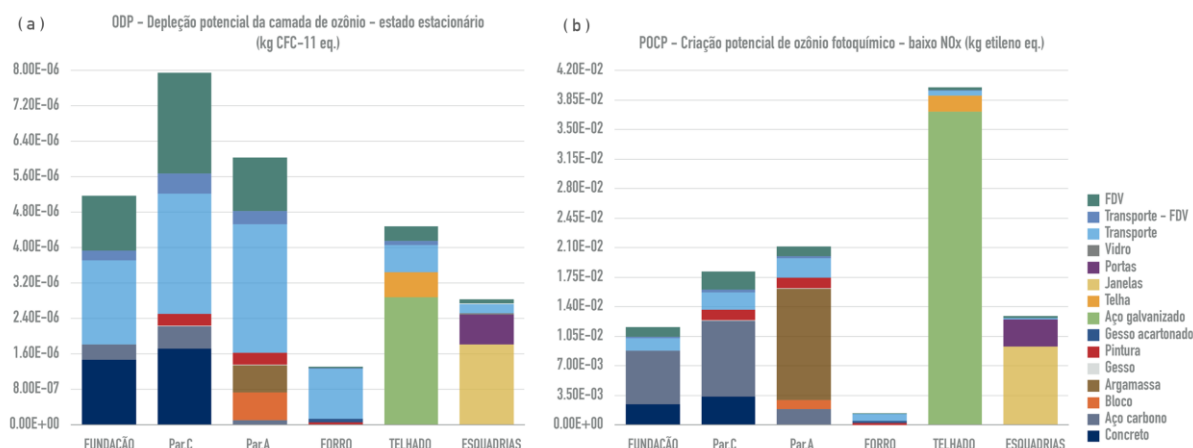


Figura 46 - Resultados por sistemas construtivos avaliados para (a) Depleção potencial da camada de Ozônio (ODP) e (b) Criação potencial de ozônio fotoquímico (POCP).

No caso de POCP, o aço utilizado no sistema telhado, paredes e fundação é o processo mais impactante. Esse impacto ocorre principalmente na produção de ferro gusa em alto forno. No processo, ocorre a reação entre o  $\text{CO}_2$  e o carbono presente no coque de carvão ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ), e o monóxido de carbono gerado dentro do alto forno reage com o  $\text{FeO}$ , de forma redutora para a produção de metal (CLASSEN et al., 2009). Uma parte do CO do alto forno é reaproveitado no processo depois de passar por tratamento. Outra parte do CO é lançada diretamente no ar, junto com  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  e metais pesados, de acordo com o processo do *Ecoinvent*.

Diferentemente do comportamento quanto a outros impactos, a argamassa da parede de alvenaria é um dos processos mais importantes para POCP. A argamassa utilizada considera uma composição com a adição de cal, que funciona como aglomerante, assim como o cimento. A produção de cal no Brasil, considera em grande parte, a calcinação do calcário com biomassa, tornando a indústria menos emissiva do ponto de vista de impacto em mudanças climáticas. Ocorre que na pirólise da madeira para produção de carvão natural existem importantes emissões de CO e VOC's, que, embora sejam de origem biogênica, são considerados no impacto de POCP.

Para as categorias de impacto, de uma maneira geral, deve-se destacar o processo de pintura, que nos resultados somam uso de tinta PVA (interna) e acrílica (externa). Sua representação é relevante considerando que as quantidades utilizadas são muito pequenas. As emissões mais importantes estão relacionadas com a produção de dióxido de titânio, utilizado como pigmento branco. Além das emissões de queima de combustíveis fósseis para a sinterização do minério de titânio, existem emissões de ácido clorídrico, para o ar, e sulfatos e metais pesados, para a água.

Para a maioria das categorias de impacto analisadas (6/7), o sistema de casa ParA possui menor impacto incorporado inicial, se comparado com a casa ParC. Ao mesmo tempo, os importantes impactos resultantes da estrutura de aço galvanizado irão elevar o impacto resultante, em qualquer modelo testado. Soma-se a isso, o impacto de transportes, que é importante, considerando a cadeia produtiva de materiais de construção com maior valor mássico. Mesmo assim, como demonstrado anteriormente, os impactos incorporados recorrentes podem ser tão ou mais importantes que os incorporados iniciais.

### 6.3.2 Impactos incorporados recorrentes

A contribuição dos impactos incorporados recorrentes é apresentada para três cenários. Esses cenários são baseados no estudo piloto proposto na Fase 2 desta dissertação. Os resultados são apresentados para todas as categorias de impacto por sistema construtivo. Dessa forma, eles podem ser visualizados de maneira mais clara quanto à representação de cada processo. Estes resultados estão normalizados pelo cenário de manutenção C1 de cada sistema. Como a fundação não requer manutenção e o impacto com pisos está fora do escopo deste trabalho, os sistemas de fundação e pisos não são apresentados.

Os impactos incorporados totais para a parede de concreto são exibidos na Figura 47. Como havia sido verificado na Fase 2, um dos processos mais impactantes para os impactos incorporados é a recorrência de pinturas. Entretanto, a fase anterior considera dados de tinta alquídica, com base óleo, enquanto os novos resultados apresentam dados adaptados para o Brasil. Dessa forma, é possível constatar que a baixa durabilidade das tintas de revestimento considerada nos cenários avaliados é um dos maiores geradores de impacto. Mesmo no cenário C3, o total de pinturas pode ser considerado importante, dada a baixa representação mássica.

O transporte também é importante para todas as categorias de impacto do sistema de parede de concreto, ultrapassando 50% dos impactos totais em ODP. O maior responsável nos impactos recorrentes pelos transportes é o gesso utilizado no revestimento, pois tem extração no nordeste do país. O impacto de transportes segue tendência similar para parede de alvenaria (Figura 48), pois possui importantes quantidades de massa a ser transportada.

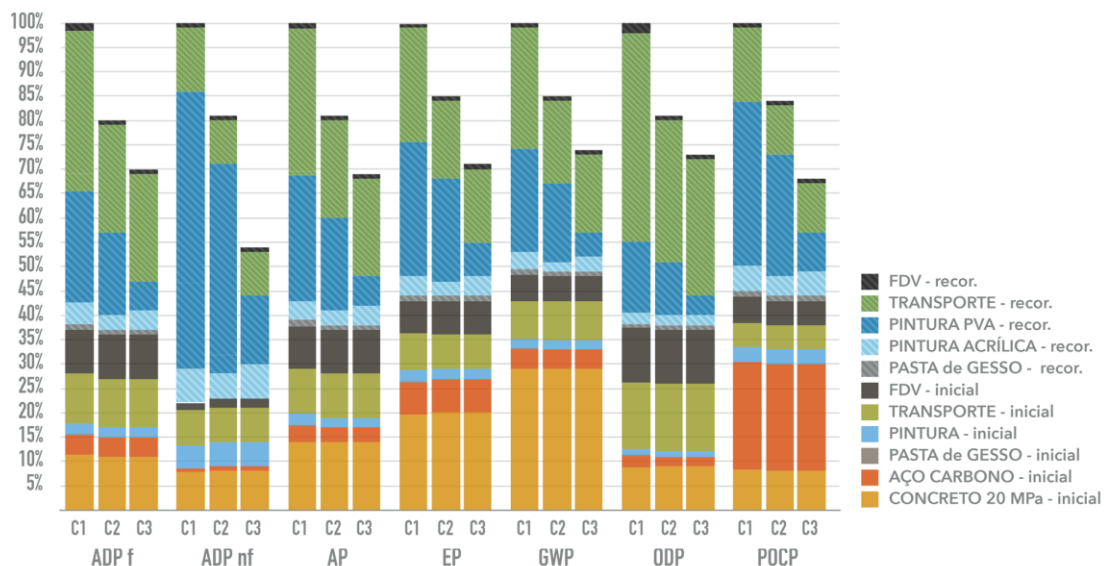


Figura 47 - Impactos incorporados totais do sistema de parede de concreto para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de parede de concreto com manutenção C1.

No caso da parede de alvenaria, a diferença entre os cenários de manutenção é mais alta do que na parede de concreto, ultrapassando 45% da contribuição em 5/7 categorias (Figura 48). Um dos principais agentes dessa diferença é a durabilidade da argamassa de revestimento, pois, sendo um dos processos com maior massa, influencia também o impacto de transportes.

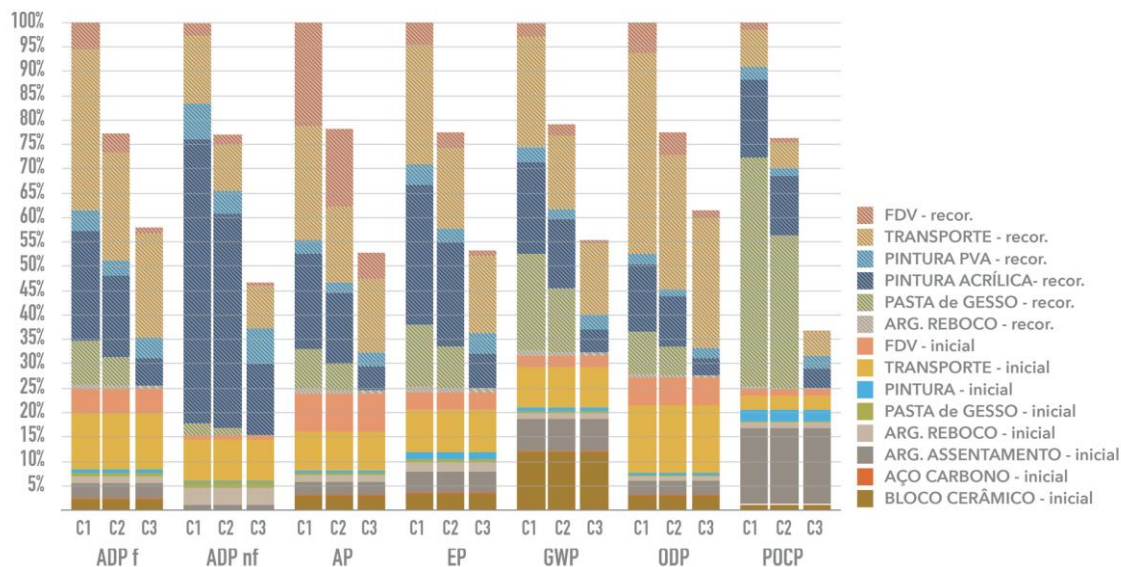


Figura 48 - Impactos incorporados totais do sistema de parede de alvenaria para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de parede de alvenaria com manutenção C1.

No caso do forro de gesso (Figura 49), além da questão da disposição, os transportes assumem impacto preponderante. Esse resultado pode ser ainda mais preocupante se considerarmos que o gesso de construção civil poderia utilizar outras fontes de matéria prima. O fosfogesso, um resíduo produzido pelas indústrias de fertilizantes agrícolas,

tem propriedades similares à gipsita e estoques atuais de mais de 160 milhões de toneladas, sendo que o Rio Grande do Sul é um dos estados de produção (COSTA, 2013). A indústria de construção civil (excluindo a produção de cimento) ainda não aproveita esse resíduo como matéria prima (BEZERRA, 2009).

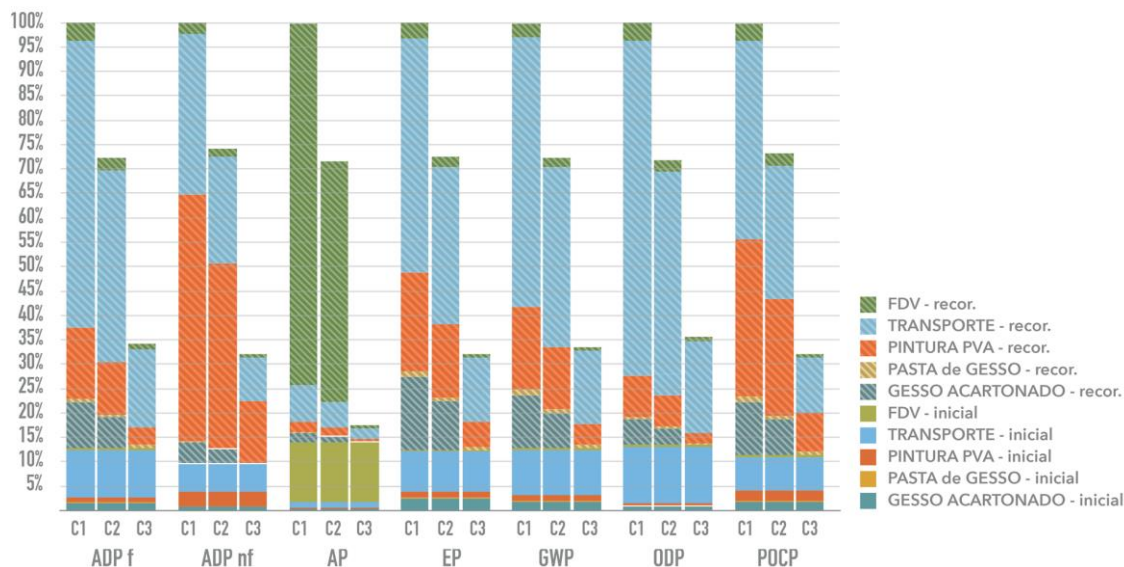


Figura 49 - Impactos incorporados totais do sistema de forro para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de forro com cenário de manutenção C1.

Os impactos incorporados totais da cobertura da edificação (Figura 50) apresentam comportamento diferente dos demais sistemas. Em função da durabilidade mais alta da estrutura de aço galvanizado e, também, pelo importante impacto ambiental causado inicialmente, os impactos recorrentes são secundários. Em C1, os impactos recorrentes são menores que 30% de todos os impactos incorporados, já no caso de C3, eles chegam a menos de 10%.

No caso dos impactos incorporados por esquadrias (Figura 51), a tendência de C3 ter o impacto mais baixo se altera. Os cenários C2 e C3 consideram o mesmo fator de renovação, ainda que baseado em autores diferentes. O cenário C3 utiliza dados de durabilidade de materiais propostos por Tavares (2006), enquanto que C2 baseia a substituição de materiais na vida útil de projeto, proposta pela norma de desempenho para o nível superior. O fator de renovação proposto pela EN 15978 considera o arredondamento sempre para o próximo número inteiro. Dessa forma, se o produto tiver durabilidade de 30 ou 40 anos, ele será substituído 1 vez em 50 anos. Por isso, mesmo que Tavares (C3) proponha durabilidade maior que a VUP superior, o fator de substituição é o mesmo.



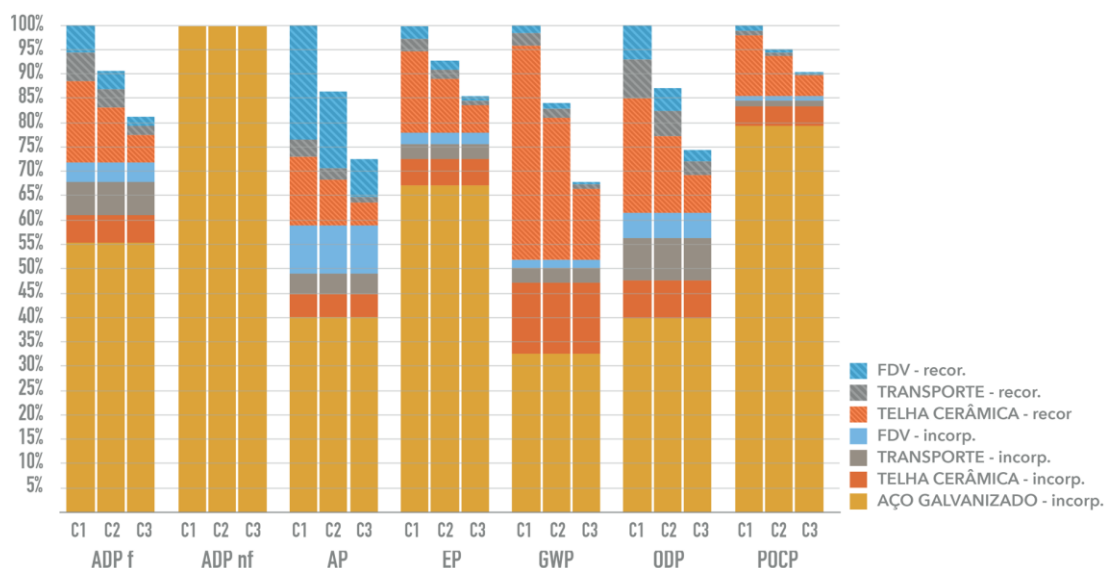


Figura 50 - Impactos incorporados totais do sistema de cobertura para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de cobertura com cenário de manutenção C1.

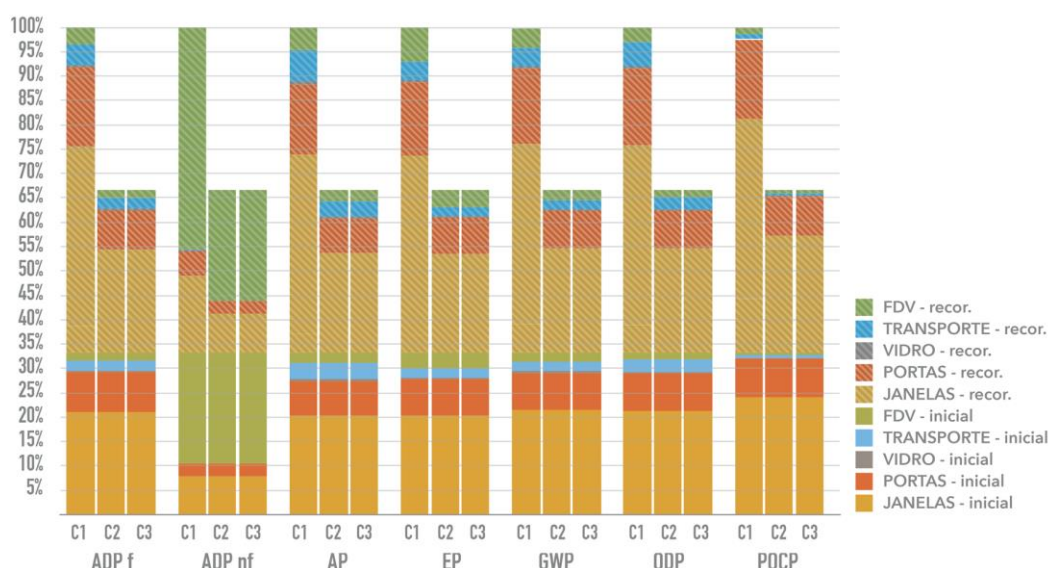


Figura 51 - Impactos incorporados totais do sistema de esquadrias para três cenários de manutenção, normalizados pelo sistema de esquadrias com cenário de manutenção C1.

### 6.3.3 Comparação com resultados da ACV preliminar

Para viabilizar a comparação dos resultados da Fase 2 com a Fase 3, são apresentados apenas os impactos incorporados iniciais e recorrentes<sup>23</sup> (Figura 52). Por não ser avaliado na Fase 2, o sistema de esquadria não é apresentado para os resultados da Fase 3. Ambos os modelos consideram o cenário de manutenção baseado na NBR

<sup>23</sup> Não são apresentados impactos incorporados por fim de vida.

15.575, para VUP mínima de sistemas, cenário C1. O objetivo desta comparação é verificar o quão próximo ou distante os resultados de dados não adaptados estão daqueles que consideram algum nível de regionalização.

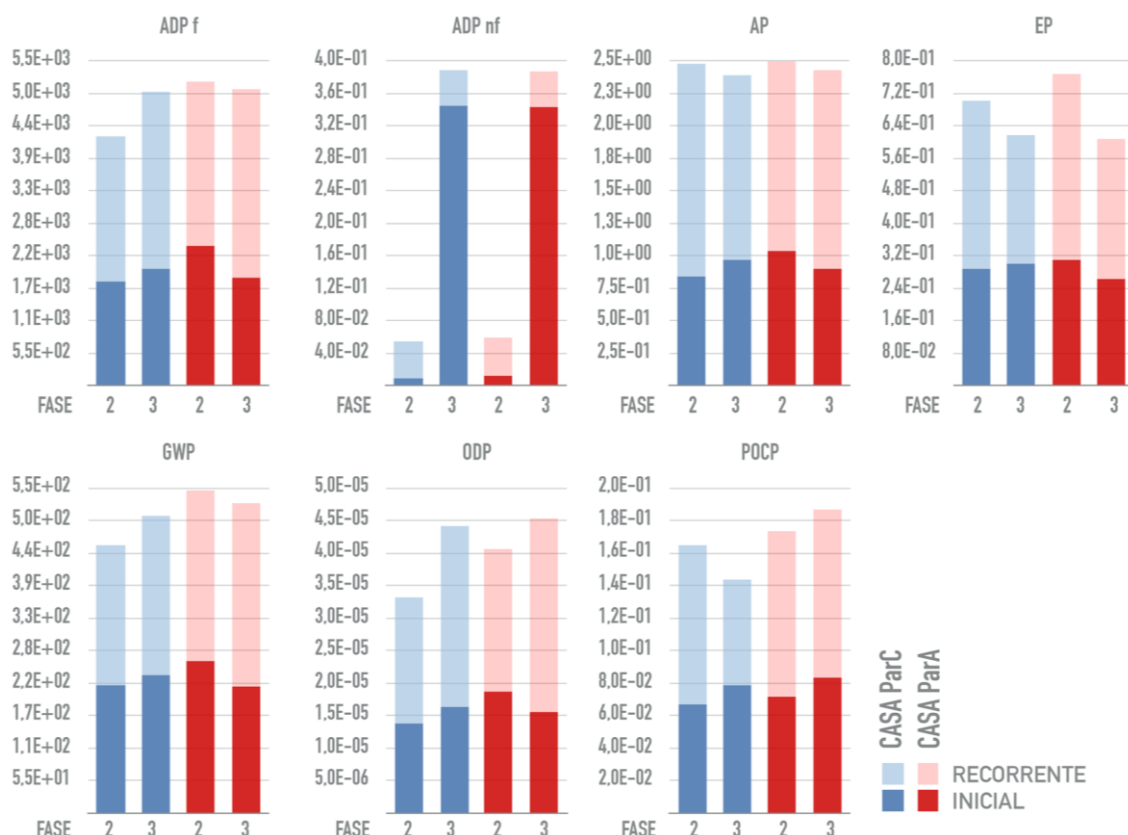


Figura 52 – Comparação dos impactos incorporados totais dos dois modelos de casa analisados utilizando dados internacionais (Fase 2) e adaptados (Fase 3). Ambos modelos utilizam o mesmo critério de manutenções, cenário C1.

De maneira geral, não existe uma tendência claramente identificável entre os impactos incorporados totais dos modelos com dados regionalizados (Fase 3) e não adaptados (Fase 2). Em ParC existe uma faixa de variação percentual entre 5 e 11% em 5/7 categorias, que faz com que as tendências de resultado se invertam em vários casos. No mesmo sentido, em ParA, a faixa de variação de 2 e 11% em 5/7 categorias muda a tendência dos resultados totais.

Considerando somente os impactos incorporados iniciais, existe aumento entre impactos na Fase 3 para a casa ParC (6/7 categorias). Ao mesmo tempo, existe a diminuição de impactos iniciais da casa ParA na Fase 3 (5/7 categorias). Adicionalmente, a variação pode chegar em até 30% na casa ParA em ADPf.

No caso de ParC, a tendência dos impactos iniciais está relacionada com o maior detalhamento dos dados de concreto. Na fase anterior é considerado concreto com

menor uso de cimento, enquanto que, com dados adaptados, houve maior consumo de cimento. No caso de ParA, a tendência dos impactos iniciais está relacionada com o detalhamento dos dados de bloco e telha cerâmicos. Esse resultado se relaciona com o uso do dado desenvolvido pela ANICER, que tem produção com menores emissões de poluentes que a referência europeia, pelo uso de combustíveis renováveis.

Nos requerimentos recorrentes do modelo ParC, os impactos são maiores com o uso de dados adaptados em 4/7 categorias. Enquanto que, para o modelo ParA, os mesmos impactos aumentam em 5/7 categorias. Mesmo assim, não existem tendências similares dentro da mesma categoria de impacto para ParC e ParA nas duas fases analisadas.

Considerando somente os resultados da Fase 2, a casa ParA obteve os maiores impactos incorporados iniciais e recorrentes em todas as categorias analisadas. Em contraposição, analisando os resultados da Fase 3, os impactos são similares na maioria das categorias, mas, considerando apenas o incorporado inicial, a parede de alvenaria é menos impactante na maioria das categorias.

Frente a essas considerações é possível afirmar que o uso de dados sem nenhum tipo de regionalização deve ser utilizado com precaução, principalmente, se o objetivo for a comparação de impactos ambientais de materiais em edificação. O uso de dados internacionais exige a verificação de equivalência nos processos produtivos utilizados. Na Fase 2, esses dados foram utilizados, principalmente, para priorizar as informações de adaptação da Fase 3.

#### 6.3.4 Discussão com outros autores

Os resultados da casa com paredes de concreto (ParC C1) e de alvenaria (ParA C3) são apresentados em comparação com diversos autores nacionais e internacionais. A escolha dos modelos apresentados considera o resultado geral mais alto e mais baixo, obtido para todos os impactos analisados. Em relação aos autores, são apresentados aqueles com objeto de estudo similar ao tratado nesta dissertação. A descrição dos autores é apresentada, também, no capítulo de revisão bibliográfica, subitem 2.3. Tentou-se priorizar autores nacionais, já que processos construtivos e padrões de uso energético podem variar com frequência entre países e continentes. Por esse motivo, autores que apresentam inventários de quantificação de energia (*i.e.* Análise do ciclo de vida energético) e inventários de CO<sub>2</sub> são citados. Nesses casos, mesmo que a comparação entre os resultados não seja igualmente equivalente, eles tratam de impactos ou quantificações similares, e servem para a discussão de resultados. Todos

os resultados são expressos tendo por referência a relação entre impacto e unidade de área. Há preferência na comparação entre área útil, porém, na falta dessa informação é utilizada a área bruta. Esses casos são tratados pontualmente.

Os resultados para ADP f e ADP nf são apresentados na Figura 53. A primeira categoria é apresentada em conjunto com a Análise do Ciclo de Vida energético (ACVe) de dois autores brasileiros. No caso do ACVe de Tavares (2006), embora os resultados totais sejam semelhantes, existem diferenças importantes. A energia incorporada inicial é maior do que o dobro de ParC e ParA, sendo essa diferença relativa ao escopo de levantamento. Tavares (2006) considera diversos materiais para a edificação, como, por exemplo, pisos e encanamentos, caso similar ocorre com Silva (2012).

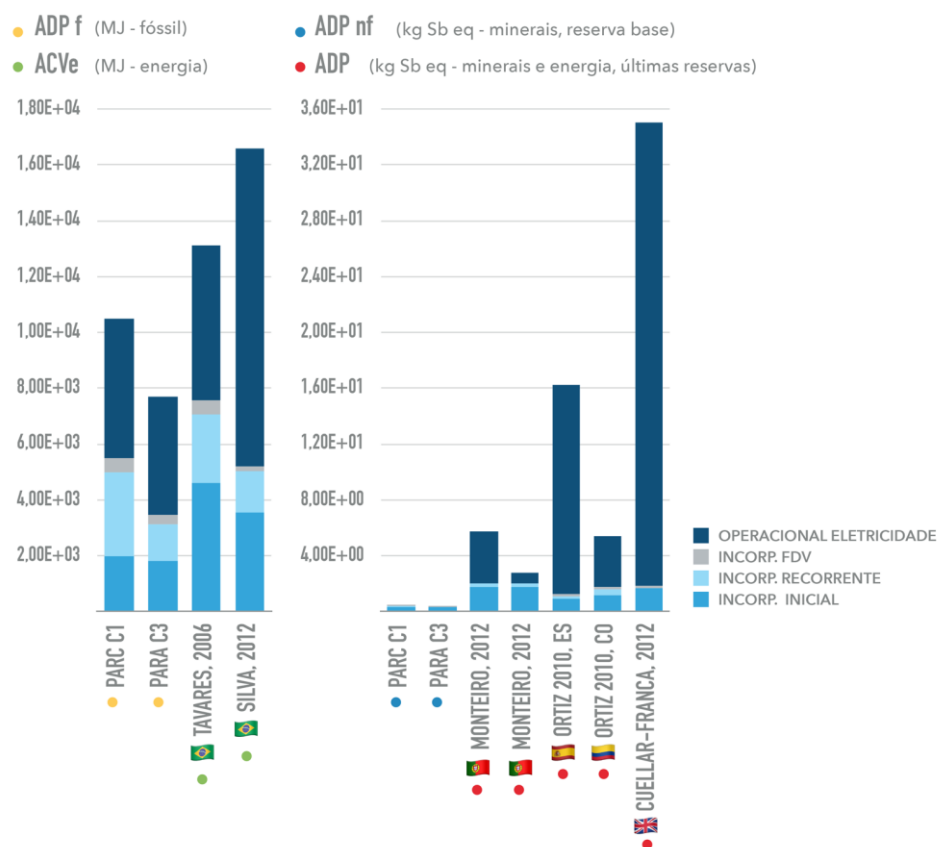


Figura 53 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para ADP f (ADP f – Depleção de recursos abióticos, combustíveis fósseis), ACVe (Análise de ciclo de vida energético, ADP nf (Depleção de recursos abióticos, não fósseis), ADP (Depleção de recursos abióticos, fósseis e não fósseis).

Quanto à energia elétrica da fase operacional, Tavares (2006) considera um consumo mensal de 140 kWh, enquanto Silva (2012) utiliza 142 kWh. Já os modelos de casa ParC e ParA utilizam 175 kWh e 149 kWh, respectivamente. Como os dois primeiros autores consideram inventário de energia, é apenas feita a transformação das unidades

de energia em função de sua capacidade de trabalho<sup>24</sup>. Por outro lado, a avaliação de impacto relacionado com recursos abióticos fósseis, considera a disponibilidade do recurso fóssil utilizado, e, dessa forma, esperam-se resultados diferentes.

O resultado para ADP nf (CML 2011, reserva base de recursos abióticos não fósseis) é apresentado em conjunto com resultados internacionais para ADP (CML, 2011, últimas reservas de recursos abióticos fósseis e não fósseis). Nesse caso, os métodos de caracterização são diferentes, questão já tratada anteriormente. Mesmo assim, é interessante que, no caso dos trabalhos de Ortiz-Rodríguez, Castells e Sonnemann (2010), para o caso espanhol, e de Cuéllar-Franca e Azapagic (2012), a fase operacional seja tão relevante. Em ambos os casos são assumidos intensos usos energéticos relativos ao condicionamento artificial. Soma-se a isso o fato de que as matrizes de energia elétrica espanhola e inglesa, são baseadas em combustíveis fósseis e energia nuclear<sup>25</sup>. Além disso, o setor residencial do Reino Unido utiliza aproximadamente 50% de energia proveniente de gás natural encanado com aquecimento<sup>26</sup>.

Ainda sobre ADP, a comparação com os casos portugueses é diferente. Segundo Monteiro e Freire (2012), Portugal é o país da União Europeia com o menor consumo *per capita* de energia. Isso explica-se pela cidade analisada, Coimbra, possuir clima mais ameno que outras cidades europeias, possibilitando menor uso de condicionamento. Além disso, os autores portugueses não consideraram energia com equipamentos e iluminação. Em relação ao caso Colombiano, não é considerado o uso de energia com condicionamento artificial, entretanto, é assumido o uso de energia para outras aplicações.

Diversos resultados de Acidificação e Eutrofização potencial são apresentados na Figura 54. Em ambos os casos, todos os autores utilizam a mesma metodologia. Mesmo assim, para AP, o resultado apresentado por Ortiz et al. (2010), no modelo espanhol, assume valores bem mais altos durante a operação. Isso ocorre porque todo o uso de energia considerado é somente elétrico, inclusive para cocção e aquecimento. A produção de energia elétrica é o maior contribuinte europeu de emissões de SO<sub>2</sub><sup>27</sup>. Justamente por esse motivo, o resultado apresentado por Cúellar-Franca é menos

---

<sup>24</sup> Todavia, não é possível explicar o motivo de ambos trabalhos de ACVe terem resultados operacionais tão distintos. Ao mesmo tempo, como esse resultado não é objeto de estudo deste trabalho, não será feito nenhum esforço nesse sentido.

<sup>25</sup> A energia elétrica espanhola entre recursos fósseis e nuclear considera 74%, enquanto a inglesa soma 86%, de acordo com dados da Agência Internacional de Energia. Disponível em <<http://www.iea.org/sankey/>>. Acessado em fevereiro de 2017.

<sup>26</sup> Ibid.

<sup>27</sup> EEA. Sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) emissions. Disponível em <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-sulphur-dioxide-so2-emissions-1/assessment-3>>. Acessado em fevereiro de 2017.

impactante para AP, que o caso anterior. Os últimos autores consideram fontes energéticas menos emissivas para a formação de chuva ácida.

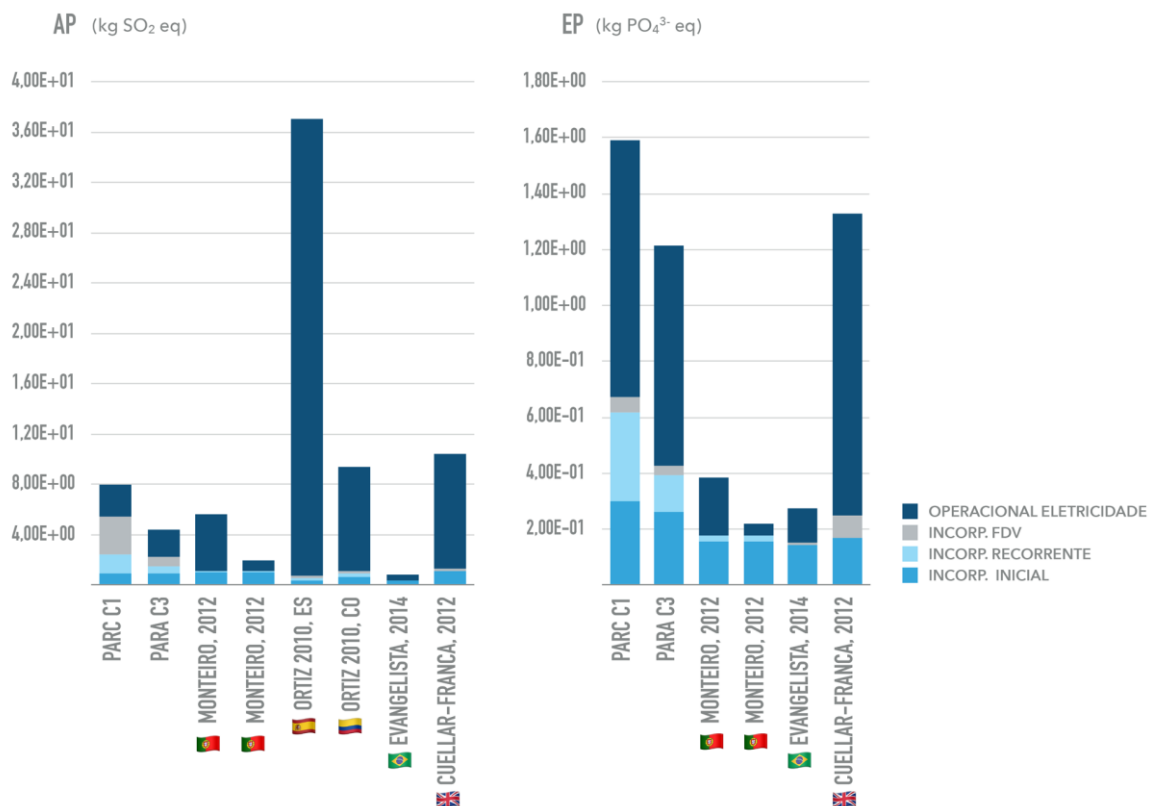


Figura 54 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para AP (Potencial de Acidificação) e EP (Potencial de Eutrofização).

O resultado apresentado por Evangelista et al. (2014) é mais baixo em todas as categorias analisadas. Estes, dentre os autores encontrados, foram os únicos brasileiros que realizaram estudo de ACV com diversas categorias de impacto em uma edificação residencial no Brasil. O estudo de caso dos autores é um edifício com 16 pavimentos, e a unidade funcional trata de área bruta edificada. Normalmente, a área bruta de edifícios de apartamentos é maior do que a área bruta de casas, em função dos primeiros compartilharem áreas comuns não presentes na edificação menor (halls, corredores de acesso, escadas de incêndio, elevadores, dutos comuns, áreas técnicas). Como resultado, o impacto ponderado pela área bruta edificada será menor. Além disso, os autores não declaram adaptação de dados. De qualquer maneira, os resultados são apresentados em função da proximidade temática dentro do mesmo país.

Por outro lado, o impacto incorporado inicial em AP é similar na maioria dos casos. Ao mesmo tempo, os impactos recorrentes mudam substancialmente, pois variam em função das substituições de materiais. Já os impactos operacionais mudam em função da matriz energética utilizada e, principalmente, pelo comportamento de uso energético

assumido, que possui padrões distintos entre os trabalhos e países de referência. O impacto de FDV é maior no modelo ParC, pois existe a disposição do gesso utilizado e suas substituições ao longo do ciclo de vida.

Em relação aos impactos de EP, podem ser percebidas diferenças importantes entre os resultados, especialmente para impactos operacionais. Especula-se que essas diferenças estejam relacionadas com o vetor de referência para o uso de energia elétrica, da base *Ecoinvent*. Todos autores citados nesta categoria utilizam a base de dados da versão 2, enquanto que esta dissertação considera a versão 3.3. A produção de energia na versão mais atual da base de dados considera importantes diferenças no detalhamento do fornecimento energético de baixa tensão, incluindo perdas de produção e transmissão entre alta, média e baixa voltagem, além de maior detalhamento na infraestrutura. Apenas em relação ao dado brasileiro, existem diferenças próximas à 20% em termos de eutrofização<sup>28</sup>. Por outro lado, considerando apenas os impactos incorporados iniciais, todos os modelos são relativamente equivalentes. O resultado mais alto para ParC e ParA está relacionado com os transportes dos materiais e suas respectivas emissões de NO<sub>2</sub>. O caso inglês considera apenas o transporte da indústria até a obra (50 km), o que também ocorre com os modelos portugueses (≈ 65 km), enquanto que no estudo de Evangelista et al. (2014), não é considerado qualquer tipo de transporte.

Os resultados para mudanças climáticas (GWP com base IPCC 2007, 100 anos de horizonte, CML 2001) e inventário de CO<sub>2</sub>, são apresentados na Figura 56. Na figura, o gráfico à esquerda apresenta os resultados completos, enquanto que, o gráfico à direita apresenta os resultados excluindo Cuéllar-Franca e Azapagic (2012). Os últimos autores têm resultados aproximadamente 20x mais altos que o resultado mais baixo analisado. Isso ocorre em função da matriz energética inglesa, mais poluente para GWP e do padrão de intensa demanda energética considerado, especialmente para aquecimento artificial.

Ortiz et al. (2012), para a Espanha, apresentam o segundo resultado mais alto, por motivos similares ao caso inglês. A similaridade entre o modelo de casa ParA com o resultado da casa Colombiana, se relaciona com o uso de materiais similares, como o de paredes externas em alvenaria cerâmica. Mesmo assim, os dois casos citados possuem diferenças importantes entre as quantidades de materiais utilizadas. Por exemplo, o caso colombiano considera mais do que triplo de concreto (fundação e laje).

---

<sup>28</sup> Considerando o vetor “market for electricity, low voltage – BR” da versão 3.3 em comparação com o vetor “electricity mix - BR” da versão 2.1.

Ao mesmo tempo, esta dissertação considera distâncias maiores de transporte, nesse caso, com tendência a igualar os resultados totais.

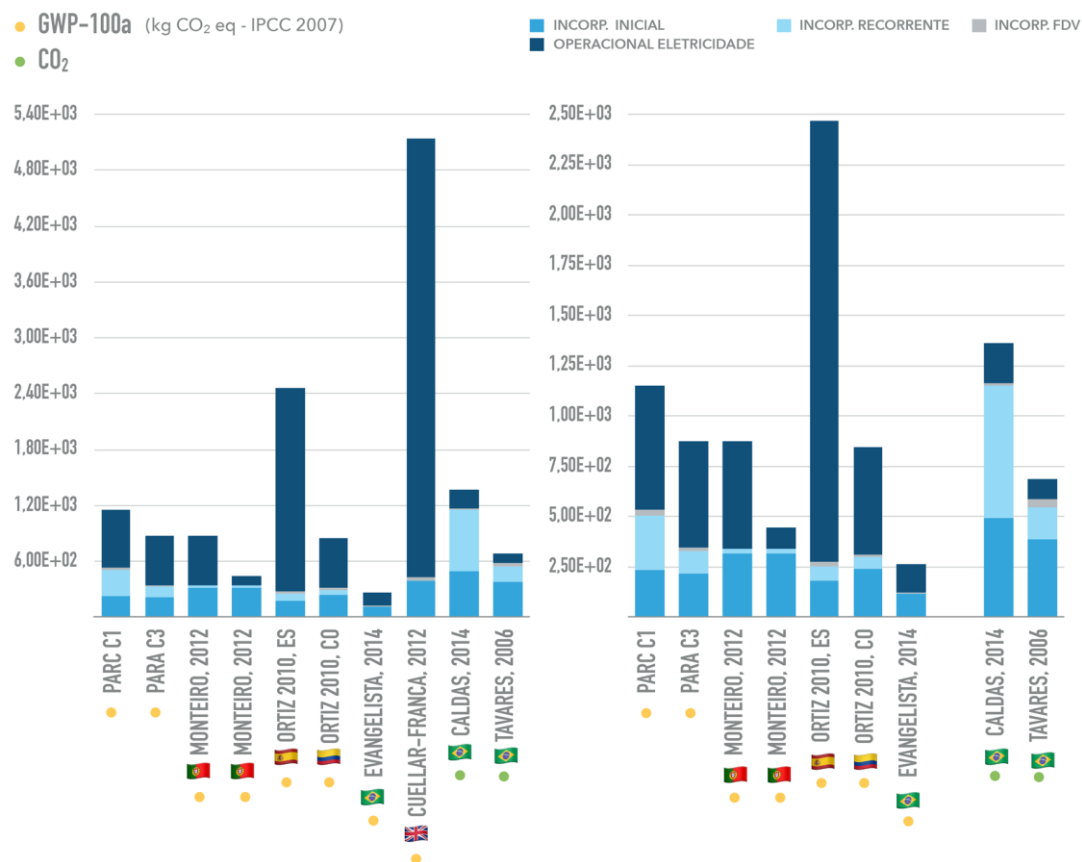


Figura 55 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para GWP (Potencial de mudança climática, IPCC 2007, horizonte de 100 anos) e CO<sub>2</sub> (Inventário de ciclo de vida). A figura da esquerda apresenta os resultados completos dos autores, a figura da direita não apresenta o resultado de impacto operacional com uso de energia elétrica para o caso do Reino Unido, Cuéllar-Franca e Azapagic (2012).

Em relação tanto ao trabalho de Caldas et al. (2015) quanto ao de Tavares (2006), existem diferenças substanciais na metodologia, já que esses autores consideram o inventário de CO<sub>2</sub>. A diferença entre os resultados está possivelmente relacionada com decisões de escopo, quantitativos e processo de fabricação de materiais, além de fontes de referência, incluindo data e localização geográfica de dados e fatores. Para a produção de 1 MJ de energia elétrica brasileira, Tavares (2006) e Caldas et al. (2015) consideram emissões similares, 0,018 kg CO<sub>2</sub>, para o primeiro, e 0,020 kg CO<sub>2</sub>, para o segundo. Ao passo que, para a produção e distribuição de 1 MJ de eletricidade nacional utilizando a base do *Ecoinvent* são gerados 0,218 kg CO<sub>2Eq</sub>.<sup>29</sup> para o impacto de mudança climática (IPCC, 2007). Com essa demonstração, verifica-se o motivo do

<sup>29</sup> Processo “market for electricity, low voltage” da versão 3.3 do *ecoinvent*.



impacto operacional ser mais alto para as casas ParC e ParA. Além disso, é possível que por razões similares Evangelista et al. (2014) apresentem resultados mais baixos<sup>30</sup>.

Mesmo assim, a comparação com o trabalho de Caldas et al. (2015) é interessante, pois estes autores pressupõem durabilidade igual à VUP mínima, apresentada na NBR 15.575. Dessa forma, ao menos proporcionalmente, os resultados para impactos incorporados iniciais e recorrentes são semelhantes ao modelo de casa ParC C1.

O resultado para depleção da camada de ozônio e criação de ozônio fotoquímico são apresentados pela Figura 56. Para ODP, é possível perceber que, em todos os casos europeus, com exceção do espanhol, existe importante impacto incorporado inicial e operacional. O motivo está relacionado com o uso de materiais para proteção térmica, notadamente, poliestireno expandido (EPS) e poliestireno extrudado (XPS). O processo de produção de ambos os isolantes pode utilizar hidrofluorcarbonetos (HFC-134a e HFC-152a). O problema é relatado por Rodrigues e Freire (2014), avaliando diversos tipos de isolante térmico para um telhado residencial, onde o resultado de impacto incorporado do isolante XPS é apresentado de forma ilustrativa.

Desde a adoção das medidas do Protocolo de Montreal, os agentes químicos utilizados na produção de espumas térmicas tem sido outros, como CO<sub>2</sub> por exemplo (ALTHAUS et al., 2007). Como esses processos industriais ainda estão em modificação, alguns trabalhos podem relatar o uso destes isolantes, mas apresentar baixo impacto à camada de ozônio, situação provável ao caso de Ortiz et al. (2010). Os autores referenciam o uso de XPS e fibra de vidro no modelo espanhol, porém, o resultado não sinaliza o uso da tecnologia de produção com hidrocarbonetos.

Quanto ao impacto de POCP, a maior variação é relativa ao uso eletricidade, principalmente, quando se considera o caso inglês. A diferença pode estar relacionada à matriz de energia elétrica do Reino Unido, em função de emissões de monóxido de carbono com produção de energia de termoelétricas com carvão mineral<sup>31</sup>. Caso similar pode ser identificado no resultado dos autores portugueses. Embora a fase de uso seja mais baixa que as demais, os últimos autores consideram somente uma fração da energia de condicionamento térmico (50% no caso mais alto). Dessa forma, estima-se que poderiam ser maiores com outros comportamentos de operação.

---

<sup>30</sup> Levando em conta a mudança na versão 2 para a 3 na base de dados do *Ecoinvent* e o tipo de vetor utilizado para o fornecimento de energia, que pode ou não considerar perdas de transmissão.

<sup>31</sup> Carvão mineral é responsável por ≈34% da matriz de energia elétrica inglesa. Agência Internacional de Energia. Disponível em <<http://www.iea.org/sankey/>>. Acessado em fevereiro de 2017.

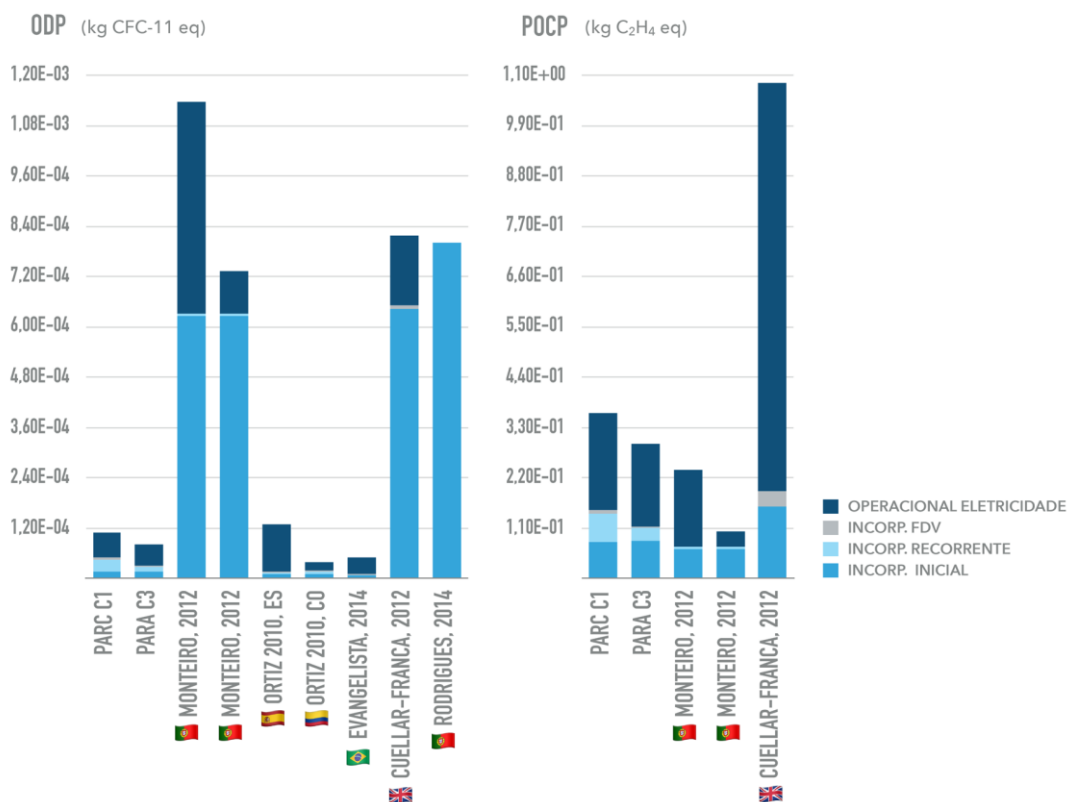


Figura 56 - Comparação de impactos apresentados por diversos autores para ODP (Potencial de depleção de ozônio estratosférico) e POCP (Potencial de criação de ozônio fotoquímico).

Os modelos ParA e ParC, para POCP, têm importante impacto operacional pelo uso de combustíveis na geração de energia. Aproximadamente 39% da matriz de geração elétrica brasileira tem base em combustíveis fósseis. Além disso, outros 11% de energia elétrica são gerados com biocombustíveis, que também são responsáveis pela criação de ozônio fotoquímico.

## 6.4 CONCLUSÃO DA FASE 3

A Fase 3 desta dissertação desenvolveu a ACV final do modelo de uma casa de referência, com paredes de concreto, e de uma variante, com paredes de alvenaria. O ICV utilizou dados adaptados para a realidade brasileira, considerando, também, a cadeia de distribuição. Os resultados da ACV final atestam a maior relevância dos impactos operacionais no ciclo de vida da edificação estudada. Mesmo assim, impactos incorporados demonstraram contribuição importante. Dentre eles, o transporte de materiais foi um dos mais relevantes, pois quando a cadeia produtiva dos materiais de construção é considerada, percebem-se as grandes distâncias de deslocamento de alguns insumos.

A produção industrial brasileira é intensiva no uso do transporte rodoviário. Esse é um dos modelos mais impactantes considerando mudanças climáticas, depleção de recursos fósseis e criação de ozônio fotoquímico. As esquadrias de alumínio, cuja matéria prima tem escoamento principalmente por via naval, desde a extração da bauxita, na região Norte do país, até a forja de tarugos para extrusão, tem impactos baixos em relação ao transporte. De maneira oposta, o gesso, com extração de matéria prima na região Nordeste e distribuição rodoviária, apresenta impacto de transporte diversas vezes maior que a sua produção.

Um dos sistemas mais importantes na geração de impactos é o de paredes. No caso das paredes de concreto, o cimento foi o maior responsável pelos impactos. No modelo com paredes de alvenaria, um dos maiores contribuintes é a argamassa, utilizada, tanto para assentamento, quanto para revestimento. Além disso, os impactos da parede de alvenaria podem ser majorados se a durabilidade da argamassa de revestimento for menor que 50 anos.

Nos resultados relativos ao impacto incorporado inicial de paredes, ou seja, desconsiderando manutenções, a parede de alvenaria é menos impactante que sua similar em concreto em 6 das 7 categorias analisadas, sendo 28% menos impactante em GWP. Essa é uma diferença menor que o estudo desenvolvido pela Associação Nacional de Indústria Cerâmica, onde pode chegar à 65% para mudança climática. Nesse caso, é importante notar que premissas sobre o tipo de concreto, quantidades de aço estrutural e concreto foram diferentes, levando a resultados diferentes. Além disso, distâncias de transporte foram modificados para todos os materiais, à exceção daqueles envolvidos na produção dos produtos cerâmicos.

Estudos acadêmicos brasileiros e relatórios setoriais de construção civil normalmente apresentam resultados de impacto relacionados com energia e mudanças climáticas (ou inventário de CO<sub>2</sub>). Isso ocorre, pois ambos impactos estão pautados com alguns dos maiores problemas da indústria de construção, que é intensamente energética na produção de materiais de construção. Todavia, quando outros impactos são analisados, é possível notar comportamentos instigantes de alguns materiais. Foi o caso do impacto em oxidação fotoquímica da argamassa do sistema de alvenaria, especificamente pelo uso de carvão vegetal na produção da cal.

Os estudos sobre a indústria da cal no Brasil indicam uso intenso de biomassa renovável, notadamente carvão vegetal. O uso deste combustível é uma alternativa para diminuição de impactos de mudança climática, já que o carbono emitido pela queima

será recuperado na renovação das florestas de produção, além de recuar o uso de combustíveis fósseis. Entretanto, compostos orgânicos voláteis (VOCs), provenientes tanto da queima, quanto da produção do carvão natural, são importantes emissores para a formação de oxidantes fotoquímicos. Em contato com NO<sub>x</sub> e luz ultravioleta na troposfera, os VOCs formam ozônio, um dos responsáveis por ilhas urbanas de calor. Esse é apenas um exemplo que demonstra a necessidade de a indústria brasileira de construção civil, e sua cadeia produtiva, ampliar sua consideração sobre impactos ambientais.

Além disso, os impactos incorporados totais podem variar, dependendo da recorrência de manutenções. Nesse sentido, atenta-se à importância da durabilidade de materiais de construção. Foram verificados decréscimos de 10% nos impactos, considerando materiais mais duráveis. É importante ressaltar, entretanto, que os processos produtivos analisados são idênticos, mesmo considerando durabilidades diferentes. Eventualmente, materiais com durabilidade maior podem ter processos produtivos diferentes, e esses, resultarão em impactos diferentes. Esses casos estão fora do escopo desta dissertação.

A produção do gesso não gera impactos incorporados iniciais importantes, mas o transporte da matéria prima para sua produção é muito significativo ambientalmente. Alternativas para o uso da gipsita como matéria prima existem, por exemplo, com uso de fosfogesso, um resíduo da produção de fertilizantes, que tem reservas próximas ao RS e pouco exploradas pela construção civil. A exemplo da indústria de cimentos, que usa fosfogesso como um dos elementos para adição de sulfatos, a indústria de gesso de construção poderia fazer uso dessa disponibilidade.

A disposição do gesso é problemática. Embora leis reforcem a necessidade de separação e reciclagem, o Brasil ainda luta para abandonar o uso de aterros não controlados a céu aberto. E, mesmo existindo empresas que ofereçam reciclagem dentro da zona metropolitana de Porto Alegre, pode haver falta de controle em sua disposição. O gesso disposto incorretamente gera graves danos ao meio ambiente e saúde humana. Os resultados em acidificação potencial somam mais do que 70%, considerando somente a disposição incorreta dos sistemas de forro de gesso em aterro sanitário. O impacto pode ser ainda maior se o gesso for disposto a céu aberto.

A comparação com diversos autores demonstrou importantes diferenças ligadas, principalmente, ao impacto operacional. Esse último pode variar conforme padrão de uso mais ou menos intenso dos usuários. Outro estudo de ACV brasileiro em edificação

residencial também considerou requisitos incorporados e operacionais. A comparação com o estudo citado apresenta diferenças importantes, que possivelmente estão ligadas ao escopo de cada trabalho, principalmente, no que concerne ao objeto de estudo de caso, um edifício de apartamentos com área bruta maior que 10 mil m<sup>2</sup>.

Por outro lado, impactos incorporados iniciais apresentados por diversos autores foram aproximadamente similares na comparação dos resultados dessa dissertação. Entretanto, excetuam-se dessa lista os impactos de Depleção de Recursos Abióticos. A metodologia utilizada para avaliar recursos não fósseis (reserva base) atribui impactos altos em elementos pouco utilizados pela construção civil. Mesmo assim, determinados processos industriais podem afetar a disponibilidade desses recursos. Foi o que ocorreu com a extração e beneficiamento do zinco para galvanização, onde o dado utilizado assume perdas de até 20% para alguns metais raros.

Como este trabalho utilizou a EN15804 e o manual de ILCD para definir os impactos, aqueles relativos à ADP foram apresentados como fósseis e não fósseis. Entretanto, os estudos internacionais apresentados caracterizam o impacto condensado de ADP, com recursos fósseis e não fósseis, em conjunto. Frente a essa dificuldade, resultados foram apresentados, mas não puderam ser diretamente comparados.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou os potenciais impactos ao meio ambiente gerados por uma edificação do Programa Minha Casa Minha Vida. A metodologia utilizou a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida, de forma a quantificar os impactos gerados em sete categorias. O programa experimental foi montado em três fases, tendo como referência o estudo de caso de uma residência unifamiliar, do tipo casa térrea, construída com fundação de concreto, paredes de concreto e cobertura com telhas cerâmicas. Esse projeto foi escolhido por ser uma solução de edificação produzida em série, em mais de 700 unidades, aumentando, dessa forma, a possibilidade de utilização dos resultados.

A Fase 1 analisou o uso de energia elétrica, por meio de simulação termoenergética. A casa de concreto foi comparada com cinco modificações de envoltória, em paredes e cobertura. Dessas alternativas, foi selecionada uma, com sistema de alvenaria para paredes, de forma a ser testada nas fases seguintes. O resultado Fase 1 demonstrou que o uso de energia pode ter importantes variações considerando envoltórias diferentes. Sendo a escolha de envoltória uma decisão de projeto, o impacto energético de uma edificação ao longo do seu ciclo de vida de 50 anos estará diretamente atrelado às decisões ocorridas em um curto período inicial.

A Fase 2 teve o objetivo de desenvolver uma ACV preliminar, de forma a entender os impactos de cada material e suas contribuições, para cada categoria. Além disso, houve revisão da Fase 1, com a definição de novos critérios para o uso de condicionamento artificial. Para a ACV foram utilizados dados de ICV extrapolados, para representar produção e mercado de produtos em um cenário global. Os resultados demonstraram a importância dos impactos incorporados recorrentes, provenientes de manutenções ao longo do ciclo de vida do edifício. Foram especialmente importantes os processos de pintura interna de paredes, pois o cenário de manutenções utilizou a referência de vida útil de projeto da NBR 15.575. Pela norma, pinturas internas devem assegurar desempenho por 3 anos, no mínimo, o que ocasionaria 16 repinturas no período de 50 anos.

Na Fase 3, foi realizada a ACV final desta dissertação, a partir da revisão das fases anteriores e a adaptação de dados de inventário ao contexto nacional. Os resultados da ACV corroboram a importância da fase operacional, salientada na revisão biográfica. O uso de energia para o longo período de uso dos edifícios (se comparado com outros produtos de consumo) permite essa conclusão.

Os impactos incorporados, embora sejam inferiores, representam fator essencial para diminuir impactos operacionais. Mesmo com impacto inicial mais alto, se algum material ou sistema proporcionar menores impactos operacionais que outro, o resultado de impacto total poderá ser menor. Foi o que ocorreu nos resultados da Fase 2, com o uso de dados internacionais não adaptados. Mesmo a casa com paredes de alvenaria tendo demonstrado impacto incorporado inicial maior do que a casa em concreto, quando considerada a melhor adequação térmica proporcionada pela primeira, o impacto total foi menor.

Na Fase 3, com o uso de dados adaptados, os impactos operacionais novamente apresentaram maior importância. Os impactos incorporados representaram de 30% até, aproximadamente, 50% em 5 das categorias. Considerando impactos totais, a casa com paredes de alvenaria proporcionou menor impacto para o cenário base de manutenção (C1) em 4/7 de categorias. A diferença de impacto entre as casas chegou em até 10%, no cenário de manutenção C1. Entretanto, com o cenário de manutenções menos intensivo (C3), os impactos totais da casa de alvenaria foram menores em todas as categorias de AICV.

O PMCMV desenvolveu um número expressivo de novas edificações, segundo números oficiais, mais de 2,3 milhões de unidades habitacionais, sendo um importante gerador de impactos. Salaria que uma redução de 10% equivale ao impacto potencial de 230.000 unidades habitacionais. Esta dissertação quantificou alguns impactos ambientais potenciais de uma tipologia do PMCMV, com o uso da ferramenta de ACV.

Alguns autores podem considerar a ACV uma ferramenta de difícil aplicação em edifícios. Um motivo para essa consideração se relaciona com a complexidade intrínseca das construções. A ACV de edifícios exige simplificações, que agregam incertezas aos modelos. De fato, simplificações são necessárias (assim como em qualquer modelo de representação da realidade), e os modelos são representações limitadas. O método científico utilizado nesta dissertação teve o objetivo de demonstrar transparência e clareza nas escolhas efetuadas. Por isso, os resultados apresentados têm validade, e no caso de sua utilização por outros autores, as simplificações devem ser ponderadas, pois somente a análise crítica avança o conhecimento científico.

No Brasil, uma das simplificações mais criticadas na metodologia de ACV é o uso de dados internacionais para representar a realidade local. A metodologia utilizada nesta dissertação considerou a adaptação dos dados mais relevantes de sistemas e materiais de construção. Os processos industriais de referência foram explicitados e analisados

frente aos padrões brasileiros. Como pôde ser visto na comparação de resultados entre a ACV com dados internacionais e a ACV com dados adaptados, a utilização de dados sem adaptação gera resultados inconclusivos, o que torna a regionalização das informações, não apenas recomendada, mas necessária para uma ACV em edificações.

O levantamento de adaptação de dados é uma tarefa complexa e laboriosa. A indústria da construção civil tem uma cadeia ampla de fornecimento de serviços, o que exige a investigação de informações em vários níveis. No Brasil, ainda não existem dados consolidados de inventário para indústria, mas, felizmente, algumas iniciativas podem melhorar a situação atual. Uma delas é o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida, desenvolvido pelo IBICT e outra, o projeto SRI (*Sustainable Recycling Industries*) do Ecoinvent, para inventários de ciclo de vida em alguns países em desenvolvimento, incluindo o Brasil. Além dessas, a divulgação setorial de relatórios de ciclo de vida começa a ser notada pelos fornecedores da construção civil brasileira e pode, beneficemente, aumentar a competitividade industrial por produtos de menor carga ambiental.

Para a correta aplicação de uma ACV são necessários tempo e esforço, dois dilemas em um mundo marcado pela rapidez do consumo econômico. A reflexão sobre nossos impactos é uma tarefa complexa no mundo veloz descrito por Zygmunt Bauman:

*Velocidade, não guia ao pensamento, não ao pensamento longínquo, de longo prazo, qualquer que seja seu nível. A reflexão necessita de pausa e descanso, para “tomar seu tempo”, recapitulando os passos já dados, examinando o local alcançado e a sabedoria (ou a imprudência, se for o caso) de tê-lo alcançado. O pensamento tira a mente do dever a ser cumprido, que sempre necessita de corrida e velocidade contínua, a qualquer custo. [...].(BAUMAN, 2001 p.209, tradução nossa).*

A qualquer custo, projetamos e construímos edificações, enquanto o meio ambiente, as gerações presentes e futuras arcam com o impacto de refletirmos pouco (ou muito rápido) sobre elas. A aplicação da ferramenta de ACV auxilia a reflexão para melhores escolhas, e confirma sua importância na qualificação ambiental de edificações.



## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação é apenas um grão no meio do universo sobre a sustentabilidade em edifícios, por isso, frente ao método e resultados são feitas algumas sugestões de continuidade:

- a) aumentar o escopo do trabalho produzido, considerando outros elementos que sofreram cortes, como sistemas de piso, instalações elétricas e hidrossanitárias;
- b) considerar os padrões de consumo dentro das residências, ao longo do seu uso, tendo em vista o uso de mobiliário, eletrodomésticos, consumo de água e alimentos, geração de resíduos, entre outros;
- c) aplicar questionários para os usuários, na definição de taxas de substituição (frente a durabilidade ou mesmo renovação), dando maior clareza aos requerimentos recorrentes;
- d) levantar as contas mensais de eletricidade, considerando uma amostragem de residências do estudo de caso, aprimorando o resultado operacional de energia;
- e) considerar a incerteza atrelada ao uso dos dados e a incerteza relativa às suposições do modelo e suas simplificações, identificando os sistemas e materiais com maior incerteza para o resultado obtido.

## REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário Estatístico**. São Paulo: ABAL, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo: ABAL, 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10.821: Caixilhos para edificação - Janelas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15.575-1: edificações habitacionais – desempenho – parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15.575-4: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15.575-5: edificações habitacionais – desempenho – parte 5: sistemas de cobertura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013c.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15.494: Tintas para construção civil - Requisitos de desempenho de tintas para edificações não industriais - Tinta brilhante à base de solvente com secagem oxidativa**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABU BAKAR, N. N. *et al.* Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 1–11, 2015.
- ALTHAUS, H. *et al.* **Life cycle inventories of chemicals. ecoinvent report No.8, v2.0**. Dübendorf: The Ecoinvent Centre, 2007.
- AMORE, C. S.; SHIMBO, L. Z.; RUFIN, M. B. C (Org.). **Minha casa... e a cidade? Avaliação do programa Minha Casa Minha Vida em seis estados brasileiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2015.
- ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Diesel e Emissões: a nova legislação**. [s.l.]: ANFAVEA, 2012.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- \_\_\_\_\_. **Standard 140: Standard Method of Test for Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta: ASHRAE, 2011.
- ASIF, M.; MUNEER, T.; KELLEY, R. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1391–1394, 2007.
- BAUMAN, Z. **Liquid Modernity**. Cambridge: Polity Press, 2001. v. 30
- BAYER, C. *et al.* **Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice**. Washington: American Institute of Architects, 2010.
- BEZERRA, M. S. **Relatório técnico perfil da gipsita**. Brasília: Ministerio de Minas e Energia, 2009.
- BRASIL. **Indicadores sobre Minha Casa Minha Vida**. Disponível em: <<http://dados.gov.br/dataset/minha-casa-minha-vida>>. Acesso em: 1 jan. 2016.

\_\_\_\_. **Entenda as novas regras do Minha Casa Minha Vida — Palácio do Planalto**. Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br/acompanhe-planalto/noticias/2017/02/entenda-as-novas-regras-do-minha-casa-minha-vida>>. Acesso em: 1 mar. 2017.

BRIBIÁN, I.; VALERO, A.; ARANDA, A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510–2520, 2009.

BRUNDTLAND, G. *et al.* **Our common future (Brundtland Report)**. Cary: Oxford University Press US, 1987.

CABEZA, L. F. *et al.* Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 536–542, jul. 2013.

\_\_\_\_. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CALDAS, L. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO<sub>2</sub> de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing**. Brasília: UNB, 2016. Dissertação (mestrado em engenharia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2016.

CALDAS, L. *et al.* **Emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida de habitações de interesse social: estudo de caso para o DF - Brasil**. SIBRAGEC ELAGEC. Anais...São Carlos: 2015

CARB - CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **Climate change scoping plan: a framework for change**. Sacramento: CARB, 2008.

CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Balço Energético do Rio Grande do Sul 2013: ano base 2012**. Porto Alegre: CEEE, 2013.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15.978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method**. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.

\_\_\_\_. **EN 15.804:2012+A1:2013 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products**. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2013.

CESANO, D.; RUSSELL, J. **ELLA Policy Brief: Green Building in Latin America**. London: Evidence and Lessons from Latin America (ELLA), 2013.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020**. Brasília: CGEE, 2014.

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, n. 1, p. 395–413, 2015.

CHEN, C. *et al.* LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1231–1240, 2010.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2001.

CLASSEN, M. *et al.* **Life Cycle Inventories of Metals Data v2.1 (2009)**. Dübendorf: The Ecoinvent Centre, 2009.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIAS. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: uma visão institucional**. Brasília: CNI, 2010.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307**. Brasília: CONAMA, 2002.

CONDEIXA, K. M. S. P. **Comparação entre materiais da construção civil através da avaliação do ciclo de vida: sistema Drywall e alvenaria de vedação**. Niterói: UFF, 2013. Dissertação (Mestrado de engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

COSTA, E. B. DA. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Porto Alegre: UFRGS, 2013. Dissertação (Mestrado de engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CRAWLEY, D. B. *et al.* EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319–331, 2001.

CUÉLLAR-FRANCA, R. M.; AZAPAGIC, A. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. **Building and Environment**, v. 54, p. 86–99, 2012.

DAIOGLOU, V.; RUIJVEN, B. J. VAN; VUUREN, D. P. VAN. Model projections for household energy use in developing countries. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 601–615, 2012.

DAVIS, L. W.; GERTLER, P. J. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 19, p. 5962–5967, 2015.

DERWENT, R. G. *et al.* Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in northwest Europe calculated with a master chemical mechanism. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 14–15, p. 2429–2441, ago. 1998.

DIAS, M. F. **Modelo para estimar a geração de resíduos na produção de obras residenciais verticais**. São Leopoldo: Unisinos, 2013. Dissertação (Mestrado de engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

DING, G. K. C. **The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities**. [s.l.] University of Technology Sydney, 2004.

DIXIT, M. K. *et al.* Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 8, p. 1238–1247, 2010.

\_\_\_\_\_. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3730–3743, ago. 2012.

DJONGYANG, N.; TCHINDA, R.; NJOMO, D. Thermal comfort: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2626–2640, 2010.

DOKA, G. **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services**.ecoinvent report No. 13. Dübendorf: The Ecoinvent Centre, 2009. v. 1

ECOINVENT. **SRI Project** - ecoinvent. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/about/projects/sri-project/sri-project.html>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Balanco energético nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EVANGELISTA, P. P. A.; SOUZA, H. H. S.; TORRES, E. A. **Métodos de Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida na Construção Civil: Estudo de Caso em Edificação Residencial** IV Congresso Brasileiro sobre Gestão Pelo Ciclo de Vida. **Anais...** São Bernardo do Campo: GBGCV, 2014

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Rede Estadual de Monitoramento Automático da Qualidade do Ar: Relatório 2015**. Porto Alegre: FEPAM, 2016.

FINNVEDEN, G. *et al.* Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.

FRANARIN. **Planilha eletrônica de orçamentos**. [s.l.]: Franarim software e orçamentos, 2014. Disponível em: < <http://www.franarin.com.br>>

GONZÁLEZ, A. B. R. *et al.* Towards a universal energy efficiency index for buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 980–987, 2011.

GRIGOLETTI, G. D. C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Dissertação (Mestrado de engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GUERREIRO, A. A. **Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativa no Brasil**. Porto Alegre: UFRGS, 2014. Monografia (Graduação em engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

GUINÉE, J. B. *et al.* Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. **The Netherlands: Ministry of ...**, n. May, p. 692, 2001.

\_\_\_\_\_. **Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO standards - Part 3: Scientific Background**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HAMMOND, G. P. Industrial energy analysis, thermodynamics and sustainability. **Applied Energy**, v. 84, n. 7–8, p. 675–700, 2007.

HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. Embodied energy and carbon in construction materials. **Proceedings of the ICE - Energy**, v. 161, n. 2, p. 87–98, 2008.

HAUSCHILD, M. Z. Environmental impacts. **Journal of Transport Geography**, 2005.

HAUSCHILD, M.; WENZEL, H. **Environmental assessment of products: scientific background**. London: Chapman & Hall, 1998. v. 2

HEIJUNGS, R. *et al.* **Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (Part 1)**. Leiden: CML, 1992.

HEINONEN, J. *et al.* Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator? **Building and Environment**, v. 95, p. 116–125, 2016.

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 2014.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. Development of a methodology for life cycle building energy ratings. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3779–3788, 2011.

HONG, T.; CHOU, S. .; BONG, T. . Building simulation: an overview of developments and information sources. **Building and Environment**, v. 35, n. 4, p. 347–361, 2000.

HUIJBREGTS, M. **Life-cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants. Calculation of equivalency factors with RAINS-LCA**. Leiden: CML, 1999.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Indústria do aço no Brasil**. Brasília: CNI, 2012.

\_\_\_\_\_. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. Brasília: CNI, 2014.

IBICT - INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O que é SICV Brasil?** Disponível em: <<http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

IBN-MOHAMMED, T. *et al.* Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 232–245, nov. 2013.

ILCD - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY - EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD)**

**Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context.** Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Genebra: IPCC, 2014.

ISAAC, M.; VUUREN, D. P. VAN. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. **Energy Policy**, v. 37, n. 2, p. 507–521, 2009.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14.040: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework.** Genebra: ISO, 2006a.

\_\_\_\_\_. **ISO 14.044: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines.** Genebra: ISO, 2006b.

JENKIN, M. E.; HAYMAN, G. D. Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 8, p. 1275–1293, abr. 1999.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTO, M. A. **Produção de cal.** Ribeirão Preto: BNDS, 2014.

KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES, G. F. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. **Sustainability**, v. 1, n. 3, p. 674–701, 2009.

KIM, T.; TAE, S.; CHAE, C. U. Analysis of environmental impact for concrete using LCA by varying the recycling components, the compressive strength and the admixture material mixing. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 4, p. 1–14, 2016.

KOUGOULIS, J. S. *et al.* **Revision of EU European Ecolabel and Development of EU Green Public Procurement Criteria for Indoor and Outdoor Paints and Varnishes.** [s.l.]: JRC - European Commission, 2012.

KUMAR, V.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Life cycle assessment of residential buildings: a case study in Canada. **Int J Civ Environ Struct Constr Archit Eng**, v. 9, n. 8, p. 753–761, 2015.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2012.** Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

LABOUZE, E. *et al.* Photochemical ozone creation potentials. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 3, p. 187–195, 2004.

LAFONTAINE, M. *et al.* **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto.** Québec: QUANTIS-CA, 2012a.

\_\_\_\_\_. **Análise comparativa do ciclo de vida d e paredes construídas com blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto armado moldado in loco.** Québec: QUANTIS-CA, 2012b.

LAGERSTEDT, J.; LUTTROPP, C.; LINDFORS, L.-G. Functional priorities in LCA and design for environment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 3, p. 160–166, 2003.

LAMBERTS, R. *et al.* **Conforto e Stress térmico.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** Brasília: Eletrobras, 2014.

LANE, J.; LANT, P. Including N<sub>2</sub>O in ozone depletion models for LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 252–257, 2012.

LBNL - LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **DOE-2.2 - Building Energy Use and Cost Analysis Program.** Berkeley: LBNL, 2004.

- \_\_\_\_\_. **What is Energy Efficiency?** Disponível em: <<https://eetd.lbl.gov/ee/ee-1.html>>. Acesso em: 1 jan. 2015.
- LENZEN, M. Errors in Conventional and Input-Output – based Life-Cycle Inventories. **Journal of Industrial Ecology**, v. 4, n. 4, p. 127–148, 2001.
- LEVINSON, A. California energy efficiency: Lessons for the rest of the world, or not? **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 107, p. 269–289, 2014.
- LUNDIE, S.; CIROTH, A.; HUPPES, G. Inventory methods in LCA : towards consistency and improvement. n. June, p. 1–121, 2007.
- MARJABA, G. E.; CHIDIAC, S. E. Sustainability and resiliency metrics for buildings – Critical review. **Building and Environment**, v. 101, p. 116–125, 2016.
- MARTÍNEZ-ROCAMORA, A.; SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 565–573, 2016.
- MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C. T.; MATTHEWS, D. H. **Life cycle assessment: quantitative approaches for decisions that matter**. Icatextbook, 2015.
- MCNEIL, M. A.; LETSCHERT, V. E. Future air conditioning energy consumption in developing countries and what can be done about it: the potential of efficiency in the residential sector. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2008.
- MELO, D. DE C. P. DE. **Processo de calcinação da gipsita/resíduo de um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável**. Recife: UFP, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Relatório Final**. Brasília: MMA, 2011.
- MONTANO, P. F.; BASTOS, H. B. A indústria de vidro plano : conjuntura atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 38, p. 265–290, 2013.
- MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 572–583, 2012.
- MORAGA, G.; MORALES, M.; KIRCHHEIM, A.; PASSUELLO, A. (Org.). **Relatório técnico de adaptação de dados de Inventário de Ciclo de Vida de materiais de construção**. Porto Alegre: [s.n], 2017.
- MOREIRA, V. S.; SILVEIRA, S. R. Indicadores de desempenho do Programa Minha Casa, Minha Vida : avaliação com base na satisfação dos beneficiários. **Cadernos Gestão Pública e Cidadania**, v. 20, n. 66, p. 94–117, 2015.
- NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Global climate change: Vital signs of the planet**. Disponível em: <<http://climate.nasa.gov>>. Acesso em: 1 jan. 2016.
- OERS, L. VAN *et al.* Abiotic resource depletion in LCA. n. June, p. 1–75, 2002.
- OERS, L. VAN; GUINÉE, J. The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. **Resources**, v. 5, n. 1, p. 16, 2016.
- OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Revista Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167–181, 2014.
- ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 12, p. 2435–2443, 2010.
- \_\_\_\_\_. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28–39, 2009.

PASSUELLO, A. C. **Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em Embalagens Descartáveis para Frutas: Estudo de Caso**. Porto Alegre: UFRGS. Dissertação (Mestrado em engenharia), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “My house my life”. **Energy and Buildings**, v. 57, n. 2013, p. 95–102, 2013.

PELLETIER, N.; TYEDMERS, P. An ecological economic critique of the use of market information in life cycle assessment research. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 342–354, 2011.

PÉREZ-LOMBARD, L. *et al.* A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

PEUPORTIER, B. L. P. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 5, p. 443–450, 2001.

PISELLO, A. L.; GORETTI, M.; COTANA, F. A method for assessing buildings’ energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. **Applied Energy**, v. 97, p. 419–429, 2012.

PROCEL. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - Ano base 2005 - Classe residencial**. Brasília: Eletrobras, 2007.

PUETTMANN, M. E.; WILSON, J. B. Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 18–29, 2007.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, out. 2010.

RAVISHANKARA, A. R.; DANIEL, J. S.; PORTMANN, R. W. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. **Science**, v. 326, 2009.

REIS, M. **Esquadrias de alumínio: análise dos critérios de escolha destes componentes em edifícios de apartamentos, padrão médio-alto, na Cidade de São Paulo**. São Paulo: USP, 2011. Tese (doutorado em arquitetura), Programa de pós graduação em Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RODRIGUES, C.; FREIRE, F. Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house. **Building and Environment**, v. 81, p. 204–215, nov. 2014.

RODRIGUEZ, O. **Sustainability assessment within the residential building sector: A practical life cycle method applied in a developed and a developing country**. Terragona: URV, 2010. Tese (Doutorado em engenharia), Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, Terragona, 2010.

ROLNIK, R. *et al.* O Programa Minha Casa Minha Vida nas regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas: aspectos socioespaciais e segregação. **Cad. Metrop.**, v. 17, n. 33, p. 127–154, 2015.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 249–257, mar. 2007.

SCHEPPEL, M. *et al.* Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. **Materials**, v. 7, n. 8, p. 6010–6027, 2014.

SCHNEIDER, M. Cement and Concrete Research Process technology for efficient and sustainable cement production. **Cement and Concrete Research**, 2015.

SILVA, J. M. **Caracterização de Tintas Látex para a construção Civil: Diagnóstico do mercado do estado de São Paulo**. São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em



engenharia), Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 2005.

SILVA, L. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SIMMONS, A.; DEY, C. **Hybrid analysis: combining input/output analysis, company expenditure records and process measures to reveal full supply chain environmental aspects**. 2nd National Environmental Management Network. **Anais...** Newcastle: Centre for Integrated Sustainability Analysis, 2008

SIVAK, M. Will AC put a chill on the global energy supply? **American Scientist**, v. 101, n. 5, p. 330–333, 2013.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. São Paulo: SNIC, 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>.

SOUZA, A. DE. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto - SP**. São Carlos: UFSCar, 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia), Programa de Pós Graduação em Exatas e da Terra, Universidade Federal de São Carlos, 2012.

SOUZA, D. M. DE *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 165–173, 15 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 70–82, 20 nov. 2016.

SUGAWARA, E. T. **Comparação dos desempenhos ambientais do b5 etílico de soja e do óleo diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. São Paulo: USP, 2012. Tese (Doutorado em engenharia), Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 2012.

TAKANO, A. *et al.* Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, v. 79, p. 20–30, 2014.

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

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia. I Conferencia Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. **Anais...**, 2004.

\_\_\_\_\_. Determinação da energia embutida em edificações: um atributo de sustentabilidade. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - ENTAC. **Anais...** Florianópolis: ENTAC, 2006. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006\\_3855\\_3860.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_3855_3860.pdf)>

TOE, D. H. C.; KUBOTA, T. Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. **Frontiers of Architectural Research**, v. 2, n. 3, p. 278–291, 2013.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

U.S.DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. **Annual Energy Outlook 2015**. Washington: U.S.DOE, 2015. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2015\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf)>

UEMOTO, K. L. **Influência da Formulação de tintas de base acrílica como barreira contra a penetração de agentes agressivos nos concretos**. São Paulo: USP, 1998. Tese (doutorado em engenharia), Departamento de engenharia civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Buildings and Climate Change**. Paris: UNEP, 2009.

\_\_\_\_. **Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure**. Paris: UNEP, 2013.

\_\_\_\_. **The “State of Play” of Sustainable Building in Latin America**. Paris: UNEP, 2014.

WEIDEMA, B. P. *et al.* **The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. Dübendorf: The Ecoinvent Centre, 2013.

WERNET, G. *et al.* The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010**. Geneva: World Meteorological Organization, 2011.

ZABALZA, I. *et al.* Use of LCA as a Tool for Building Ecodesign. A Case Study of a Low Energy Building in Spain. **Energies**, v. 6, n. 8, p. 3901–3921, 2 ago. 2013

## APÊNDICE A

Resultados de avaliação de impacto do ciclo de vida para as casas ParC, com paredes de concreto, e ParA, com paredes de alvenaria. As casas consideram três cenários de requerimentos incorporados recorrentes (C1, C2 e C3).

ParC C1	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	2,04E+03	3,45E-01	9,92E-01	3,05E-01	2,37E+02	1,70E-05	7,95E-02
Incorporado - recorrente	2,99E+03	4,40E-02	1,43E+00	3,17E-01	2,71E+02	2,79E-05	6,43E-02
Incorporado - fim de vida	5,26E+02	8,48E-02	2,73E+00	4,91E-02	3,00E+01	6,05E-06	6,05E-03
Operacional - eletricidade	5,00E+03	1,52E-02	2,57E+00	9,22E-01	6,18E+02	5,90E-05	2,12E-01
Total	1,06E+04	4,89E-01	7,72E+00	1,59E+00	1,16E+03	1,10E-04	3,62E-01

ParC C2	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	2,04E+03	3,45E-01	9,92E-01	3,05E-01	2,37E+02	1,70E-05	7,95E-02
Incorporado - recorrente	1,92E+03	2,61E-02	9,09E-01	2,04E-01	1,73E+02	1,80E-05	4,01E-02
Incorporado - fim de vida	4,79E+02	5,68E-02	2,00E+00	4,32E-02	2,69E+01	5,60E-06	5,50E-03
Operacional - eletricidade	5,00E+03	1,52E-02	2,57E+00	9,22E-01	6,18E+02	5,90E-05	2,12E-01
Total	9,45E+03	4,43E-01	6,47E+00	1,47E+00	1,05E+03	9,96E-05	3,38E-01

ParC C3	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	2,04E+03	3,45E-01	9,92E-01	3,05E-01	2,37E+02	1,70E-05	7,95E-02
Incorporado - recorrente	1,30E+03	1,92E-02	6,07E-01	1,31E-01	1,13E+02	1,24E-05	2,71E-02
Incorporado - fim de vida	4,53E+02	5,68E-02	5,57E-01	4,13E-02	2,57E+01	5,32E-06	5,18E-03
Operacional - eletricidade	5,00E+03	1,52E-02	2,57E+00	9,22E-01	6,18E+02	5,90E-05	2,12E-01
Total	8,80E+03	4,36E-01	4,73E+00	1,40E+00	9,93E+02	9,37E-05	3,24E-01

ParA C1	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	1,90E+03	3,43E-01	9,18E-01	2,67E-01	2,19E+02	1,63E-05	8,36E-02
Incorporado - recorrente	3,19E+03	4,44E-02	1,53E+00	3,46E-01	3,11E+02	2,98E-05	1,04E-01
Incorporado - fim de vida	5,24E+02	8,50E-02	2,72E+00	4,63E-02	2,90E+01	5,75E-06	5,72E-03
Operacional - eletricidade	4,26E+03	1,30E-02	2,19E+00	7,85E-01	5,26E+02	5,02E-05	1,81E-01
Total	9,87E+03	4,86E-01	7,35E+00	1,45E+00	1,08E+03	1,02E-04	3,74E-01

ParA C2	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	1,90E+03	3,43E-01	9,18E-01	2,67E-01	2,19E+02	1,63E-05	8,36E-02
Incorporado - recorrente	2,06E+03	2,64E-02	9,77E-01	2,24E-01	2,00E+02	1,93E-05	6,66E-02
Incorporado - fim de vida	4,56E+02	5,69E-02	1,97E+00	3,89E-02	2,48E+01	5,05E-06	4,95E-03
Operacional - eletricidade	4,26E+03	1,30E-02	2,19E+00	7,85E-01	5,26E+02	5,02E-05	1,81E-01
Total	8,67E+03	4,40E-01	6,06E+00	1,32E+00	9,69E+02	9,09E-05	3,36E-01

ParA C3	ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
	MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Incorporado - inicial	1,90E+03	3,43E-01	9,18E-01	2,67E-01	2,19E+02	1,63E-05	8,36E-02
Incorporado - recorrente	1,30E+03	1,92E-02	6,07E-01	1,31E-01	1,13E+02	1,24E-05	2,71E-02
Incorporado - fim de vida	3,80E+02	5,66E-02	5,15E-01	3,35E-02	2,08E+01	4,17E-06	4,12E-03
Operacional - eletricidade	4,26E+03	1,30E-02	2,19E+00	7,85E-01	5,26E+02	5,02E-05	1,81E-01
Total	7,84E+03	4,32E-01	4,23E+00	1,22E+00	8,79E+02	8,31E-05	2,96E-01

ADPf	Potencial de depleção de recursos abióticos fósseis - CML 2001
ADPnf	Potencial de depleção de recursos abióticos não fósseis (últimas reservas) - CML 2001
AP	Potencial de acidificação - média europeia - CML 2001
EP	Potencial de eutrofização - CML 2001
GWP	Potencial de aquecimento global - IPCC 100 anos - CML 2001
ODP	Potencial de depleção da camada de ozônio - CML 2001
POCP	Potencial de criação de ozônio fotoquímico (baixo NOx) - CML 2001

## APÊNDICE B

Resultados de avaliação de impacto do ciclo de vida para os impactos incorporados em cada um dos sistemas avaliados.

## Impacto Incorporado Inicial

por sistemas

		ADPf	ADPnf	AP	EP	GWP	ODP	POCP
		MJ eq.	kg Sb eq.	kg SO2 eq.	kg PO4--- eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg C2H4 eq.
Fundação	Concreto convencional 25 MPa	1,90E+02	8,03E-04	1,03E-01	3,42E-02	4,08E+01	1,48E-06	2,49E-03
Fundação	Tela de aço estrutural	6,03E+01	1,01E-04	2,27E-02	1,09E-02	4,78E+00	3,42E-07	6,30E-03
Fundação	Brita de leito	8,50E-02	2,03E-06	4,77E-05	1,56E-05	8,02E-03	5,43E-10	2,03E-06
Fundação	Transporte Incorporado inicial	1,54E+02	9,02E-04	6,25E-02	1,22E-02	1,02E+01	1,90E-06	1,47E-03
Fundação	Fim de Vida (FDV)	1,03E+02	1,50E-04	4,46E-02	8,32E-03	5,27E+00	1,24E-06	1,20E-03
Fundação	Transporte FDV	1,76E+01	1,48E-04	7,04E-03	1,39E-03	1,18E+00	2,12E-07	1,70E-04
Parede - concreto	Concreto autoadensável 20 MPa	2,40E+02	1,32E-03	1,30E-01	4,53E-02	5,20E+01	1,73E-06	3,34E-03
Parede - concreto	Tela de aço estrutural	8,64E+01	1,45E-04	3,25E-02	1,55E-02	6,85E+00	4,90E-07	9,03E-03
Parede - concreto	Gesso em pasta	4,03E+00	3,23E-06	2,39E-03	4,77E-04	3,71E-01	2,67E-08	7,07E-05
Parede - concreto	Tinta Acrílica (externa)	1,58E+01	1,96E-04	5,94E-03	1,56E-03	1,03E+00	7,49E-08	3,60E-04
Parede - concreto	Tinta Vínílica (interna)	3,02E+01	6,04E-04	1,51E-02	3,98E-03	2,36E+00	1,81E-07	8,54E-04
Parede - concreto	Transporte Incorporado inicial	2,17E+02	1,22E-03	8,73E-02	1,71E-02	1,42E+01	2,71E-06	2,04E-03
Parede - concreto	Fim de Vida (FDV)	1,88E+02	2,74E-04	8,07E-02	1,51E-02	9,55E+00	2,26E-06	2,18E-03
Parede - concreto	Transporte FDV	3,37E+01	2,39E-04	1,35E-02	2,67E-03	2,27E+00	4,68E-07	3,28E-04
Parede - alvenaria	Bloco cerâmico	5,01E+01	3,30E-05	3,72E-02	7,74E-03	2,38E+01	6,35E-07	9,96E-04
Parede - alvenaria	Gesso em pasta	4,03E+00	3,23E-06	2,39E-03	4,77E-04	3,71E-01	2,67E-08	7,07E-05
Parede - alvenaria	Argamassa de cimento	6,33E+01	1,23E-04	3,27E-02	9,43E-03	1,32E+01	6,02E-07	1,32E-02
Parede - alvenaria	Tinta Acrílica (externa)	3,02E+01	6,04E-04	1,51E-02	3,98E-03	2,36E+00	1,81E-07	8,54E-04
Parede - alvenaria	Tinta Vínílica (interna)	1,58E+01	1,96E-04	5,94E-03	1,56E-03	1,03E+00	7,49E-08	3,60E-04
Parede - alvenaria	Tela de aço estrutural	1,84E+01	3,08E-05	6,94E-03	3,32E-03	1,46E+00	1,05E-07	1,93E-03
Parede - alvenaria	Transporte Incorporado inicial	2,63E+02	1,39E-03	9,91E-02	1,94E-02	1,62E+01	2,90E-06	2,32E-03
Parede - alvenaria	Fim de Vida (FDV)	1,01E+02	1,61E-04	3,95E-02	7,45E-03	4,83E+00	1,21E-06	1,15E-03
Parede - alvenaria	Transporte FDV	4,24E+01	2,01E-04	1,02E-02	2,04E-03	1,72E+00	3,06E-07	2,51E-04
Forro	Gesso acartonado	1,43E+01	3,95E-05	8,60E-03	2,20E-03	1,13E+00	8,51E-08	2,17E-04
Forro	Gesso em pasta	1,33E+00	1,10E-06	7,88E-04	1,57E-04	1,22E-01	8,82E-09	2,33E-05
Forro	Tinta Vínílica (interna)	8,44E+00	1,69E-04	4,23E-03	1,11E-03	6,60E-01	5,08E-08	2,39E-04
Forro	Transporte Incorporado inicial	9,09E+01	3,01E-04	3,69E-02	7,07E-03	5,80E+00	1,12E-06	8,16E-04
Forro	Fim de Vida (FDV)	3,50E+00	3,95E-06	3,59E-01	2,65E-04	1,64E-01	3,65E-08	4,89E-05
Forro	Transporte FDV	1,70E+00	1,59E-05	6,68E-04	1,37E-04	1,16E-01	2,01E-08	1,71E-05

## Impacto Incorporado Inicial

por sistemas

		ADPf MJ eq.	ADPnf kg Sb eq.	AP kg SO2 eq.	EP kg PO4--- eq.	GWP kg CO2 eq.	ODP kg CFC-11 eq.	POCP kg C2H4 eq.
Telhado	Telha cerâmica	4,67E+01	5,26E-05	2,68E-02	8,16E-03	1,80E+01	5,62E-07	1,94E-03
Telhado	Perfis de aço galvanizado	4,63E+02	3,26E-01	2,28E-01	9,87E-02	4,00E+01	2,88E-06	3,71E-02
Telhado	Transporte Incorporado inicial	5,79E+01	3,05E-04	2,33E-02	4,55E-03	3,79E+00	6,22E-07	5,42E-04
Telhado	Fim de Vida (FDV)	2,70E+01	1,91E-05	1,48E-02	2,69E-03	1,56E+00	3,32E-07	3,33E-04
Telhado	Transporte FDV	7,68E+00	7,02E-05	3,03E-03	6,19E-04	5,22E-01	9,12E-08	7,69E-05
Esquadrias	Janelas - partes metálicas	2,43E+02	9,52E-03	1,33E-01	2,86E-02	2,40E+01	1,82E-06	9,31E-03
Esquadrias	Portas - partes metálicas	9,32E+01	3,23E-03	4,69E-02	1,07E-02	8,64E+00	6,73E-07	3,16E-03
Esquadrias	Vidro plano	2,92E+00	8,94E-06	2,53E-03	3,01E-04	2,74E-01	2,39E-08	1,62E-05
Esquadrias	Transporte Incorporado inicial	2,53E+01	7,35E-05	2,06E-02	2,67E-03	2,15E+00	2,15E-07	2,14E-04
Esquadrias	Fim de Vida (FDV)	1,58E+01	2,78E-02	1,06E-02	3,81E-03	1,61E+00	9,48E-08	1,98E-04
Esquadrias	Transporte FDV	5,07E-01	7,45E-07	1,55E-04	2,85E-05	1,78E-02	5,98E-09	5,96E-06

\* O Impacto Incorporado Recorrente pode ser obtido pela multiplicação do resultado de impacto inicial pelos fatores apresentados na Tabela 9.




ADPf	Potencial de depleção de recursos abióticos fósseis - CML 2001
ADPnf	Potencial de depleção de recursos abióticos não fósseis (últimas reservas) - CML 2001
AP	Potencial de acidificação - média europeia - CML 2001
EP	Potencial de eutrofização - CML 2001
GWP	Potencial de aquecimento global - IPCC 100 anos - CML 2001
ODP	Potencial de depleção da camada de ozônio - CML 2001
POCP	Potencial de criação de ozônio fotoquímico (baixo NOx) - CML 2001

## ANEXO A

MORAGA, G.; MORALES, M.; KIRCHHEIM, A.; PASSUELLO, A. (Org.). **Relatório técnico de adaptação de dados de Inventário de Ciclo de Vida de materiais de construção**. Porto Alegre: [s.n.], 2017

As tabelas de adaptação de inventário do ciclo de vida foram são apresentadas com base nos dados desenvolvidos pelo Ecoinvent (WERNET et al., 2016), segundo a versão 3.3. Somente os inventários com as entradas de fluxos de processo são apresentados. As quantidades de cada fluxo são mostradas quando modificadas, os valores originais não modificados, não são apresentados. Os autores de cada adaptação de inventário são apresentados no cabeçalho dos relatórios.

Os inventários seguem o seguinte padrão de legenda:

	Dado adicionado
	Dado modificado
	Dado removido



MORAGA, G.; MORALES, M.; CRUZ, I.; KIRCHHEIM, A.; PASSUELLO, A.

**Relatório de adaptação de ICV: Concreto e argamassa.**concrete production 20MPa, RNA  
concreto autoadensável 20MPaDado original  
Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for acetic acid, without water, in 98% solution state	GLO		acetic acid, without water, in 98% solution state	0.02180	4,06E+00	kg	Superplastificante da classe dos poliacarboxílicos em solução ativa de 40%. O dado original considera solução de 80% de ácido acético e 20% de óxido de etileno. Segundo Tutikian, 2007, a quantidade de superplastificante é de 0,47% da massa de cimento (270*0,047*0,4). O valor total é ajustado para o proporcionamento original, considerando 40% das substâncias.
market for ethylene oxide	GLO		ethylene oxide	8,72E-02	1,02E+00	kg	
areia natural dragagem		BR	areia natural dragagem		3,31E-01	m3	Dado adaptado conforme tabela específica. Quantidade conforme Tutikian, 2007
Cement Production, CP IV		BR	Cimento CPIV		2,70E+02	kg	Quantidade conforme Tutikian, 2007
market for cement, Portland	RoW		cement, Portland	2,40E+02		kg	cimento original removido
market for chemical, organic	GLO		chemical, organic			kg	
market for concrete mixing factory	GLO		concrete mixing factory			Item(s)	
market for diesel, burned in building machine	GLO		diesel, burned in building machine			MJ	
market for electricity, medium voltage	CA-QC	BR	electricity, medium voltage			kWh	Localização modificada BR
market for fatty alcohol	GLO		fatty alcohol			kg	A composição de Tutikian, 2007 não considera incorporadores de ar, removido
gravel production, crushed		RoW	gravel, crushed		1,02E+03	kg	Agregado graúdo de britagem. Quantidade conforme Tutikian, 2007
market for gravel, round	RoW		gravel, round			kg	O concreto não considera uso de agregado graúdo natural
market for heat, district or industrial, natural gas	CA-QC	GLO	heat, district or industrial, natural gas			MJ	Localização modificada GLO
market for lubricating oil	GLO		lubricating oil			kg	
market for sand	GLO		sand			kg	Areia de britagem, removido
market for steel, low-alloyed, hot rolled	GLO		steel, low-alloyed, hot rolled			kg	
market for synthetic rubber	GLO		synthetic rubber			kg	
market for tap water	CA-QC	GLO	tap water	2,05E+02	1,73E+02	kg	Localização modificada GLO. Quantidade Ibdem. areia natural dragagem
market for waste concrete	RoW		waste concrete			kg	
market for wastewater from concrete production	RoW		wastewater from concrete production			m3	

concrete production 20MPa, RNA  
concreto convencional 25MPaDado original  
Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for acetic acid, without water, in 98% solution state	GLO		acetic acid, without water, in 98% solution state			kg	
market for ethylene oxide	GLO		ethylene oxide			kg	
areia natural dragagem		BR	areia natural dragagem		6,00E-01	m3	Dado adaptado conforme tabela específica. Quantidade conforme Franarin, 2014
Cement Production, CP IV		BR	Cimento CPIV		3,85E+02	kg	Quantidade conforme Franarin, 2014
market for cement, Portland	RoW		cement, Portland	2,40E+02		kg	cimento original removido
market for chemical, organic	GLO		chemical, organic			kg	
market for concrete mixing factory	GLO		concrete mixing factory			Item(s)	
market for diesel, burned in building machine	GLO		diesel, burned in building machine			MJ	
market for electricity, medium voltage	CA-QC	BR	electricity, medium voltage			kWh	Localização modificada BR
market for fatty alcohol	GLO		fatty alcohol			kg	Não são considerados incorporadores de ar, removido
gravel production, crushed		RoW	gravel, crushed		9,00E+02	kg	Agregado graúdo de britagem. Quantidade conforme Franarin, 2014
market for gravel, round	RoW		gravel, round			kg	O concreto não considera uso de agregado graúdo natural
market for heat, district or industrial, natural gas	CA-QC	GLO	heat, district or industrial, natural gas			MJ	Localização modificada GLO
market for lubricating oil	GLO		lubricating oil			kg	
market for sand	GLO		sand			kg	Areia de britagem, removido
market for steel, low-alloyed, hot rolled	GLO		steel, low-alloyed, hot rolled			kg	
market for synthetic rubber	GLO		synthetic rubber			kg	
market for tap water	CA-QC	GLO	tap water	2,05E+02	1,93E+02	kg	Localização modificada GLO. Quantidade estimada em 0,5 água/cimento
market for waste concrete	RoW		waste concrete			kg	
market for wastewater from concrete production	RoW		wastewater from concrete production			m3	

cement mortar production - CH  
cement mortar production - BRDado original  
Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
areia natural dragagem		BR	areia natural dragagem		3,50E-04	m3	Dado de extração de areia adaptado conforme tabela específica. Quantidade alterada segundo dados em Franarin, 2014
market for silica sand	CH		silica sand	8,00E-01		kg	Refere-se a produção de areia na Suíça, removido
Cement Production, CP IV		BR	Cimento CPIV		8,85E-02	kg	Produção de cimento brasileira, conforme tabela específica. Quantidade alterada conforme Franarin, 2014
market for cement, Portland	CH		cement, Portland	2,00E-01		kg	Refere-se a produção de cimento na Suíça, removido
market for conveyor belt	GLO		conveyor belt			m	
market for electricity, medium voltage	CH	BR	electricity, medium voltage			kWh	Alterado para a matriz brasileira
market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO		industrial machine, heavy, unspecified			kg	
market for lime, hydraulic		BR	market for lime, hydraulic		5,71E-02	kg	Dado de produção da cal adaptado conforme tabela específica. Quantidade alterada segundo dados em Franarin, 2014
market for packing, cement		GLO	packing, cement			kg	

**Relatório de adaptação de ICV: Cimentos brasileiros.**

clinker production - CH

Dado original

clinker production - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for ammonia, liquid	RER	RoW	ammonia, liquid			kg	Localização modificada RoW
market for bauxite, without water	GLO	-	bauxite, without water			kg	
market for calcareous marl	GLO	-	calcareous marl			kg	
charcoal production	GLO	-	charcoal		1,28E-02	kg	Dado calculado conforme relatório de produção de cimento (SNIC,2013), ponderados pelos dados de energia do setor cimenteiro no balanço energético nacional (BEN, 2014).
market for diesel, burned in building machine	GLO	-	diesel, burned in building machine	1,34E-02	4,06E-02	MJ	Ibid. Charcoal production
market for electricity, medium voltage	CH	BR	electricity, medium voltage	1,21E-01	8,57E-02	kWh	Localização modificada BR. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for hard coal	WEU	RLA	hard coal	3,70E-02	4,47E-03	kg	Localização modificada RLA. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for heavy fuel oil [CH]	CH	RoW	heavy fuel oil	7,58E-04	2,46E-04	kg	Localização modificada RoW. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO		industrial machine, heavy, unspecified			kg	
market for light fuel oil	CH	RoW	light fuel oil	2,00E-04	3,74E-04	kg	Localização modificada RoW. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for limestone, crushed, for mill	CH	GLO	limestone, crushed, for mill			kg	Localização modificada GLO
market for lubricating oil	GLO		lubricating oil			kg	
market for natural gas, high pressure	CH	GLO	natural gas, high pressure	1,00E-04	4,82E-04	m3	Localização modificada GLO. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for petroleum coke	GLO		petroleum coke	8,91E-03	8,34E-02	kg	Localização modificada GLO. Quantidade Ibid. Charcoal production
market for pulverised lignite	GLO		pulverised lignite			MJ	Os relatórios setoriais não relatam o uso desse tipo de energia.
market for refractory, basic, packed	GLO		refractory, basic, packed			kg	
market for refractory, fireclay, packed	GLO		refractory, fireclay, packed			kg	
market for refractory, high aluminium oxide, packed	GLO		refractory, high aluminium oxide, packed			kg	
market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	GLO		steel, chromium steel 18/8, hot rolled			kg	
market for tap water	CH	RoW	tap water			kg	Localização modificada RoW
market for urea, as N	GLO		urea, as N			kg	
"fluxo elementar"			Water, unspecified natural origin			m3	

cement production, pozzolana and fly ash 11-35%,

non-US - CH

Dado original

Cement Production, CP IV, BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for cement factory	CH	GLO	cement factory			Item(s)	Mudança localização GLO
clinker production	CH	BR	clinker	0,7315	0,65	kg	Localização modificada para dado adaptado de produção. Quantidade conforme média da faixa de clínquer da norma brasileira (ABNT, 1991)
market for electricity, medium voltage	CH	BR	electricity, medium voltage	0,0329	0,05712	kWh	Mudança localização BR. Energia modificada segundo relatório setorial (CNI, 2010)
market for ethylene glycol	GLO		ethylene glycol			kg	
market for gypsum, mineral	GLO		gypsum, mineral			kg	
cement production, pozzolana and fly ash 11-35%, non-US	RoW		hard coal ash	-	0,325	kg	Cinza volante, quantidade conforme média da faixa de material pozolânico da norma brasileira (ABNT, 1991)
heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	RoW		heat, district or industrial, other tha	-	0,0391	MJ	Energia modificada segundo relatório setorial (CNI, 2010)
cement production, pozzolana and fly ash 11-35%, non-US	CH		inert filler			kg	
market for limestone, crushed, for mill	GLO		limestone, crushed, for mill	-	0,025	kg	Calcário utilizado como filler, segundo norma brasileira
packing, cement	RoW		packing, cement			kg	
market for steel, low-alloyed	GLO		steel, low-alloyed			kg	

**Relatório de adaptação de ICV: Cal hidratada**

lime production - CH

Dado original

lime production - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for ammonia, liquid	RER		ammonia, liquid			kg	
areia natural dragagem		BR	areia natural dragagem		9,26E-03	m3	Modificação do tipo de areia para o brasileiro. Conforme adaptação específica
market for sand	GLO		sand	9,26E-03		kg	Remoção areia original
market for bauxite, without water	GLO		bauxite, without water			kg	
Market for cement factory	CH	GLO	cement factory			Item(s)	Modificação localização GLO
charcoal production	GLO		charcoal		1,76E-01	kg	Conforme levantamento da matriz energética de produção de cal.de John et al., 2013
clay, at mine		BR	clay, at mine		3,31E-01	kg	Modificação do tipo de argila para o brasileiro. Conforme adaptação específica (ANICER, 2012)
market for clay	CH		clay	3,31E-01		kg	Remoção argila original
market for diesel, burned in building machine	GLO		diesel, burned in building machine			MJ	
market for electricity, medium voltage	CH	BR	electricity, medium voltage			kWh	Modificação localização BR
market for hard coal	WEU		hard coal			kg	O Brasil não utiliza este tipo de energia para produção, conforme John et al., 2013
market for heavy fuel oil	CH		heavy fuel oil			kg	O Brasil não utiliza este tipo de energia para produção, conforme John et al., 2013
market for heat, district or industrial, natural gas	RoW		heat, district or industrial, natural gas		1,04E+00	MJ	Conforme levantamento da matriz energética de produção de cal.de John et al., 2013
market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO		industrial machine, heavy, unspecified			kg	
treatment of inert waste, inert material landfill	CH	GLO	inert waste, for final disposal			kg	Modificação localização GLO
market for lime	GLO		lime			kg	
market for lime, hydrated, loose weight	CH	GLO	lime, hydrated, loose weight			kg	Modificação localização GLO
market for lubricating oil	GLO		lubricating oil			kg	
market for municipal solid waste	CH	GLO	municipal solid waste			kg	Modificação localização GLO
market for petroleum coke	GLO		petroleum coke		8,62E-02	kg	Conforme levantamento da matriz energética de produção de cal.de John et al., 2013
market for refractory, basic, packed	GLO		refractory, basic, packed			kg	
market for refractory, fireclay, packed	GLO		refractory, fireclay, packed			kg	
market for refractory, high aluminium oxide, packed	GLO		refractory, high aluminium oxide, packed			kg	
market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	GLO		steel, chromium steel 18/8, hot rolled			kg	
market for tap water	CH	RoW	tap water			kg	Modificação localização RoW
"fluxo elementar"			Water, unspecified natural origin			m3	

**Relatório de adaptação de ICV: Areia de dragagem.**

Dado desenvolvido

	Unidade de processo	Localização adaptada	Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
				Ecoinvent	Adaptada		
Armazenamento	market for electricity, medium voltage	BR	Electricity, medium voltage	-	1,30E-04	kWh	Processo criado tendo como referência os dados obtidos em uma visita à uma mineradora de grande porte na região metropolitana de Porto Alegre e complementados com dados de Souza (2012). Considerando massa unitária de 1500 kg/m <sup>3</sup> de acordo com Basílio (1995). Foi considerado a umidade final da areia sendo 4,2% de acordo com Petrucci (1988). Consumo de eletricidade relacionado à iluminação e instalações administrativas.
	market for diesel	RoW	diesel	-	3,00E-01	kg	
	market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO	industrial machine, heavy, unspecified	-	1,07E-03	kg	
	market for lorry, 16 metric ton	GLO	lorry, 16 metric ton	-	1,33E-07	item(s)	
"fluxo elementar"	-	Occupation, dump site	-	6,00E-02	m <sup>2</sup> a		
Beneficiam.	market for diesel - RoW	RoW	diesel	-	1,70E+00	kg	
	market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO	industrial machine, heavy, unspecified	-	9,88E-04	kg	
Extração	diesel, burned in building machine	GLO	diesel, burned in building machine	-	5,50E+01	MJ	
	market for industrial machine, heavy, unspecified	GLO	industrial machine, heavy, unspecified	-	6,50E-02	kg	
	"fluxo elementar"	-	Sand, quartz, in ground	-	1,50E+03	kg	
	"fluxo elementar"	-	Water, river	-	6,50E-01	m <sup>3</sup>	

MORAGA, G.; MORALES, M.; CRUZ, I.; KIRCHHEIM, A. PASSUELLO, A.

**Relatório de adaptação de ICV: Bloco e telha cerâmica.**

Inventário original desenvolvido por LAFONTAINE, M. et al. (2012a, 2012b), a adaptação diz respeito a transição dos vetores da versão 2.2 para a 3.3 da base de dados do Ecoinvent.

Processo	Quantidade Un.	Entrada	Quantidade Un.	Localização
clay, at mine	9,83E+00 kg	Clay	1,00E+00 kg	Fluxo elementar
		Occupation, mineral extraction site	1,70E-04 m2*a	Fluxo elementar
		diesel, burned in building machine	8,63E-02 MJ	GLO
		Transformation, to mineral extraction site	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		Transformation, to unknown	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		Transformation, from unknown	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		recultivation, bauxite mine	1,67E-05 m2	GLO
clay brick, preparation of dough	1,17E+01 Item(s)	Market for tap water	1,60E-01 kg	RoW
		diesel, burned in building machine	1,63E-01 MJ	GLO
clay brick, forming operations	1,03E+00 Item(s)	market for electricity, medium voltage	8,33E-02 kWh	BR
		lubricating oil production	1,17E-03 kg	RER
		Market for heat, district or industrial, natural gas	3,25E-02 MJ	RoW
clay brick, firing - wood chips, from industry, mixed, burned in furnace 1000kW	7,97E+00 MJ	market for electricity, low voltage	0,00417 kWh	BR
		market for furnace, wood chips, hardwood storage area, 1000kW	5,62E-09 Item(s)	GLO
		market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	2,28E-03 t*km	GLO
		market for wood ash mixture, pure	-4,90E-04 kg	RoW
		market for wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass	-7,60E-02 kg	GLO
clay brick, drying	1,03E+00 Item(s)	market for inert waste	-2,15E-02 kg	RoW

Telha Ceramica Anicer

Processo	Quantidade Un.	Entrada	Quantidade Un.	Localização
clay, at mine	3,93E+00 kg	Clay	1,00E+00 kg	Fluxo elementar
		Occupation, mineral extraction site	1,70E-04 m2*a	Fluxo elementar
		diesel, burned in building machine	8,63E-02 MJ	GLO
		Transformation, to mineral extraction site	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		Transformation, to unknown	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		Transformation, from unknown	1,67E-05 m2	Fluxo elementar
		recultivation, bauxite mine	1,67E-05 m2	GLO
clay tile, preparation of dough	4,68E+00 kg	Market for tap water	6,57E-02 kg	GLO
		diesel, burned in building machine	1,03E-01 MJ	GLO
clay tile, forming operations	1,03E+00 Item(s)	market for electricity, medium voltage	8,33E-02 kWh	BR
		lubricating oil production	1,17E-03 kg	RER
clay tile, firing - wood chips, from industry, mixed, burned in furnace 1000kW	7,97E+00 MJ	market for electricity, low voltage	4,17E-03 kWh	BR
		market for furnace, wood chips, hardwood storage area, 1000kW	5,62E-09 Item(s)	GLO
		market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	2,28E-03 t*km	GLO
		market for wood ash mixture, pure	-4,90E-04 kg	RoW
		market for wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass	-7,60E-02 kg	GLO
clay tile, drying	1,03E+00 Item(s)	market for inert waste	-2,15E-02 kg	RoW

**Relatório de adaptação de ICV: Aço para construção**

reinforcing steel production - RER

Dado original

reinforcing steel production - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
hot rolling, steel	RER	GLO	hot rolling, steel			kg	Moldagem, somente localização modificada
steel production, electric, low-alloyed	RER	BR	steel, low-alloyed			kg	Aço com liga metálica produzido por forno de arco elétrico, somente localização modificada
steel production, converter, unalloyed	RER	BR	steel, unalloyed			kg	Aço sem liga metálica produzido por forno LD, dado modificado segundo relatórios industriais

steel production, converter, unalloyed - RER

Dado original

steel production, converter, unalloyed - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for basic oxygen furnace waste	GLO		basic oxygen furnace waste			kg	
market for blast oxygen furnace converter	GLO		blast oxygen furnace converter			Item(s)	
market for coke	GLO		coke			MJ	
market for dolomite	GLO		dolomite			kg	
market for dust, unalloyed electric arc furnace steel	GLO		dust, unalloyed electric arc furnace steel			kg	
market group for electricity, medium voltage	RER	BR	electricity, medium voltage			kWh	Matriz de energia elétrica BR
market for ferronickel, 25% Ni	GLO		ferronickel, 25% Ni			kg	
market for inert waste, for final disposal	CH	GLO	inert waste, for final disposal			kg	Modificação da localização
market for iron ore, beneficiated, 65% Fe	GLO		iron ore, beneficiated, 65% Fe			kg	
market for iron scrap, sorted, pressed	GLO		iron scrap, sorted, pressed			kg	
market group for natural gas, high pressure	RER-CH	GLO	natural gas, high pressure			m3	Modificação da localização
market for natural gas, high pressure	CH	GLO	natural gas, high pressure			m3	Modificação da localização
market for oxygen, liquid	RER		oxygen, liquid			kg	
market for pig iron	GLO	BR	pig iron			kg	Entrada modificada para o dado adaptado de ferro gusa
market for quicklime, in pieces, loose	CH	GLO	quicklime, in pieces, loose			kg	Modificação da localização
"fluxo elementar"			Water, cooling, unspecified natural origin			m3	
"fluxo elementar"			Water, unspecified natural origin			m3	

steel production, electric, low-alloyed - RER

Dado original

steel production, electric, low-alloyed - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for anode, for metal electrolysis	GLO		anode, for metal electrolysis			kg	
market for dust, unalloyed electric arc furnace steel	GLO		dust, unalloyed electric arc furnace steel			kg	
market for electric arc furnace converter	GLO		electric arc furnace converter			Item(s)	
market group for electricity, medium voltage	RER	BR	electricity, medium voltage			kWh	Matriz de energia elétrica BR
market for hard coal	-	RLA	hard coal	1,40E-02	1,40E-02	kg	Quantidade é soma todas as entradas de carvão mineral (duas localizações), localização modificada para RLA
market for inert waste, for final disposal	CH	GLO	inert waste, for final disposal			kg	Localização GLO
market for iron scrap, sorted, pressed	GLO		iron scrap, sorted, pressed			kg	
market group for natural gas, high pressure [Europe without Switzerland]	RER-CH	GLO	natural gas, high pressure			m3	Localização GLO
market for natural gas, high pressure	CH	GLO	natural gas, high pressure			m3	Localização GLO
market for oxygen, liquid	RER	GLO	oxygen, liquid			kg	Localização GLO
market for quicklime, in pieces, loose	CH	GLO	quicklime, in pieces, loose			kg	Localização GLO
market for refractory, basic, packed	GLO		refractory, basic, packed			kg	
market for slag, unalloyed electric arc furnace steel	GLO		slag, unalloyed electric arc furnace steel			kg	
"fluxo elementar"			Water, cooling, unspecified natural origin			m3	

pig iron production - GLO

Dado original

pig iron production - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for blast furnace	GLO	-	blast furnace			Item(s)	
blast furnace gas, Recycled Content cut-off	GLO	-	blast furnace gas			MJ	
blast furnace slag, Recycled Content cut-off	GLO	-	blast furnace slag			kg	
market for charcoal		GLO	charcoal		6,21E-02	kg	Segundo dados da indústria o Brasil utiliza carvão natural no forno, o valor está listado no Consumo de matérias-primas e insumos (IAB, 2012, p.13)
market for coke	GLO	-	coke	9,72E+00	1,08E+01	MJ	Valor calculado segundo a entrada listada no Consumo de matérias-primas e insumos (IAB, 2012, p.13)
market for hard coal	RLA	-	hard coal	1,69E-03	5,85E-01	kg	
market for hard coal	RNA	-	hard coal	2,44E-02		kg	
market for hard coal	PL	-	hard coal	7,53E-03		kg	
market for hard coal	CN	-	hard coal	5,71E-02		kg	
market for hard coal	ZA	-	hard coal	6,16E-03		kg	
market for hard coal	AU	-	hard coal	7,72E-03		kg	
market for hard coal	ID	-	hard coal	6,83E-03		kg	
market for hard coal	RU	-	hard coal	5,70E-03		kg	
market for hard coal	ROW	-	hard coal	3,14E-02		kg	Segundo dados da indústria o Brasil utiliza carvão natural no forno, o valor está listado no Consumo de matérias-primas e insumos (IAB, 2012, p.13). Os dados deletados fazem referência a produção de carvão mineral no mundo, foi utilizado o dado apenas de Referência da América Latina (RLA).

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for hard coal	WEU	-	hard coal	1,40E-03		kg	
market for inert waste, for final disposal	GLO	-	inert waste, for final disposal			kg	
iron ore beneficiation to 65% Fe	GLO	-	iron ore, beneficiated, 65% Fe			kg	
market for iron pellet	GLO	-	iron pellet			kg	
market for limestone, unprocessed	GLO	-	limestone, unprocessed			kg	
market group for natural gas, high pressure	GLO	-	natural gas, high pressure	3,08E-03		m3	Não é utilizado gás natural para produção de ferro gusa no Brasil (IAB, 2012, p.13)
market for petroleum coke	GLO	-	petroleum coke	-	3,45E-02	m3	A produção brasileira utiliza coque de petróleo (IAB, 2012, p.13)
market for refractory, fireclay, packed	GLO	-	refractory, fireclay, packed			kg	
market for sinter, iron	GLO	-	sinter, iron			kg	
market for sludge, pig iron production	GLO	-	sludge, pig iron production			kg	
market for wastewater from pig iron production	GLO	-	wastewater from pig iron production			m3	
"fluxo elementar"		-	Water, cooling, unspecified natural origin			m3	
"fluxo elementar"		-	Water, unspecified natural origin			m3	

**Relatório de adaptação de ICV: Esquadrias de alumínio.**

window frame production, aluminium, U=1,6 W/m2K

Dado original

window frame production, aluminium - BR

Dado adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	GLO		acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer			kg	
market for adhesive, for metal	GLO		adhesive, for metal			kg	
market for Alumínio, primario+secundario		BR	Alumínio, primario+secundario		1,06E+01	kg	Dado modificado para representar realidade brasileira, conforme tabela especifica. Quantidade estimada de Alumínio por m2 de esquadria, baseado em dados comerciais [(8,75+12,5)/2]
market for aluminium, wrought alloy	GLO		aluminium, wrought alloy	3,97E+01		kg	Alumínio original removido
market for electricity, medium voltage	RER	BR	electricity, medium voltage			kWh	Localização modificada
market for extrusion, plastic film	GLO		extrusion, plastic film			kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	GLO		glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded			kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for isopropanol	GLO		isopropanol			kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for metal working factory	GLO		metal working factory			Item(s)	
market for nylon 6	GLO		nylon 6			kg	
market for polyethylene, high density, granulate	GLO		polyethylene, high density, granulate			kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for powder coat, aluminium sheet	GLO		powder coat, aluminium sheet			m2	Pintura em pó eletrostática, valor mantido por falta de informações
market for reinforcing steel	GLO	BR	reinforcing steel			kg	Mudança de localização, dado adaptado segundo tabela especifica
market for section bar extrusion, aluminium	GLO		section bar extrusion, aluminium	3,80E+01	1,02E+01	kg	Quantidade estimada de extrusão conforme proporção do dado original, 96% da entrada de alumínio
market for section bar rolling, steel	GLO		section bar rolling, steel			kg	
market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled	GLO		steel, chromium steel 18/8, hot rolled			kg	
market for synthetic rubber	GLO		synthetic rubber	4,87E+00	1,50E+00	kg	Quantidade estimada de borracha de vedação em 30% da esquadria original
market for waste plastic, mixture	GLO		waste plastic, mixture	-9,58E-02		kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for waste plastic, mixture	GLO		waste plastic, mixture	-6,24E-03		kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for waste polyethylene/polypropylene product	GLO		waste polyethylene/polypropylene product	-2,39E-01		kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido
market for waste polyethylene/polypropylene product	CH		waste polyethylene/polypropylene product	-7,17E-03		kg	Material relacionado com isolamento térmico, removido

**Aluminium production, BR**

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
aluminium, primary, ingot - IAI Area 3		RLA	aluminium, primary, ingot - IAI Area 3		7,38E-01	kg	Dado de produção do alumínio para referência América Latina. Quantidade conforme o uso de alumínio primário em ABAL, 2011
treatment of aluminium scrap, new, at refiner - RoW		RoW	aluminium, cast alloy		2,62E-01	kg	Ibid. ABAL, 2011



**Relatório de adaptação de ICV: Tintas látex de emulsão vinílica e de emulsão acrílica.**

Alkyd paint production, white, water-based, product in 60% solution state - RER Dado Original

Vinyl paint production, white - BR Dado Adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for chemical factory, organics	GLO		chemical factory, organics			Item(s)	Os processos energéticos e de infraestrutura foram mantidos idênticos ao original. Seguindo metodologia presente na adaptação dos dados base para Ecolabels em tintas europeias (KOUGOULIS et al., 2012), Localização modificada quando possível.
market for chemical, organic	GLO		chemical, organic			kg	
market for electricity, medium voltage	RER	BR	electricity, medium voltage			kWh	
market group for heat, district or industrial, natural gas	RER		heat, district or industrial, natural gas			MJ	Processos químicos da tinta original, excluídos
market group for heat, district or industrial, other than natural gas	RER		heat, district or industrial, other than natural gas			MJ	
market for pentaerythritol	GLO		pentaerythritol			kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for phthalic anhydride	GLO		phthalic anhydride			kg	
market for soybean oil, crude	GLO		soybean oil, crude			kg	
market for titanium dioxide	RER		titanium dioxide	5,05E-01	1,60E-01	kg	As quantidades anteriormente eram distribuídas entre 2 localizações, na adaptação elas foram somadas e a localização alterada para RoW.
market for waste paint	RER-CH		waste paint	-1,68E-02		kg	
market for waste paint	CH	RoW	waste paint	-3,90E-05	-1,68E-02	kg	Processos químicos da tinta original, excluído
market for white spirit	GLO		white spirit			kg	
market group for tap water		GLO	tap water - GLO		3,57E-01	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for ethylene glycol		GLO	ethylene glycol - GLO		2,00E-02	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for waste mineral oil		GLO	waste mineral oil - GLO		2,50E-03	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for sodium nitrite		GLO	sodium nitrite		1,00E-03	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for carboxymethyl cellulose, powder		GLO	carboxymethyl cellulose, powder		4,50E-03	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for polyvinylchloride, emulsion polymerised		GLO	polyvinylchloride, emulsion polymerised		2,50E-01	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for ammonia, liquid		RER	ammonia, liquid		1,00E-03	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
market for sodium aluminate, powder		GLO	sodium aluminate, powder		1,00E-01	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).
"fluxo elementar"			Calcium carbonate, in ground		1,00E-01	kg	Quantidades baseadas em SILVA (2005).

Alkyd paint production, white, water-based, product in 60% solution state - RER Dado Original

Acrylic paint production, white - BR Dado Adaptado

Unidade de processo	Localização		Fluxo de referência	Quantidade		Un.	Comentários
	Ecoinvent	Adaptada		Ecoinvent	Adaptada		
market for chemical factory, organics	GLO		chemical factory, organics			Item(s)	Os processos energéticos e de infraestrutura foram mantidos idênticos ao original. Seguindo metodologia presente na adaptação dos dados base para Ecolabels em tintas europeias (KOUGOULIS et al., 2012), Localização modificada quando possível.
market for chemical, organic	GLO		chemical, organic			kg	
market for electricity, medium voltage	RER	BR	electricity, medium voltage			kWh	
market group for heat, district or industrial, natural gas	RER		heat, district or industrial, natural gas			MJ	Processos químicos da tinta original, excluídos
market group for heat, district or industrial, other than natural gas	RER		heat, district or industrial, other than natural gas			MJ	
market for pentaerythritol	GLO		pentaerythritol			kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
market for phthalic anhydride	GLO		phthalic anhydride			kg	
market for soybean oil, crude	GLO		soybean oil, crude			kg	
market for titanium dioxide	RER		titanium dioxide	5,05E-01	1,02E-01	kg	As quantidades anteriormente eram distribuídas entre 2 localizações, na adaptação elas foram somadas e a localização alterada para RoW.
market for waste paint	RER-CH		waste paint	-1,68E-02		kg	
market for waste paint	CH	RoW	waste paint	-3,90E-05	-1,68E-02	kg	Processos químicos da tinta original, excluído
market for white spirit	GLO		white spirit			kg	
market group for tap water		GLO	tap water - GLO		3,69E-01	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
market for propylene glycol, liquid		GLO	propylene glycol, liquid		2,56E-02	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
market for kaolin		GLO	kaolin		1,14E-01	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
market for ethylene glycol		GLO	ethylene glycol - GLO		2,36E-02	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer		GLO	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer		1,27E-01	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
butyl acrylate production		RER	butyl acrylate - RER		1,23E-01	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).
"fluxo elementar"			Calcium carbonate, in ground		1,22E-01	kg	Quantidades baseadas em LOH (1998).