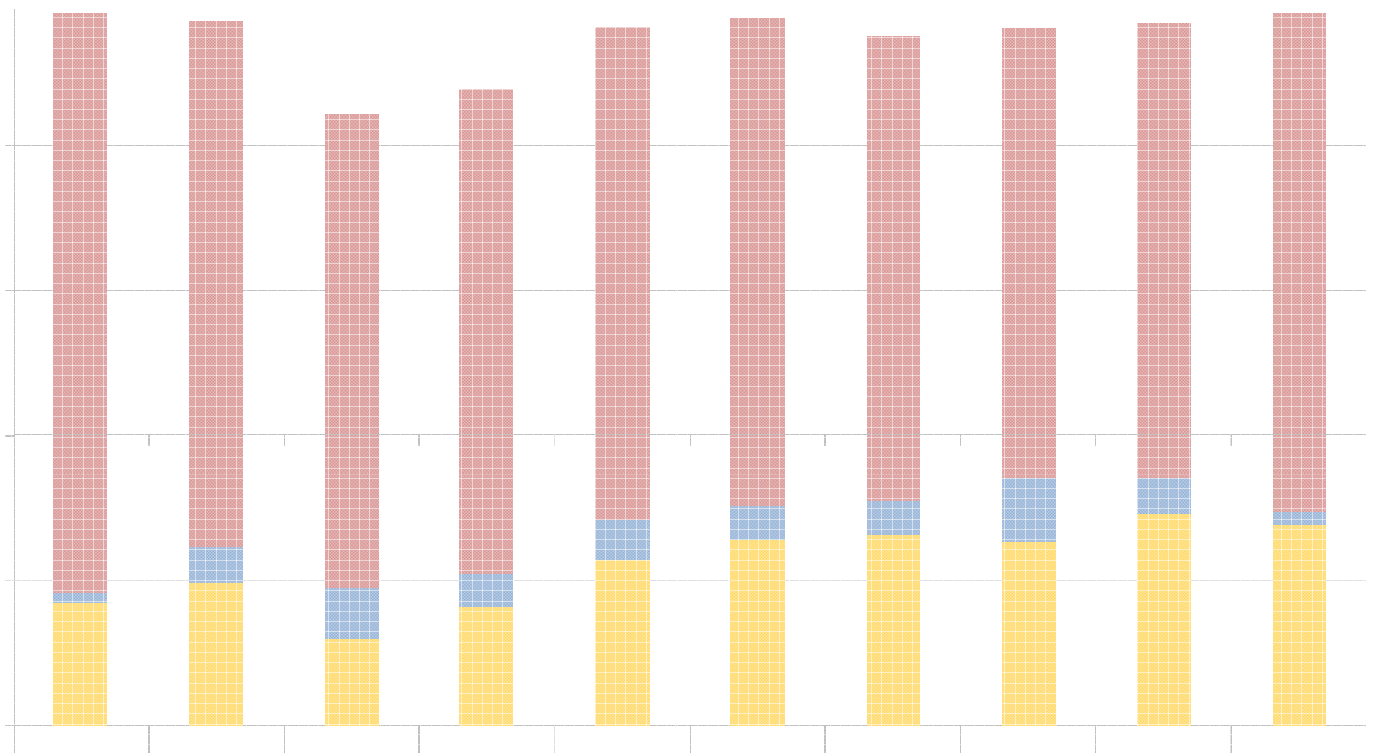




# Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade



**Tese de Doutorado**  
São Carlos – SP  
Maio de 2014

**Cristiane Bueno**  
Orientador: João Adriano Rossignolo  
Coorientador: Aldo Roberto Ometto



**Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil:**  
Análise de Sensibilidade

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências da Arquitetura e Urbanismo.

**Área de Concentração:**

Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Autora: Cristiane Bueno

**Orientador:** Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

**Coorientador:** Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B928a Bueno, Cristiane  
Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil:  
Análise de Sensibilidade / Cristiane Dueno; orientador  
João Adriano Rossignolo; coorientador Aldo Roberto  
Ometto. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em  
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de  
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,  
2014.

1. Avaliação de Ciclo de Vida. 2. Análise de  
Sensibilidade. 3. Avaliação Quantitativa de  
Sustentabilidade. 4. Desempenho Ambiental de  
Edificações. 5. Sistemas Construtivos. 6. Avaliação de  
Impacto de Ciclo de Vida. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Arquiteta e Urbanista **CRISTIANE BUENO**


Título da tese: "**Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**".


Data da defesa: **16/05/2014**

**Comissão Julgadora:**

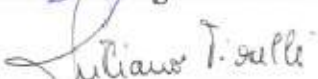
**Resultado:**

  
Prof. Dr. **João Adriano Rossignolo (Orientador)**  
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - FZEA/USP) APROVADA

  
Prof. Assoc. **Márcio Minto Fabricio**  
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo- IAU/USP) APROVADA

  
Profa. Dra. **Karin Maria Soares Chvatal**  
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo- IAU/USP) APROVADA

  
Prof. Dr. **Antônio de Paulo Peruzzi**  
(Faculdade de Engenharia Civil - FECIV/UFU) APROVADA

  
Prof. Dr. **Juliano Fiorelli**  
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - FZEA/USP) APROVADA

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação: do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Prof. Associado **Márcio Minto Fabricio**



## DEDICATÓRIA

*Aos meus pequenos Joaquim e Miguel, por toda sua força e coragem.*

*Por sua luta incessante pela vida.*





## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e fomento a este trabalho de pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Adriano Rossignolo, pelo apoio irrestrito e entusiasmo com este trabalho, e pela imensa paciência e compreensão com as minhas dificuldades. Sobretudo, pela grande amizade e companheirismo crescentes ao longo dos anos de trabalho juntos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto, por ter me recebido de braços abertos em seu grupo de estudos, e me ajudado a suprir todas as minhas deficiências em relação às nuances mais exatas e aprofundadas da metodologia de ACV.

Aos Professores Michael Z. Hauschild, Morten Birkved e Ralph Rosenbaum, e aos colegas Alexis Laurent, Anders Bjørn, Teunis Dijkman, Mirko Miseljic e Mikolaj Owsianiak por toda a amizade, apoio e ajuda durante meu estágio de doutorado na Universidade Técnica da Dinamarca.

Aos Prof. Dr. Almir Sales e Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares que, graças às suas construtivas colocações na fase de qualificação deste trabalho, me ajudaram enormemente no redirecionamento deste e em seu desenvolvimento final.

Ao Prof. Dr. Márcio Minto Fabrício que tem também me acompanhado durante todo o mestrado e doutorado, sempre me ajudando a desenvolver trabalhos que trouxeram grande enriquecimento em meu aprendizado como pesquisadora.

Aos amigos Marieli, Rodrigo, Rosi, Natália, Ana Laura e Fábio, dentre tantos outros, pelo trabalho sempre conjunto e solidariedade total na resolução de quaisquer assuntos acadêmicos ou pessoais, e aos queridos Marcelinho e Geraldo, por todos os “galhos quebrados” ao longo do caminho.

Ao meu marido, Luis Antonio, por estar sempre amorosamente ao meu lado, não medindo esforços para que eu possa alcançar meus objetivos, e aos meus pequenos Miguel e Joaquim que me ensinam dia a dia com sua doçura, força e coragem na luta pela vida.

Ao meu irmão, Renato, que tem me servido de exemplo e espelho durante toda a vida, e de quem tenho sempre tentado seguir os passos em busca do meu próprio caminho.

E, finalmente, aos meus pais, Elizabete e Milton, por seu apoio incondicional em todas as decisões que tenho tomado durante toda a minha vida. Eu não teria chegado a lugar nenhum sem eles.

*“Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta.”*

(Francisco C. Xavier)

*“ You must be the change you wish to see in the world.”*

(Mahatma Gandhi)



## RESUMO

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Área de Concentração em Arquitetura Urbanismo e Tecnologia – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

No que toca à avaliação de sistemas construtivos, a análise dos sistemas existentes para certificação ambiental de edifícios revela que há raras ferramentas que avaliam desempenho ambiental objetiva e holisticamente por Análise do Ciclo de Vida (ACV), predominando o reconhecimento de atributos de produtos e, desta forma, perdendo-se a noção global do impacto. Dentre as principais dificuldades encontradas para o uso da ACV em sistemas construtivos, encontra-se a escassez de dados de inventário disponíveis para sistemas construtivos no cenário brasileiro, o que torna a aplicação da metodologia ainda mais complexa e demorada. Por outro lado, bancos de dados internacionais dispõem de uma quantidade considerável de informações, as quais são muitas vezes utilizadas para estudos realizados dirigindo-se ao contexto brasileiro. Assim, esta pesquisa buscou responder às seguintes questões: a) se coletados para processos idênticos, os dados disponíveis em bases de dados internacionais validadas devem levar a resultados similares àqueles obtidos por estudos baseados em dados primários coletados no contexto brasileiro?; b) As metodologias de avaliação de impacto disponíveis na atualidade são capazes de avaliar de forma completa e consistente os principais potenciais de impacto derivados do ciclo de vida de materiais de construção tradicionais? Com isso o objetivo desta pesquisa foi avaliar a sensibilidade dos resultados de um estudo comparativo de ACV à utilização de dados secundários (provenientes de bases de dados europeias) ou dados primários (coletados no contexto brasileiro), assim como à utilização de diferentes metodologias de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), identificando as categorias de impacto de contribuição mais significativa na avaliação de sistemas

construtivos tradicionais, pela aplicação da metodologia em um estudo de caso. Os resultados demonstraram que o escopo geográfico das fontes de dados, assim como as possibilidades de escolha entre diferentes metodologias de AICV constituem pontos de grande sensibilidade dos estudos de ACV, os quais devem ser detalhadamente avaliados e descritos, de forma a se evitar resultados enganosos. Além disso, o desenvolvimento de categorias direcionadas especificamente aos impactos das atividades de mineração apresentou-se como uma importante demanda para futuros desenvolvimentos.

## **ABSTRACT**

BUENO, C. **Life Cycle Assessment in Building Construction: Sensitivity Analysis**. Thesis (PhD) – Program of Post Graduation in Architecture and Urbanism – Architecture and Urbanism Institute of Sao Paulo University, Sao Carlos, 2014.

Regarding the evaluation of building systems, the analysis of existing buildings environmental certification systems reveals that there are few tools to evaluate environmental performance objectively and holistically through Life Cycle Analysis (LCA) predominating the product attributes recognition and thus losing the global perspective of impacts. Among the main difficulties encountered in the application of LCA in building systems, lies the lack of inventory data available for building systems in the Brazilian scene, which makes the application of the methodology even more complex and time consuming. In the other hand, international databases provide a considerable amount of information, which are often used for studies addressing the Brazilian context. Thus, this research aimed to answer the following questions: a) whether collected for identical processes, the data available in the international validated databases would lead to results similar to those obtained by studies based on primary data collected in the Brazilian context? b) Are the impact assessment methodologies currently available able to fully and consistently evaluate the main potential impacts derived from the lifecycle of traditional building materials? Therefore, the objective of this research was to perform a sensitivity analysis of the results of a comparative LCA case study to the use of secondary data (provided by European databases) or primary data (collected in the Brazilian context), as well as the use of different Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methodologies, identifying the impact categories of most significant contribution in the evaluation of traditional construction systems, through the application of the methodology in a case study. The results showed that the geographic scope of the data sources and the choice among different LCIA methods are points of high sensitivity of LCA

studies, which must be evaluated and described in detail to avoid misleading conclusions. Furthermore, the development of an LCIA category addressing impacts of mining activities was presented as the main demand for future developments.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1. Introdução e Justificativa .....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 2. Objetivo, Hipótese e Organização da Pesquisa .....</b>	<b>35</b>
2.1. <i>Objetivo geral</i> .....	35
2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	35
2.3. <i>Hipótese</i> .....	36
2.4. <i>Organização da pesquisa</i> .....	36
<b>CAPÍTULO 3. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) .....</b>	<b>39</b>
3.1. <i>Definição de Objetivo e Escopo</i> .....	40
3.1.1. Definição do objetivo.....	40
3.1.2. Definição do escopo .....	44
3.2. <i>Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)</i> .....	57
3.2.1. Identificação de processos dentro das fronteiras do sistema.....	59
3.2.2. Planejamento da coleta de dados .....	64
3.2.3. Coleta de dados de ICV da unidade de processo .....	65
3.2.4. Modelagem do sistema .....	72
3.2.5. Cálculo dos resultados do ICV .....	74
3.3. <i>Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)</i> .....	75
3.3.1. Metodologias de AICV .....	78
3.3.2. Discussão comparativa .....	92
3.4. <i>Interpretação do Ciclo de Vida</i> .....	97
3.4.1. Identificação de questões significativas .....	98
3.4.2. Análise de contribuição .....	99
3.4.3. Avaliação.....	99
3.4.4. Conclusões, limitações e recomendações .....	103

3.4.5. Comunicação .....	104
3.4.6. Revisão crítica .....	106
3.5. <i>Análise de Sensibilidade</i> .....	106
<b>CAPÍTULO 4. Aplicação da ACV em Sistemas de Certificação Ambiental.....</b>	<b>113</b>
<b>CAPÍTULO 5. Metodologia .....</b>	<b>131</b>
5.1. <i>Definições metodológicas da ACV</i> .....	131
5.2. <i>Estudo de caso</i> .....	132
5.3. <i>Análise de sensibilidade</i> .....	134
5.3.1. <i>Coleta de dados primários de inventário e análise de sensibilidade às fontes de dados</i> .....	134
5.3.2. <i>Análise de sensibilidade ao uso de diferentes metodologias de AICV</i> .....	137
5.4. <i>Avaliação de significância das categorias de impacto</i> .....	140
5.5. <i>Discussão dos resultados</i> .....	141
<b>CAPÍTULO 6. Estudo de caso comparativo de ACV de sistemas de vedações externas não-estruturais baseado em dados secundários .....</b>	<b>143</b>
6.1. <i>Objetivo e Escopo</i> .....	145
6.1.1. <i>Definição do objetivo</i> .....	145
6.1.2. <i>Definição do escopo</i> .....	147
6.2. <i>Análise de Inventários de Ciclo de Vida (ICV)</i> .....	161
6.2.1. <i>Identificação de processos dentro das fronteiras do sistema</i> .....	161
6.2.2. <i>Inventários de Ciclo de Vida</i> .....	161
6.3. <i>Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)</i> .....	163
6.4. <i>Interpretação do ciclo de vida</i> .....	182
6.4.1. <i>Identificação das questões significativas</i> .....	182
6.4.2. <i>Avaliação do estudo</i> .....	184
6.4.3. <i>Conclusões, Limitações e Recomendações</i> .....	186

<b>CAPÍTULO 7. Análise de Sensibilidade .....</b>	<b>189</b>
7.1. Sensibilidade à variação de fontes de dados .....	189
7.2. Sensibilidade à variação de metodologias de AICV .....	204
7.3. Avaliação de significância das categorias de impacto .....	217
<b>CAPÍTULO 8. Considerações Finais .....</b>	<b>221</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>229</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>237</b>
<b>ANEXO A.</b> Procedimentos de cálculo de transmitância e capacidade térmica .....	237
<b>ANEXO B.</b> Inventários de ciclo de vida dos principais fluxos baseados em dados secundários .....	241
<b>ANEXO C.</b> Modelos de questionário para coleta de dados primários .....	255
<b>ANEXO D.</b> Dados primários coletados para os processos de maior contribuição .....	261

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Fases de uma ACV .....	30
<b>Figura 2:</b> Ciclo de vida do produto .....	39
<b>Figura 3:</b> Fluxograma esquemático da metodologia CML.....	80
<b>Figura 4:</b> Fluxograma esquemático da metodologia Eco-indicator 99 .....	81
<b>Figura 5:</b> Fluxograma esquemático da metodologia EDIP .....	84
<b>Figura 6:</b> Fluxograma esquemático da metodologia IMPACT 2002+.....	86
<b>Figura 7:</b> Fluxograma esquemático da metodologia LIME.....	87
<b>Figura 8:</b> Fluxograma esquemático da metodologia ReCiPe.....	89
<b>Figura 9:</b> Fluxograma esquemático da metodologia TRACI .....	90
<b>Figura 10:</b> Fluxograma esquemático da metodologia IMPACT WORLD+ .....	92
<b>Figura 11:</b> Detalhamento Construtivo da Alvenaria de Blocos Cerâmicos: Corte Vertical .....	148
<b>Figura 12:</b> Detalhamento Construtivo da Alvenaria de Blocos de Concreto: Corte Vertical .....	149
<b>Figura 13:</b> Detalhamento Construtivo da Parede de Concreto Leve: Corte Vertical .....	149
<b>Figura 14:</b> Detalhamento Construtivo do Sistema <i>steel framing</i> com placas de gesso internas e placa cimentícia externa: Corte Vertical .....	150
<b>Figura 15:</b> Detalhamento Construtivo do Sistema <i>steel framing</i> com placas cimentícias interna e externa: Corte Vertical .....	151
<b>Figura 16:</b> Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da alvenaria de blocos cerâmicos .....	153
<b>Figura 17:</b> Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da alvenaria de blocos de concreto .....	154
<b>Figura 18:</b> Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da parede de concreto leve .....	155
<b>Figura 19:</b> Processos elementares e fronteiras do sistema do produto do sistema steel framing	

com fechamento interno em gesso acartonado e externo em placa cimentícia.....	156
<b>Figura 20:</b> Processos elementares e fronteiras do sistema do produto do sistema <i>steel framing</i> com fechamento interno e externo em placas cimentícias.....	157
<b>Figura 21:</b> Fornecimento de energia elétrica no Brasil, por fonte.....	162
<b>Figura 22:</b> Resultados da AICV para <i>endpoint</i> pela metodologia ReCiPe 2008.....	164
<b>Figura 23:</b> Resultados de AICV normalizados e agregados.....	166
<b>Figure 24:</b> Impactos potenciais das alternativas para Radiação Ionizante pela metodologia ReCiPe 2008.....	167
<b>Figura 25:</b> Processos de maior contribuição para Radiação Ionizante no ciclo de vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	167
<b>Figure 26:</b> Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas pela metodologia ReCiPe 2008.....	168
<b>Figure 27:</b> Processos de maior contribuição para Mudanças Climáticas no ciclo de vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	168
<b>Figura 28:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo agrícola e urbano pela metodologia ReCiPe 2008.....	169
<b>Figura 29:</b> Processos de maior contribuição para Ocupação do Solo Agrícola e Urbano no ciclo de vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	170
<b>Figura 30:</b> Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Recursos Fósseis e Metais pela metodologia ReCiPe 2008.....	171
<b>Figure 31:</b> Processos de maior contribuição para Esgotamento de Recursos Fósseis no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008.....	172
<b>Figura 32:</b> Processos de maior contribuição para Esgotamento de Metais no ciclo de vida Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	172

<b>Figura 33:</b> Impactos potenciais das alternativas para Toxicidade Humana pela metodologia ReCiPe 2008.....	173
<b>Figura 34:</b> Processos de maior contribuição para Toxicidade Humana no ciclo de vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	174
<b>Figure 35:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Marinha e de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008 .....	174
<b>Figure 36:</b> Processos de maior contribuição para Ecotoxicidade Marinha e em Água Doce no ciclo de vida Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	175
<b>Figure 37:</b> Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização Marinha e de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008 .....	175
<b>Figure 38:</b> Processos de maior contribuição para Eutrofização Marinha no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008 .....	176
<b>Figura 39:</b> Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Água pela metodologia ReCiPe 2008.....	176
<b>Figure 40:</b> Processos de maior contribuição para Esgotamento de Água no ciclo de vida das paredes de concreto leve pela metodologia Recipe 2008.....	177
<b>Figura 41:</b> Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.....	178
<b>Figure 42:</b> Processos de maior contribuição para Formação de Partículas no ciclo de vida do sistema <i>steel framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.....	178
<b>Figura 43:</b> Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.....	179
<b>Figura 44:</b> Processos de maior contribuição para Formação de Oxidantes Fotoquímicos no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008.....	179

<b>Figura 45:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.....	180
<b>Figura 46:</b> Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.....	180
<b>Figura 47:</b> Processos de maior contribuição Ecotoxicidade Terrestre no ciclo de vida do sistema <i>steel framing</i> com placas cimentícias interna e externa pela metodologia ReCiPe 2008.....	181
<b>Figura 48:</b> Processos de maior contribuição Acidificação Terrestre no ciclo de vida das paredes de concreto leve pela metodologia ReCiPe 2008.....	182
<b>Figura 49:</b> Resultados da AICV <i>endpoint</i> pela metodologia ReCiPe 2008.....	190
<b>Figura 50:</b> Resultados de AICV normalizados e agregados .....	191
<b>Figura 51:</b> Impactos potenciais das alternativas para Radiação Ionizante pela metodologia ReCiPe 2008.....	193
<b>Figure 52:</b> Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas pela metodologia ReCiPe 2008.....	194
<b>Figura 53:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo agrícola pela metodologia ReCiPe 2008.....	195
<b>Figura 54:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo urbano pela metodologia ReCiPe 2008.....	196
<b>Figura 55:</b> Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Recursos Fósseis pela metodologia ReCiPe 2008 .....	197
<b>Figura 56:</b> Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Metais pela metodologia ReCiPe 2008.....	197
<b>Figura 57:</b> Impactos potenciais das alternativas para Toxicidade Humana pela metodologia ReCiPe 2008.....	198
<b>Figure 58:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.....	199

<b>Figure 59:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Marinha pela metodologia ReCiPe 2008.....	199
<b>Figure 60:</b> Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.....	200
<b>Figure 61:</b> Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização Marinha pela metodologia ReCiPe 2008.....	200
<b>Figura 62:</b> Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Água pela metodologia ReCiPe 2008.....	201
<b>Figura 63:</b> Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.....	202
<b>Figura 64:</b> Impactos potenciais das alternativas para Formação de Oxidantes Fotoquímicos pela metodologia ReCiPe 2008 .....	202
<b>Figura 65:</b> Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.....	203
<b>Figura 66:</b> Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.....	204
<b>Figura 67:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Mudanças Climáticas.....	205
<b>Figura 68:</b> Análise de Contribuição da categoria Mudanças Climáticas para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos .....	206
<b>Figura 69:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Depleção de Ozônio .....	207
<b>Figura 70:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Formação de Ozônio Fotoquímico .....	208
<b>Figura 71:</b> Análise de Contribuição da categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos .....	209
<b>Figure 72:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Acidificação .....	209
<b>Figura 73:</b> Análise de Contribuição da categoria Acidificação para a Alvenaria de Blocos	



Cerâmicos .....	210
<b>Figura 74:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Eutrofização.....	210
<b>Figure 75:</b> Análise de Contribuição da categoria Eutrofização para a Alvenaria de Blocos	
Cerâmicos .....	212
<b>Figura 76:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Ecotoxicidade Terrestre.....	212
<b>Figura 77:</b> Análise de Contribuição da categoria Ecotoxicidade Terrestre para a Alvenaria de Blocos	
Cerâmicos .....	213
<b>Figura 78:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Ecotoxicidade Aquática .....	213
<b>Figura 79:</b> Análise de Contribuição da categoria Ecotoxicidade Aquática para a Alvenaria de Blocos	
Cerâmicos .....	214
<b>Figura 80:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Toxicidade Humana.....	214
<b>Figura 81:</b> Análise de Contribuição da categoria Toxicidade Humana para a Alvenaria de Blocos	
Cerâmicos .....	215
<b>Figura 82:</b> Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Depleção de Água.....	217
<b>Figura 83:</b> Resultados Normalizados de AICV pelo método ReCiPe .....	218

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Países de origem das principais metodologias de AICV .....	78
<b>Tabela 2:</b> Categorias para Análise Comparativa de Sistemas de Certificação .....	115
<b>Tabela 3:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação LEED .....	117
<b>Tabela 4:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação AQUA .....	118
<b>Tabela 5:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação CASBEE .....	119
<b>Tabela 6:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação Green Star .....	120
<b>Tabela 7:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação SBTool .....	121
<b>Tabela 8:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação Green Globes .....	121
<b>Tabela 9:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação DGNB .....	122
<b>Tabela 10:</b> Avaliação de materias e componentes construtivos no sistema de certificação BREEAM .....	122
<b>Tabela 11:</b> Quadro de síntese do estado atual da implementação da ACV nos principais sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios .....	128
<b>Tabela 12:</b> Unidades dos Indicadores das categorias de impacto entre as metodologias midpoint estudadas .....	140
<b>Tabela 13:</b> Fatores de conversão para harmonização de unidades.....	141
<b>Tabela 14:</b> Transmitância Térmica e Capacidade Térmica das alternativas comparadas.....	160

<b>Tabela 15:</b> Resultados de AICV em nível <i>midpoint</i> pela metodologia ReCiPe 2008 .....	165
<b>Tabela 16:</b> Resultados de AICV em nível <i>midpoint</i> pela metodologia ReCiPe 2008 .....	192
<b>Tabela A1:</b> Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Alvenaria de Blocos Cerâmicos.....	239
<b>Tabela A2:</b> Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Alvenaria de Blocos de Concreto.....	239
<b>Tabela A3:</b> Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Parede de Concreto Leve.....	239
<b>Tabela A4:</b> Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas de gesso acartonado internas e placas cimentícias externas. ....	240
<b>Tabela A5:</b> Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias interna e externa.....	240
<b>Tabela B1:</b> Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Alvenaria de Blocos Cerâmicos .....	241
<b>Tabela B2:</b> Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Alvenaria de Blocos de Concreto .....	243
<b>Tabela B3:</b> Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Parede de Concreto Leve .....	245
<b>Tabela B4:</b> Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas de gesso acartonado internas e placas cimentícias externas.....	247
<b>Tabela B5:</b> Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida do Sistema <i>Steel Framing</i> com placas cimentícias internas e externas.....	251
<b>Tabela C1:</b> Questionário para coleta de dados: Processo de produção de blocos cerâmicos.....	255
<b>Tabela C2:</b> Questionário para coleta de dados: Processo de produção de cimento Portland .....	256
<b>Tabela C3:</b> Questionário para coleta de dados: Processo de produção de clínquer .....	257
<b>Tabela C4:</b> Questionário para coleta de dados: Processo de produção de Fibrocimento.....	258

<b>Tabela C5:</b> Questionário para coleta de dados: Processo de produção de MDF.....	259
<b>Tabela D1:</b> Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Blocos Cerâmicos.....	261
<b>Tabela D2:</b> Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Cimento Portland.....	262
<b>Tabela D3:</b> Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Fibrocimento.....	264
<b>Tabela D4:</b> Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de MDF .....	265

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, a necessidade de respeitar os princípios do desenvolvimento sustentável, bem como os novos modelos econômicos, mudaram a expectativa em relação à durabilidade das obras de construção, e introduziram o planejamento de vida útil do processo (HANS et al., 2008).

O uso de energia e de água pela indústria de materiais de construção, assim como a ocupação do solo por edifícios, sua construção e operação de serviços, são fatores que demonstraram constituir parte dominante do impacto total ambiental causado pela sociedade (ERLANDSSON; BORG, 2003).

Essa preocupação com o desenvolvimento sustentável, principalmente na sua dimensão ambiental, deu origem a dezenas de Métodos de Avaliação de Desempenho Ambiental do Edifício, em diferentes países, com variados critérios e métodos de avaliação e certificação. Tais ferramentas de avaliação de desempenho demonstraram-se eficientes ou não, dependendo das condições em que são aplicadas (PATRICIO; GOUVINHAS, 2004).

No que toca a avaliação dos sistemas construtivos, a análise dos sistemas existentes para certificação ambiental de edifícios revela que há raras ferramentas que avaliam desempenho ambiental objetivamente por ACV, predominando o reconhecimento de *atributos* de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado). O problema da abordagem por atributos é que eles são tratados isoladamente e perde-se a noção global do impacto (SILVA, 2007).

A fim de avaliar o impacto global das medidas de redução de consumo de recursos durante o período de vida de um edifício, a realização de uma avaliação de ciclo de vida do edifício como um todo demonstra ser uma metodologia de grande utilidade (VERBEECK; HENS, 2010b). O seu princípio consiste em analisar as repercussões ambientais de um produto ou atividade, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas, energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado (SOARES et al., 2006).

Existem diversos métodos e ferramentas para avaliação ambiental, alguns especificamente desenvolvidos como ferramentas de seleção, outros que podem funcionar como tal, mesmo sem terem sido originalmente criados com este objetivo. A ampliação do leque de preocupações ambientais levou a consideração de emissões de resíduos e de uso e depleção de recursos naturais, que deveriam ser incorporados em uma estrutura de avaliação mais abrangente. Neste contexto, a ACV emergiu como um método reconhecido e que foi a base para a criação de diversas ferramentas de avaliação. Ao mesmo tempo, a complexidade dos produtos da construção civil, incluindo os materiais, sistemas, subsistemas, e as inúmeras possibilidades de combinação destes para a constituição de uma edificação, criou produtos mais complexos do que os bens de consumo que vinham sendo avaliados pela ACV (JOHN et al, 2006).

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), de acordo com a NBR ISO 14040 (2008), é a compilação e a avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida considerando, portanto, este ciclo de forma holística.

A ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) é aplicável a todos os níveis do sistema no setor da construção. Duas abordagens principais da ACV para tais aplicações podem ser observadas: uma abordagem “de baixo para cima”, centrada na seleção de materiais de construção, e uma abordagem “de cima para baixo”, que considera todo o edifício como ponto de partida para futuras melhorias (ERLANDSSON; BORG, 2003).

As fronteiras de análise devem considerar as etapas de extração de matérias-primas, transporte, fabricação, uso e descarte (o ciclo de vida). Esse procedimento permite uma avaliação científica da situação, além de facilitar a localização de eventuais mudanças associadas às diferentes etapas do ciclo que resultem em melhorias no seu perfil ambiental.

Sob a ótica ambiental, ela estabelece inventários tão completos quanto possível do fluxo de matéria (e energia) para cada sistema e permite a comparação desses balanços entre si, sob a forma de impactos ambientais (SOARES *et al*, 2006). O ciclo de vida de um edifício inclui a produção

de materiais, construção, operação, manutenção e desmontagem do edifício, e gestão de resíduos (GUSTAVSSON; JOELSSON, 2010).

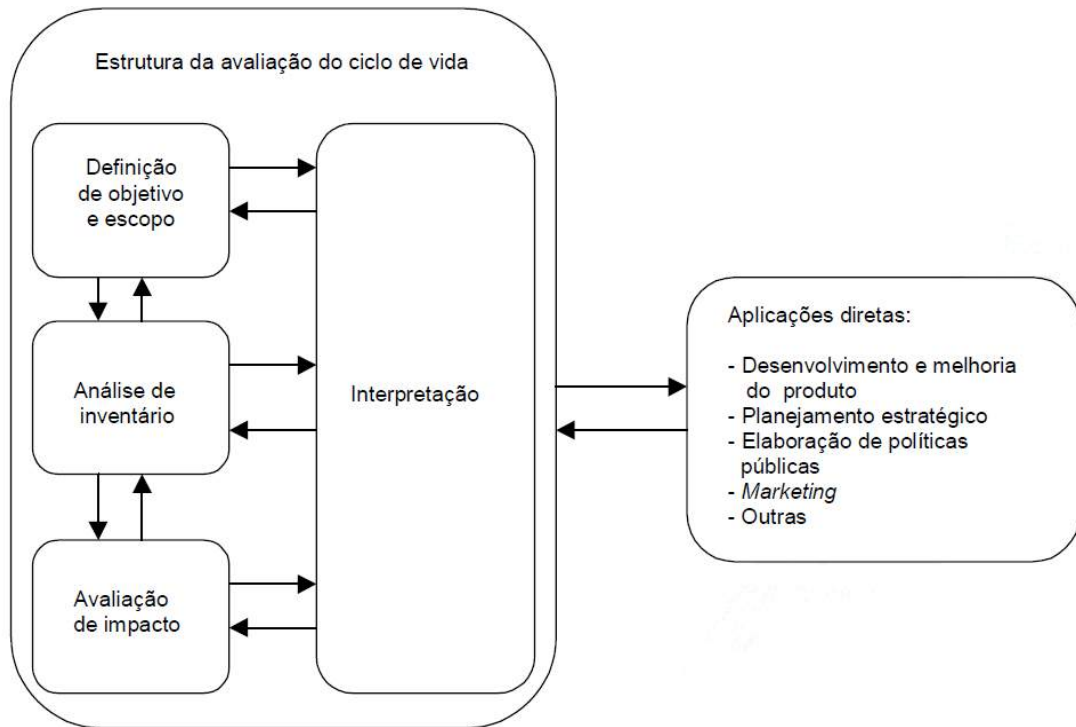
A ACV foi desenvolvida principalmente para a concepção de produtos com baixo impacto ambiental. Como produtos, os edifícios são especiais porque têm uma vida relativamente longa, sofrem constantes alterações, muitas vezes têm funções múltiplas, contêm muitos componentes diferentes, são produzidos localmente, são normalmente únicos, causam impacto local, são integrados com a infra-estrutura, etc., portanto, as fronteiras de seu sistema não são claras (BRIBIÁN *et al*, 2009).

A ACV é hoje normalizada por um conjunto de normas da série NBR ISO 14040. No Brasil, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) estabelece os princípios gerais e a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) aborda a definição de objetivos e escopo, análise de inventários de ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e interpretação. No plano internacional, às quatro normas citadas, são acrescentadas a ISO/TR 14047 (ISO/TR, 2003), que apresenta exemplos de aplicação, a ISO/TS 14048 (ISO/TS, 2002), que considera o formato de apresentação de dados, e, finalmente, a ISO/TR 14049 (ISO/TR, 2000), que fornece exemplos de aplicação especificamente à definição de objetivos (SOARES *et al.*, 2006).

De acordo com a norma NBR 14040 (ABNT, 2009a), a ACV deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 1.

Chevalier e Le Teno (1996) listam algumas das hipóteses que devem ser consideradas para a realização de uma ACV e analisam suas consequências sobre o significado dos resultados que elas produzem:

- **Estabilidade no tempo:** A primeira suposição feita em uma ACV é considerar o sistema de produção como um sistema estável no tempo. Esta hipótese permite que se obtenha apenas um retrato instantâneo do ciclo de vida do produto.



**Figura 01: Fases de uma ACV.** Fonte: NBR 14040 (2008).

- **Separabilidade:** O método de ACV também assume que o sistema desenhado em torno de um produto é completamente independente de outros produtos fora do sistema.
- **Precisão:** Em terceiro lugar, supõe-se que nenhum fluxo pode ter mais de um valor exato.
- **Estado de equilíbrio:** Na maioria das vezes, o risco não é avaliado na ACV, o pressuposto aqui é que o sistema do produto está em estado de equilíbrio.
- **Modelo mundial, pontual e contínuo:** Supõe-se que todos os fluxos ambientais veem e voltam para a mesma fonte. O modelo de mundo também assume reagir continuamente a solicitações contínuas.

O desenvolvimento de estudos de ACV em edificações requer algumas alterações devidas, entre outros aspectos, às diferenças apresentadas com relação ao ciclo de vida de produtos industriais que envolvem, normalmente, um curto espaço de tempo. Obras de engenharia, ao contrário de produtos com vida útil de semanas ou meses, são, em geral, caracterizadas por uma vida útil que se estende por alguns anos, décadas ou mesmo séculos (SOARES et al., 2006). Devido



ao tempo de vida relativamente longo dos produtos de construção, a hipótese de estabilidade no tempo também pode produzir resultados altamente incertos (VERBEECK; HENS, 2010a).

Avaliação do ciclo de vida (ACV) constitui uma parte importante dos métodos de avaliação e certificação do edifício. Estudos anteriores como os de ERLANDSSON e BORG (2003), NIBEL et al. (2005), e HAAPIO e VIITANIEMI (2008) permitiram que ferramentas de ACV para edifícios fossem revistas, no entanto, existem algumas lacunas em relação a indicadores ambientais, complexidade de apresentação dos resultados para usuários, simplificação e adaptação para fins diversos (por exemplo, as fases iniciais do projeto) (BRIBIÁN et al., 2009).

Para minimizar a dificuldade de aplicação das metodologias convencionais de ACV ao setor da construção civil, Chevalier e Le Teno (1996), propuseram alguns requisitos especiais para a ACV de sistemas construtivos:

- Regras especiais de fronteira do sistema devem ser definidas para forçar a separabilidade;
- Processos específicos para sistemas construtivos devem ser modelados;
- A hipótese de estabilidade no tempo deve ser forçada ou cancelada;
- A hipótese de precisão tem que ser cancelada;
- A qualidade dos dados e as relações entre eles devem ser documentadas;
- A lista de estressores de impacto deve ser aberta aos critérios definidos pelo utilizador, de acordo com um processo de negociação bem documentado;
- Assistência deve ser prestada aos utilizadores para a gestão dos resultados;
- Um programa de computador deve ser utilizado para auxiliar todo o processo.

Algumas metodologias internacionais devem ser consideradas para análise e aplicação neste trabalho por sua grande representatividade de aplicação no âmbito internacional, como é o caso das EPDs (*Environmental Product Declarations* ou Declarações Ambientais de Produtos).

As EPDs, utilizando a norma francesa NFP01-010 (AFNOR, 2004) e baseando-se na análise de ciclo de vida dos materiais, oferecem uma análise ambiental e sanitária dos produtos industrializados, inclusive sistemas construtivos. Essas EPDs foram criadas para permitir a

comparação e escolha de produtos, no entanto, apresentam limites de utilização, uma vez que fornecem informações que não permitem a comparação direta para a escolha de componentes de construção, primeiramente, porque os materiais de construção em geral, não têm as mesmas funções e as mesmas aplicações em um edifício. Além disso, as informações fornecidas pelas EPDs são complexas demais para serem tratadas "à mão" (LEMAIRE et al., 2007). As EPDs buscam a comparação de sistemas dentro de uma mesma categoria e unidade funcional de construção e então estabelecem uma listagem padrão de critérios de emissão e consumo para a comparação para tais produtos dentro de seu ciclo de vida, de forma a uniformizar sua avaliação.

Entre os estudos ambientais nacionais relacionados a sistemas construtivos, e que serão considerados como base para o desenvolvimento deste trabalho, é importante ressaltar o trabalho apresentado por Kulay, Hansen e Silva (2010), o qual trata do inventário do ciclo de vida do porcelanato esmaltado. Outro estudo importante refere-se à pesquisa aplicada a processos produtivos de pisos e tijolos cerâmicos de Soares e Pereira (2004). Os aspectos considerados no estudo de Soares e Pereira (2004) enfatizam, essencialmente, a qualidade ambiental, não levando em conta a saúde e a segurança ocupacional, nem aspectos de qualidade de produto, tendo como estrutura básica estudada o processo produtivo (a fábrica) de pisos e tijolos (SOARES et al., 2006).

É importante notar que, a despeito de algumas pesquisas aqui citadas, não há trabalhos de abordagem sobre o tema no Brasil que estejam finalizados de forma conclusiva, no que tange a aplicação da ACV para avaliação de sistemas construtivos, principalmente visando à utilização desses estudos para a comparação e escolha de sistemas construtivos na fase de concepção do edifício.

Neste trabalho será utilizado, para embasamento do estudo de ACV, o roteiro de aplicação da metodologia proposto pelo *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* (EC-JRC, 2010a), que se baseia nas normas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b), com aprofundamento de conceitos e estratégias de aplicação.

Para melhor justificar a escolha das metodologias para a AICV do estudo de caso proposto neste trabalho, na etapa de revisão bibliográfica será realizado um levantamento do estado da arte e breve discussão comparativa das principais metodologias de AICV disponíveis e validadas, de forma a avaliar suas potencialidades e fragilidades de aplicação em estudos direcionados a sistemas construtivos no contexto brasileiro.



## CAPÍTULO 2. OBJETIVO, HIPÓTESE E ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

### 2.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar a sensibilidade dos resultados de um estudo comparativo de ACV às diversas escolhas assumidas durante a elaboração do escopo do estudo, como fontes de dados de inventário e diferentes metodologias de AICV, identificando as categorias de impacto de contribuição mais significativa na avaliação de sistemas construtivos tradicionais, pela aplicação da metodologia em um estudo de caso em sistemas de vedação externa não-estrutural.

### 2.2. Objetivos Específicos

Mediante o objetivo geral deste trabalho, descrito acima, buscou-se a delimitação de objetivos específicos afim de melhor direcionar o desenvolvimento da metodologia de trabalho.

Desta forma os objetivos específicos deste trabalho englobam:

- Avaliar a sensibilidade dos resultados de um estudo comparativo de ACV à utilização unicamente de bases de dados validadas disponíveis, as quais provêm dados secundários médios de processos baseados no contexto europeu, ou utilizando-se adicionalmente dados primários complementares (coletados no contexto brasileiro específico do estudo) para os processos de maior representatividade de impacto nos resultados finais;
- Avaliar a sensibilidade dos resultados à utilização de diferentes metodologias de AICV;
- Identificar as categorias de impacto, dentro das metodologias aplicadas, que apresentem impactos potenciais mais significativos para o caso específico da avaliação de sistemas de vedação tradicionais e que precisem, portanto, de um maior desenvolvimento específico, buscando ampliar tais conclusões para o campo da construção civil de forma mais abrangente;
- Avaliar se, nos estudos comparativos de sensibilidade apresentados acima, a melhor alternativa – do ponto de vista ambiental – de sistema de vedação externa não-estrutural, dentre

as alternativas comparadas no estudo de caso, se mantém a mesma, ou se pode haver variações nas conclusões do estudo, quando condições diferentes são assumidas nos critérios de coleta de dados e de escolha de metodologias de AICV.

### **2.3. Hipótese**

O presente trabalho será pautado na hipótese de que a alteração de algumas definições-chave de Escopo assumidas em um estudo de ACV – como as fontes de dados e escolha da metodologia de AICV – pode alterar substancialmente seus resultados finais, podendo levar a conclusões enganosas. Dessa forma, tais definições de Escopo devem constituir o fator de maior sensibilidade nos resultados finais de um estudo de ACV.

### **2.4. Organização da pesquisa**

O presente projeto de pesquisa pode ser dividido em seis etapas distintas:

- i) Definições metodológicas da ACV;
- ii) Estudo de caso, com a aplicação comparativa da metodologia de ACV em cinco tipologias de vedações externas não-estruturais, baseado majoritariamente em dados secundários previamente validados;
- iii) Coleta e tratamento de dados primários para os processos elementares considerados de maior contribuição para impactos ambientais potenciais pelo mesmo estudo, e análise de sensibilidade dos resultados à utilização de dados primários e secundários;
- iv) Análise de sensibilidade dos resultados do estudo de caso inicial, baseado em dados secundários à utilização das diferentes metodologias de AICV;
- v) Identificação das categorias de impacto, dentre as metodologias de AICV aplicadas, que demonstrarem maior significância na avaliação de sistemas construtivos

tradicionais de vedações externas e de questões chave para futuro desenvolvimento;

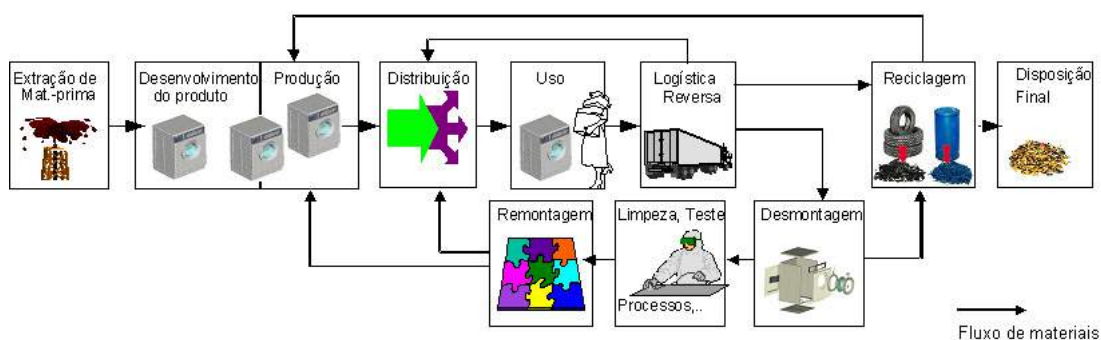
vi) Discussão dos resultados e conclusões.





### CAPÍTULO 3. A AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), de acordo com a NBR ISO 14040 (2008), é a compilação e a avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida, considerando este ciclo de forma holística. A Figura 2 representa este ciclo, no qual são observados estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição ou geração da matéria-prima a partir de recursos naturais até a disposição final.



**Figura 2: Ciclo de vida do produto.** Fonte: FRANKE (2004)

Segundo a NBR ISO 14044 (2009) um estudo de ACV deve ser composto por quatro fases:

- a. Definição de objetivo e escopo;
- b. Análise de inventário;
- c. Avaliação de impactos;
- d. Interpretação.

O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente dependendo do objetivo do estudo em particular.

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é a segunda fase de uma ACV. Trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão.

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV e tem por objetivo prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do estudo de ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.

Neste trabalho, nos itens subsequentes, será utilizado, para embasamento e detalhamento das fases de um estudo de ACV, o roteiro de aplicação da metodologia proposto pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a), que se baseia nas normas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b). Para a etapa de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), as diversas metodologias existentes para avaliação de impacto serão brevemente apresentadas e discutidas, com base em informações obtidas no ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b).

### **3.1. Definição de Objetivo e Escopo**

#### 3.1.1. Definição do objetivo

A definição de objetivos é a primeira fase de qualquer ACV, independentemente se o estudo é limitado ao desenvolvimento de um único conjunto de dados de uma unidade de processo ou é um estudo de ACV completo de uma afirmação comparativa para ser publicada.

A definição do objetivo é essencial para todas as outras fases da ACV:

- Orienta todos os aspectos detalhados da definição do escopo, que por sua vez, define a estrutura para os trabalhos de ACV e ICV;
- O controle de qualidade do trabalho é realizado tendo em vista os requisitos que foram determinados no objetivo do trabalho;

- Se o trabalho vai além de um estudo de ICV, os resultados finais da ACV são avaliados e interpretados em estreita relação com o objetivo do estudo.

Seis aspectos devem ser abordados e documentados durante a definição dos objetivos:

- Aplicação pretendida dos resultados;
- Limitações devido ao método, suposições e cobertura de impacto;
- Razões para a realização do estudo e contexto de decisão;
- Público alvo do estudo;
- Se é um estudo comparativo a ser divulgado ao público;
- Encarregados do estudo e outros atores influentes.

Finalmente, a fim de ajudar na definição do escopo, especialmente em relação à identificação da estrutura de modelagem e da abordagem metodológica do ICV deve ser realizada uma classificação do contexto de decisão do estudo.

#### 3.1.1.1. Aplicações Pretendidas

Em estudos de apoio à tomada de decisão e contabilidade/monitoramento, muitas vezes, várias aplicações separadas destinam-se a um mesmo estudo ou a aplicação é combinada com o custo, fatores sociais, ou outras informações ambientais complementares. Diferentes aplicações requerem diferentes abordagens metodológicas para a modelagem do ICV.

Estudos puramente metodológicos, sem relação com o suporte à decisão ou contabilidade/controle sobre o objeto de estudo, devem ser explicitados em seu objetivo de forma que não corra o risco de serem considerados pelo público como uma base para tomada de decisão relativa a produtos.

### 3.1.1.2. Limitações do método, suposições e impactos

Suposições adotadas ou cobertura de impacto limitada devem ser claramente identificadas e, mais tarde, relatadas de forma proeminente, uma vez que podem interferir diretamente nos resultados do estudo.

Estudos com cobertura de impacto limitada têm limitações nas definições iniciais que podem resultar em incapacidade para comparações. Outras limitações metodológicas referem-se, por exemplo, às limitações que são inerentes ao ACV convencional ou podem ser causadas pela abordagem específica do método escolhido.

Suposições sobre as características do sistema analisado ou sobre cenários específicos, também podem limitar a usabilidade e a reprodutibilidade dos resultados.

Estudos direcionados a nichos de mercado específicos podem limitar inicialmente os tipos de produtos a serem incluídos no estudo de ACV, embora, a partir de uma perspectiva puramente técnica, também produtos fora do nicho específico precisariam ser incluídos para evitar uma comparação potencialmente enganosa.

### 3.1.1.3. Motivos para realização do estudo, contexto de decisão e público-alvo

Definir os direcionadores e motivações do estudo, e, especialmente, identificar o contexto de decisão são passos importantes do estudo. O contexto de decisão é um critério fundamental para determinar os métodos mais apropriados para o modelo de ICV, e também determina diretamente outros aspectos-chave da definição do escopo, das decisões a serem tomadas durante a coleta de dados e modelagem, o cálculo dos resultados da avaliação de impacto, e, finalmente, para estudos de ACV, também a interpretação dos resultados.

A determinação do público alvo, entre outras coisas, ajuda a identificar as necessidades de revisão crítica e a forma adequada de apresentação do relatório e nível técnico de comunicação.

#### 3.1.1.4. Comparações destinadas a serem divulgadas ao público

Nos casos em que o estudo de ACV tem como objetivo comparar duas ou mais alternativas para divulgação pública deve-se afirmar de forma clara que "o estudo inclui uma afirmação comparativa e está previsto para ser divulgado ao público". Este aspecto implica uma série de requisitos adicionais obrigatórios nos termos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) sobre a execução, revisão de documentação e relatórios do estudo ACV, devido às consequências potenciais dos resultados para, por exemplo, empresas externas, instituições, consumidores, etc.

Ainda, de acordo com a norma ISO 14044 (ABNT, 2009b), um estudo de ICV por si só não deve ser usado para afirmações comparativas destinadas a serem divulgadas ao público.

#### 3.1.1.5. Encarregados do estudo e outros atores influentes

A definição de objetivo deve identificar quem encomendou o estudo ICV/ACV e todos os financiadores e/ou outras organizações que tenham qualquer influência relevante sobre o estudo deve ser nomeados, o que inclui os especialistas em ACV que realizarão o estudo.

#### 3.1.1.6. Classificação do contexto de decisão como situação A, B ou C

De acordo com o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a) os contextos de decisão possíveis para um estudo de ACV podem ser divididos em três tipos, cada qual com suas peculiaridades e requisitos específicos:

- Situação A - "Apoio à decisão em micro-escala": apoio à decisão, normalmente referente produtos, mas também às etapas do processo do produto, empresas e outros sistemas, sem consequências no sistema de fundo ou em outros sistemas, ou consequências exclusivamente de pequena escala.

- Situação B - "Apoio à decisão em meso/macro-escala": Apoio à decisão para estratégias com grandes consequências no sistema de fundo ou outros sistemas. A decisão analisada por si só é grande o suficiente para resultar, por mecanismos de mercado, em mudanças estruturais de capacidade instalada em pelo menos um processo fora do sistema de primeiro plano analisado.
- Situação C - "Contabilidade": De um ponto de vista de tomada de decisão, realiza-se uma retrospectiva de contabilidade/documentação do que aconteceu (ou vai acontecer com base em previsões), sem nenhum interesse em quaisquer consequências adicionais que o sistema analisado possa ter no sistema de fundo ou em outros sistemas.

#### 3.1.1.7. Extensão do objetivo (opcional)

Em diversos casos é comum considerar a possibilidade de alargar o objetivo do estudo ICV/ACV para outras utilizações/aplicações, a fim de se beneficiar de possíveis sinergias. Esta extensão do objetivo deve ser prevista inicialmente, uma vez que, desta forma, normalmente significa pouco esforço adicional, enquanto uma expansão tardia pode exigir recursos adicionais substanciais para a coleta de dados faltantes, ou a necessidade de remodelação do sistema.

#### 3.1.2. Definição do escopo

O escopo de um estudo de ICV/ACV é sempre decorrente de seu objetivo, e os seguintes itens do escopo precisam ser claramente descritos/definidos:

- O(s) tipo(s) de entrega(s) do estudo de ACV, alinhados com a aplicação pretendida;
- O(s) sistema(s) ou processo(s) que serão estudados e suas funções, unidade funcional, e fluxo(s) de referência;

- Estrutura da modelagem do ICV e forma de manipulação de produtos ou processos multifuncionais;
- Fronteiras do sistema, requisitos de completeza e regras de corte;
- Categorias de impacto da AICV a serem cobertas e seleção de métodos específicos de AICV a serem aplicados, bem como - se incluído - normalização e ponderação de dados;
- Outros requisitos de qualidade de dados de ICV com relação à representatividade e adequação geográfica, tecnológica e temporal;
- Tipos, qualidade e fontes das informações e dados requeridos, e, especialmente, a precisão necessária e incertezas máximas permitidas;
- Requisitos especiais para comparações entre sistemas;
- Identificação dos Mix de energia utilizados para cada um dos processos dentro do ciclo de vida;
- Detalhamento do tipo de transporte utilizado para distribuição dos produtos e transporte de resíduos;
- Descrição dos cenários de fim de vida, gestão de resíduos, etc.;
- Identificação de necessidade de revisão crítica;
- Planejamento do relatório de resultados.

Dois requisitos transversais no estudo de ACV devem ser considerados por sua grande importância: a) Consistência dos métodos, hipóteses e dados e, b) Reprodutibilidade.

Todos os métodos e premissas devem ser aplicados de forma suficientemente consistente para todas as fases do ciclo de vida, processos, parâmetros e fluxos do sistema analisado, em conformidade com o objetivo do estudo. Isto também se aplica aos métodos de AICV e fatores de ponderação e normalização, se incluídos. Todos os dados do ICV devem ser suficientemente

consistentes em termos de exatidão, precisão e integridade, e quaisquer inconsistências devem ser documentadas.

A reprodutibilidade de um estudo de ACV é uma avaliação qualitativa da medida em que a documentação dos métodos, suposições e dados/fontes de dados permitiria que um praticante independente reproduzisse os resultados do estudo e quaisquer conclusões ou recomendações formuladas.

#### 3.1.2.1. Tipos de entregas e aplicações pretendidas

Os tipos mais comumente produzidos de resultados são os seguintes, dos mais básicos aos mais complexos:

- Estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e/ou conjunto de dados;
- Resultados dos estudos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e/ou conjunto de dados (incluindo estudos comparativos ou não-comparativos);
- Modelo detalhado do ICV do sistema analisado.

É importante salientar que, estudos comparativos a serem divulgados ao público deverão ser sempre estudos completos de ACV, com todas as suas etapas.

#### 3.1.2.2. Função, Unidade Funcional e Fluxo de referência

Duas definições muito importantes para o estabelecimento de um estudo de ACV são “Fluxo de referência” e “Unidade Funcional”.

O fluxo de referência é o fluxo (ou fluxos em caso de processos multifuncionais) ao qual todos os outros fluxos de entrada e de saída quantitativamente se referem, ou seja, é o fluxo quantitativo referente à unidade funcional definida.



Unidade Funcional é a unidade de referência para a quantificação do desempenho de um sistema de produto. É a unidade de referência com base na qual será realizado todo o estudo de ACV.

Uma ou mais funções e unidades funcionais mensuráveis de cada um dos sistemas devem ser claramente identificadas. Muitas vezes, o objetivo do estudo de ICV/ACV determina qual das funções individuais de um sistema estará em foco e qual será o objeto analisado, ou se o sistema todo é objeto da análise.

O primeiro passo para a definição da unidade funcional é a identificação e quantificação das propriedades mensuráveis relevantes e do desempenho técnico/funcional do sistema.

Os aspectos qualitativos relevantes também devem ser documentados, uma vez que podem ser decisivos para a aceitação do produto pelos usuários. Isso é necessário para assegurar que os produtos a serem comparados são realmente comparáveis.

A definição da unidade funcional deve, portanto, incluir os aspectos quantitativos e qualitativos chave para evitar subjetividade na definição da equivalência de produtos. No desenvolvimento de produtos, os conceitos de “propriedades obrigatórias” e “propriedades de posicionamento” são algumas vezes utilizados. As propriedades obrigatórias são características que o produto deve possuir para que o usuário perceba-o como um produto funcionalmente útil (incluindo requisitos legais). As propriedades de posicionamento, por outro lado, são características opcionais que podem ser utilizadas para posicionar o produto no mercado de forma mais atrativa do que outros produtos similares. A definição quantitativa da função do produto (assim como alguns aspectos qualitativos) será tipicamente baseada nas propriedades obrigatórias do produto, enquanto outros aspectos qualitativos, tipicamente relacionados à percepção do usuário, podem ser identificados dentre as propriedades de posicionamento.

A definição quantitativa da unidade funcional do produto deve ser baseada em normas técnicas sempre que possível e apropriado. No caso de falta de uma norma técnica aplicável e

apropriada, é permitida e requerida a especificação de um meio apropriado, reprodutível e claramente documentado de mensuração da unidade funcional.

Nos casos em que uma unidade funcional relevante não for encontrada, é necessária a identificação quantitativa e qualitativa do fluxo de referência, assim como uma descrição detalhada do produto, a fim de que suas características mais relevantes possam ser identificadas.

Em processos multifuncionais, para cada função uma unidade funcional e/ou fluxo de referência deve ser identificado de forma apropriada, dependendo do tipo de co-funcionalidade/co-produto. Caso contrário, especificações técnicas do processo e suas funções devem ser fornecidas em documentação anexa. Para sistemas ou produtos com apenas uma função relevante (sistemas monofuncionais), a unidade funcional deve ser especificada, juntamente com um fluxo de referência, especificados de forma clara e detalhada. Para sistemas multifuncionais com funções múltiplas e paralelas, devem ser fornecidas especificações técnicas detalhadas, e a unidade funcional correspondente, assim como o fluxo de referência.

Em sistemas com funções alternativas, a função e a unidade funcional mais relevantes devem ser especificadas, assim como o fluxo de referência detalhadamente definido, e especificações técnicas funcionalmente relevantes.

Mais uma vez é importante notar que, para todas as etapas do estudo, requisitos especiais são necessários para comparações entre produtos a serem divulgadas ao público.

### 3.1.2.3. Estrutura de modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Na definição de escopo uma decisão importante deve ser tomada em relação aos princípios e abordagens metodológicas do ICV que serão aplicados na modelagem do sistema. A modelagem pode ser atribucional ou consequencial, e a multifuncionalidade pode ser solucionada por alocação ou expansão/substituição do sistema. Essas escolhas trazem implicações para diversas escolhas futuras, incluindo a forma como os dados de inventário deverão ser coletados e obtidos.

O modelo atribucional de ciclo de vida retrata sua cadeia de fornecimento real ou prevista, específica ou média, bem como a utilização e fim de vida da sua cadeia de valor. O sistema existente ou previsto é incorporado em uma tecnosfera estática.

O modelo consequencial de ciclo de vida retrata uma cadeia de fornecimento genérica, como esta é teoricamente esperada em consequência da decisão analisada. O sistema interage com os mercados, e essas mudanças são retratadas de forma que uma demanda adicional para o sistema analisado deve ter uma tecnosfera dinâmica que está reagindo com essa demanda adicional. O objetivo é identificar as consequências que uma decisão no sistema em primeiro plano tem para outros processos e sistemas da economia, tanto no sistema de segundo plano como em outros sistemas. O sistema analisado é modelado em torno dessas consequências, assim um passo fundamental na modelagem consequencial é a identificação dos processos marginais.

Quanto à multifuncionalidade, uma variante dos processos multifuncionais é o produto multifuncional, que é metodologicamente igual, mas normalmente é modelado de forma diferente em conjuntos de dados de ICV: enquanto cada co-função dos processos multifuncionais anteriormente mencionados tem um fluxo de referência individual, no caso de produtos multifuncionais, normalmente, só um fluxo de referência é usado.

Diferentes abordagens são utilizadas para a resolução de multifuncionalidade. A escolha da abordagem mais adequada depende, entre outros fatores, do objetivo do estudo, dados e informações disponíveis, e das características do processo ou produto multifuncional.

A forma mais adequada de resolver a multifuncionalidade deve ser identificada já na fase de escopo da ACV, pois afeta a identificação dos dados de inventário e outras informações necessárias. O problema da multifuncionalidade pode ser resolvido pelas seguintes abordagens:

- Subdivisão dos processos multifuncionais - refere-se à coleta de dados individualmente para os processos monofuncionais que se relacionam com o sistema analisado e que estão contidos no processo multifuncional;

- Expansão do sistema (incluindo substituição) – Pode-se resolver a multifuncionalidade expandindo as fronteiras do sistema e substituindo uma função não necessária por uma forma alternativa ou, quando vários sistemas multifuncionais devem ser comparados em um estudo, isto seria feito pela expansão das fronteiras do sistema e adição funções faltantes, e os inventários dos respectivos produtos monofuncionais. Expansão do sistema e substituição são as abordagens metodológicas correspondentes para a solução de multifuncionalidade na modelagem consequencial. Substituição significa subtrair o inventário de outro sistema do sistema analisado. Isto leva muitas vezes a fluxos de inventário negativo. Na prática, a expansão do sistema pode levar à necessidade de nova expansão do sistema à medida que os sistemas inclusos muitas vezes são novamente multifuncionais. Isso pode ser resolvido em muitos casos, por regras de corte.
- Alocação – Resolve a multifuncionalidade pela divisão dos valores das entradas e saídas individuais entre as co-funções de acordo com algum critério de alocação.

Uma combinação específica da estrutura de modelagem do ICV (atribucional ou consequencial) e das abordagens metodológicas de ICV (alocação ou expansão do sistema) é identificada para cada situação de objetivo (A, B e C).

Para resolver o problema da multifuncionalidade na situação A, subdivisão ou subdivisão virtual devem ser aplicadas, excluindo processos multifuncionais livres.

À situação B aplica-se a mesma modelagem ditada para a situação A, com uma exceção: processos que foram identificados por serem afetados por grandes mudanças em consequência da decisão analisada devem ser modelados como uma mistura de processos marginais de longa duração.

Para resolver a funcionalidade na situação C, subdivisão ou subdivisão virtual devem ser aplicadas, excluindo processos multifuncionais livres.

#### 3.1.2.4. Obtenção das fronteiras do sistema e critérios de corte

As fronteiras do sistema definem quais partes do ciclo de vida e quais processos pertencem ao sistema analisado, isto é, são necessárias para a determinação de sua função, conforme definido pela sua unidade funcional. Uma definição precisa de fronteiras do sistema é importante para assegurar que todos os processos atribucionais e consequenciais sejam incluídos no sistema modelado e que todos os impactos ambientais potenciais sejam apropriadamente cobertos. Os níveis de critérios de corte e as incertezas máximas permitidas são as medidas chave para a qualidade geral dos resultados do estudo de ICV/ACV.

A ACV representa impactos relacionados a processos e produtos, mas não cobre, por exemplo, impactos de acidentes, derramamentos e impactos na saúde. Isto porque esses impactos ocorrem na tecnosfera e não estão sujeitos a qualquer destino ambiental e da cadeia de exposição. Se inclusos, eles devem ser inventariados, agregados e interpretados separadamente dos inventários de ciclo de vida, que dizem respeito a interações entre a tecnosfera e a ecosfera. Uma alternativa para a avaliação desses impactos é a aplicação de uma análise de risco, que poderia avaliar a possibilidade de incidência de tais eventos e as possíveis dimensões de seus impactos.

Para os conjuntos de dados de unidades de processo e fluxos de produtos e resíduos, a fronteira do sistema é aquela entre o processo modelado e o resto da tecnosfera. Para resultados de ICV e de conjuntos de dados de AICV, assim como para ACVs completas, as fronteiras do sistema devem ser determinadas de forma que todos os fluxos que as transpõem sejam exclusivamente fluxos elementares e de referência. Na realidade, mesmo para produtos simples, todas as atividades econômicas são de alguma forma parte do sistema. No entanto, o número de processos que contribuem em grau quantitativamente relevante para o sistema é normalmente bastante limitado. Na prática todos os fluxos de produto, de resíduos e elementares que não sejam quantitativamente relevantes ou de referência, podem ser ignorados.

Portanto, definir as fronteiras do sistema significa decidir quais estágios do ciclo de vida, tipos de atividades, processos específicos e fluxos elementares deverão ser incluídos e quais deverão ser ignorados no modelo de ciclo de vida. A definição qualitativa das fronteiras do sistema deve identificar aquelas partes do ciclo de vida que devem ser incluídas. A fronteira do sistema deve ser representada por um diagrama semi-esquemático que mostre explicitamente quais partes do sistema e estágios de seu ciclo de vida estão inicialmente destinados a serem incluídos e excluídos.

A exclusão sistemática de transportes, infra-estrutura, serviços, atividades administrativas, etc., não é apropriada a menos que seja necessária de acordo com objetivos específicos do estudo de ICV/ACV. A necessidade de inclusão e possibilidade de exclusão de atividades apenas pode ser decidida para um dado caso tendo em vista o atendimento de requisitos de completeza e precisão dos resultados.

O critério quantitativo de corte define o valor de corte a ser aplicado para produtos, resíduos e fluxos elementares que cruzam a fronteira do sistema analisado, mas que não são quantitativamente incluídos no inventário. Em geral, todos os processos e fluxos que são atribuíveis ao sistema analisado devem ser incluídos nas fronteiras do sistema. Entretanto, nem todos esses processos e fluxos elementares são quantitativamente relevantes: para os menos relevantes, dados de menor qualidade ou estimados podem ser usados, diminuindo os esforços para coleta e obtenção de dados de alta qualidade para aquelas partes. A definição quantitativa das fronteiras do sistema diz respeito à omissão admissível de estágios inteiros do ciclo de vida, tipos de atividades, processos e produtos específicos, e fluxos elementares. Essas omissões, entretanto, apenas podem ser justificadas se forem insignificantes para o resultado do estudo. Ao lado do fluxo de referência que fornece a unidade funcional e fluxos de resíduos permitidos, nenhum outro fluxo relevante deve atravessar a fronteira entre o sistema analisado e o resto da tecnosfera, na medida do possível. E apenas os fluxos elementares devem cruzar a fronteira entre o sistema analisado e da ecosfera.

Os componentes de qualidade de dados interagem de forma multiplicativa e, tipicamente, os dados de qualidade mais fraca acabam por diminuir a qualidade geral dos dados. Portanto um critério válido de corte deve ser definido baseando-se no grau quantitativo de completeza dos impactos ambientais gerais do sistema do produto.

#### 3.1.2.5. Preparação do embasamento para a avaliação de impacto

A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) agrega os dados obtidos nos inventários de forma a facilitar sua interpretação. Opcionalmente, a normalização e ponderação de tais dados também podem ser aplicadas para dar suporte a tal interpretação. Ao mesmo tempo a avaliação de impacto também é necessária para o estabelecimento de critérios de corte e para avaliação de completeza em estudos de ACV.

As categorias de impacto ambiental cobertas na AICV, assim como as metodologias de AICV, normalização, agrupamento e ponderação, devem ser determinadas anteriormente à análise inicial do inventário, para assegurar que dados relevantes sejam coletados.

Uma análise baseada em ICV, sem avaliação de impacto, pode, em alguns casos, ser justificada, dependendo do objetivo do estudo. Entretanto, é importante notar que esse tipo de análise pode limitar a interpretação dos resultados e comparações. Por este motivo, em caso de estudos comparativos a serem divulgados ao público, afirmações baseadas apenas em ICV não são permitidas, de acordo com a norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

A seleção das categorias de impacto deve ser completa, abrangendo todas as questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema analisado. Dependendo da aplicação pretendida, pode ser decidido durante a definição de objetivo trabalhar com uma seleção limitada de categorias de impacto ambiental. A exclusão inicial de categorias de impactos relevantes deve ser claramente documentada e considerada na interpretação dos resultados, pois pode limitar consideravelmente as conclusões e recomendações do estudo.

Dependendo do objetivo do estudo e da natureza do sistema estudado, a inclusão de categorias ou fatores de impacto faltantes, que sejam relevantes para os resultados finais, pode ser necessária. Além disso, para estudos comparativos de ACV, também é importante que a adequação de metodologias genéricas de AICV seja discutida na fase de interpretação do estudo.

A normalização e agrupamento, de acordo com as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), são estágios opcionais, que visam apoiar a interpretação do perfil de impacto, de forma a buscar um resultado completamente agregado. A fase de agrupamento exige a normalização prévia, uma vez que o agrupamento sem prévia normalização pode fornecer resultados “mascarados”.

Nos casos de afirmações comparativas a serem divulgadas ao público, assim como todos os outros estudos que visam apoiar comparação de produtos por terceiros, a seleção final dos métodos de AICV a serem aplicados, assim como os níveis de avaliação (de ponto intermediário ou final) deve ser feita durante a definição inicial do escopo, da mesma forma que as decisões a respeito da possibilidade de inclusão das fases de normalização e agrupamento. Tais decisões devem ser documentadas de forma que permitam que numa futura revisão crítica, possa ser verificado o momento em que tais decisões foram tomadas.

#### 3.1.2.6. Representatividade e adequação dos dados do ICV

Para que os dados de inventário possam representar de forma válida os impactos ambientais de um sistema, eles devem ter representatividade e adequação. A representatividade está relacionada à capacidade dos dados coletados representarem o “verdadeiro” inventário do processo, abrangendo a coleta de dados relacionados à tecnologia, geografia e tempo. A adequação se refere ao grau em que os dados do processo utilizados no modelo do sistema realmente representam o verdadeiro processo do sistema analisado.



A representatividade tecnológica de um processo ou sistema identifica quão bem os dados de inventários representam esse sistema/processo em relação às reais características técnicas ou tecnológicas documentadas nas informações descritivas do relatório.

Para o modelo atribucional, dados específicos relacionados à tecnologia da cadeia de fornecimento devem ser previstos para o sistema de primeiro plano, e médias do consumo de mercado para o sistema de fundo. Esses são idealmente os dados primários e secundários dos fornecedores e dos usuários. Para o modelo consequencial, os mesmos dados devem ser previstos para o sistema de primeiro plano, incluindo-se os dados específicos de tecnologia de fornecedores para ligações contratualmente fixas ou planejadas da cadeia de fornecimento. As tecnologias marginais de curto ou longo prazo devem ser previstas para serem usadas no sistema de fundo.

A representatividade geográfica de um processo ou sistema identifica quão bem os dados de inventário representam a localização do processo/sistema, em relação à sua operação, produção ou consumo. A abrangência geográfica dos dados de ICV deve representar a menor unidade geográfica apropriada, dependendo do objetivo do estudo e das aplicações pretendidas.

A necessidade de representatividade temporal é muito influenciada pela aplicação pretendida do estudo e seus requisitos em relação, por exemplo, à validade futura dos resultados e conclusões da ACV.

#### 3.1.2.7. Tipos, qualidade e fontes dos dados e informações requeridos

Durante a definição inicial de escopo e a preparação do trabalho subsequente, os principais tipos e fontes de dados e outras informações devem ser identificados, os quais serão mais detalhados e frequentemente revisados durante as fases iterativas de coleta de dados e modelagem de inventário, avaliação de impacto e interpretação. É recomendado preparar uma visão geral dos principais tipos de dados e informações que serão necessários, dependendo do tipo

de entrega do estudo de ICV/ACV e determinar os requisitos gerais de dados e sua qualidade, a menos que isso seja feito na fase posterior de “planejamento da coleta de dados”.

#### 3.1.2.8. Comparação entre sistemas

Estudos envolvendo afirmações comparativas a serem divulgadas ao público devem atender requisitos adicionais para que tais comparações sejam válidas, justas e não enganosas. Isso reflete as consequências que o uso comparativo de resultados de ACV pode ter para outras empresas, instituições e partes interessadas, que não estão diretamente envolvidas no estudo.

Dois aspectos relacionados à questão “do que está sendo comparado” são importantes para esse tipo de estudo: a equivalência da unidade funcional das alternativas comparadas e a seleção não enganosa das alternativas.

Frequentemente o contexto de aplicação dos produtos comparados também deve ser considerado como parte da unidade funcional, uma vez que produtos com a mesma unidade funcional geral podem ter desempenhos diferentes.

Dentre as propriedades de posicionamento, a durabilidade do produto tem um papel especial, estando diretamente relacionada à unidade funcional do produto. Por isso, a durabilidade deve ser considerada quantitativamente, usando-se a vida útil técnica das alternativas como base para afirmações comparativas. Outras considerações sobre vida-útil devem ser consideradas na análise de cenários, como vida útil de moda, mecânica, integridade, inovação técnica, custos, etc.

Assegurar a consistência dos métodos, pressupostos e dados usados no estudo de ACV para todos os sistemas comparados é de grande importância. Em estudos de comparação de sistemas, os requisitos gerais de qualidade de dados dependem na diferença relativa do impacto ambiental global entre os sistemas comparados. Nesses casos, com respeito à completeza, os critérios de corte devem ser aplicados para avaliação de impacto, mas também para massa e energia.

Estudos comparativos com base em indicadores ou categorias de impacto selecionadas devem destacar que a comparação não é adequada para identificar alternativas ambientais preferíveis, uma vez que só abrangem os impactos considerados.

#### 3.1.2.9. Identificação da necessidade de revisão crítica

Uma revisão crítica deve ser realizada por peritos que não estão envolvidos no estudo de ICV/ACV. Isso é geralmente benéfico para a qualidade e credibilidade, assim como para o valor do estudo. O tipo de revisão crítica requerida depende das aplicações pretendidas do estudo. É útil que, já durante a definição do escopo, seja decidido se uma revisão crítica será feita, por quem e de que forma será realizada. Essa decisão antecipada permite que a coleta de dados, documentação e relatório do estudo de ICV/ACV sejam adaptados para atender os requisitos da revisão, diminuindo o esforço global.

#### 3.1.2.10. Planejamento da Comunicação do estudo

O relatório/comunicação do estudo é um elemento vital de qualquer ACV. Sem documentação clara e efetiva para peritos e comunicação para os tomadores de decisão, ACVs podem tornar-se subjetivas para uso errôneo e enganoso, não contribuindo para o melhoramento do desempenho ambiental. O relatório deve ser objetivo e transparente, e deve ficar claro o que foi ou não incluso no estudo, e quais conclusões e recomendações os resultados do estudo podem embasar. É importante que o relatório reflita claramente o estudo, podendo ter diferentes formas e níveis dependendo de seus objetivos inicialmente estabelecidos.

### **3.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)**

Os dados coletados durante a fase de inventário alimentarão todas as fases subsequentes do estudo de ACV, assim como servirão de *feedback* para as definições estabelecidas nas fases de

objetivo e escopo, proporcionando parâmetros mais concretos para ajuste destas. Assim, nessa fase da ACV (a fase de ICV) deve ser realizada a coleta de dados e modelagem do sistema, sempre de acordo com as definições do objetivo e escopo do estudo. É por esse motivo que, geralmente, esta é a fase que mais requer esforço e recursos num estudo de ACV.

A fase de inventário envolve a coleta de dados para:

- Fluxos de entrada e saída dos processos: a) Fluxos elementares (como uso de recursos e emissões, mas também outras intervenções na ecosfera, como o uso do solo); b) Fluxos de produtos (bens e serviços que se apresentem como produtos de um processo e como entradas/insumos de outro) que liguem o processo analisado a outros processos e; c) Fluxos de resíduos (água residual, resíduos sólidos e efluentes) que precisam ser ligados ao processo de gerenciamento de resíduos para assegurar uma modelagem completa dos esforços relacionados e impactos ambientais.
- Outras informações identificadas na definição de escopo como relevantes para o sistema analisado. Isto inclui dados estatísticos, características de processos e produtos, e todos os outros dados e informações, exceto aqueles diretamente relacionados à avaliação de impacto.

O tipo específico de trabalho a ser desenvolvido no inventário de ciclo de vida depende das entregas pretendidas do estudo e nem todos os passos são requisitos para todo tipo de estudo.

Dito isto, o trabalho de inventário de ciclo de vida, em geral, significa:

- Identificação de processos do sistema (modelagem atribucional ou consequential),
- Planejamento da coleta de dados primários e conjuntos de dados de fontes secundárias,
- Coleta de dados do sistema de primeiro plano para os processos requeridos,

- Desenvolvimento genérico de dados de ICV, especialmente onde dados médios ou específicos não estão disponíveis e não podem ser desenvolvidos, tipicamente por restrições de acesso aos dados ou de orçamento,
- Obtenção de dados complementares como processos da unidade ou resultados de conjuntos de dados de ICV de provedores de dados,
- Média dos dados de ICV ao longo do processo ou produto, incluindo para produção em desenvolvimento, fornecimento e consumo,
- Modelagem do sistema pela conexão e dimensionamento dos conjuntos de dados corretamente, provando que tal sistema realmente fornece a unidade funcional estudada,
- Resolução de problemas de multifuncionalidade nos processos no sistema,
- Cálculo dos resultados do ICV, isto é, a somatória de todas as entradas e saídas para todos os processos dentro das fronteiras do sistema. Se totalmente modelado, apenas os fluxos de referência e fluxos elementares deverão permanecer no inventário.

### 3.2.1. Identificação de processos dentro das fronteiras do sistema

A fronteira do sistema do produto em um estudo de ACV inclui ainda, por exemplo, processos de mineração, processamento, manufatura, uso, reparos e manutenção, assim como transporte, tratamento de resíduos e outros serviços adquiridos como, por exemplo, serviços legais e de limpeza, marketing, produção e desativação de bens de capital, operação das instalações, tais como varejo, armazenamento, escritórios de administração, deslocamentos de pessoal, viagens de negócios, etc. Resumindo, todas as atividades não acidentais que são realizadas de forma relacionada ao sistema analisado e que podem também ser atribuídas a ele (modelagem atribucional), ou esperadas/modeladas como uma consequência de uma decisão do sistema de primeiro plano (modelagem consequencial), devem ser incluídas nas fronteiras do sistema, a

menos que sejam quantitativamente irrelevantes pela determinação dos critérios de corte aplicados.

A maneira como processos são identificados com as fronteiras do sistema diferem consideravelmente entre as modelagens atribucional e consequencial, pois diferentes processos e dados são requeridos com base na abordagem de modelagem.

#### 3.2.1.1. Identificação de processos na modelagem atribucional

A modelagem atribucional retrata o sistema da forma como este pode ser observado/mensurado, ligando processos únicos dentro da tecnosfera ao longo dos fluxos de matéria, energia e serviços. Esta fase de “atribuição” é crucial, mas está apenas implicitamente abordada nas NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas na prática, resultando em fronteiras de sistema, modelos e resultados finais inconsistentes.

Observando a identificação numa perspectiva mais funcional/técnica, as seguintes fases e processos devem ser, em princípio, atribuídos ao sistema ou processo analisado, começando pela unidade funcional e fluxo de referência do sistema:

- Processo ou sistema central analisado: processo do sistema de primeiro plano que diretamente fornece a unidade funcional ou fluxo de referência analisado como sua função (alguns desses processos são bens, enquanto outros são serviços ou sistemas produto-serviço);
- Incorporação física do bem: bens que (parcialmente ou completamente) fisicamente terminam no bem analisado ou em outros bens que são parte do sistema;
- Contato com o processo central ou bem analisado: bens e serviços que apenas tocam o bem ou processo central executando uma função de apoio que suporta a prestação da função analisada;

- Serviços para o processo ou sistema central: processos que nem mesmo tocam o processo/bem analisado ou exercem uma função direta para a prestação de um serviço, mas que são requeridos, no entanto, para trabalhar em segundo plano em relação ao processo. Além disso, chegamos a processos marginais que, na verdade, não se relacionam diretamente com o processo ou sistema central. Esses processos indiretos são identificados e se conectam ao sistema de primeiro plano. É importante notar que isso não resulta numa lista interminável de processos a serem incluídos, pois pela aplicação de regras de corte - com base na experiência em processos semelhantes e julgamento de especialistas - a maioria destes pode ser excluída.

Especialmente para processos do sistema de primeiro plano, uma descrição inicial é requerida. Isso irá ser revisado quando da coleta e documentação dos dados do processo da unidade.

#### 3.2.1.2. Identificação de processos na modelagem consequencial

A modelagem consequencial de ICV busca a identificação das consequências de uma decisão no sistema de primeiro plano em outros processos e sistemas da economia e constrói um sistema a ser analisado em torno de tais consequências. Essas consequências são aqueles processos que assumimos serem operados como uma reação à decisão em questão.

Para identificar as consequências detalhadas e processos marginais, além da expertise em ACV, as seguintes expertises são necessárias, dependendo dos mecanismos e modelos considerados na modelagem consequencial:

- Experiência de previsão de desenvolvimento de tecnologia (curvas de aprendizagem, curvas de experiência),
- Desenvolvimento de cenários,

- Custo de mercado e previsões de mercado,
- Modelagem de custos de tecnologia,
- Modelagem de equilíbrio geral, e
- Modelagem de equilíbrio parcial.

Os seguintes itens explicam os passos para modelagem de consequências para o modelo consequencial:

- O primeiro passo no sentido de identificar os processos marginais que fornecem a função e os processos suplantados é identificar/decidir quais as consequências primárias e secundárias e as restrições que devem ser integradas ao modelo.
- Em seguida está a identificação dos processos que são operados ou deslocadas devido às consequências identificadas.
- Análise das consequências consideradas e, tendo em conta as limitações selecionadas, identificação dos processos e modelagem do ciclo de vida consequencial. Isto começa a partir da decisão analisada no sistema de primeiro plano.

As seguintes consequências primárias devem ser avaliadas para inclusão (a menos que estas já sejam explicitamente requeridas ou diretamente derivadas de um objetivo específico do estudo):

- Processos que sejam operados como consequência direta de mercado da decisão para alcançar a demanda adicional de um produto;
- Processos que suplantem/complementem co-funções de processos multifuncionais que estejam dentro da fronteira do sistema (em casos de resolução de multifuncionalidade por substituição);

As seguintes consequências são secundárias, mas podem ser avaliadas para inclusão:



- Aumento na demanda geral por uma co-função não requerida se seu valor de mercado é reduzido devido à sua disponibilidade adicional em consequência secundária de uma demanda adicional pela função analisada;
- Efeito de incentivo ao processo para aumentar sua eficiência como consequência secundária de um preço maior para sua co-função determinante, em consequência de aumento de demanda;
- Diminuição da demanda por funções concorrentes de uma função não requerida como consequência secundária da diminuição de preço desta devido ao aumento de demanda para a co-função analisada e, portanto, uma disponibilidade adicional de sua co-função não requerida;
- Mudanças de comportamento do consumidor.

Principais passos para identificação de processos no modelo consequencial:

- Considerar as consequências primárias e a dimensão de seu efeito;
- Considerar consequências e limitações secundárias;
- Situação de mercado e competitividade;
- Identificação da mistura de processos/sistemas marginais de longo e curto prazo.

A multifuncionalidade na modelagem consequencial é resolvida de maneira semelhante à modelagem atribucional, em um procedimento de dois passos relacionados a subdivisão, incluindo a consideração de: a) causalidade física, em casos de produção combinada real; (b) produção conjunta, substituição em casos gerais de multifuncionalidade ou substituição em modelos de fim de vida ou tratamento de resíduos.

Especialmente para processos do sistema de primeiro plano, uma descrição inicial é requerida, e será revisada no momento da coleta e documentação dos dados do processo da unidade.

### 3.2.2. Planejamento da coleta de dados

Antes que o planejamento real da coleta dos dados e informações possa ser realizado, é recomendado obter clareza de algumas opções e considerações:

- Para o sistema de primeiro plano serão coletados dados específicos, médios ou genéricos?
- Necessidade de dados médios multi-anuais ou dados genéricos;
- Definição das fontes de dados primárias e secundárias;
- Principal foco para concentração de esforços de coleta.

É importante identificar para quais processos do sistema analisado novos estudos específicos do processo da unidade terão de ser desenvolvidos com dados primários e secundários de produtores ou operadores. Este é tipicamente o caso para o sistema de primeiro plano completo. O uso de processos técnicos ou diagramas de fluxos é recomendado.

O próximo passo é identificar para quais partes do sistema analisado o uso de conjuntos de dados de ICV médios ou genéricos é mais apropriado. É importante notar que para um dado caso, dados médios ou genéricos podem ser mais acurados, completos e precisos, também para alguns processos do sistema de primeiro plano. Se tais dados forem usados, isso precisa ser justificado.

É recomendado identificar sistematicamente fontes de dados e informações necessários. Isto inclui considerar trabalhar para o sistema de fundo principalmente com resultados de ICV ou com conjuntos de dados de unidade de processo, os quais têm vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas para o caso em questão. Combinações são possíveis se os dados forem consistentes. Dentre as fontes de dados de ICV, fontes primárias e secundárias podem ser diferenciadas. O princípio orientador deve ser a disponibilidade e a qualidade dos dados mais apropriados. Trabalhar com conjuntos bem documentados e dados já revisados é recomendado, pois isso apoia um uso correto dos conjuntos de dados, uma documentação marginal do sistema analisado e sua revisão.

Um passo importante é avaliar, ao longo do objetivo do estudo, em que pontos dados médios multi-anuais e genéricos podem ser preferíveis a dados médios anuais, por representarem melhor o processo/sistema. Isso se aplica para processos com fortes variações inter-anuais, para assegurar uma representatividade temporal suficiente.

Recomenda-se orientar o esforço de coleta de dados pela relevância dos respectivos dados e informações, e basear-se na experiência existente, que reflete o processo ou sistema suficientemente analisado.

### 3.2.3. Coleta de dados de ICV da unidade de processo

Para todos os processos identificados, os dados de inventário devem ser coletados. Uma coleta real de dados de inventário é tipicamente requerida apenas para o sistema de primeiro plano, enquanto que todos os dados para o sistema de segundo plano podem ser buscados em bases de dados disponíveis. Os dados da unidade do processo são a base para todo o trabalho de ICV. Idealmente, eles devem estar relacionados a operações individuais para um processo específico, entretanto, esses dados podem também ser referentes às médias para esses processos, ou podem ser genéricos e, portanto, retratar um processo ou tecnologia de forma geral ao invés de sua operação específica.

#### 3.2.3.1. Coleta de dados básicos para os processos de unidade

Recomendações são dadas para a coleta de dados primários básicos e sobre a forma de obtê-los:

- Evitar processos de unidade “caixa preta”, (isto é processos de unidade para os quais os dados coletados são uma combinação de mais de um processo fisicamente separados em passos do processo) por subdivisão ou subdivisão virtual: (a) Investigar se o processo de unidade analisado é um processo de unidade de “caixa preta” e a seguir, verificar se a

subdivisão pode resolver o problema da multifuncionalidade deste processo; (b) Baseando-se neste resultado, buscar a possível aplicação da subdivisão, subdivisão parcial ou subdivisão virtual, respectivamente.

- Descrição do que o processo da unidade representa em relação a: (a) tecnologia, geografia/escopo de mercado e tempo que o processo representa e qualquer possível limitação de representatividade; (b) Fluxo de referência/unidade funcional.
- Tipos de fluxos de entrada e saída a serem coletados: dados quantitativos de todas as entradas e saídas relevantes que são associados ao processo da unidade devem ser coletados/modelados, se possível. Nos casos em que não for possível, as lacunas devem ser documentadas no relatório sobre qualidade de dados e na interpretação dos resultados do estudo. Esses fluxos tipicamente incluem (a) entradas de produtos consumidos, como fluxos de produtos; (b) Entrada de resíduos, como fluxos de resíduos; (c) Entrada de recursos naturais, como fluxos elementares; (d) Emissões para o ar, água e solo, como fluxos elementares; (e) Outras entradas e saídas que intervêm na ecosfera, como fluxos elementares; (f) Saída de resíduos, como fluxos de resíduos; (g) Saída de bens e serviços de valor agregado fornecidos pelo processo, como fluxos de produtos.
- Os tipos de dados primários: (a) Dados medidos coletados por operadores do processo devem ser preferíveis se possível e apropriado (não apenas dados fisicamente medidos, mas também provenientes de listas de consumo, contas, etc.); (b) Composição e conteúdo energético de produtos e fluxos de resíduos; (c) Vários outros dados podem ser úteis ou até mesmo necessários, como formulações, listas de peças, patentes, engenharia do processo, modelos estequiométricos, especificações e relatórios de testes de produtos e processos, etc.; (d) para modelagem do estágio de uso dos produtos e gerenciamento inicial de resíduos, é recomendado o uso de levantamentos e estudos que analisem o comportamento médio ou típico para complementar as especificações do produto.

- Quantidades do fluxo de referência: é recomendado o uso da quantidade de “uma unidade de referência” do fluxo de referência e expressar o inventário do processo em relação a essa quantidade.
- Representatividade das condições de operação: Os dados de inventário coletados para um processo específico devem, tanto quanto possível e necessário para alcançar o objetivo do estudo, representar o ciclo operacional completo do processo, incluindo todos os estágios quantitativamente relevantes. Isso se aplica também a serviços, e tal representatividade deve ser documentada. Para medições no processo operado, dados de pelo menos um ano completo devem ser usados para se obter dados médios representativos. Para processos parametrizados, as relações matemáticas devem representar mudanças relevantes do inventário em relação a parâmetros de influência, incluindo relações quantitativas e qualitativas entre fluxos de inventário.
- Verificação de limites legais: É recomendada a verificação de limites legais existentes relevantes para orientação de quais fluxos devem ser incluídos em quaisquer casos. Limites legais existentes para localidades diferentes podem ser usados caso a legislação ambiental seja muito limitada no país onde o processo é operado, e desde que tais limites sejam tecnicamente transferíveis para tal localidade.
- O dimensionamento correto da unidade funcional e do fluxo de referência deve ser assegurado ao converter os dados primários para os fluxos de inventário. Recomenda-se documentar todos os passos dados sobre o tratamento dos dados brutos para os fluxos do inventário do processo de unidade, como média/agregação, dimensionamento, unidade de conversão, etc. Isso facilita substancialmente o processo de revisão e facilita a futura atualização do conjunto de dados.
- Resolução de questões de confidencialidade: Informações confidenciais ou particulares podem ser protegidas pela agregação dos resultados de ICV e conjuntos de dados do

sistema. A transparência pode ser assegurada pela documentação de informações confidenciais num “relatório confidencial” à parte, acessível apenas para os revisores críticos, confidencialmente.

- Uma verificação da validade dos dados coletados deverá ser realizada durante o processo de coleta de dados. Para tal controle de qualidade interino sobre o processo de unidade, recomenda-se aplicar os aspectos técnicos de qualidade dos dados da revisão crítica sobre o alcance e os métodos de revisão. A documentação do conjunto de dados deve descrever apropriadamente o processo e identificar sua exatidão, precisão e completeza, assim como quaisquer limitações.
- Lacunas relevantes de dados de inventário podem ser preenchidas, se possível, por: (a) Identificação da relevância de dados inicialmente faltantes; (b) Se essa triagem mostra que a falta de dados pode ser de importância nas iterações futuras do trabalho de ACV, deve tentar-se, primeiro, identificar se o fluxo está realmente acontecendo no processo analisado e então se obter os dados ainda em falta; ou como segunda opção, estimativas devem ser obtidas; e, como terceira opção, a lacuna deve ser mantida e comunicada; (c) Para cada novo processo de unidade modelado, quaisquer dados inicialmente faltantes devem ser documentados de forma transparente e consistente; para julgar a relevância de uma lacuna de dados inicial, é necessário aproximar a exatidão, precisão e completeza alcançadas do impacto ambiental total no nível do sistema; as lacunas de dados devem, geralmente, ser preenchidas com dados metodologicamente consistentes, e apenas dados que aumentem a qualidade geral do inventário final para o sistema analisado devem ser usados; (d) Se dados estimados que preencham tais requisitos não estiverem disponíveis, a lacuna de dados deverá ser mantida e documentada.

Recursos não-renováveis de energia devem ser inventariados como tipo de recurso energético e em poucos casos (apenas de petróleo primário, secundário, terciário a céu aberto ou

de mineração subterrânea de carvão) devem ser diferenciados exclusivamente por tipo de extração de recursos, se esta informação estiver disponível. A relação energia/massa deve ser fornecida para todos os fluxos de recursos energéticos, à exceção de minérios nucleares.

Fontes de energia renováveis devem ser inventariadas como a quantidade de energia utilizável extraída da natureza. Para a biomassa da natureza esta é a quantidade fisicamente incorporada, medida como valor calorífico inferior de substâncias sem água.

Recursos não devem ser inventariados de forma geograficamente diferenciada e recursos para produção de metais ou outros elementos químicos devem ser inventariados como elementos químicos.

Uso direto do solo e transformação do solo devem ser inventariados ao longo das necessidades do método de AICV aplicado (se incluso na avaliação de impacto) e se o uso ou transformação do solo forem modelados, dióxido de carbono e outras emissões e efeitos relacionados também devem ser modelados.

A respeito do uso de água, é recomendado que, pelo menos as entradas (água doce de superfície, águas subterrâneas renováveis, a água subterrânea fóssil/profunda, a água do mar), saídas (emissão / descarga de água em forma líquida, emissões em forma de vapor) e mudanças na qualidade de água, especialmente por substâncias químicas, sejam inventariadas como fluxos elementares separados.

Todas as emissões e outros fluxos elementares que ocorrem além dos próximos 100 anos da data do estudo de ICV/ACV devem ser inventariados separadamente daqueles que ocorrem dentro dos próximos 100 anos.

Tratamentos de resíduos e águas residuais devem ser modelados consistentemente com as fronteiras entre a tecnosfera e a ecosfera; caso contrário isso deve ser claramente documentado e explicitamente considerado na interpretação subsequente. Essa modelagem inclui todos os passos

do tratamento, incluindo a disposição final de qualquer resíduo restante em depósitos ou aterros, assim como o inventário das emissões desses locais para a ecossfera.

Duas exceções são resíduos radioativos e resíduos em depósitos subterrâneos, os quais devem ser mantidos como fluxos de resíduos específicos no inventário, a menos que o gerenciamento detalhado a longo prazo e intervenções relacionadas tenham sido completamente modeladas também para esses casos. Para aterros, descarga e disposição de resíduos não gerenciadas, as intervenções na ecossfera devem ser modeladas como parte do ICV.

Fluxos de resíduos devem ser modelados seguindo a lógica do fluxo de massa. Isso significa inventariar os resíduos a partir da saída desses processos, onde ele é gerado.

Para os processos de gerenciamento de resíduos, isso significa que os fluxos de resíduos devem, portanto, ser modelados no lado da entrada do processo se qualquer um dos produtos secundários ou resíduos remanescentes potencialmente produzidos estiver do lado de saída.

### 3.2.3.2. Desenvolvimento de dados genéricos de ICV

Em ACV, conjuntos de dados específicos, médios e genéricos são frequentemente diferenciados. Na prática, tipicamente uma combinação é encontrada.

Um conjunto de dados específicos em sua forma pura representa um único processo ou sistema. Isso exclusivamente contém dados medidos para o processo representado.

Um conjunto de dados médios, idealmente, combina diferentes conjuntos de dados específicos e/ou outros dados médios, de forma média, para representar uma combinação de processos ou sistemas. A média pode atravessar tecnologias, produtos, locais, países e/ou tempo, entre outros.

Um conjunto de dados genéricos é desenvolvido usando, ao menos parcialmente, outras informações além daquelas medidas por um processo específico. Estas outras informações podem



ser estequiométricas ou provenientes de outros modelos de cálculo, patentes de processos ou produtos, avaliação de especialistas, etc.

#### 3.2.3.3. Seleção de conjuntos de dados secundários de ICV

Os dados secundários (genéricos, médios ou específicos), para serem usados no modelo do sistema, devem ser metodologicamente consistentes com conjuntos de dados primários que foram especificamente coletados. Conjuntos de dados secundários devem ser selecionados de acordo com sua qualidade de dados em um sentido mais estrito, ou seja, sua representatividade tecnológica, geográfica e temporal, completeza e precisão. Seus fluxos de referência e/ou unidade funcional devem, além disso, ser suficientemente representativos para o processo, bem ou serviço específico que tais dados objetivam representar no sistema analisado.

É recomendado dar preferência a conjuntos de dados com revisão crítica prévia, uma vez que esses limitam o esforço de revisão do sistema analisado. É também recomendado dar preferência a conjuntos de dados que estão apoiados por documentação completa e eficientemente organizada.

#### 3.2.3.4. Criação de médias de dados de ICV

Existem duas formas principais para o estabelecimento de médias: a média de processos (também chamada de média horizontal) e a média de sistemas (também chamada de média vertical).

Na média do processo, é feita a média de dois ou mais processos que fornecem as mesmas funções, mas representam, por exemplo, diferentes tecnologias, localidades, anos, etc. Isso tipicamente inclui uma ponderação de inventários de acordo com sua contribuição para a situação média a ser representada. Nessas médias, qualquer dado faltante é tipicamente preenchido com dados de realidades similares, para assegurar, por exemplo, que misturas de países e tecnologias

representem bem a média objetivada. Analogamente, a média do sistema é realizada pela média de inventários de dois ou mais sistemas do berço ao portão ou do berço ao túmulo.

O conjunto de dados médios é, portanto, frequentemente mais representativo do processo ou sistema do que um conjunto de dados genéricos. Isso é válido desde que dados suficientemente representativos estejam disponíveis para todas as variantes relevantes do produto, e possam estar acompanhados de informações estatísticas relativas à variação de tais dados entre os produtos usados como base para a média. O esforço para coleta de dados é claramente maior para conjuntos de dados médios do que para conjuntos de dados genéricos, mas essa abordagem oferece vantagens, como a possibilidade de *benchmarking* interno, análise de pontos fracos/melhoramentos, geração de EPDs para produtores específicos, etc.

#### 3.2.4. Modelagem do sistema

Os inventários de todos os processos dentro das fronteiras do sistema devem ser corretamente dimensionados em relação aos demais e à unidade funcional e/ou fluxo de referência do sistema analisado. Nenhum fluxo de produto ou resíduo quantitativamente relevante pode ser deixado sem modelagem ou desconectado, com exceção dos fluxos de referência que representem quantitativamente a unidade funcional do sistema. Caso contrário esses fluxos deverão ser claramente documentados e a lacuna de precisão e completeza resultante deverá ser considerada na interpretação dos resultados.

É recomendado verificar previamente, durante a modelagem, se os conjuntos de dados ou sistema estão propriamente modelados e se atendem aos requisitos de qualidade identificados na fase de escopo.

Lacunas de dados devem ser preenchidas com conjuntos de dados metodologicamente consistentes, enquanto lacunas com pouca relevância podem também ser preenchidas com conjuntos de dados desenvolvidos pelas orientações do ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a) que

atendam os requisitos gerais de qualidade. Apenas dados e conjuntos de dados que aumentem a qualidade geral do inventário final do sistema analisado deverão ser usados para preencher lacunas. Isso significa que a qualidade de dados individuais ou conjuntos de dados deve ser equivalente, pelo menos, à dos dados estimados.

#### 3.2.4.1. Resolução de multifuncionalidade em processos de modelagem atribucional

Muitos processos contribuem para a provisão de mais de uma função, pela produção de mais de um produto, operando sobre mais de uma entrada, ou combinações desses. O problema de tais processos multifuncionais é que na ACV é preciso analisar um sistema único para poder-se determinar o impacto ambiental específico que pode estar relacionado ao seu ciclo de vida. No mundo real, entretanto, há poucos sistemas isolados. Assim como um co-produto surge em um processo que faz parte do sistema a ser analisado, ele é usado tipicamente em um sistema diferente. Isso significa que tal processo começa a fazer parte também de outro sistema, e que seus impactos ambientais não podem mais ser completamente atribuídos ao sistema em estudo.

Multifuncionalidade pode ocorrer em dois níveis: processos de unidade de operação única que não podem ser sub-divididos para fins de coleta de dados e processos de unidade “caixa preta” que podem ser ainda sub-divididos. É recomendado investigar se o processo unitário analisado é um processo “caixa preta” e, a seguir, verificar se a subdivisão pode resolver a multifuncionalidade desse processo.

Baseando-se no resultado da ação descrita, a subdivisão é aplicável se for possível coletar dados exclusivamente para aqueles processos inclusos que tem apenas uma saída funcional: os dados de inventário devem ser coletados apenas para tais processos unitários inclusos. Se isso não for possível, dados de inventário devem ser coletados separadamente para, pelo menos, alguns dos processos inclusos, especialmente para aqueles que são os principais contribuintes para o inventário e que não podem, caso contrário, ser claramente atribuídos a apenas uma das co-

funções. É importante verificar se é possível subdividir o processo virtualmente, baseando-se no entendimento do processo/tecnologia. Este é o caso sempre que uma relação quantitativa que pode ser identificada e especificada se refira exatamente aos tipos e quantidades de um fluxo com pelo menos uma das co-funções/fluxos de referência. Se os passos precedentes não forem possíveis e uma separação real ou virtual não for factível, a alocação é a abordagem a ser aplicada, e sua necessidade precisa ser justificada e quaisquer possíveis distorções documentadas.

Se houver necessidade de alocação, a carga ambiental dos processos deve ser partilhada entre as co-funções do processo ou sistema por distribuição, os processos multifuncionais e produtos multifuncionais devem ser diferenciados, bem como o seguinte procedimento deve ser aplicado: (a) Como primeiro critério, as relações de causalidade física entre cada fluxo e as co-funções do processo precisam ser identificadas e usadas como critério de alocação. Essa relação é aquela que determina a forma na qual as mudanças quantitativas dos produtos ou funções realizados pelo sistema mudam as outras entradas e saídas. Nessa etapa, os fluxos de inventário relacionados ao processo devem ser diferenciados dos fluxos de inventário relacionados à função. (b) Em segundo lugar, um critério geral de alocação para processos multifuncionais, o valor de mercado das co-funções, deve ser aplicado. Se isso é feito, o valor deve se referir a condições específicas e ao ponto em que as co-funções saem ou entram do processo multifuncional. Se isso não puder ser feito, a lacuna de precisão e potencial distorção dos resultados devem ser documentados e considerados na interpretação dos resultados.

### 3.2.5. Cálculo dos resultados do ICV

Dependendo do nível de agregação requerido para as aplicações previstas, os inventários de todos os processos inclusos devem ser dimensionados de acordo com sua participação no sistema geral do produto e agregados em, por exemplo, estágios do ciclo de vida, ou do sistema do produto completo.

Os mesmos procedimentos de cálculo devem ser aplicados consistentemente no sistema analisado, no momento da agregação dos processos dentro das fronteiras do sistema, para obtenção dos resultados do ICV. É necessário: (a) determinar, para cada processo dentro da fronteira do sistema, quanto de seu fluxo é requerido para o sistema emitir sua unidade funcional e/ou fluxo de referência; (b) dimensionar o inventário de acordo com cada processo; (c) somar os inventários corretamente dimensionados de todos os processos dentro da fronteira do sistema; (d) Se a aplicação pretendida dos resultados requer uma avaliação de impacto de localidade não-genérica, a agregação dos fluxos elementares relacionados à localidade deve ser evitada no cálculo dos resultados; (e) Se dados desagregados não puderem ser publicamente apresentados, é recomendado prever a realização da avaliação de impacto no nível desagregado, fornecendo os resultados de AICV juntamente com os resultados agregados de ICV.

Quaisquer fluxos de produtos e resíduos que permaneçam no inventário e que sejam fluxos não-funcionais devem ser salientados no relatório e/ou conjunto de dados: eles também precisam ser modelados mais tarde para o uso do conjunto de dados, ou então esta lacuna precisa ser explicitamente considerada na interpretação e conclusão subsequentes do estudo.

### **3.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)**

O objetivo da AICV, segundo ABNT (2008), é avaliar o sistema de produto sob uma perspectiva ambiental, com o uso de categorias de impacto e de indicadores de categoria associados aos resultados do ICV. Para Udo de Haes et al. (2002), esta fase avalia a significância das intervenções ambientais contidas no inventário do ciclo de vida. A AICV agrega os dados obtidos nos inventários de forma a facilitar sua interpretação.

Segundo a NBR ISO 14044 (2009), as etapas obrigatórias da avaliação de impacto do ciclo de vida são:

- Seleção das categorias de impactos;

- Classificação dos aspectos nos impactos, de acordo com sua importância;
- Caracterização pela valoração do aspecto, de acordo com sua magnitude em relação ao impacto.

Adicionalmente, há os elementos opcionais para a normatização, o agrupamento e a ponderação dos resultados dos indicadores e técnicas de análise da qualidade dos dados. O nível de detalhes, a escolha dos impactos avaliados e os métodos dependem do objetivo e do escopo do estudo.

A seleção das categorias de impacto deve ser completa, abrangendo todas as questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema analisado. Dependendo da aplicação pretendida, pode ser decidido durante a definição de objetivo trabalhar com uma seleção limitada de categorias de impacto ambiental. A exclusão inicial de categorias de impacto relevantes deve ser claramente documentada e considerada na interpretação dos resultados, pois pode limitar consideravelmente as conclusões e recomendações do estudo.

Existem métodos de AICV para “pontos intermediários” (*midpoint*) e “pontos finais” (*endpoint*), ou ambos, em metodologias integradas de AICV. De forma geral, em metodologias *midpoint* um número maior de categorias de impacto é determinado, e os resultados são mais exatos e precisos comparados com as avaliações de *endpoint*, as quais consideram normalmente as três áreas de proteção (saúde humana, qualidade do ecossistema e uso de recursos).

As principais categorias consideradas numa avaliação de *midpoint* são: mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, toxicidade humana, inorgânicos respiratórios, radiação ionizante, formação fotoquímica de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, uso do solo e esgotamento de recursos.

Dependendo do objetivo do estudo e da natureza do sistema estudado, a inclusão de categorias ou fatores de impacto faltantes, que sejam relevantes para os resultados finais, pode ser

necessária. Além disso, para estudos comparativos de ACV, também é importante que a adequação de metodologias genéricas de AICV seja discutida na fase de interpretação do estudo.

A normalização, agrupamento e ponderação são estágios opcionais que buscam um resultado completamente agregado.

Na normalização, os resultados dos indicadores para as diferentes categorias de impacto de danos *midpoint* ou *endpoint* são expressos em relação a uma referência comum, pela divisão dos resultados do indicador pelo respectivo valor de referência.

Os valores de referência normalmente utilizados são os resultados do impacto total anual territorial de fluxos elementares num país, região ou continente, ou de forma global, per capita, por exemplo. Para resultados *midpoint* a base da normalização é o impacto potencial total, calculado à partir de um inventário anual dos fluxos elementares. Para resultados *endpoint*, a base da normalização é o dano total causado nas áreas de proteção (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos naturais).

Na ponderação os resultados dos indicadores para diferentes categorias de impacto ou danos são multiplicados (cada um deles) por um fator de ponderação específico, que tem a intenção de refletir a relevância de diferentes categorias/fatores de impactos dentre as outras.

Conjuntos de ponderação podem ser desenvolvidos por diferentes mecanismos, por formuladores de políticas públicas ou painéis de indústrias, de partes interessadas, de peritos, etc. É importante notar que fatores de ponderação são sempre subjetivos, e refletem valores pressupostos. Portanto, após a ponderação é importante, na interpretação do estudo, deixar claros tais pressupostos e limitações, para que a avaliação dos resultados obtidos seja direcionada e não enganosa.

As normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) indicam a estrutura metodológica geral das fases para a realização da ACV, assim como da AICV. Contudo, não indicam os métodos para a realização do estudo.

### 3.3.1. Metodologias de AICV

Existem hoje mais de 50 métodos de AICV disponíveis na Europa (EPLCA, 2010), conforme apresentado na Tabela 1. São técnicas específicas referentes aos impactos ambientais que integram o escopo das avaliações efetuadas nestas regiões. No entanto, verifica-se a existência de esforços no sentido de ampliar o escopo de aplicação deste instrumento, levando em consideração as diferenças espaciais regionais dos demais ambientes mundiais.

**Tabela 1: Países de origem das principais metodologias de AICV**

Metodologia	Desenvolvida por	País de origem
CML	CML	Holanda
Eco-Indicator 99	PRé	Holanda
EDIP97 – EDIP2003	DTU	Dinamarca
EPS 2000	IVL	Suécia
Impact 2002+	EPFL	Suíça
LIME	AIST	Japão
LUCAS	CIRAIG	Canadá
ReCiPe	RUN + Pré + CML + RIVM	Holanda
Swiss Ecoscarcity 07	E2+SEU-services	Suíça
TRACI	US EPA	USA
MEEuP	VhK	Holanda
Impact World +	DTU, CIRAIG, EPFL	Cooperação global

Fonte: EC-JRC (2010b).

Os principais métodos amplamente utilizados na fase de avaliação de impactos da ACV são: *Eco Indicator 99*, *EDIP 97*, *EDIP 2003*, *(Dutch) Handbook on LCA (CML2002)*, *TRACI*, *EPS 2000*, *Impact 2002(+)*, *LIME*, *Swiss Ecoscarcity (Ecopoints 2006)*, *ReCiPe*, *MEEuP* e *Impact World +*. Esses métodos são majoritariamente desenvolvidos dentro do escopo regional europeu, no entanto, verifica-se a existência de esforços no sentido de ampliar o escopo de aplicação deste instrumento, considerando as diferenças espaciais regionais dos demais ambientes mundiais.



Nesta etapa passaremos então a uma descrição sintética dessas principais metodologias de AICV, tomando como base sua estruturação geral, contexto, e, principalmente, suas particularidades, de forma que se possa assim, estabelecer mais claramente as diferenças e similaridades entre elas.

#### 3.3.1.1. CML 2002 LCA Handbook (GUINÉE et al., 2002)

Metodologia holandesa de avaliação *midpoint*, a CML busca as melhores práticas para os indicadores de operacionalização *midpoint* da série de normas ISO 14040. Sua validade regional é global exceto no que se refere a acidificação e formação de foto-oxidantes (para os quais a abrangência é apenas para a Europa).

Para todas as categorias de emissão princípios semelhantes são utilizados com respeito, por exemplo, à manipulação de tempo, espaço e não-linearidades. Para cada indicador, fatores de normalização específicos são calculados.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Fundamentação científica de apoio a todas as escolhas importantes;
- Fornecimento de fatores alternativos de AICV para análises de sensibilidade para cada categoria de impacto;
- Distinção entre categorias de impacto básicas, específicas do estudo e outras;
- A maioria de suas categorias de impacto já foi descrita em artigos científicos;
- Princípios para AICV desenvolvidos juntamente com os princípios para os outros elementos da metodologia de ACV.

A Figura 3 traz um fluxograma esquemático da estrutura metodológica do método CML.

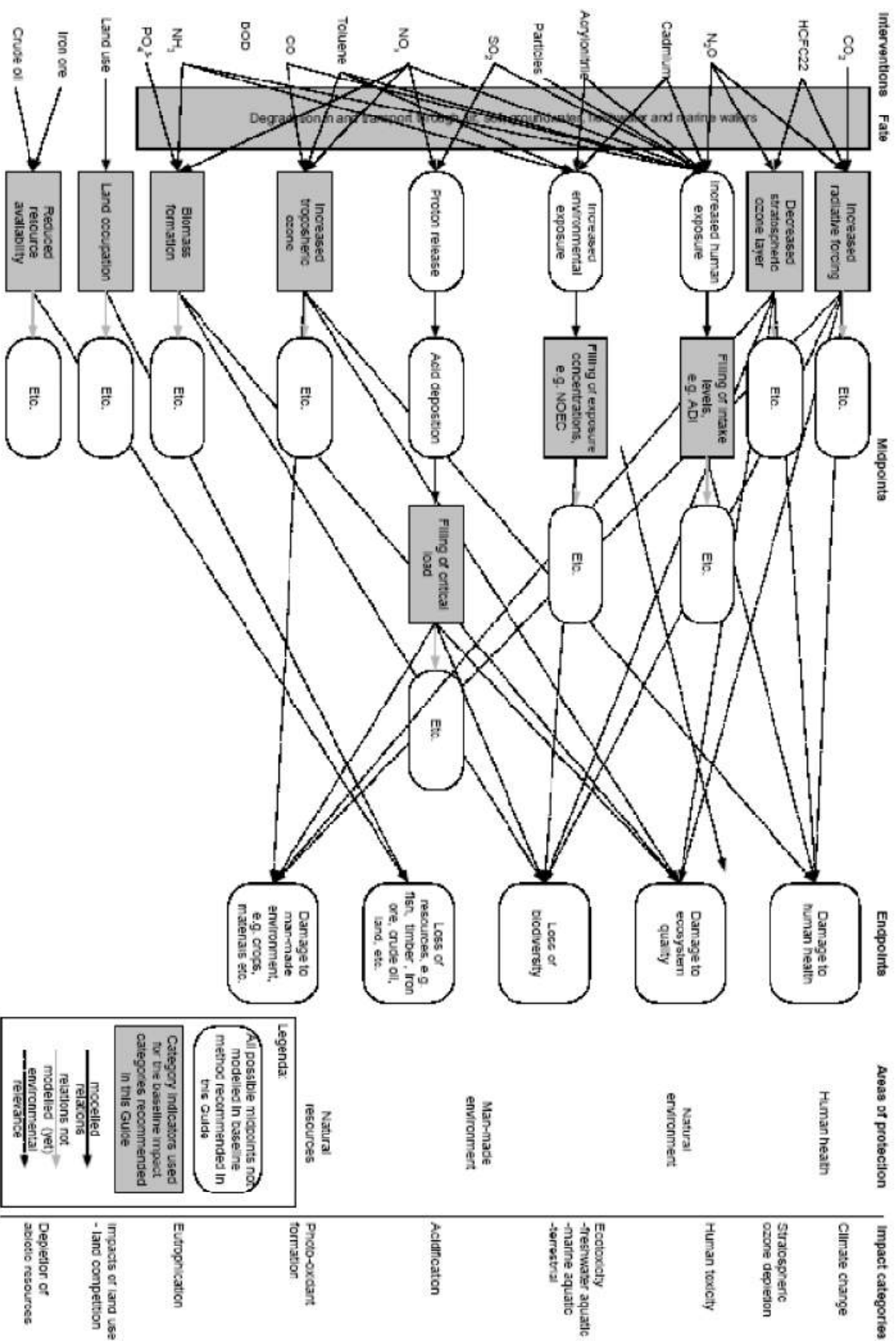


Figura 3: Fluxograma esquemático da metodologia CML. Fonte: EC-JRC (2010b)

### 3.3.1.2. Eco-indicator 99 (GOEDKOOP and SPRIENSMA, 2000)

Eco-indicador 99, é uma metodologia *endpoint*, desenvolvida com o objetivo de simplificar a interpretação e ponderação dos resultados. Uma das aplicações previstas é o cálculo de pontuações de eco-indicadores de um único ponto que podem ser usados por projetistas no dia-a-dia para tomada de decisão, mas também como um método de avaliação de impacto geral na ACV.

Possui categorias de impacto globais para mudanças climáticas, destruição do ozônio e recursos. Para outras categorias de impacto todas as emissões são assumidas a ter lugar na Europa.

Todos os mecanismos ambientais são marginais. O uso de apenas três indicadores por categoria de impacto também força a harmonização em modelos.

A normalização não é feita por categoria de impacto, mas por área de proteção (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos naturais).

A Figura 4 traz um fluxograma esquemático da estrutura metodológica do método Eco-indicator 99.

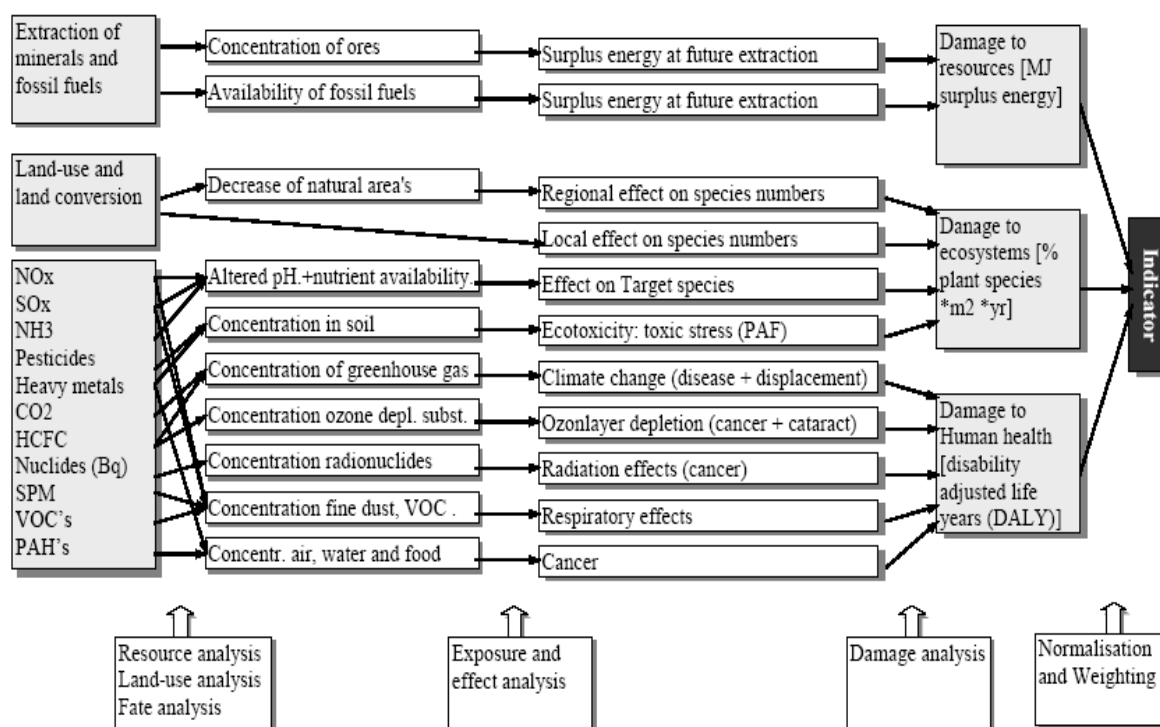


Figura 4: Fluxograma esquemático da metodologia Eco-indicator 99. Fonte: EC-JRC (2010b)

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- O uso de três perspectivas para criar conjuntos consistentes de escolhas subjetivas a respeito da perspectiva temporal aplicada, a importância da capacidade de gerenciamento, o papel do desenvolvimento tecnológico futuro e do nível de mecanismos de causa-efeito;
- O uso consistente, em uma abordagem totalmente integrada, da mesma unidade de resultado para todas as categorias de impacto, resultando em danos para a saúde humana, ou ecossistemas ou recursos, respectivamente;
- Evita a dupla contagem da categoria de uso do solo com ecotoxicidade e eutrofização;
- A fase de normalização é baseada em indicadores *endpoint*.

#### 3.3.1.3. EDIP 1997-2003 (WENZEL et al.,1997; POTTING and HAUSCHILD, 2005)

A parte de AICV de EDIP97 (WENZEL et al., 1997) é composta por categorias clássicas relacionadas com categorias de impacto de emissões *midpoint*, bem como recursos e ambiente de trabalho. Inclui normalização e ponderação dos impactos ambientais com base em metas de políticas ambientais. EDIP2003 (POTTING e HAUSCHILD, 2005) é uma continuação da metodologia com a inclusão da avaliação de exposição com base em informações regionais de AICV relacionado com categorias de impacto de emissões não-globais *midpoint*. As principais particularidades dessa metodologia são (EC-JRC, 2010b):

- O aquecimento global tem fatores de caracterização para todos os compostos orgânicos voláteis de origem petroquímica;

- Fatores de caracterização de destruição do ozônio tem horizontes de tempo mais curtos (5 e 20 anos), de potencial relevância uma vez que o principal problema com a destruição do ozônio estratosférico será nas próximas décadas;
- Ambiente de trabalho diferenciado;
- Revisão externa por pares de todos os modelos de caracterização.

A Figura 5 traz um fluxograma esquemático da estrutura metodológica do método EDIP.

#### 3.3.1.4. EPS 2000 (STEEN, 1999)

EPS foi inicialmente desenvolvido em 1990 para ajudar desenvolvedores de produtos. A última atualização ocorreu em 2000. O método tem uma estrutura híbrida *midpoint+endpoint*. Especialmente no início, era um modelo de vanguarda, o primeiro a usar monetização e a ter suas incertezas totalmente especificadas. Mecanismos ambientais que são incertos estão inclusos e não foram deixados de fora como acontece em outros métodos. Este método produz indicadores de categoria com os níveis de impacto expressos em unidades monetárias, que podem ser adicionados para calcular pontuação única. As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Percursos complexos, efeitos diretos e a maior parte dos indiretos são cobertos, o que torna o método bastante completo em relação a impactos e substâncias cobertos;
- Abordagem média consistente: os níveis médios de danos observados estão relacionados com o nível estressor, a partir do qual os fatores de impacto são estimados. Isso resulta em estimativas, mas estas são consideradas aceitáveis, pois a incerteza envolvida é estimada;
- O mercado como usual atualmente é o cenário padrão para resultados tecnológicos do futuro em um fator de dano relativamente alto para o esgotamento de recursos;

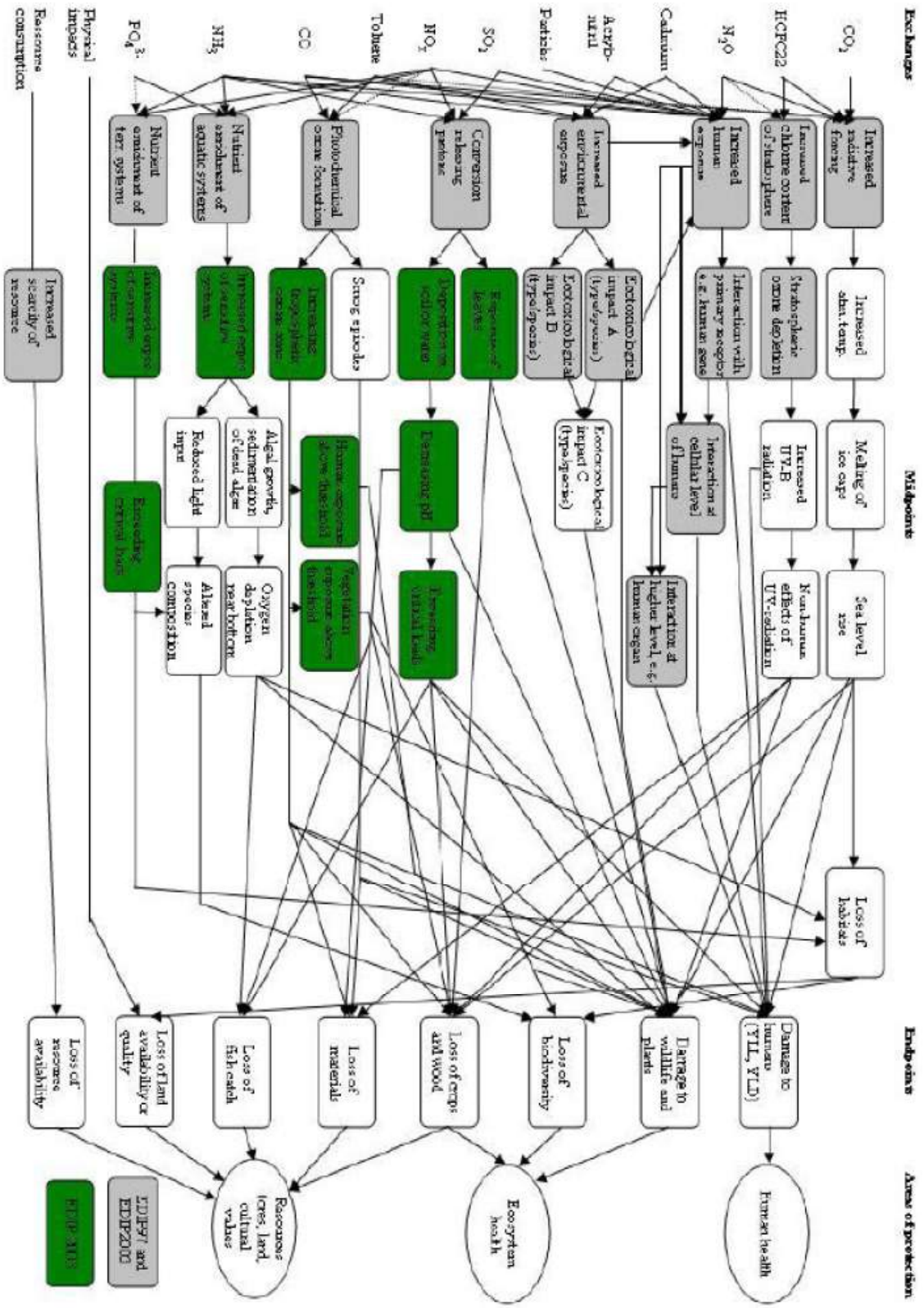


Figura 5: Fluxograma esquemático da metodologia EDIP. Fonte: EC-JRC (2010b)

- Cinco áreas de proteção são consideradas: os valores da saúde humana, capacidade de produção dos ecossistemas, recursos de ações abióticos, biodiversidade e culturais e recreativas.
- Impactos no ecossistema incluem efeitos na produção de carne, peixe e madeira.
- Todos os efeitos são calculados por substância, o que é traz mais precisão do que a utilização do princípio guarda-chuva;
- Emissões de altitude elevadas de aeronaves estão incluídas.

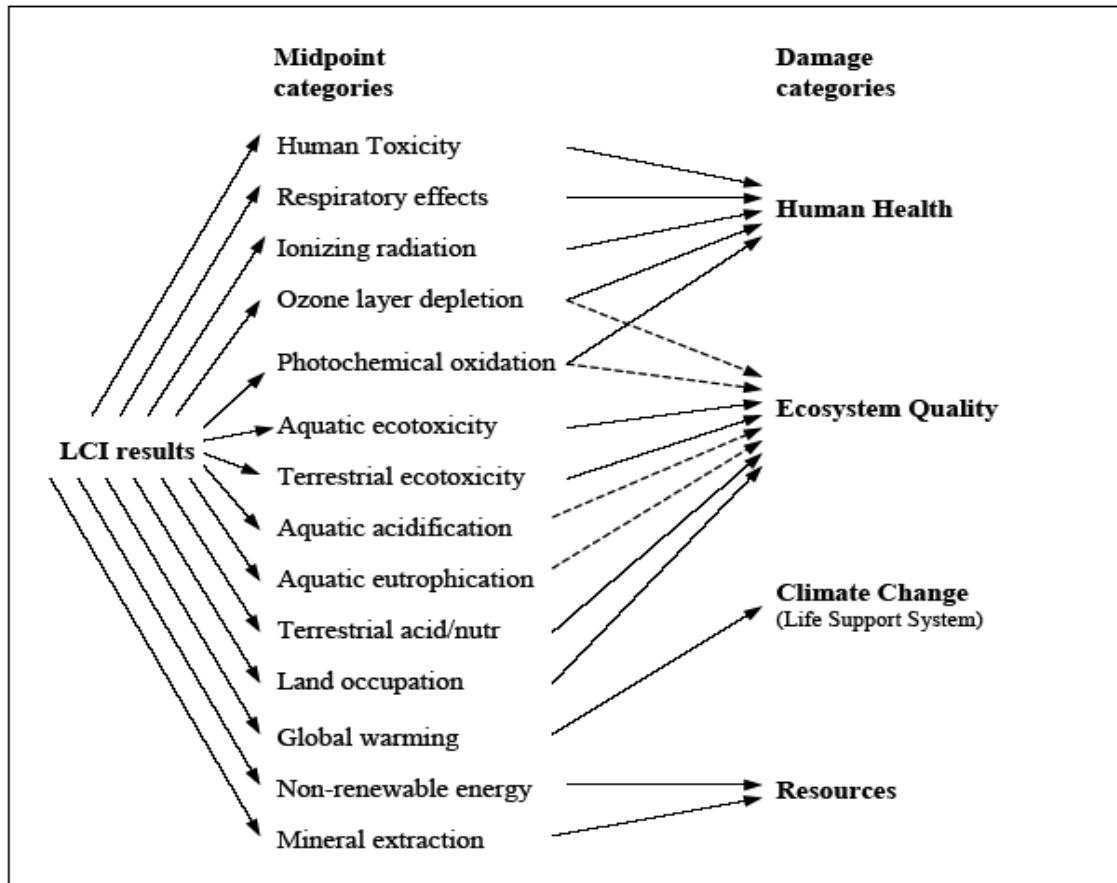
#### 3.3.1.5. IMPACT 2000+ (JOLLIET et al., 2004)

Esta metodologia propõe uma implementação viável de abordagem combinada *midpoint/endpoint*, ligando todos os tipos de resultados de ICV (fluxos elementares e outras intervenções), por 14 categorias *midpoint* e quatro *endpoint*. Traz novos conceitos e métodos, com base abordagens existentes, para garantir que melhor se ajustem ao escopo comparativo de AICV, especialmente para a avaliação comparativa de toxicidade humana e eco-toxicidade. Foi desenvolvido em colaboração com os desenvolvedores do método LIME, e outras categorias *midpoint* são adaptadas de métodos existentes (Eco-indicador 99 e CML, 2002). Todos os impactos *midpoint* são expressos em unidades de uma substância de referência e relacionados com as quatro categorias de impacto: saúde humana, qualidade do ecossistema, alterações climáticas e recursos. Normalização pode ser realizada no nível *midpoint* ou *endpoint*.

A Figura 6 traz um fluxograma esquemático da estrutura do método IMPACT 2002+.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Novos conceitos e métodos de avaliação comparativa melhorada de toxicidade humana e efeitos de ecotoxicidade (ambos são baseados em respostas médias ao invés de suposições conservadoras) foram desenvolvidos para IMPACT 2002 +;



**Figura 6: Fluxograma esquemático da metodologia IMPACT 2002+.** Fonte: EC-JRC (2010b)

- Para a categoria recursos, o conceito de energia excedente a partir de Muller Wenk, mas somando energia primária e excedente para os combustíveis fósseis. Desenvolvimentos têm sido realizados sobre a exposição do ar interior e impactos diretos de pesticidas.

### 3.3.1.6. LIME (ITSUBO et al., 2004)

O método de LIME (*Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling*) foi desenvolvido no Japão, com base na ajuda de especialistas de todo o mundo, e é amplamente utilizado no Japão. A documentação completa do método de LIME 1, está sendo traduzida, enquanto alguns artigos científicos já estão disponíveis. As descrições da continuação, LIME 2, estão na sua maioria em japonês. O método é aplicado principalmente no Japão. Baseia-se no



desenvolvimento de listas de *midpoint* (caracterização), *endpoint* (avaliação de danos) e ponderação, refletindo as condições ambientais do Japão.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Danos associados com o ambiente construído estão incluídos;
- Totalmente desenvolvido para as condições naturais e humanas japonesas;
- Monetização é usada para avaliação, mas também pode ser usada com painel de ponderação;
- Novo trabalho está em curso para especificar fatores de incerteza;
- A modelagem sistemática do ponto médio até o ponto final é a força da metodologia LIME, e o modelo proposto deve ser sistematicamente considerado por esta função.

A Figura 7 traz um fluxograma esquemático da estrutura do método LIME2.

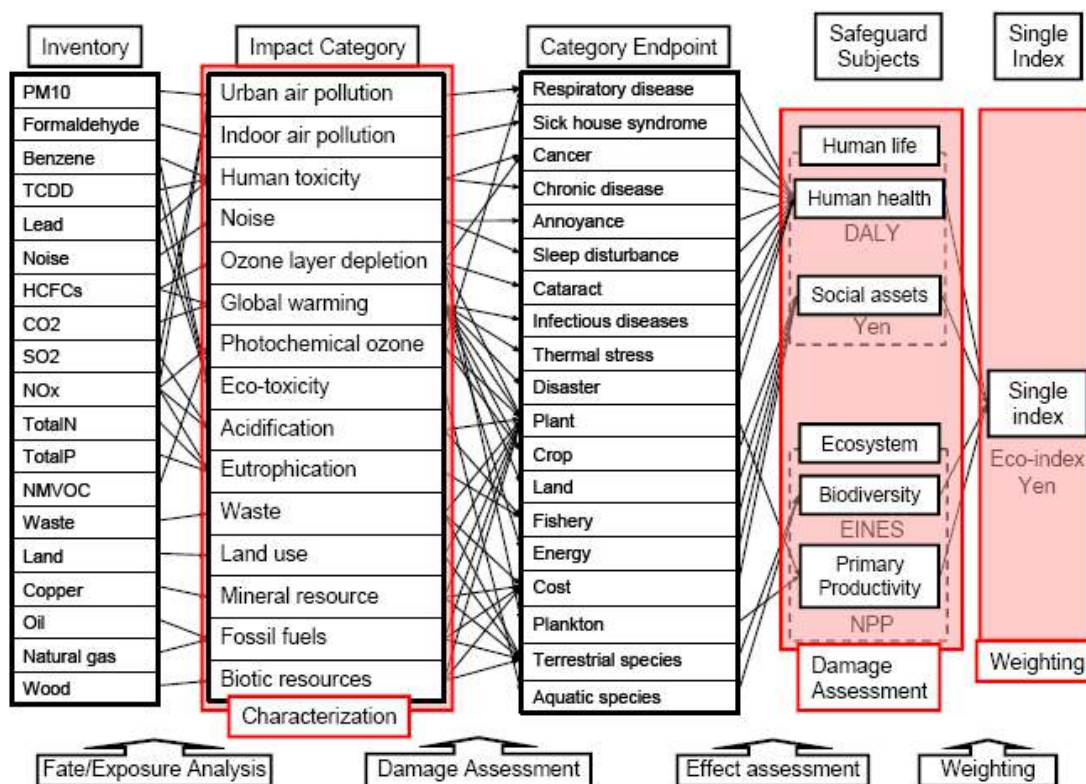


Figura 7: Fluxograma esquemático da metodologia LIME. Fonte: EC-JRC (2010b)

### 3.3.1.7. ReCiPe (GOEDKOOPEt al., 2008)

O método ReCiPe é uma continuação dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2002. Ele integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura consistente. Embora inicialmente a integração dos métodos fosse o objetivo, todas as categorias de impacto têm sido remodeladas e atualizadas (exceto radiação ionizante). O método não foi publicado como um único documento ainda, mas categorias de maior impacto têm sido descritas periódicos científicos. Para todas as categorias de emissões princípios e escolhas semelhantes são usados. Todos os impactos são marginais. Todas as categorias de impacto da mesma área de proteção têm a mesma unidade de indicador. Os mesmos mecanismos ambientais são usados para cálculos de *midpoint* e *endpoint*.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Uso consistente de *midpoints* e *endpoints* no mesmo mecanismo ambiental. Pontos médios são escolhidos o mais próximo possível aos resultados de ICV (menor incerteza do indicador);
- Abordagem marginal consistente;
- Subcompartimentos de ar rural e urbano aplicados a fatalidades e modelo de exposição para a toxicidade humana.
- A maioria das categorias de impacto já foi descrita em artigos científicos.

A Figura 8 traz um fluxograma esquemático da estrutura do método ReCiPe.

### 3.3.1.8. Ecological Scarcity Method / Ecopoints 2006 (MULLER-WENK, 1994)

O método de Ecological Scarcity - às vezes chamado Swiss Ecoscarcity ou Swiss Ecopoints - permite uma ponderação comparativa e agregação de várias intervenções ambientais pelo uso dos chamados eco-fatores.

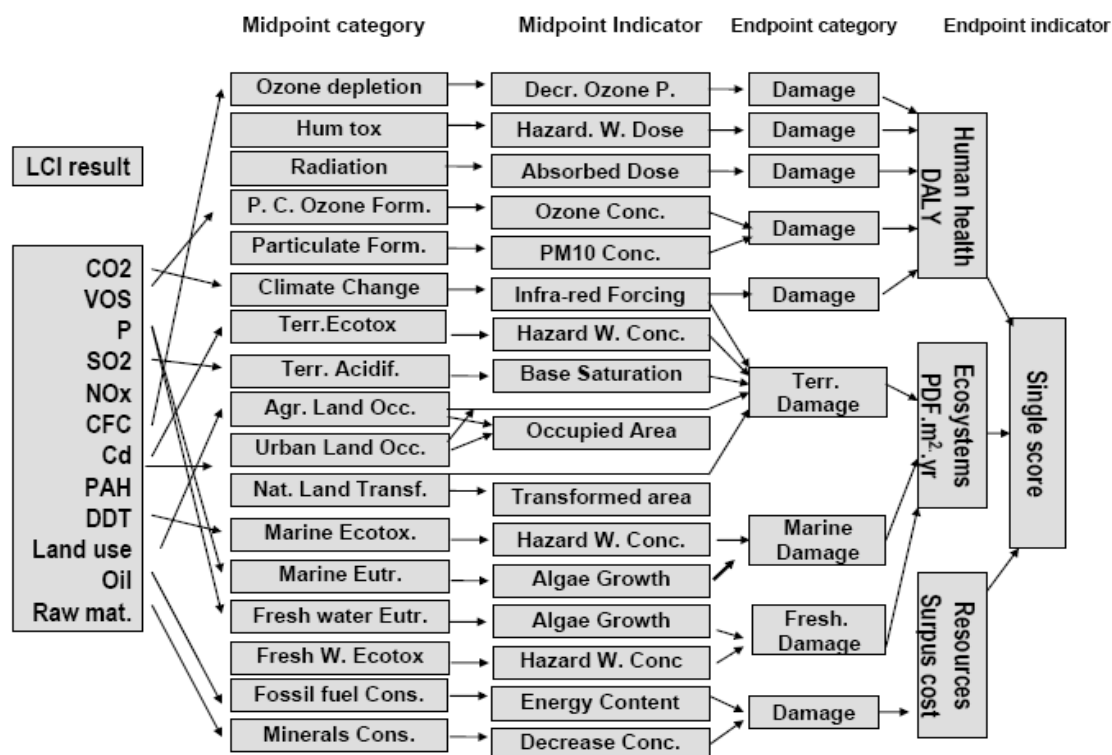


Figura 8: Fluxograma esquemático da metodologia ReCiPe. Fonte: EC-JRC (2010b)

O método fornece esses fatores de ponderação para emissões diferentes em água, ar e solo superficial/águas subterrâneas, bem como para o uso dos recursos energéticos. Os fatores ecológicos baseiam-se nos fluxos anuais reais (fluxos atuais) e sobre o fluxo anual considerado como crítico (fluxos críticos) em uma área definida (país ou região). Os eco-fatores foram originalmente desenvolvidos para a área da Suíça e, mais tarde, conjuntos de eco-fatores também foram disponibilizados para outros países, como Bélgica e Japão. O método foi desenvolvido para avaliações ambientais padrão, por exemplo, de produtos ou processos específicos.

### 3.3.1.9. TRACI (BARE et al., 2003)

Foi desenvolvido pela EPA dos EUA como um método *midpoint* que representa as condições ambientais nos EUA como um todo, ou por estado. Durante o desenvolvimento do TRACI, a coerência com os pressupostos de modelagem anteriores foi importante para cada

categoria de impacto. Para categorias como a acidificação e formação de fumaça, modelos empíricos detalhados norte-americanos, como os desenvolvidos pelo *United States National Acid Precipitation Assessment Program* e *California Air Resources Board*, permitiram a inclusão das abordagens mais sofisticadas para localizações específicas e fatores de caracterização para localização específica. Escolhas são minimizadas pela utilização de níveis *midpoint*. Onde as escolhas são necessárias, são feitas com base nas políticas da EPA.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Esse método é apoiado pela EPA dos EUA, e é especialmente relevante para as emissões que ocorrem como parte de ciclos de vida do produto nos EUA.
- Para a acidificação, eutrofização e formação de fumaça, fatores de caracterização regionais específicos (por estado) estão disponíveis.

A Figura 9 traz um fluxograma esquemático da estrutura do método TRACI.

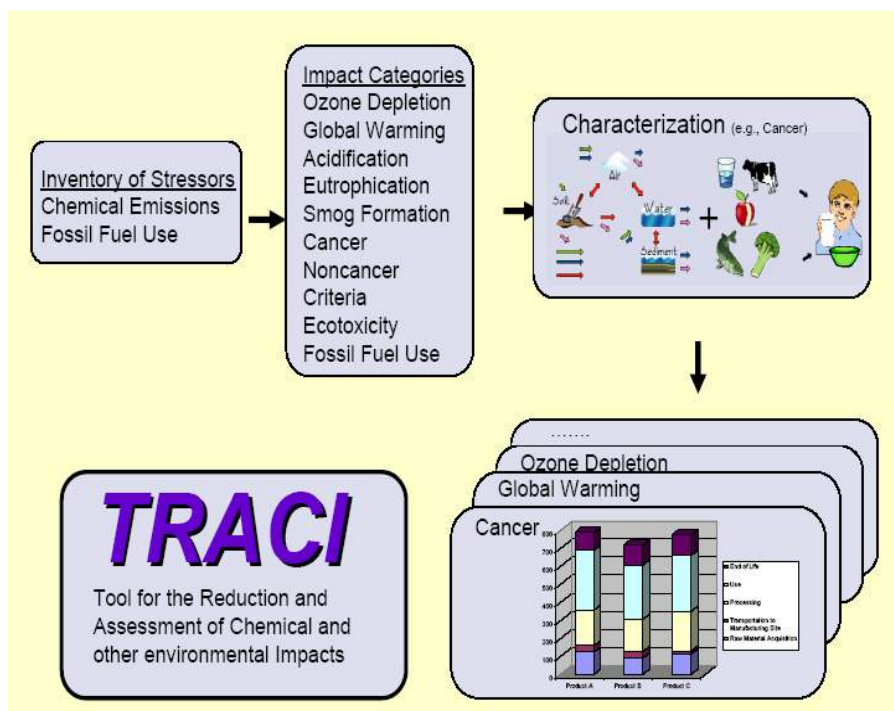


Figura 9: Fluxograma esquemático da metodologia TRACI. Fonte: EC-JRC (2010b)

#### 3.3.1.10. MEEuP (Kemna et al., 2005)

A metodologia MEEuP (*Methodology study for Eco-design of Energy-using Products*) foi desenvolvida por um contratante, em nome da Comissão Europeia (DG Enterprise) para avaliar quais e em que medida diversos produtos que consomem energia cumprem determinados critérios que os façam elegíveis para rotulagem CE, sob aplicação de medidas previstas no âmbito do Eco-design dos produtos elétricos da Diretiva 2005/32/CE, adotando uma abordagem de ciclo de vida. A metodologia inclui, além de dados de inventário e parâmetros técnicos para produtos elétricos, também fatores específicos de avaliação de impacto com uma abordagem única. O método MEEuP também se destina a apoiar o eco-design em geral.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Usado principalmente pela União Europeia para a avaliação dos produtos elétricos;
- Baseado em diretivas da União Europeia ou em acordos internacionais, o que traz o benefício de maior aceitação pelos órgãos competentes.

#### 3.3.1.11. Impact World + (IMPACT WORLD +, 2012)

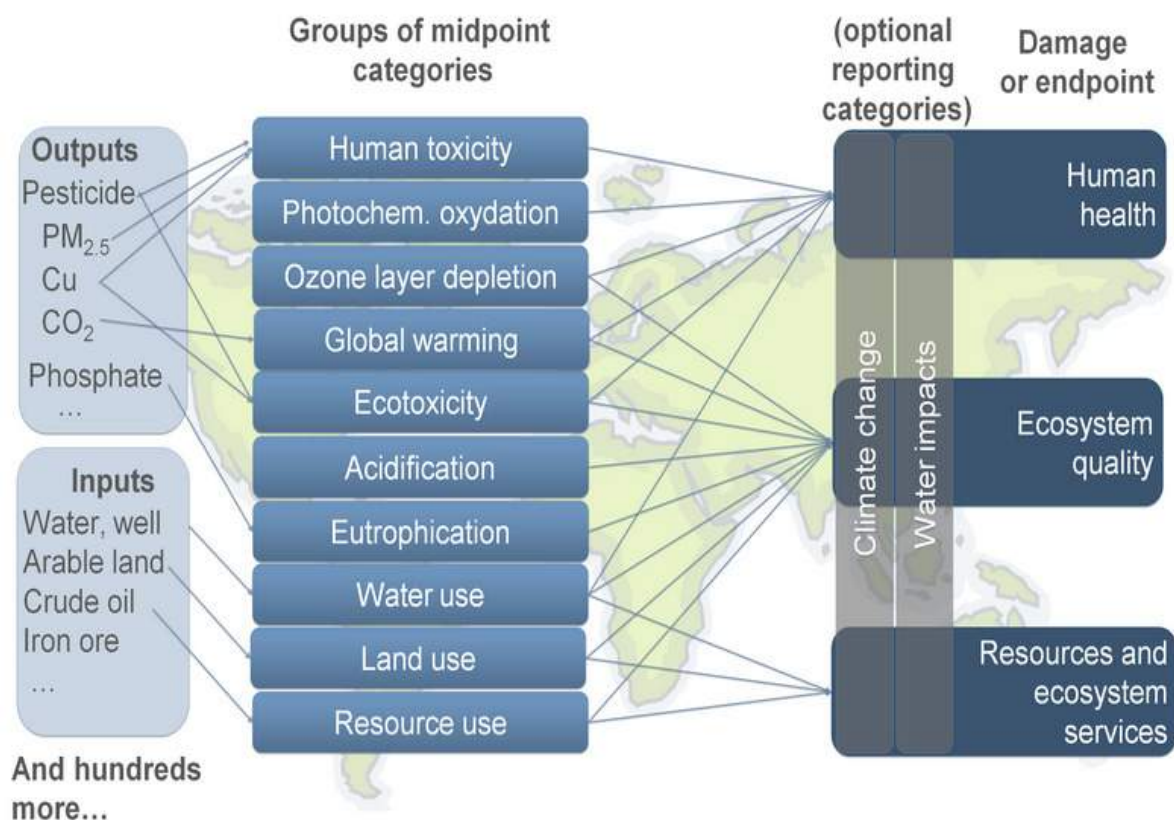
A maioria dos impactos modelados na ACV é regional ou local, no entanto, as metodologias de ACV atualmente oferecem fatores de caracterização genéricos, os quais representam condições médias para uma região específica, como um país ou continente, sem levar em consideração a variabilidade espacial desses impactos.

A metodologia IMPACT World+ está sendo desenvolvida como resposta à necessidade de regionalização da avaliação de impacto. Essa metodologia cobre todo o mundo, implementando abordagens de modelagem de caracterização desenvolvidas como uma atualização conjunta dos métodos IMPACT 2002+, EDIP e LUCAS.

Informações relacionadas à variabilidade espacial e modelagem de incertezas estão inclusas, e a metodologia oferece fatores de caracterização para cada continente, permitindo a avaliação regional de qualquer emissão/consumo de recursos que seja georreferenciado, como fornecido pelo banco de dados Ecoinvent, e a determinação da incerteza relativa a uma emissão de localização desconhecida, associando a variabilidade geográfica correspondente de cada fator de caracterização numa dada escala geográfica. A Figura 10 mostra a estrutura do método Impact World+.

### 3.3.2. Discussão comparativa

As metodologias de AICV existentes estudadas neste trabalho podem ser classificadas e comparadas de acordo com os seguintes parâmetros metodológicos:



**Figura 10: Fluxograma esquemático da metodologia Impact World+.** Fonte: IMPACT WORLD+

(2012)

- Categorias de impacto: Apresentação de todas as categorias de impacto abordadas pela metodologia;
- Nível de Avaliação de Impacto: Atribuição de níveis de avaliação de impacto *midpoint*, *endpoint* ou híbrido (*midpoint+endpoint*) às categorias discriminadas no item anterior.
- Abrangência de aplicação: Determinação da abrangência do escopo geográfico/regional para o qual uma determinada categoria de impacto de uma metodologia específica estudada foi criada;
- Metodologia de Normalização: Descrição da metodologia de normalização apresentada para o método de AICV;
- Metodologia de Ponderação: Descrição da metodologia de ponderação apresentada para o método de AICV.

O primeiro tipo de agrupamento que pode ser realizado entre as metodologias de AICV estudadas é referente ao nível de avaliação *midpoint* e *endpoint*. Neste estudo, optou-se por definir tal nível de avaliação por categoria de impacto, uma vez que algumas metodologias apresentam uma característica híbrida, ou seja, a junção de avaliações *midpoint* e *endpoint*.

Das metodologias apresentadas, CML 2002, EDIP 97-2003, MEEuP e TRACI constituem o grupo das metodologias de avaliação *midpoint*, ou seja, aquelas em que todas as categorias de impacto baseiam-se em avaliações de ponto médio ou impacto potencial direto das emissões. Outra vertente constitui as metodologias de avaliação *endpoint*, ou seja, aquelas que baseiam todas as suas categorias de impacto em avaliação de danos às áreas de proteção. Este grupo é composto pelos métodos Eco-indicator 99 e EPS 2000.

Um terceiro grupo é composto por metodologias híbridas, as quais apresentam categorias de avaliação *midpoint* e *endpoint* e algumas categorias combinam as avaliações de potenciais de

impacto de ponto médio e de avaliação de danos. Neste grupo o método LIME apresenta categorias de impacto baseadas em avaliação *midpoint*, *endpoint* e híbrida, enquanto os métodos Impact 2002, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity 07 e Impact World + têm as categorias de impacto avaliadas no nível *endpoint* e híbrido.

Quanto ao contexto de criação das ferramentas, com exceção da metodologia LIME, direcionada inteiramente ao contexto japonês, e da metodologia TRACI desenvolvida tomando como base as características ambientais da América do Norte, mais especificamente os Estados Unidos para algumas categorias locais, todas as demais metodologias foram desenvolvidas por países da Europa e consideram, para categorias de impacto regional, as características ambientais europeias, muitas vezes de países específicos. A metodologia Impact World+, diferentemente das demais, foi desenvolvida por equipes de diversas partes do globo.

Uma nuance importante das metodologias observadas neste trabalho se refere à abrangência de aplicação das categorias de impacto, também chamada de validade regional pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b).

Algumas metodologias assumem ser direcionadas para contextos regionais específicos, como é o caso das metodologias LIME (Japão), MEEuP e ReCiPe (União Europeia), Eco-Indicator 99 (Europa, com categorias específicas para Holanda e Suíça), Swiss Ecoscarcity 07 (Suíça) e TRACI (Estados Unidos/América do Norte). Para essas metodologias todas as categorias de impacto têm abrangência de aplicação regional/local, com exceção daquelas categorias globais por definição como Aquecimento Global, Destruição da Camada de Ozônio e Consumo de Recursos não-renováveis, sendo que algumas dessas metodologias consideram inclusive o consumo de recursos não renováveis como categoria de validade regional.

A metodologia Impact 2002+ tem a maioria de suas categorias medidas pelos danos causados levando em consideração a Europa, no entanto, já apresenta uma tentativa de



globalização das categorias referentes à Toxicidade humana, Efeitos respiratórios e Radiação ionizante, as quais na grande maioria dos métodos apresentam aplicação local.

Outras metodologias, notavelmente uma de nível de avaliação *endpoint*, a EPS 2000, e outra de avaliação *midpoint*, a CML 2002, buscam uma maior globalização da validade regional de suas categorias de impacto, com exceção das categorias Parcela de extinção de espécies (do método EPS 2000) e Formação de foto-oxidantes e Acidificação (do método CML 2002). O fato de apenas essas categorias serem mantidas como “regionais” em metodologias quase inteiramente de validade global, chama a atenção sobre as possibilidades e fragilidades de globalização de tais categorias.

A metodologia EDIP apresenta validade global para todos os impactos em sua primeira versão, de 1997, no entanto, no novo desenvolvimento do método, no ano de 2003, a maioria das categorias já se apresenta com aplicabilidade direcionada à Europa, demonstrando uma regionalização da Avaliação de Impacto. Tal trajetória de desenvolvimento pode demonstrar a necessidade de avaliação de alguns impactos regionalmente, de modo a obter-se uma maior precisão nos resultados.

Neste quesito a metodologia Impact World+ diferencia-se das demais, por sua proposta de cobertura mundial, uma vez que oferece fatores de caracterização para cada continente, permitindo a avaliação regional de qualquer emissão/consumo de recursos que seja georreferenciado.

Quanto às metodologias de normalização e ponderação, não há um consenso, dentre as metodologias, sobre métodos de normalização e ponderação padrão. A maioria dos métodos apresentados desenvolvem alguma metodologia própria de normalização, com exceção de EPS2000, MEEuP e TRACI.

Na metodologia LIME a normalização não é apresentada por não se fazer necessária, uma vez que a monetização é aplicada ao nível *endpoint*. Em relação à ponderação, esta também é

abordada pela maioria das metodologias, não sendo desenvolvida apenas pelo CML2002, Impact 2002+, MEEuP e TRACI.

Finalmente, no que se refere às categorias de impacto abordadas por cada uma das metodologias, podemos notar que a temática das categorias presentes numa determinada metodologia está diretamente ligada ao nível de avaliação (*midpoint* ou *endpoint*) e ao contexto de criação desta. Isso acontece porque as temáticas abordadas por uma metodologia de AICV refletem, na maioria das vezes, as áreas consideradas de maior sensibilidade ambiental para o contexto de criação da metodologia.

As categorias referentes ao potencial de impacto para mudanças climáticas (ou aquecimento global) e destruição da camada de ozônio estão presentes em todas as metodologias estudadas, com exceção da metodologia EPS 2000, onde apenas potenciais de danos às áreas de proteção são abordados. O mesmo acontece com as categorias Acidificação e Eutrofização, as quais apenas não são abordadas pelas metodologias EPS 2000 e Swiss Ecotoxicity 07.

Em relação ao potencial de impacto para formação de foto-oxidantes, este não se apresenta abordado pelas metodologias Eco-Indicator 99, EPS e TRACI, de forma parecida com a categoria Ecotoxicidade, a qual não é avaliada pelas metodologias EPS, MEEuP e Swiss Ecotoxicity 07.

O potencial de impacto para toxicidade humana demonstra diferentes abordagens dentre as metodologias estudadas. É avaliado em nível intermediário (direto) pelas metodologias CML, EDIP e LIME. No entanto, em outras metodologias predominantemente *endpoint* como Eco-Indicator 99, EPS 2000, TRACI, MEEuP e Swiss Ecotoxicity 07, esta categoria é avaliada do ponto de vista do potencial de danos às áreas de proteção. Outras metodologias apresentam os dois níveis de avaliação, *midpoint* e *endpoint*, como Impact 2002+, ReCiPe e Impact World+.

Questões referentes ao Consumo de Recursos e Geração de Resíduos são abordadas por todas as metodologias estudadas. Nas metodologias de avaliação *midpoint* o consumo de recursos,

assim como a geração de resíduos, são tratados na forma de quantificação direta dos fluxos de inventário. Nas metodologias *endpoint*, por outro lado, tais questões são abordadas sob o ponto de vista de seus danos potenciais, como o esgotamento de recursos e consequências ambientais potenciais da disposição de resíduos sólidos.

As problemáticas ambientais relacionadas ao uso do solo são abordadas por categorias de impacto em metodologias de AICV como CML 2002, Eco-Indicator 99, Impact 2000+, LIME, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity 07 e Impact World+.

Dessa forma, podemos notar pela discussão das características e particularidades das metodologias de AICV que essas variam bastante, conferindo a tais metodologias um grande potencial de interferência dos resultados finais da AICV.

### **3.4. Interpretação de Ciclo de Vida**

A fase de interpretação de uma ACV tem dois objetivos principais que se diferenciam fundamentalmente:

- Durante os passos iterativos da ACV e para todos os tipos de entregas, a fase de interpretação serve para orientar o trabalho no sentido de melhorar os modelos de ICV para atender as necessidades derivadas do objetivo do estudo.
- Se as etapas iterativas da ACV resultaram no modelo e resultados finais de ICV e, especialmente, para estudos comparativos de ACV, a fase de interpretação serve para tirar conclusões robustas e - muitas vezes - recomendações.

A interpretação de ciclo de vida é a fase da ACV onde os resultados das demais fases são então considerados coletivamente e analisados sob a luz do rigor, completeza e precisão alcançados para os dados utilizados, assim como também para as suposições que tenham sido assumidas durante o estudo de ACV/ICV. Os resultados finais da interpretação podem ser conclusões e recomendações, as quais devem respeitar as intenções e restrições do objetivo e escopo definidos para o estudo. Isso está especialmente relacionado com a adequação da unidade

funcional e fronteiras do sistema, assim como a qualidade dos dados obtidos, em relação ao objetivo. A interpretação deve apresentar os resultados da ACV de forma inteligível e ajudar o usuário do estudo avaliar a robustez das conclusões e compreender as limitações potenciais do estudo.

A fase de interpretação é composta de três etapas:

- Identificação das questões significativas como processos elementares, parâmetros, suposições e fluxos elementares;
- Tais questões devem ser avaliadas considerando sua sensibilidade ou influência nos resultados gerais do estudo de ACV, etapa que inclui avaliações de completeza e consistência;
- Os resultados da avaliação devem ser usados na formulação de conclusões e recomendações a partir do estudo de ACV.

Em casos onde o estudo envolve comparações entre dois ou mais sistemas, considerações adicionais deverão ser incluídas na interpretação.

#### 3.4.1. Identificação de questões significativas

O objetivo deste primeiro elemento da interpretação é analisar e estruturar os resultados das fases anteriores da ACV de forma a identificar as questões significativas. Há dois aspectos inter-relacionados das questões significativas:

- Primeiramente, há os principais contribuintes para os resultados da AICV, isto é, os estágios, processos e fluxos elementares mais relevantes do ciclo de vida, assim como as categorias de impacto mais relevantes;
- Em segundo lugar, há as principais escolhas que podem ter influência potencial na precisão dos resultados finais da ACV, como escolhas metodológicas, suposições, dados utilizados para determinar os inventários dos processos, metodologias utilizadas para a AICV, assim fatores de normalização e ponderação opcionalmente utilizados.

### 3.4.2. Análise de Contribuição

A análise de contribuição pode ser requerida para várias aplicações:

- Identificar a necessidade de coleta de novos dados ou de melhoria de qualidade de dados, pela quantificação da completeza do inventário;
- Concentrar mais esforços na coleta de dados sobre os processos que mais contribuíram e intervenções individuais de fluxos elementares;
- Concentrar esforços em *ecodesign* e melhoria/desenvolvimento do produto, nos processos que mais contribuíram e intervenções individuais de fluxos elementares;
- Informar a parcela de contribuição interna e externa para o impacto ambiental global às partes interessadas;
- Contribuir para o controle de qualidade interno durante o trabalho de ACV, investigando a verossimilhança qualitativa e quantitativa dos resultados detalhados da análise de contribuição.

### 3.4.3. Avaliação

A avaliação é realizada para estabelecer fundamentos para se obter conclusões e fornecer recomendações durante a interpretação dos resultados de ICV/ACV. Tal avaliação envolve: verificação de completeza, verificação de sensibilidade e verificação de consistência.

O resultado da avaliação é crucial para dar robustez às conclusões e recomendações do estudo, e precisa ser apresentado de forma que dê uma compreensão clara dos resultados. Usando os mesmos métodos e abordagens como a avaliação final do estudo de ACV, a avaliação é também usada durante o desenvolvimento do estudo para analisar a completeza, rigor, precisão e consistência alcançados. Isto serve para identificar a necessidade por dados adicionais ou melhores, assim como revisão de suposições feitas e outras escolhas metodológicas.

#### 3.4.3.1. Verificação de Completeza

Verificações de completeza no inventário são realizadas de forma a determinar em que grau este está completo e se os critérios de corte foram cumpridos. Se os critérios de corte não foram obedecidos, dados adicionais ou melhores deverão ser usados para satisfazer o objetivo e escopo da ACV.

Durante a execução da verificação de completeza, fatores de AICV e fluxos elementares faltantes devem ser quantitativamente considerados. Em casos onde os critérios de corte não puderem ser atingidos, as definições de objetivo e escopo deverão ser ajustadas para acomodar tal lacuna de completeza, o que pode significar que questões originais do objetivo não poderão ser respondidas, ou que os dados obtidos não atingiram a qualidade requerida.

Como regra geral, é recomendada a inclusão do maior número de fluxos elementares possível no inventário, para permitir que o usuário realize uma avaliação de impacto detalhada. É importante notar que a porcentagem de completeza alcançada não pode ser mal interpretada, como indicando exatos 100% de completeza. No entanto, a completeza alcançada indica o valor real aproximado.

Na prática, essa questão pode ser razoavelmente abordada da seguinte forma: depois da modelagem do sistema com os dados disponíveis, para todas as lacunas de informação um valor/fluxo “bem aproximado” deverá ser identificado pelo julgamento de especialistas. Isso se relaciona a todos os tipos de lacunas de informações e dados, especialmente:

- Tipos e quantidades de dados de fluxos inicialmente faltantes;
- Composições de elementos e conteúdo de energia de todos os fluxos que contribuam de forma relevante para a massa total dos fluxos;
- Custos de todos os bens e serviços que contribuam de forma relevante para o custo e valor total de produção;
- Impacto ambiental dos dados faltantes para bens e serviços consumidos.

As mais problemáticas são as lacunas qualitativas, ou seja, a falta de conhecimento da ocorrência de um fluxo. Para emissões, provisões legais de qualquer natureza que visem a apresentação de relatórios, medição ou a redução dessas emissões são um meio adequado para detectar a sua existência e relevância potencial.

Para obtenção dos valores de completeza atingidos, provisórios ou finais, uma porcentagem de cobertura de dados (com qualidade, no mínimo, de dados estimados) é calculada. Esse procedimento utiliza o valor aproximado de 100% do modelo de sistema completo, incluindo dados de baixa qualidade como referência.

#### 3.4.3.2. Verificação de Sensibilidade

A verificação de sensibilidade tem o objetivo de avaliar a confiabilidade dos resultados, conclusões e recomendações do estudo de ACV. Julgamento de especialistas e experiências anteriores contribuem para a análise de sensibilidade. Análise de cenários e cálculos de incerteza são os métodos quantitativos para apoiá-la. Na fase de interpretação, a análise de sensibilidade é utilizada juntamente com informações sobre as incertezas de questões significativas dentre os dados de inventário, de avaliação de impacto e suposições e escolhas metodológicas para avaliar a confiabilidade dos resultados finais, e conclusões e recomendações baseadas em tais resultados.

A análise de sensibilidade deve verificar as limitações na adequação de escolhas de escopo, em relação ao objetivo do estudo, assim como o estabelecimento de conclusões e recomendações, especialmente:

- Identificação dos sistemas a serem estudados;
- Identificação das funções e unidades funcionais do sistema, ou, em caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- Identificação da modelagem e abordagem de ICV apropriadas a serem aplicadas;
- Identificação das fronteiras do sistema e quantificação do critério de corte;
- Seleção das categorias de impacto e métodos de AICV a serem aplicados;

- Identificação da abordagem a ser usada para interpretação;
- Identificação dos dados de ICV e requisitos de qualidade dos dados, incluindo a aplicabilidade dos dados de inventário nos métodos de AICV selecionados;
- Seleção de métodos de normalização e ponderação, caso sejam inclusos no estudo;
- Tipos de suposições e escolhas de valores feitas e sua relevância;
- Identificação das limitações aplicáveis ao uso e/ou interpretação dos resultados.

Em relação a questões de objetivo e escopo, a verificação de sensibilidade pode ser feita pelo cálculo e comparação de cenários, especialmente para diferentes abordagens de alocação na fase de inventário. Para outros itens, isso pode ser feito por análise qualitativa baseada no julgamento de especialistas e apoiada em experiências anteriores.

A análise de sensibilidade deve verificar a existência de limitações na adequação do trabalho de ICV, em relação ao objetivo e escopo do estudo, assim como estabelecer conclusões e recomendações. Isso se refere, especialmente, à coleta e seleção adequada de dados de inventário em relação à:

- Representatividade tecnológica, geográfica e temporal para o sistema analisado;
- Completeza do inventário em relação às categorias de impacto escolhidas e quantitativamente relevantes;
- Precisão dos valores e parâmetros de inventário, devido à incerteza dos dados primários utilizados.

A verificação pode ser feita por análise de cenários e/ou ser acompanhada por um cálculo de incerteza.

Em relação à AICV, a verificação de sensibilidade pode ser realizada por uma análise de cenários, aplicando-se diferentes metodologias de AICV possíveis. Isso pode ser acompanhado por um cálculo de incertezas nos resultados da AICV.

Devido ao caráter iterativo da ACV, a análise de sensibilidade pode ainda ser utilizada como um elemento integrado nas iterações do estudo, incorporando a coleta de dados de inventário,



avaliação de impacto e determinação de fronteiras do sistema. Os resultados dessas análises de sensibilidade anteriores poderão então ser usados como ponto de partida para a verificação de sensibilidade da interpretação.

#### 3.4.3.3. Verificação de Consistência

A verificação de consistência é realizada para investigar se as suposições, métodos e dados foram aplicados de forma consistente no decorrer do estudo de ACV. Essa verificação é aplicável ao ciclo de vida de um sistema analisado, assim como entre sistemas comparados.

Questões metodológicas de relevância são, especialmente, a modelagem e abordagem de ICV, assim como também o estabelecimento de fronteiras do sistema, excesso de dados, aplicação consistente da avaliação de impacto, e outras suposições. Na fase de inventário as principais questões são aquelas relacionadas à consistência da representatividade temporal, geográfica e tecnológica dos dados, à adequação do processo de unidade escolhido, ou à capacidade dos resultados do ICV representarem os processos do sistema, assim como a completeza e precisão dos dados. Questões relacionadas à avaliação de impacto são aquelas referentes à aplicação consistente dos elementos da AICV, incluindo os fatores de normalização e ponderação.

#### 3.4.4. Conclusões, limitações e recomendações

Integrando o resultado dos outros elementos da fase de interpretação e baseando-se nas principais conclusões das fases anteriores da ACV, os elementos finais da interpretação são o estabelecimento de conclusões, identificação das limitações do estudo, e desenvolvimento de recomendações para o público-alvo, de acordo com a definição de objetivo e aplicações previstas dos resultados.

As limitações mais frequentemente notáveis para estabelecimento de conclusões significativas são:

- As fronteiras do sistema/critérios de corte;

- Qualidade e consistência alcançadas para os dados de ICV, conforme o objetivo do estudo;
- Incertezas das metodologias de AICV;
- Suposições da fase de definição de objetivo;
- Outras limitações metodológicas ou específicas do estudo.

Se as conclusões forem consistentes com os requisitos, elas podem ser relatadas como conclusões finais, caso contrário, essas precisarão ser reformuladas e verificadas novamente. Quaisquer limitações do estudo dentro do objetivo e escopo devem ser listadas, e então avaliadas para cada uma, o tipo e a magnitude das consequências que essas têm para as conclusões e aplicações pretendidas.

Em estudos que envolvem a comparação de sistemas, a interpretação deve considerar alguns pontos adicionais, para assegurar conclusões justas e relevantes a partir do estudo:

- Questões significativas devem ser determinadas para cada um dos sistemas, com atenção especial para questões que venham a diferir entre os sistemas e que tenham potencial de mudar conclusões da comparação. Tais conclusões precisam ser eliminadas se possível ou, caso contrário, consideradas na formulação do relatório;
- Se uma análise de incerteza foi realizada para investigar se a diferença entre dois sistemas é estatisticamente significativa, tal análise deve ser realizada nas diferenças entre os sistemas, levando em conta variações entre processos;
- A verificação de consistência aborda o tratamento consistente de questões chave nos diferentes sistemas, e é fundamental para assegurar uma comparação justa.

Recomendações baseadas nas conclusões finais do estudo de ACV devem ser lógicas, razoáveis e plausíveis, e estritamente relacionadas com as aplicações pretendidas, conforme definido no objetivo do estudo.

#### 3.4.5. Comunicação

A forma e níveis de apresentação de relatórios dependem de três fatores primários:

- Os tipos de entregas do estudo,
- O objetivo e aplicações pretendidas do estudo e do relatório, e
- O público-alvo (especialmente audiência técnica ou não-técnica e interna ou de terceira parte/pública).

Independentemente de se os resultados da AICV sejam publicados em forma de relatório ou conjunto de dados, por razões de transparência, esses devem ser acompanhados pelos resultados do ICV. Existem três tipos de relatórios:

- Relatório para uso interno e que não deverá ser divulgado a nenhuma parte externa à instituição que encomendou/financiou o estudo ou que realizou o trabalho de ACV;
- Relatório para documentar e/ou comunicar os resultados da ACV, para ser apresentados a uma terceira parte;
- Estudo que envolve uma comparação de produtos da qual os resultados deverão ser divulgados ao público.

O relatório de um estudo de ACV deve ser composto pelos seguintes elementos:

- Sumário Executivo (para audiência não-técnica): deve incluir, pelo menos, elementos chave do objetivo e escopo do sistema estudado. Os principais resultados das fases de ICV e AICV devem ser apresentados de maneira a assegurar o uso apropriado da informação, assim como afirmações relevantes sobre qualidade dos dados, suposições e julgamentos de valores.
- Sumário Técnico (para audiência técnica/praticantes de ACV): deve incluir, no mínimo, o objetivo, escopo com limitações e suposições relevantes, e um diagrama geral de fluxos do sistema estudado, e deve indicar claramente o que foi atingido pelo estudo. Os principais resultados das fases de ICV e AICV devem ser apresentados de maneira a assegurar o uso apropriado da informação, assim como afirmações relevantes sobre qualidade dos dados, suposições e julgamentos de valores.

- Parte principal (para praticantes de ACV): Todas as fases do estudo de ACV devem ser apresentadas de forma detalhada e transparente, incluindo, o objetivo completo do estudo, escopo detalhado, resultados da análise de inventário, avaliação de impacto de ciclo de vida e resultados, Interpretação, conclusões e recomendações.
- Anexos (para praticantes de ACV): Os anexos servem para documentar elementos de natureza mais técnica, que poderiam inapropriadamente interromper o fluxo das partes principais do relatório de ACV, mas que devem ser usados como referência, como, por exemplo, as memórias de cálculo dos inventários e AICV.
- Relatório confidencial: deve conter todos os dados e informações confidenciais que não podem ser disponibilizados publicamente. Esse relatório deve ser disponibilizado para revisores críticos, sob condições de confidencialidade.

#### 3.4.6. Revisão crítica

A revisão crítica deve assegurar, entre outras coisas, se:

- Os métodos utilizados pela AICV são consistentes com a documentação de orientação e assim, também com as normas NBR ISO 14040 (2008) e NBR ISO 14044 (2009),
- Os métodos utilizados para a ACV são válidos científica e tecnicamente,
- Os dados usados são apropriados em relação ao objetivo do estudo,
- A interpretação reflete as limitações identificadas e o objetivo do estudo, e
- O relatório do estudo é transparente e consistente.

### 3.5. Análise de Sensibilidade

Análise de sensibilidade é a avaliação do efeito de uma mudança em uma única entrada nos resultados finais de um estudo de ACV (ROSENBAUM, 2012).

A Norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) estabelece que o objetivo da verificação de sensibilidade, na fase de Interpretação de um estudo de ACV, é “avaliar a confiabilidade dos

resultados finais e conclusões, determinando de que forma eles serão afetados por incertezas nos dados, métodos de alocação ou cálculo dos resultados dos indicadores de categoria”.

Ainda segundo a norma, devem ser consideradas as questões predeterminadas pelo objetivo e escopo do estudo, os resultados de todas as fases anteriores e pareceres de especialistas e experiências anteriores, principalmente em se tratando de afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, quando a avaliação deverá também incluir declarações explicativas baseadas em análises detalhadas de sensibilidade.

O nível de detalhamento requerido para a análise de sensibilidade pela norma 14044 (ABNT, 2009b) é bastante flexível e pouco preciso, sendo descrito como dependendo diretamente das conclusões da AICV, as quais determinam a necessidade de uma análise de sensibilidade mais abrangente ou precisa.

O ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a) oferece uma orientação mais detalhada dos procedimentos a serem utilizados na análise de sensibilidade de um estudo de ACV. De acordo com suas prerrogativas, a verificação de sensibilidade tem a finalidade de avaliar a confiabilidade dos resultados finais e das conclusões e recomendações de um estudo de ACV, e análises de cenários e cálculos de incerteza são os métodos quantitativos que podem ser utilizados para apoiá-la.

Na etapa de interpretação, a análise de sensibilidade é usada juntamente com informações sobre as incertezas das questões significativas relativas aos dados de inventário, de avaliação de impacto e os pressupostos metodológicos, a fim de avaliar a confiabilidade dos resultados finais e as conclusões e recomendações que neles se baseiam. Dessa forma, considera-se útil estruturar a análise de sensibilidade ao longo das seguintes fases de uma ACV: "objetivo e escopo", "inventário do ciclo de vida" e "avaliação de impacto do ciclo de vida" (EC-JRC, 2010a).

Na fase de Objetivo e Escopo a análise de sensibilidade é usada para verificar se há limitações na adequação das escolhas de escopo em relação ao objetivo do estudo e das conclusões e recomendações, especialmente na identificação do sistema a ser estudado, identificação da função e unidade funcional, identificação da modelagem de ICV a ser aplicada,

Identificação das fronteiras do sistema e critérios de corte, seleção das categorias de impacto e metodologias de AICV, identificação da abordagem interpretativa a ser utilizada, definição dos requisitos de qualidade dos dados de ICV a serem coletados, e seleção de metodologias de normalização e ponderação (EC-JRC, 2010a).

Quanto às questões de objetivo e escopo, a verificação de sensibilidade pode ser realizada por meio do cálculo e comparação de cenários especialmente para a aplicação de diferentes abordagens metodológicas de ICV para resolver problemas de multifuncionalidade dos processos estudados. Para os demais itens, tal análise pode ser qualitativa, com base em pareceres de peritos e base em experiências anteriores (EC-JRC, 2010a).

Na fase de Inventário de Ciclo de Vida a análise de sensibilidade é utilizada para verificar se há limitações na adequação do trabalho de ICV, em relação ao objetivo e escopo do estudo e das conclusões e recomendações obtidas a partir desse. Isto se refere especialmente à coleta e seleção de dados apropriados de inventário em relação à sua representatividade tecnológica, geográfica e temporal para o sistema analisado, à completeza do inventário em relação às categorias de impacto incluídas e quantitativamente relevantes e, finalmente, à precisão dos valores e parâmetros de inventário, devido a incertezas dos dados brutos utilizados. Essa verificação pode ser feita pela análise conjunta de cenários e/ou ser acompanhada por um cálculo de incertezas (por exemplo, uma simulação de Monte-Carlo). É importante ressaltar mais uma vez que o cálculo da incerteza pode apoiar um julgamento de especialistas, mas não substituí-lo, dadas as limitações de tais cálculos para refletir a incerteza real (EC-JRC, 2010a).

Finalmente, na fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida a análise de sensibilidade é utilizada para verificar se há limitações na adequação do trabalho de AICV em relação ao objetivo e escopo do estudo e das conclusões e recomendações, quanto à seleção apropriada dos métodos AICV e sua aplicação correta e completa para o inventário, à seleção adequada de fatores de normalização e ponderação (se incluídos) e sua correta aplicação, à precisão dos resultados de AICV (EC-JRC, 2010a).

Atenção especial deve ser dada, na fase de interpretação, para o fato de que a incerteza inerente aos fatores de caracterização varia entre as categorias de impacto, as quais refletem o estado da arte em termos de modelagem da via impacto subjacente, e também a disponibilidade e qualidade dos dados de substâncias aplicadas no cálculo dos fatores de caracterização de cada substância. As categorias *midpoint* relacionadas a produtos químicos que tratam toxicidade humana e ecotoxicidade são, portanto, acompanhadas por incertezas consideravelmente maiores do que as categorias que tratam de conversão de energia como, por exemplo, acidificação, formação fotoquímica de ozônio ou aquecimento global (EC-JRC, 2010a).

Quanto à AICV, a análise de sensibilidade pode ser feita por uma avaliação de cenários, em relação à aplicação de diferentes métodos admissíveis de AICV. Isto pode ser acompanhado por um cálculo de incerteza dos resultados de AICV, o qual, mais uma vez, pode apenas apoiar uma opinião especializada, mas não substituí-la (EC-JRC, 2010a).

A combinação da análise de sensibilidade em diversas fases de um estudo de ACV ajuda a identificar aspectos fundamentais para a melhoria da coleta de dados de inventário ou de avaliação de impacto. Assim, o foco para a melhoria de qualidade deve ser em dados com forte influência sobre os resultados globais e uma incerteza elevada ao mesmo tempo. Se tais dados não puderem ser melhorados, o resultado é uma baixa qualidade geral dos resultados, a qual deve ser documentada. Se a precisão é insuficiente para atender às exigências da aplicação pretendida dos resultados, pode ser necessário rever o objetivo do estudo. A segunda prioridade para a melhoria da qualidade dos dados são os dados intermediários, ou seja, aqueles que possuem alta sensibilidade ou importância, e incerteza média, ou elevada incerteza e sensibilidade média (EC-JRC, 2010a).

Devido à necessidade de uma abordagem iterativa em ACV a análise de sensibilidade deve ser usada como um elemento integrado, incorporando a coleta de dados de inventário, avaliação de impacto e definição de fronteiras do sistema. Os resultados destas análises de sensibilidade

prévias são usados como ponto de partida para a verificação da sensibilidade da fase de interpretação (EC-JRC, 2010a).

De acordo com Rosenbaum (2012) três abordagens complementares de análise de sensibilidade são possíveis:

- Análise do efeito de uma mudança fixa em um dado de entrada,
- Análise do efeito de uma alteração específica nos parâmetros de incerteza de um dado de entrada,
- Análise do efeito de uma mudança em um dado de entrada do seu valor mínimo até o máximo.

O efeito de uma mudança em um dado de entrada sobre os resultados finais de um estudo de ACV é medido pela análise de sensibilidade e expresso de acordo com a Equação 1 (ROSENBAUM, 2012).

**Equação 1:**

$$S_{in} = (\Delta \text{ saída/saída}) / (\Delta \text{ entrada } n/ \text{ entrada } n)$$

Onde:

$S_{in}$ : Sensibilidade ao dado de entrada n

( $\Delta$  saída/saída): Mudança resultante no dado de saída/resultado

( $\Delta$  entrada n/ entrada n): Mudança no dado de entrada n

Ainda de acordo com Rosenbaum (2012) dois tipos de sensibilidade se distinguem em ACV:

- Sensibilidade de um parâmetro de saída y para um parâmetro de entrada x ligados por uma função contínua  $y = f(x)$ ;
- Sensibilidade associada a uma escolha discreta, por exemplo, à definição dos limites do sistema, regras de alocação, unidade funcional, método de avaliação de impacto, etc.



Na análise de sensibilidade associada a uma escolha discreta, calcula-se a efeito de uma mudança em um ou vários dos parâmetros discretos de entrada relacionando-os a um parâmetro dependente de saída. O parâmetro de saída é avaliado para os diferentes valores (escolhas metodológicas) que os parâmetros de entrada podem assumir (ROSENBAUM, 2012).

Como já discutido anteriormente, na realização de uma análise de sensibilidade, diversos elementos de um estudo de ACV podem ser avaliados, como a definição do sistema de produto e suas fronteiras, critérios de corte, unidade funcional, procedimentos de alocação, hipóteses e análises relacionadas aos dados de inventário, seleção de métodos e categorias de avaliação de impacto, classificação dos resultados de inventário, fatores de caracterização, referências e dados de normalização, método de ponderação (ROSENBAUM, 2012). No presente trabalho, foram escolhidas as fontes de dados de inventário e seleção de métodos e categorias de avaliação de impacto, e seus fatores de caracterização, como foco da análise de sensibilidade.

Muitas metodologias de AICV vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em estudos de ACV, entretanto, nenhuma delas ainda é reconhecida internacionalmente de acordo com os requisitos impostos pela *International Organization for Standardization* (ISO). Não há diretrizes específicas e oficiais que ajudem o praticante de ACV a escolher entre os modelos e fatores de caracterização, e assim, os resultados de algumas categorias de impacto podem variar substancialmente (Hauschild et al., 2012).

De forma a verificar se os resultados e conclusões de um estudo de ACV variam de acordo com o método de AICV utilizado, diversos estudos têm sido desenvolvidos para comparar tais metodologias. Dreyer, Niemann e Hauschild (2003) usaram EDIP 97, CML 2001 e Ecoindicator 99 para avaliar seis categorias de impacto e realizar uma comparação quantitativa dos fatores de caracterização e normalização, e uma comparação qualitativa dos fatores de ponderação. Pant et al. (2004) identificou diferenças significativas entre as metodologias de AICV em termos de dados e resultados. Rosenbaum et al. (2011) concluiu que os estudos mais recentes tendem a considerar um número maior de métodos e aplicar aqueles que foram mais recentemente desenvolvidos,

como é o caso do USEtox, por exemplo. As comparações realizadas por Caneghem, Block e Vandecasteele (2010) indicaram que diferentes fatores de caracterização podem influenciar conclusões sobre a tendência dos efeitos ao longo do tempo e a contribuição relativa das substâncias individualmente. Pizzol et al. (2011a, b) comparou nove diferentes metodologias de AICV utilizadas na avaliação de impacto de metais na saúde humana, e em ecossistemas aquáticos e terrestres. Cavalett et al. (2012) utilizou-se de um estudo de caso em biocombustíveis para comparar sete métodos e obteve resultados similares para impactos globais, mas encontrou dificuldades para comparar as demais categorias, devido ao uso de diferentes indicadores. Para métodos *endpoint*, os fatores de normalização e ponderação mostraram interferir significativamente nos resultados.

A maior parte desses estudos apresentou resultados divergentes dentre os diferentes métodos devido à grande variação nos fatores de caracterização adotados. Hauschild et al. (2012) comparou os modelos de caracterização para cada categoria de impacto presente na maioria dos métodos aplicados na atualidade, e estabeleceu recomendações para as melhores práticas em AICV de acordo com o ILCD.

A despeito do número significativo de estudos comparativos já realizados, é ainda relevante executar mais um estudo de comparação incluindo os métodos recentemente desenvolvidos e que não foram considerados em estudos anteriores, como ReCiPe e as melhores práticas recomendadas pelo ILCD (Hauschild et al., 2012). Discrepâncias potenciais nos resultados de diferentes métodos de AICV têm importância fundamental para o praticante de ACV, uma vez que tais diferenças podem levar a resultados enganosos.

#### CAPÍTULO 4. APLICAÇÃO DA ACV EM SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL

No setor da construção civil, a preocupação com o desenvolvimento sustentável, principalmente na sua dimensão ambiental, embasou a criação de um novo nicho imobiliário com amplas possibilidades de rentabilidade: os 'Edifícios Verdes', avaliados e rotulados a partir da criação de dezenas de Métodos de Avaliação de Desempenho Ambiental do Edifício, em diferentes países, com variados critérios e métodos de avaliação e certificação. Tais ferramentas de avaliação de desempenho demonstraram-se eficientes ou não, dependendo das condições em que são aplicadas (PATRICIO; GOUVINHAS, 2004).

Certificações como BREEAM (SKOPEK, 1997), GBTool (COLE e LARSSON, 2002) e LEED (USGBC, 2009) têm sido usadas para avaliar e certificar edifícios em grandes cidades do Brasil, por exemplo, onde seus critérios de avaliação e parâmetros avaliativos demonstram-se muitas vezes inadequados (PATRICIO e GOUVINHAS, 2004).

No que toca a avaliação dos sistemas construtivos, a análise dos sistemas existentes para certificação ambiental de edifícios revela que há poucas ferramentas que avaliam desempenho ambiental objetivamente pela Análise do Ciclo de Vida, predominando o reconhecimento de atributos de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado). O problema da abordagem por atributos é que eles são tratados isoladamente e perde-se a noção global do impacto (SILVA, 2007).

A fim de avaliar o impacto global das medidas de redução de consumo de recursos durante o período de vida de um edifício, a realização de uma avaliação de ciclo de vida demonstra-se uma metodologia de grande utilidade (VERBEECK; HENS, 2010b). O seu princípio consiste em analisar as repercussões ambientais de um produto ou atividade, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas, energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado (SOARES et al, 2006). As fronteiras de análise devem considerar as etapas de extração de matérias-primas, transporte, fabricação, uso e descarte (o ciclo de vida). Esse procedimento permite uma

avaliação científica da situação, além de facilitar a localização de eventuais mudanças associadas às diferentes etapas do ciclo que resultem em melhorias no seu perfil ambiental.

Sob a ótica ambiental, a ACV estabelece inventários tão completos quanto possível do fluxo de matéria (e energia) para cada sistema e permite a comparação desses balanços entre si, sob a forma de impactos ambientais (SOARES et al., 2006). O ciclo de vida de um edifício inclui a produção de material de construção, construção, operação, manutenção, desmontagem e gestão de resíduos (GUSTAVSSON e JOELSSON, 2010). Essa abordagem constitui uma parte importante dos métodos de avaliação ambiental do edifício. Estudos anteriores como os de ERLANDSSON e BORG (2003), NIBEL et al (2005), e HAAPIO e VIITANIEMI (2008) permitiram que a metodologia de ACV para edifícios fosse revista, no entanto, existem algumas lacunas em relação a indicadores ambientais, complexidade de apresentação dos resultados da ACV para usuários, simplificação e adaptação para fins diversos (BRIBIÁN et al., 2009).

Mediante o cenário atual no que tange a avaliação de desempenho ambiental e ciclo de vida de sistemas construtivos, passaremos então ao estudo das ferramentas existentes, e atualmente utilizadas para tal propósito.

Segundo Bueno et al. (2011) os principais sistemas de avaliação de desempenho ambiental da atualidade (GBTool, Green Globes, LEED 2009 e AQUA), ao serem comparadas, podem ser uniformizados pelo estabelecimento das categorias para avaliação: Processo de Projeto, Conexões, Implantação, Consumo de Recursos, Emissões, Conforto e Qualidade Ambiental, Serviços, Aspectos Econômicos e Planejamento de Operação. Dentro dessas categorias, para cada sistema de certificação, há uma série de créditos, os quais são itens avaliativos que desenvolvem a análise do edifício de acordo com diversas temáticas, e que variam nos diferentes sistemas. Os créditos referentes à avaliação de materiais e sistemas construtivos concentram-se nas categorias relacionadas ao consumo de recursos, emissões e qualidade do ambiente interno, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Categorias para Análise Comparativa de Sistemas de Certificação

Categorias de Avaliação	Categorias a serem comparadas por Sistema de Certificação			
	GBTool (COLE, 2002)	Green Globes (SKOPEK; BRYAN, 2002)	AQUA (FCAV, 2008)	LEED (USGBC, 2009).
Processo de Projeto		- Gestão de projeto	- Escolha integrada de produtos, sistemas, processos construtivos	- Inovação e Processo de Projeto
Conexões	- Transportes Diários		- Relação do edifício com o seu entorno	- Localização e Ligações
Implantação		- Terreno		- Sítios Sustentáveis
Consumo de Recursos	- Consumo de Recursos	- Energia - Água - Gestão de energia	- Gestão da água - Eficiência de Água	- Energia e Atmosfera
		- Recursos	- Escolha integrada de produtos, sistemas, processos construtivos	- Materiais e Recursos
Emissões	- Cargas Ambientais	- Emissões, efluentes e outros impactos	- Gestão dos resíduos de uso e operação do edifício	- Energia e Atmosfera
Conforto e Qualidade Ambiental	- Qualidade Ambiental Interna	- Ambiente interno	- Conforto higrotérmico - Conforto acústico - Conforto visual - Conforto olfativo - Qualidade sanitária dos ambientes, do ar e da água	- Qualidade do Ambiente Interno
Serviços	- Qualidade do Serviço			
Aspectos Econômicos	- Economia			
Planejamento de operação	- Gerenciamento		- Canteiro de obras com baixo impacto ambiental - Manutenção – Permanência do desempenho ambiental	- Conscientização e Educação

Fonte: BUENO *et al* (2011).

No que se refere à avaliação de sistemas construtivos pelos principais sistemas de certificação ambiental de edifícios da atualidade, atualmente predomina o reconhecimento de atributos de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado), abordagem essa na qual eles são tratados isoladamente e perde-se a noção global do impacto, quando, na verdade, esses atributos estão frequentemente em conflito e interferem um no outro (SILVA, 2007).

Nas Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 são apresentadas as metodologias de avaliação presentes nos créditos pertinentes dos principais sistemas de certificação de desempenho ambiental de edifícios: LEED, AQUA, CASBEE, Green Star, SBTool, Green Globes, DGNB e BREEAM.

Sob uma ótica holística do desempenho ambiental de sistemas construtivos para sua avaliação, foram constatadas as seguintes limitações nas abordagens apresentadas pelos sistemas de certificação:

- Utilização de materiais certificados, não disponíveis no mercado brasileiro;
- Classificação e certificação de materiais e sistemas construtivos ainda demonstra ser uma prática pouco factível, devido à escassez de dados sobre a origem de matérias-primas, processos e recursos empregados para a produção de tais sistemas;
- Predominância do reconhecimento de atributos de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado).

Partindo-se do princípio de que existe uma clara interação entre as fases da vida de um edifício, e que muitas vezes permanece a dúvida de qual das fases é mais vantajosa para investimento, a aplicação de uma metodologia global, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), pode ser útil na busca de respostas, uma vez que esta metodologia pode avaliar o impacto global no ambiente durante a vida útil de um edifício (BRIBIÁN et al., 2009).

Tabela 3: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação LEED.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Materiais com conteúdo reciclado	Materiais e Recursos	<b>Por atributos</b> – Avalia o uso de materiais com conteúdo reciclado de forma que a soma de conteúdo reciclado pré-consumo e pós-consumo, constituam de 10 a 20% do material.
Materiais regionais		<b>Por atributos</b> – Avalia se a distância do local de extração e produção do material fica a menos de 500 milhas do local da obra, para pelo menos 10 a 20% dos materiais utilizados.
Materiais rapidamente renováveis		<b>Por atributos</b> – Avalia o uso de 2,5% do custo total dos materiais e sistemas do edifício com matéria-prima principal rapidamente renovável (origem vegetal, com ciclos de até de 10 anos).
Utilização de madeira certificada		<b>Por atributos</b> – Avalia se pelo menos 50% dos sistemas de madeira são compostos por material certificado.
Materiais de baixa emissão— adesivos e impermeabilizantes	Qualidade Ambiental Interna	<b>Por atributos</b> – Todos os adesivos e seladores utilizados no interior do edifício devem respeitar os limites de compostos orgânicos voláteis (VOC) das normas mencionadas.
Materiais de baixa emissão — Tintas e revestimentos		<b>Por atributos</b> – Tintas e revestimentos utilizados no interior do edifício devem respeitar os limites de compostos orgânicos voláteis (VOC) das normas mencionadas.
Materiais de baixa emissão — Pisos		<b>Por atributos</b> – Pisos devem respeitar os limites de compostos orgânicos voláteis (VOC) das normas mencionadas
Materiais de baixa emissão — Compósitos de madeira e produtos de fibra natural		<b>Por atributos</b> – Compósitos de madeira, produtos de fibra natural e adesivos de laminação usados no edifício não devem conter resinas de urea-formaldeído.

**Tabela 4: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação AQUA.**

<b>Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos</b>	<b>Categoria Avaliativa</b>	<b>Método de avaliação</b>
Escolhas construtivas para a durabilidade e adaptabilidade da construção	Escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos	<b>Por atributos</b> – Consideração da vida útil dos produtos, sistemas e processos em função de seu uso no edifício.
Escolhas construtivas para a facilidade de conservação da construção		<b>Por atributos</b> – Avaliação da escolha de produtos de fácil conservação.
Escolha dos produtos de construção a fim de limitar os impactos socioambientais da construção		<b>Por atributos</b> – Avaliação de atributos ambientais dos produtos de construção, relacionados à emissão de gases contribuintes para o efeito estufa, à geração de resíduos, à possibilidade de reuso/reciclagem de materiais, ao uso de recursos renováveis e ao esgotamento de recursos naturais.
Escolha dos produtos de construção a fim de limitar os impactos da construção à saúde humana		<b>Por atributos</b> - Conhecimento das características dos produtos de revestimentos interiores quanto às emissões de poluentes nocivas à saúde humana.

Pequenas alterações nas diversas fases do processo construtivo podem promover, além de mudanças importantes na eficiência ambiental e redução dos gastos operacionais de uma obra, maior incentivo em investimentos no setor. Nesse mercado de competitividade crescente e submetido a instrumentos de comando de controle (legislação e normas) e de melhoria contínua, a escolha de materiais de construção representa um importante campo da engenharia ambientalmente responsável (SOARES et al, 2006). Além disso, quando se busca a melhoria do desempenho ambiental dos edifícios, materiais e componentes adicionais são aplicados, resultando em uma maior energia incorporada, referente à energia necessária para a produção e o transporte de todos estes materiais e componentes (VERBEECK; HENS, 2010b).



Tabela 5: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação CASBEE.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Redução do uso de materiais	Recursos e Materiais	<b>Por atributos</b> – Incentivar o uso de materiais de alta resistência para contribuir para a redução do uso total de materiais.
Reutilização de estrutura existente		<b>Por atributos</b> – Incentivar a reutilização de estruturas de edifícios existentes para reduzir a utilização total de materiais.
Uso de materiais reciclados em elementos estruturais		<b>Por atributos</b> – Avaliar se materiais reciclados são usados na estrutura principal do edifício.
Uso de materiais reciclados em elementos não-estruturais		<b>Por atributos</b> – Avaliar se materiais reciclados são usados em aplicações não-estruturais.
Madeiras de manejo florestal sustentável		<b>Por atributos</b> – Avaliar o uso de madeira proveniente de florestas de manejo sustentável
Esforços para a reutilização de componentes e materiais		<b>Por atributos</b> – Avaliar medidas para facilitar a reciclagem no final do ciclo de vida do edifício (demolição e disposição final).
Uso de materiais sem substâncias perigosas		<b>Por atributos</b> – Avaliar a redução de produtos químicos que podem afetar a qualidade do ar interior e do meio ambiente em geral.
Espumas (materiais de isolamento)		<b>Por atributos</b> – Avaliar materiais de isolamento, como a fibra mineral, plástico expandido e materiais naturais, com base nos potenciais de Destruição do Ozônio e Aquecimento Global.

Tradicionalmente, no setor da construção, materiais locais, com baixos custos energéticos e pouco impacto ambiental, eram os mais utilizados, no entanto, atualmente, materiais globais, tais como cimento, alumínio, concreto e PVC são utilizados, aumentando a demanda energética e impacto ambiental (BRIBIÁN et al., 2009).

**Tabela 6: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação Green Star.**

<b>Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos</b>	<b>Categoria Avaliativa</b>	<b>Método de avaliação</b>
Reuso de edifício	Materiais	<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer o uso de edifícios existentes para minimizar o consumo de materiais.
Reuso de materiais		<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer projetos que prolonguem a vida útil de produtos e materiais existentes.
Concreto		<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer a redução de energia incorporada e depleção de recursos devido ao uso de concreto.
Aço		<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer a redução de energia incorporada e depleção de recursos associados ao uso de aço virgem.
PVC		<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer a redução do uso de PVC em edifícios, ou encorajar o uso de PVC que segue as diretrizes de melhores práticas.
Madeira		<b>Por atributos</b> – Encorajar e reconhecer a especificação de produtos madeireiros reutilizados ou legalmente extraídos, com práticas de manejo florestal certificadas.

Nesse contexto, a ACV se destaca, atualmente, como metodologia de excelência para análise e escolha de alternativas, sob uma perspectiva puramente ambiental. O seu princípio consiste em analisar as repercussões ambientais de um produto ou atividade, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas e energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado (SOARES et al., 2006).

Tabela 7: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação SBTool.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Energia não-renovável incorporada em materiais de construção	Consumo de Energia e Recursos	<b>ACV</b> – Utilizar o sistema de estimativa de energia incorporada, com base em ACV.
Grau de reuso de estruturas locais quando existentes		<b>Por atributos</b> – Avaliar o desempenho estrutural, funcional e econômico de uma estrutura existente.
Eficiência no uso de materiais em componentes da Estrutura e Envelope		<b>Por atributos</b> – Analisar o grau em que os componentes construtivos fazem uso eficiente dos recursos físicos.
Uso de materiais não-renováveis virgens		<b>Por atributos</b> – Estimar o uso de materiais não-renováveis virgens no projeto, para minimizar o seu esgotamento.
Uso de materiais de acabamento		<b>Por atributos</b> – Estimar o uso de materiais de acabamento no interior do edifício, para minimizar o consumo de recursos.
Facilidade de desmontagem, reutilização ou reciclagem		<b>Por atributos</b> – Determinar o grau em que os componentes construtivos são fáceis de desmontar, de modo que eles possam ser ainda reutilizados ou reciclados.
Emissões de GEE provenientes da energia incorporada em materiais de construção	Cargas Ambientais	<b>ACV</b> – Utilizar o sistema de estimativa de energia incorporada, com base em ACV.

Tabela 8: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação Green Globes.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Consumo mínimo de recursos	Recursos	<b>Por atributos</b> – Avaliar o uso de materiais reciclados, de reuso, de origem local, de baixa manutenção e madeiras certificadas.
Sistemas e materiais de baixo impacto		<b>Por ACV</b> – Avaliar o uso de materiais de menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida.

Tabela 9: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação DGNB.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Avaliação de Ciclo de Vida	Qualidade Ambiental	<b>Por ACV</b> – Avaliar Impacto Ambiental por estudo de ACV no edifício e seus materiais
Produção Ambientalmente Amigável de Materiais		<b>Por atributos</b> – Incentivar a utilização de materiais de produção ambientalmente amigável em elementos-chave de construção.

Tabela 10: Avaliação de materiais e componentes construtivos no sistema de certificação BREEAM.

Créditos Avaliativos direcionados a componentes construtivos	Categoria Avaliativa	Método de avaliação
Impactos no Ciclo de Vida	Materiais	<b>Por ACV</b> – Reconhecer e incentivar o uso de materiais de construção com baixo impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do edifício.
Paisagismo rígido e proteção de fronteiras		<b>Por ACV</b> – Reconhecer e incentivar a especificação de materiais para proteção de fronteiras e superfícies rígidas externas que tenham baixo impacto ambiental, tendo em conta o ciclo de vida dos materiais utilizados.
Origem responsável de materiais		<b>Por atributos</b> – Reconhecer e incentivar a especificação de materiais de origem ambientalmente responsável para os elementos-chave de construção.
Isolamento		<b>Por atributos</b> – Reconhecer e incentivar o uso de isolamento térmico, que tenha baixo impacto ambiental incorporado em relação às suas propriedades térmicas.
Projeto para robustez		<b>Por atributos</b> – Reconhecer e incentivar a proteção adequada dos elementos expostos do edifício e entorno, minimizando a frequência de substituição e maximizando a otimização de materiais.

Dentre os créditos de avaliação de desempenho ambiental de componentes construtivos nos sistemas de certificação estudados, a grande maioria usa a metodologia de avaliação por atributos, conforme apresentado nas Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

No sistema de certificação LEED 2009, os créditos relacionados às questões abordadas neste estudo (Materiais com conteúdo reciclado, Materiais rapidamente renováveis, Uso de madeira certificada e materiais de baixa emissão: adesivos e seladores, tintas e revestimentos, pisos e compostos de madeira e produtos de fibra natural) usam a avaliação por atributos, conforme apresentado na Tabela 3.

O primeiro crédito, “Materiais com conteúdo reciclado”, avalia o uso de materiais de forma que a soma de conteúdo reciclado pré-consumo e pós-consumo deve constituir de 10 a 20% do material avaliado, e a pontuação varia de acordo com a porcentagem alcançada.

O crédito “Materiais regionais” tem com objetivo avaliar se a distância do local de extração e produção dos materiais do edifício é menor do que 500 milhas do local da obra para, pelo menos, 10 a 20% dos materiais utilizados. De forma similar ao crédito citado anteriormente, pode-se alcançar uma melhor pontuação de acordo com a porcentagem alcançada.

Na avaliação de “Materiais rapidamente renováveis”, o objetivo é o uso de produtos com matérias-primas rapidamente renováveis para, pelo menos, 2,5% do custo total dos materiais e sistemas construtivos. Uma matéria-prima é considerada rapidamente renovável pelo sistema de avaliação quando esse tem origem vegetal, com ciclos de renovação de menos de 10 anos.

O uso de madeira certificada é também avaliado quando presente em pelo menos 50% dos sistemas de madeira.

Esse sistema de certificação possui alguns créditos relacionados à avaliação de componentes construtivos na categoria avaliativa “Qualidade Ambiental Interna”. Alguns desses créditos, os quais também utilizam-se da avaliação por atributos, se referem às emissões de

compostos orgânicos voláteis (COV) advindas de materiais como adesivos e selantes, tintas e revestimentos, e pisos.

A obtenção dos pontos relativos ao último crédito da categoria requer que compósitos de madeira, produtos de fibras naturais e adesivos de laminação usados nos edifícios não contenham resinas de ureia-formaldeído. Tal crédito também usa a avaliação por atributos.

Da mesma forma que no LEED 2009, o sistema de certificação AQUA apresenta uma metodologia de avaliação a qual utiliza-se da metodologia por atributos para todos os créditos relacionados a componentes construtivos (escolhas construtivas visando a durabilidade e adaptabilidade do edifício e facilidade de manutenção do edifício, escolha de produtos que limitem impactos sociais e ambientais da construção e impactos para a saúde humana), conforme apresentado na Tabela 4.

O primeiro crédito, “Escolhas construtivas para durabilidade e adaptabilidade do edifício” considera a vida útil dos produtos, sistemas e processos, de acordo com seu uso no edifício.

O item avaliativo “Escolhas construtivas para facilidade de manutenção do edifício” avalia a escolha de produtos de fácil conservação e manutenção, enquanto no crédito “Escolha de produtos que limitem os impactos sociais e ambientais da construção” a avaliação de atributos ambientais dos materiais de construção é relacionada às emissões de gases de efeito estufa, geração de resíduos sólidos, reuso e reciclagem de materiais, uso de materiais de fontes renováveis e esgotamento de recursos naturais. Esse é um dos créditos que mais se aproxima do conceito de ACV nos sistemas de certificação, no entanto, sem o caráter holístico, uma vez que observa tais características de forma isolada.

O último crédito desse sistema de certificação, chamado “Escolha de produtos de forma a limitar os impactos da construção na saúde humana” considera as informações disponibilizadas sobre as características do produto em relação a emissões de poluentes nocivos à saúde humana.

Sistemas de classificação CASBEE e Green Star também são completamente baseados na abordagem por atributos, como mostrado nas Tabelas 5 e 6.

A certificação Green Star só toca o tema da ACV nos créditos relativos à redução de energia incorporada do edifício, no entanto, tal sistema não recomenda a aplicação de estudos de ACV completos para tal avaliação.

O mesmo ocorre no sistema de certificação CASBEE, o qual utiliza indicadores de Aquecimento Global e Depleção de Ozônio para medir os impactos ambientais de materiais de isolamento e, no entanto, não fornece qualquer orientação quanto ao uso de ACV, ou requisitos para a avaliação de todo o ciclo de vida desses materiais. A certificação exige tal avaliação apenas para a fase de produção de materiais e componentes construtivos.

Em relação ao SBTool 2012 (Tabela 7), várias modificações podem ser identificadas em relação à sua primeira versão, o GBTool 2002. Como algumas dessas mudanças incluem avanços importantes relativos à incorporação da abordagem de ciclo de vida na metodologia de avaliação, são consideradas melhorias significativas no sistema de classificação.

Diversas mudanças ocorreram também nos créditos avaliados por atributos, como "Uso de materiais recuperados a partir de fontes fora do sítio", "Conteúdo reciclado de materiais a partir de fontes fora do sítio de construção" e "Utilização de produtos de madeira certificados ou equivalentes" - todos sobre a limitação no uso de recursos - foram substituídos por créditos mais gerais e atuais, como "Grau de reuso de estruturas locais quando existentes", "Eficiência no uso de materiais em componentes da Estrutura e Envelope", "Uso de materiais não-renováveis virgens" e "Uso de materiais de acabamento". Tais mudanças, mesmo quando implicam generalizações e simplificações, têm apontado para a atualização e aperfeiçoamento desta ferramenta avaliativa nas práticas atuais do projeto, facilitando a sua aplicação a várias tipologias de construção, implantação e técnicas construtivas.

O crédito "Prevenção de resíduos sólidos resultantes de processos de construção" também foi substituído por "Facilidade de desmontagem, reutilização ou reciclagem", apontando para novas estratégias e sistemas construtivos desenvolvidos para serem desmontados para reutilização e reciclagem. Essa abordagem diminui automaticamente a geração de resíduos sólidos durante o processo de construção e desmontagem de edifícios.

Alguns créditos, tais como aqueles relativos à emissão de substâncias que destroem o Ozônio (principalmente CFC) e gases que levam à acidificação (principalmente SO<sub>2</sub>) foram removidos do sistema de certificação. Tal remoção provavelmente está relacionada ao surgimento de uma normatização mais restritiva em relação à emissão dessas substâncias. No entanto, a consideração desses potenciais impactos deve ser avaliada de forma a assegurar uma redução constante nas emissões.

Finalmente dois créditos (um na categoria Consumo de Energia e Recursos e outro na categoria Cargas Ambientais) apresentaram evolução na aplicação da metodologia de ACV nos sistemas de certificação: "Energia não-renovável incorporada em materiais de construção" e "Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes da energia incorporada em materiais de construção". Ambos os créditos existiam na versão anterior, porém com base na contagem do consumo de energia anual ou emissões normalizadas por área construída, cobrindo apenas a fase de inventário de um estudo de ACV. Na versão SBTool 2012, o método aplicado é baseado em um estudo completo ACV, fornecendo resultados mais confiáveis e holísticos, conforme identificado por Stránská e Sedlák (2012).

Estes dois últimos créditos devem ser apontados como a principal evolução no SBTool 2012, no que se trata da implementação da abordagem de ciclo de vida. Além disso, o uso de ACV para analisar a energia não renovável incorporada pode levar a conclusões não só sobre o consumo de combustíveis fósseis e de energia, como também sobre os impactos potenciais durante o processo de produção desses materiais e sua energia incorporada.



O sistema de certificação Green Globes faz uso da Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta de avaliação de desempenho ambiental de materiais e sistemas construtivos, como pode ser observado na Tabela 8. Esse sistema de certificação também compreende o crédito “Consumo mínimo de recursos”, o qual utiliza a avaliação por atributos, considerando o uso de materiais reciclados, reutilizados, produzidos localmente e de baixa manutenção, assim como de madeiras certificadas.

Entretanto, o principal crédito avaliativo desse sistema de certificação é “Materiais e sistemas de baixo impacto”, o qual utiliza a aplicação de um estudo de ACV para avaliar o uso de materiais com menores impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida.

É importante observar que o sistema de certificação Green Globes apenas utiliza-se dos dois créditos citados acima para a avaliação de desempenho ambiental de materiais e sistemas construtivos. Isso provavelmente se deve ao fato de que um estudo completo de ACV produz, por si só, o maior número possível de informações sobre o perfil ambiental de um produto, pela avaliação holística dos potenciais de impactos ambientais deste.

A Tabela 9 mostra as questões relacionadas a materiais de construção avaliadas pelo sistema de certificação DGNB. Esse sistema utiliza o mesmo conceito adotado pela certificação Green Globes, com a avaliação opcional de materiais de construção usando a ACV ou a abordagem por atributos.

Tal abordagem tem como ponto fraco apresentar a ACV como um método opcional de avaliação, dando ao usuário a possibilidade de evitar a sua aplicação. Neste ponto é importante destacar que, como a metodologia de ACV é altamente consumidora de tempo e recursos, o usuário ainda tende a evitar a sua aplicação, escolhendo créditos de avaliação por atributos os quais, de forma geral, tem sistema de avaliação mais simplificado.

Finalmente, a Tabela 10 apresenta os créditos referentes à avaliação de materiais de construção no sistema de certificação BREEAM, o qual também utiliza ambas as abordagens, por

atributos e ACV. Os créditos avaliados por atributos estão relacionados com os materiais de isolamento, origem responsável de materiais e estratégias de projeto para minimizar a necessidade de manutenções sucessivas de materiais de construção expostos. Por outro lado, este sistema de certificação também inclui um crédito baseado em um estudo completo de ACV para todos os materiais empregados no edifício.

Os créditos avaliados por atributos desempenham um papel complementar em relação ao crédito baseado no estudo completo de ACV, uma vez que o último fornece resultados quase completos em termos de avaliação de impacto ambiental dos materiais de construção empregados.

Assim, pode-se concluir que, o último sistema de certificação aqui discutido, BREEAM, apresenta a estrutura mais completa e consistente em termos de implementação de ACV para a avaliação de materiais e sistemas construtivos nos sistemas de certificação de sustentabilidade.

A Tabela 11 mostra um resumo dos resultados apresentados e discutidos neste capítulo.

**Tabela 11: Quadro de síntese do estado atual da implementação da ACV nos principais sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios.**

<b>Sistema de Certificação</b>	<b>Metodologia de Avaliação</b>
LEED	Utiliza apenas a abordagem de avaliação por atributos.
AQUA	Utiliza apenas a abordagem de avaliação por atributos.
CASBEE	Utiliza apenas a abordagem de avaliação por atributos.
Green Star	Utiliza apenas a abordagem de avaliação por atributos.
SBTool	Utiliza apenas a abordagem de avaliação por atributos, mas com algumas inserções da abordagem de ciclo de vida inerente aos créditos.
Green Globes	Utiliza majoritariamente a abordagem de avaliação por atributos, com alguns créditos opcionais baseados em ACV.
DGNB	Utiliza majoritariamente a abordagem de avaliação por atributos, com alguns créditos opcionais baseados em ACV.
BREEAM	Utiliza as abordagens por atributos e ACV de forma complementar e integrada.

A discussão apresentada neste capítulo mostra que dentre os quatro sistemas de certificação mais utilizados na atualidade, Green Globes é o único que utiliza-se da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida para avaliar o desempenho ambiental de materiais e sistemas construtivos. Os demais sistemas de certificação utilizam-se da metodologia de avaliação por atributos.

A avaliação por atributos não compreende holisticamente todas as etapas e aspectos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos e pode levar a resultados e conclusões incompletos e equivocados.

A ACV é uma metodologia quantitativa que deveria ser utilizada pelos sistemas de certificação como ferramenta para avaliação de desempenho ambiental de materiais e componentes construtivos.

Dentre as principais razões para o uso limitado da ACV nos sistemas de certificação está a sua complexidade de implementação, uma vez que demanda tempo e esforços consideráveis. A extensão dos esforços empregados em um estudo de ACV faz sua aplicação dificilmente aplicável num processo de certificação.

Pode-se concluir, no entanto, que apesar do nível de esforços necessários para a implementação de um estudo completo de ACV, os resultados são significativamente mais completos e expressivos em comparação com a avaliação por atributos.

Dessa forma, o uso de um único crédito avaliativo baseado em estudos de ACV como metodologia avaliativa é capaz de substituir um conjunto maior de créditos os quais utilizem a avaliação por atributos, e ainda oferecer resultados mais completos e consistentes, uma vez que um estudo de ACV avalia todos os possíveis atributos ambientais de um produto de forma holística, considerando todas as suas possíveis inter-relações.

A metodologia de ACV poderia ser mais facilmente empregada em casos onde bases de dados de inventário estivessem disponíveis para os produtos analisados, no entanto, tal

possibilidade tem se mostrado também pouco factível, especialmente no contexto brasileiro, devido à escassez de dados disponíveis relacionados a resultados de estudos de ACV previamente realizados para materiais e sistemas construtivos.

O desenvolvimento massivo de estudos de ACV em componentes construtivos e a disponibilização dos resultados de forma normalizada em bases de dados amplamente acessíveis facilitaria, desta forma, o uso desses estudos nos processos de certificação.

## CAPÍTULO 5. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados para esta pesquisa estão subdivididos nas seguintes etapas:

- i) Definições metodológicas da ACV;
- ii) Estudo de caso, com a aplicação comparativa da metodologia de ACV em cinco tipologias de vedações externas não-estruturais, baseado majoritariamente em dados secundários previamente validados;
- iii) Coleta e tratamento de dados primários para os processos elementares considerados de maior contribuição para impactos ambientais potenciais pelo mesmo estudo, e análise de sensibilidade dos resultados à utilização de dados primários e secundários;
- iv) Análise de sensibilidade dos resultados do estudo de caso inicial, baseado em dados secundários à utilização das diferentes metodologias de AICV;
- v) Identificação das categorias de impacto, dentre as metodologias de AICV aplicadas, que demonstrarem maior significância na avaliação de sistemas construtivos tradicionais de vedações externas e de questões chave para futuro desenvolvimento;
- vi) Discussão dos resultados e conclusões.

O plano de trabalho acima descrito deverá seguir as etapas metodológicas descritas abaixo, a fim de que se estabeleça o embasamento teórico e empírico suficiente para o desenvolvimento dos resultados e produtos finais.

### 5.1. Definições metodológicas da ACV

Esta primeira etapa, de revisão da literatura, compreendeu temas intrinsecamente ligados ao embasamento teórico necessário ao desenvolvimento do trabalho de pesquisa proposto, tais como o conceito e definições metodológicas de ACV, e sua aplicabilidade na avaliação de desempenho ambiental de componentes construtivos.

A revisão da literatura incluiu, principalmente, o estudo dos documentos normativos referentes às definições metodológicas de ACV como a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), e guias detalhados de aplicação da metodologia como o ILCD Handbook (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010), que representa a referência mais atual de aplicação da ACV. De forma complementar, foi desenvolvido também um estudo exploratório das principais metodologias de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) existentes, suas potencialidades e limitações para aplicação em sistemas construtivos.

Estudos nacionais e internacionais e diferentes trabalhos científicos sobre o tema, como os estudos de ACV para diferentes sistemas construtivos e aplicações de análise de sensibilidade, também foram abordados neste trabalho.

## 5.2. Estudo de caso

Mediante as informações coletadas e analisadas pelo processo de revisão bibliográfica, o trabalho passa então a um processo de aplicação comparativa da metodologia de ACV em diferentes tipos sistemas construtivos de vedações externas não estruturais:

- a) Alvenaria de blocos cerâmicos;
- b) Alvenaria de blocos de concreto;
- c) Parede de concreto leve;
- d) Sistema *steel framing* com fechamento interno e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira;
- e) Sistema *steel framing* com fechamento interno de placas de gesso acartonado e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira.

Tal aplicação da metodologia de ACV aos sistemas construtivos de vedação externa não estrutural apresentados acima, é baseada no roteiro de aplicação estabelecido pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), e detalhado pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a), conforme descrição apresentada no Capítulo 3.

O estudo de caso inicial será baseado em fontes de dados secundários para a elaboração dos inventários de ciclo de vida. Tais dados secundários serão obtidos no banco de dados Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005).

Este estudo de ACV destina-se à comparação de sistemas construtivos de vedação externa não-estrutural, e é destinado a ser publicado em meios científicos, a fim de servir como apoio à tomada de decisão de profissionais da área do projeto de construção civil, no momento de opção por diferentes tipos de sistemas construtivos. Portanto, a total equivalência das alternativas comparadas será buscada neste trabalho, de forma que as alternativas possam ser comparadas de forma justa, não proporcionando resultados enganosos. Tal equivalência baseia-se em parâmetros de desempenho térmico estabelecidos pela norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Para o tratamento de dados de inventário e caracterização de impacto pelas metodologias de AICV utilizou-se o software GaBi 4.4 (IKP-PE, 2002). Os dados do Ecoinvent foram caracterizados pela metodologia ReCiPe e os resultados obtidos foram posteriormente tratados e transformados em gráficos.

O software também foi utilizado para a inserção de dados primários, em substituição de dados do Ecoinvent nos processos unitários para a análise de sensibilidade às fontes de dados. Da mesma forma, o software GaBi foi utilizado para obter-se as contribuições relativas de cada substância por categoria de impacto, dados que foram também trabalhados e apresentados de forma sintética, de acordo com sua magnitude, nas análises de contribuição apresentadas na análise de sensibilidade ao uso de diferentes metodologias de AICV.

A escolha do software GaBi se deu com base na grande utilização deste tanto por trabalhos científicos quanto pela indústria internacional, assim como por se tratar de um dos softwares mais completos para a realização de estudos de ACV na atualidade. O treinamento para utilização desta ferramenta se deu durante estágio de Doutorado na Universidade Técnica da Dinamarca, onde o GaBi é largamente utilizado pelos integrantes do grupo de pesquisa em Análise Quantitativa de Sustentabilidade.

### 5.3. Análise de sensibilidade

Dentre as possibilidades de aplicações e abordagens de Análise de Sensibilidade apresentadas no tópico anterior, foram escolhidas, para aplicação neste trabalho uma abordagem associada a uma função contínua e uma associada a uma escolha discreta.

A Análise de Sensibilidade associada a uma função contínua foi realizada por meio da avaliação das variações nos resultados finais do estudo de caso substituindo-se dados secundários (Ecoinvent) por dados primários específicos coletados no contexto brasileiro, para os processos de maior contribuição para os potenciais de impacto totais. Avaliou-se a porcentagem de variação nos resultados finais para todas as categorias de impacto, utilizando-se a metodologia ReCiPe 2008.

A Análise de Sensibilidade associada a uma escolha discreta foi realizada pela aplicação de diferentes metodologias de AICV. No estudo de caso inicial (baseado em dados secundários) foram utilizadas as metodologias de AICV EDIP 97, CML 2001, Impact 2002, ReCiPe 2008 e as melhores práticas em AICV recomendadas pelo ILCD (Hauschild et al., 2012).

Finalmente, uma análise foi realizada pela observação dos resultados obtidos pelas diferentes categorias de impacto dos diferentes métodos, para se avaliar em quais tipos de impactos os materiais estudados apresentam uma maior significância absoluta. Os resultados de todas as categorias foram comparados a fim de se verificar as diferenças de magnitude entre as categorias e, portanto, se existe um padrão de significância de impactos para determinadas categorias, as quais poderiam, assim, ser consideradas de maior importância nesse tipo de estudo relativo a sistemas construtivos tradicionais, e que deveriam, portanto, ser desenvolvidas ou adaptadas de forma mais específica para a realidade brasileira.

#### 5.3.1. Coleta de dados primários de inventário e análise de sensibilidade às fontes de dados

No presente tópico, o estudo de caso será repetido, utilizando as mesmas premissas de objetivo e escopo, e aplicando-se apenas a substituição dos dados utilizados para os processos de



maior potencial de impacto por dados primários, coletados em indústrias brasileiras por questionários.

O objetivo e o escopo do estudo foram mantidos idênticos aos adotados no estudo de caso baseado em dados secundários, e encontram-se detalhadamente descritos para análise no item 6.1.

Todas as suposições adotadas pelo estudo de caso inicial, referentes a critérios de corte, fronteiras do sistema, distâncias de transporte, composição de matriz energética, índices de reciclagem, entre outras, serão mantidas na presente iteração de validação do estudo. Assim, apenas foram substituídos os dados referentes aos processos de produção dos materiais citados acima.

A coleta de dados primários se deu pelo envio de questionários a empresas reconhecidas de cada setor, com a solicitação de dados anuais, tomando-se como referência o ano de 2011. Para as lacunas de dados remanescentes, foram utilizados, mais uma vez, dados secundários provenientes do Ecoinvent, de forma a manter as fontes de dados mais coesas possíveis.

É importante notar que, devido a questões de confidencialidade, exigida pelas indústrias as quais se disponibilizaram a fornecer os dados solicitados, os nomes de tais empresas serão mantidos em sigilo e, portanto, não serão divulgados neste trabalho.

O modelo de questionário utilizado para a coleta de dados primários para os processos supracitados está apresentado no ANEXO D.

Os dados primários de inventário coletados para os processos de maior contribuição para potenciais de impacto dentro do ciclo de vida dos sistemas construtivos de vedação comparados neste trabalho são apresentados no ANEXO E.

Nesta iteração validadora do estudo de caso, a AICV foi realizada, mais uma vez, pela utilização da metodologia ReCiPe 2008 (GOEDKOOPE et al., 2008), conforme definido e justificado na definição do escopo do estudo, aplicando as abordagens *endpoint* e *midpoint*, as quais cobrem a maioria dos impactos relacionados a emissões e consumo de recursos.

Para a elaboração inicial do estudo de caso, todos os dados utilizados na análise de inventário foram do Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005), base de dados internacional validada. No entanto, como aos dados de inventário disponíveis para sistemas construtivos correspondem a processos inventariados fora do contexto brasileiro, majoritariamente no contexto Europeu, possivelmente as conclusões obtidas a partir desses dados são mais especificamente direcionadas ao contexto europeu, apresentando limitações conceituais para a tomada de decisão no contexto brasileiro. É importante notar que tal fato não invalida os resultados do estudo para utilização no contexto brasileiro, uma vez que os processos escolhidos para coleta de dados de inventário são os mais parecidos possíveis com os praticados no cenário brasileiro. No entanto, é importante ressaltar que a utilização de dados coletados para esse contexto regional específico levariam à obtenção de resultados mais acurados.

Portanto, para validação dos resultados do estudo no contexto brasileiro, dados primários foram coletados para aqueles processos que demonstraram ter maior contribuição para as categorias de impacto abordadas na AICV do estudo de caso. Uma vez identificados os dados que precisariam ser coletados de fontes primárias, foram escolhidas empresas nacionalmente reconhecidas as quais apresentem processos produtivos semelhantes ao estabelecidos por este estudo e que se dispuseram a fornecer as informações necessárias a este trabalho.

Quando dados primários não puderam ser obtidos para os processos identificados, foram realizados os procedimentos propostos pelas normas NBR ISO 14044 (2009), pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a) e pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2009), que preveem o uso de equações estequiométricas para obtenção de dados de saída dos processos a partir das informações obtidas em relação aos dados de entrada, e até mesmo o desenvolvimento de médias do processo pela utilização de dados secundários disponíveis.

Utilizou-se o software para a inserção de dados primários, em substituição de dados secundários do Ecoinvent previamente utilizados nos processos unitários, a fim de se manter ao máximo, a fidelidade ao perfil inicial de simulação ambiental.

Análise de sensibilidade foi realizada para avaliar as variações nos resultados finais do estudo de caso baseado totalmente em dados secundários e onde os processos de maior contribuição tiverem dados primários coletados no contexto brasileiro. Tal análise foi realizada avaliando a porcentagem de variação nos resultados finais para todas as categorias de impacto, utilizando-se a metodologia ReCiPe 2008, a qual foi também aplicada no estudo de caso inicial.

### 5.3.2 Análise de sensibilidade ao uso de diferentes metodologias de AICV

Uma análise de sensibilidade foi também aplicada em relação à utilização de diferentes metodologias de AICV, analisando-se as possíveis implicações e consequências da escolha do método de AICV nos resultados do estudo de caso inicial, baseado em dados secundários do Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005), de forma a entender as limitações inerentes a tal escolha durante a definição de escopo.

Importante salientar que, para simplificar a análise, a alternativa de vedação *steel framing* com placas de gesso acartonado internas e cimentícia externa foi retirada da comparação, uma vez que essa alternativa tem como processos de maior contribuição os mesmos da opção de sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa, sendo seus impactos sempre próximos dessa última.

Cinco métodos de AICV foram aplicados: três metodologias mais antigas e precursoras da AICV – EDIP 97/2003 (Wenzel et al., 1997; Potting e Hauschild, 2005), CML 2001 (Guinée et al., 2002) e Impact + 2002 (Jolliet et al., 2003) – e duas metodologias mais recentemente desenvolvidas – ReCiPe 2008 (Goedkoop et al., 2008) e as melhores práticas recomendadas pelo ILCD (Hauschild et al., 2012).

As metodologias EDIP 97 e CML 2001 foram selecionadas para esta análise por se tratarem das precursoras em estudos de ACV. Das primeiras metodologias desenvolvidas para estudos de AICV, essas foram as mais utilizadas consistentemente durante os primeiros anos de aplicação de estudos de ACV. Sendo assim, a comparação de seus resultados com os de métodos mais

recentemente desenvolvidos e atualizados, pode trazer à tona possíveis diferenças, lacunas e defasagens em resultados de estudos prévios, assim como apontar para o possível direcionamento de futuros desenvolvimentos no campo da avaliação de impacto.

Impact 2002 e ReCiPe 2008 foram escolhidas por terem a maior representatividade de aplicação na atualidade, consistindo ambas de abordagens *midpoint* e *endpoint*. A metodologia Impact 2002 tem sido a mais utilizada em todo o contexto europeu nos últimos anos sendo, no entanto, aos poucos substituída pela metodologia ReCiPe 2008, a qual foi desenvolvida como uma evolução de um conjunto de metodologias previamente existente, fazendo dessas metodologias as de maior representatividade de aplicação na atualidade.

Finalmente, as melhores práticas apontadas por Hauschild et al. (2012) buscaram a avaliação de categorias de impacto isoladamente, buscando avaliar quais métodos apresentavam melhores fatores de caracterização para quais categorias. O resultado do estudo foi uma seleção de categorias, provenientes de diferentes métodos, as quais seriam capazes de prover uma avaliação mais acurada para cada tipo de impacto. Tal busca pelas melhores práticas faz dessas categorias desejáveis de serem aplicadas neste estudo, a fim de verificar também a sensibilidade dos resultados.

A metodologia Impact World+, a despeito de se tratar da última a ter sido desenvolvida, e a primeira a pretender ser uma ferramenta de uso global com fatores de caracterização específicos para todas as regiões do globo (países ou continentes), não pode ser aplicada neste trabalho uma vez que tem disponível para aplicação apenas a sua versão *beta*, a qual não apresenta, até o momento, compatibilidade com o software utilizado nesta pesquisa.

A etapa de AICV foi realizada em nível *midpoint* para todas as metodologias, e a comparação dos métodos foi baseada no ponto de vista dos tomadores de decisão, não se aprofundando no *background* científico dos fatores de caracterização. No entanto, variações nos fatores de caracterização foram identificadas para explicar possíveis discrepâncias nos resultados.

A comparação dos resultados em nível *midpoint* se concentrou principalmente nas categorias de impacto cobertas por todas as cinco metodologias analisadas. Sendo assim, as categorias discutidas de forma central nesta análise de sensibilidade foram Mudanças Climáticas, Depleção de Ozônio, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação, Eutrofização, Ecotoxicidade e Toxicidade Humana.

A categoria Depleção de Recursos não foi analisada profundamente devido a suas diferentes abordagens dentre os métodos de AICV, os quais apresentam-se de forma mais delimitada – como depleção de metais e recursos fósseis no método ReCiPe – ou mais abrangente – como Depleção Abiótica nos métodos CML e ILCD. Tais categorias foram consideradas como “não comparáveis” devido as suas diferentes abordagens conceituais, e foram discutidas de forma concisa nos resultados. A única categoria relacionada ao consumo de recursos analisada de forma aprofundada foi Depleção de Água, de forma a se avaliar se as diferentes metodologias de avaliação adotadas pelos métodos ReCiPe e ILCD podem levar a resultados discrepantes.

De modo geral, os métodos coincidem modelos de caracterização, indicadores e unidades apenas para as categorias Mudanças Climáticas e Depleção de Ozônio. Para as demais categorias, a harmonização dos indicadores foi realizada no nível da caracterização e os resultados foram analisados sob os pontos de vista científico e dos tomadores de decisão. A harmonização envolveu apenas a conversão direta de diferentes indicadores em unidades comuns, no entanto, não foi realizada harmonização dos modelos subjacentes, de forma a manter suas características originais.

Para aquelas categorias onde uma análise de contribuição se fez necessária, os resultados desta foram apresentados apenas para a alvenaria de blocos cerâmicos, ou, em alguns casos, para a alternativa onde a alteração se apresentou de forma mais proeminente. Essa tipologia construtiva foi escolhida apenas para servir como amostragem de dados para tal análise, mas também por se tratar de uma das mais tradicionais no contexto brasileiro.

Como orientação para se ilustrar as diferenças intrínsecas às metodologias de AICV e o caminho percorrido para torná-las comparáveis, a Tabela 12 mostra as unidades de indicadores

para categorias de impacto entre as metodologias *midpoint* estudadas e a Tabela 13 apresenta os fatores de conversão para a harmonização das unidades.

**Tabela 12: Unidades dos Indicadores das categorias de impacto entre as metodologias *midpoint* estudadas.**

Categorias de Impacto	Indicadores (unidades)				
	EDIP 97	CML 2001	Impact 2002+	ReCiPe	ILCD
Mudanças Climáticas	kg CO2-eq	kg CO2-eq	kg CO2-eq	kg CO2-eq	kg CO2-eq
Depleção de Ozônio	kg R11-eq	kg R11-eq	kg CFC-11-eq	kg CFC-11-eq	kg CFC-11 eq
Acidificação	kg SO2-Equiv.	kg SO2-Eq.	kg SO2-Eq.	kg SO2-eq	AE
Eutrofização	kg NO3-Equiv.	kg PO4-Eq.	kg PO4-Eq.	kg N-eq	kg P-eq
Formação de Ozônio Fotoquímico	kg C2H4-Eq	kg C2H4-Eq	kg C2H4-Eq	kg NMVOC-eq	kg NMVOC-eq
Toxicidade Humana	m3	kg 1,4-DCB-eq	-	kg 1,4-DCB-eq	cases
Ecotoxicidade	m3	kg 1,4-DCB-eq	kg TEG-Eq.	kg 1,4-DCB-eq	-
Depleção de Água				m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>

O software GaBi foi utilizado para obter-se as contribuições relativas de cada substância por categoria de impacto, dados que foram também trabalhados e apresentados de forma sintética, de acordo com sua magnitude.

#### 5.4. Avaliação de significância das categorias de impacto

Finalmente, uma análise de sensibilidade foi realizada nas diferentes categorias de impacto dos diferentes métodos, para se avaliar em quais tipos de impactos os materiais estudados apresentam uma maior significância absoluta. A magnitude dos resultados normalizados em todas as categorias foi comparada, a fim de se verificar se existem diferenças massivas de magnitude entre as categorias. Tal análise foi realizada considerando ponderação de peso um, ou seja, igual para todas as categorias de impacto.

**Tabela 13: Fatores de conversão para harmonização de unidades.**

Categorias de Impacto e Unidades de harmonização	Fatores de Conversão				
	EDIP 97	CML 2001	Impact 2002	ReCiPe	ILCD
Mudanças Climáticas [kg CO2-Equiv.]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Depleção de Ozônio [kg CFC-11 eq]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Acidificação [kg SO2-Equiv]	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Eutrofização [kg NO3-Equiv.]	1,0	10,44	10,44	32	4,43
Formação de Ozônio Fotoquímico [kg NMVOC-eq]	1,7	1,7	1,7	1,0	1,0
Toxicidade Humana [kg 1,4-DCB-eq]	1,40E-5 (ar) 1,12E-2 (água) 1,43 (solo)	1,0	-	1,0	-
Ecotoxicidade [kg 1,4-DCB-eq]	1,40E-5 (ar) 1,12E-2 (água) 1,43 (solo)	1,0	1,62E-3	1,0	-
Depleção de Água [m <sup>3</sup> ]	-	-	-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>

O objetivo dessa análise de sensibilidade é avaliar se, para os sistemas construtivos de vedações tradicionais, no contexto brasileiro, existe um padrão de significância de impactos para determinadas categorias, as quais poderiam, assim, ser consideradas de maior importância nesse tipo de estudo, e que deveriam, portanto, ser desenvolvidas ou adaptadas de forma mais específica para a realidade brasileira.

### 5.5. Discussão dos resultados

Ao final das etapas descritas até aqui, a análise dos resultados obtidos com a aplicação direcionada a sistemas construtivos da metodologia de ACV se deu pela discussão dos resultados obtidos nas análises de sensibilidade propostas acima, em relação ao uso de dados primários e secundários, diferentes metodologias de AICV e da identificação das categorias de impacto que se mostraram mais significativas ao longo do estudo de caso.

A partir da aplicação da metodologia no estudo de caso, esta foi avaliada segundo os seguintes critérios:

- Aplicabilidade: nível de complexidade da aplicação da metodologia para avaliação de ciclo de vida dos sistemas analisados, e consequente vocação desta a ter sua aplicação propagada, assim como sua sensibilidade à variante regional/tecnológica do sistema analisado;
- Comparabilidade: potencialidades e limitações na comparação entre ACVs de dois diferentes sistemas, de forma a possibilitar a escolha daquela mais adequado aos objetivos ambientais do edifício em questão;
- Potencialidade avaliativa: capacidade da metodologia de promover a avaliação de desempenho ambiental dos sistemas que forem submetidos à sua aplicação;
- Sensibilidade: avaliação da sensibilidade dos resultados finais aos fatores analisados como fontes de dados e metodologias de AICV empregadas, pela contabilização percentual e estatística de divergências encontradas nos resultados finais;
- Significância: identificação e discussão das categorias de impacto que apresentaram maior significância absoluta de impactos, assim como daquelas que apresentaram maior divergência nos resultados obtidos pela aplicação de diferentes metodologias, e que, desta forma, podem ter maior interferência nas possíveis alterações encontradas nos resultados finais.

Pelos critérios descritos acima a aplicação direcionada a sistemas construtivos da metodologia de ACV foi avaliada em sua utilização nos estudos de caso, de forma a responder às questões de pesquisa apresentadas e identificar possibilidades de desenvolvimento futuro para a avaliação de sistemas construtivos direcionada à utilização em sistemas de certificação.



## **CAPÍTULO 6. ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DE ACV DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES EXTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS BASEADO EM DADOS SECUNDÁRIOS**

O objetivo da aplicação deste estudo de caso é avaliar a sensibilidade dos resultados de um estudo comparativo de ACV, aplicado a sistemas construtivos de vedação externa não-estrutural, à utilização de dados secundários (coletados no contexto europeu) ou dados primários (coletados no contexto brasileiro), assim como à utilização de diferentes metodologias de AICV, identificando as categorias de impacto de contribuição mais significativa na avaliação de sistemas construtivos tradicionais e, dessa forma, responder às questões de pesquisa colocadas no início deste trabalho: a) se coletados para processos idênticos, os dados disponíveis em bases de dados internacionais validadas devem levar a resultados similares àqueles obtidos por estudos baseados em dados primários coletados no contexto brasileiro? b) As metodologias de avaliação de impacto disponíveis na atualidade são capazes de avaliar de forma completa e consistente os principais potenciais de impacto derivados do ciclo de vida de materiais de construção tradicionais?

A escolha estratégica de materiais e componentes construtivos durante o processo de projeto é especialmente importante para melhorar o desempenho ambiental dos edifícios. A avaliação do ciclo de vida de edifícios e seus componentes aparece nesse contexto como uma alternativa para a avaliação do processo de produção do edifício como um todo, bem como seus componentes isoladamente.

A construção de edifícios em economias em desenvolvimento, como por exemplo o Brasil, ainda está raramente submetida a avaliação ambiental e, portanto, a disponibilidade de dados de ACV de componentes e sistemas construtivos pode facilitar a disseminação de tal avaliação. O estudo de ACV baseado em componentes e sistemas construtivos pode ser considerado como a segunda melhor escolha na busca de melhorias de desempenho ambiental dos edifícios. Tal nível de avaliação, portanto, não pode ser considerado como um substituto para a ACV completa do edifício, mas uma alternativa para as situações em que estudos de ACV completos não podem ser

realizados, devido às demandas econômicas, de tempo e trabalho consideráveis associadas a uma ACV completa.

É importante notar que a avaliação modular da construção é uma abordagem específica, que considera os efeitos individuais de um determinado sistema construtivo isolado, e é dirigida à comparação de tais sistemas isoladamente. Os resultados de tais estudos não levam em conta as relações entre o sistema estudado e os demais sistemas do edifício, portanto, a soma dos resultados de ACV provenientes de estudos em diferentes sistemas construtivos não levam aos mesmos resultados de uma ACV completa do edifício (Equação 2), uma vez que este último tipo de estudo deve considerar o prédio como um único objeto.

**Equação 2 :**

$$\text{AICV (sistema A) + AICV (sistema B) + ... + AICV (sistema n) } \neq \text{ACV (edifício inteiro)}$$

No presente estudo busca-se ilustrar como o desempenho ambiental dos sistemas construtivos estudados podem ser quantificados e comparados, e, portanto, tais sistemas comumente utilizados em diversos projetos de construção podem ser priorizados em termos de desempenho ambiental.

A fim de contribuir para o banco de dados de ACV de componentes de construção, o objetivo deste estudo de caso é o desenvolvimento de uma ACV comparativa de sistemas de vedação externa não-estrutural, compostos por materiais de construção tradicionalmente utilizados no contexto brasileiro. Para este fim, foi utilizada a metodologia de ACV proposta pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), com o roteiro de aplicação sugerido pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a), com a utilização do software GaBi 4.4 (IKP-PE, 2002) para as etapas de modelagem de inventário e AICV.

Este estudo visa o apoio à tomada de decisão de projetistas no momento da escolha dos componentes e sistemas construtivos de vedação no desenvolvimento projetual do edifício. É um estudo científico, destinado a publicação para a academia, direcionando-se principalmente para

aquelas áreas ligadas à construção civil. Portanto, o público-alvo deste trabalho consiste em audiência externa e técnica, e é uma afirmação comparativa que está prevista para ser divulgada ao público.

A função a ser avaliada pelo estudo é a de vedação externa de edifício, a qual provenha o desempenho térmico e acústico estabelecido nas normas pertinentes.

## 6.1. Objetivo e Escopo

### 6.1.1. Definição do objetivo

#### 6.1.1.1. Aplicações pretendidas

Este estudo de ACV busca a comparação de diferentes sistemas de vedação externa não-estrutural, de forma a contabilizar os impactos ambientais de cada uma das alternativas. Os sistemas de vedação a serem estudados e comparados neste trabalho são:

- a) Alvenaria de blocos cerâmicos;
- b) Alvenaria de blocos de concreto;
- c) Parede de concreto leve;
- d) Sistema *steel framing* com fechamento interno de placas de gesso acartonado e externo de placa sanduíche de fibrocimento, com preenchimento em MDF.
- e) Sistema *steel framing* com fechamento interno e externo de placa sanduíche de fibrocimento, com preenchimento em MDF;

O presente estudo visa o apoio à tomada de decisão de projetistas na escolha dos componentes e sistemas construtivos de vedação no momento do desenvolvimento projetual do edifício, assim como nos processos de certificação ambiental.

#### 6.1.1.2. Limitações do método, suposições e impactos

Uma possível limitação deste trabalho se dará pela necessidade de adoção de suposições e adaptações da unidade funcional para a comparabilidade do desempenho térmico e acústico das

alternativas a serem comparadas. Além disso, outras limitações dos resultados deste trabalho estão possivelmente relacionadas ao escopo geográfico dos dados e metodologias de AICV.

Os dados coletados para este primeiro estudo de caso serão secundários, extraídos de bancos de dados majoritariamente europeus, o que pode conferir limitações para a aplicação dos resultados do estudo ao contexto brasileiro.

A metodologia de AICV, ReCiPe 2008, também foi desenvolvida para aplicação no contexto europeu, podendo conferir limitações ao resultado deste estudo, no contexto brasileiro.

#### 6.1.1.3. Motivos para realização do estudo e contexto de decisão

A principal razão para a realização do estudo é a necessidade de proporcionar, ao profissional de projeto da construção civil um embasamento científico, sob a perspectiva ambiental, para a escolha de componentes construtivos de menor impacto ambiental para a composição de seu edifício, especialmente durante os processos de certificação. No caso especial das vedações, objeto de estudo desta ACV, o impacto total gerado pela decisão do sistema construtivo a ser utilizado nas vedações é considerável, visto que estes elementos compõem uma porcentagem significativa da massa de materiais consumidos na construção de um edifício.

O contexto de decisão consiste em uma situação tipo A, de acordo com o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a), definido como contexto de "Apoio à decisão em micro-escala", ou seja, apoio à decisão, relacionada diretamente ao produto e seus processos, sem consequências no sistema de fundo ou em outros sistemas, ou consequências exclusivamente de pequena escala.

#### 6.1.1.4. Público-alvo

Este é um estudo científico, destinado à publicação para a academia, direcionando-se principalmente àquelas áreas ligadas à construção civil. Portanto, o público-alvo deste trabalho consiste em audiência externa e técnica.

Este estudo é uma afirmação comparativa e está previsto para ser divulgado ao público.

#### 6.1.1.5. Encarregados do estudo

A equipe técnica encarregada do estudo é composta pelos seguintes membros: Cristiane Bueno, Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto e Prof. Dr. João Adriano Rossignolo, todos da Universidade de São Paulo, e Prof. Dr. Morten Birkved, da Universidade Técnica da Dinamarca.

#### 6.1.2. Definição do escopo

##### 6.1.2.1. Tipos de entregas e aplicações pretendidas

O presente estudo será desenvolvido na forma de um estudo completo de Avaliação de Ciclo de Vida, abrangendo as fases de Inventário de Ciclo de Vida dos sistemas dos produtos, assim como a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida a partir dos dados de tal inventário, e Interpretação. É um estudo comparativo a ser divulgado à comunidade científica.

As aplicações pretendidas dos resultados obtidos por este estudo visam dar suporte à tomada de decisão de profissionais da área de projeto de construção civil na escolha de sistemas e componentes construtivos. O estudo busca, mais especificamente, a comparação de diferentes elementos de vedação externa não-estrutural, pela contabilização dos impactos ambientais de cinco diferentes alternativas.

##### 6.1.2.2. Função, unidade funcional e fluxo de referência

A função a ser avaliada pelo estudo é a de vedação externa não-estrutural de edifício, a qual provenha o desempenho térmico e acústico estabelecido nas normas pertinentes, para aplicação na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005), referente à cidade de São Paulo.

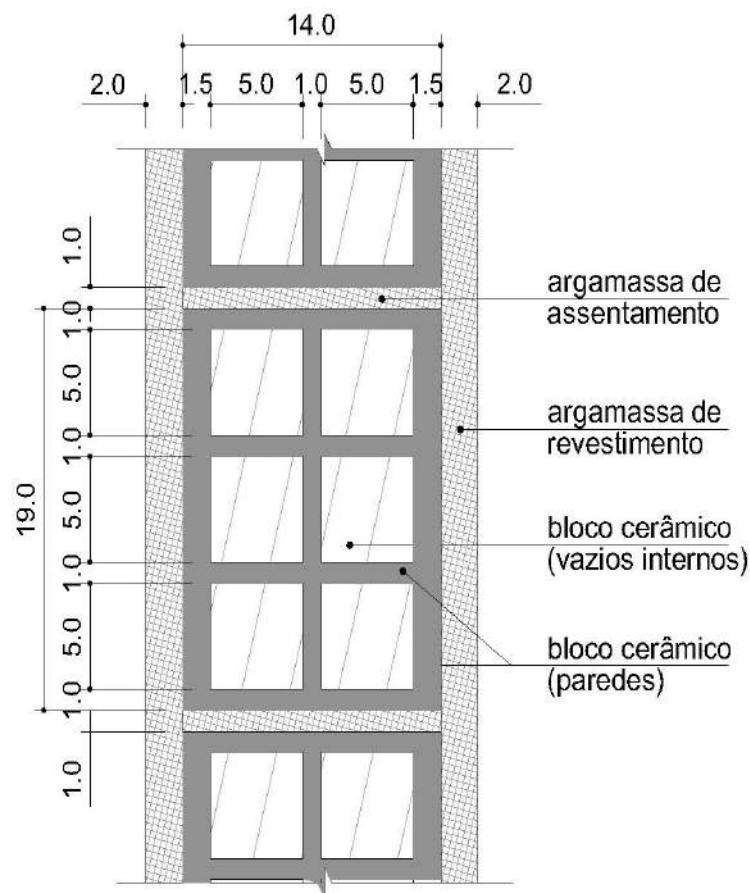
A durabilidade mínima prevista pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013) para sistemas construtivos de vedação externa como os estudados no presente documento é de 40 anos.

A unidade funcional adotada é de 1,00 m<sup>2</sup> de vedação externa não-estrutural, a qual provenha o desempenho térmico e acústico estabelecido pelas normas pertinentes, para aplicação

em edificações na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005), referente à cidade de São Paulo, pelo período de 40 anos.

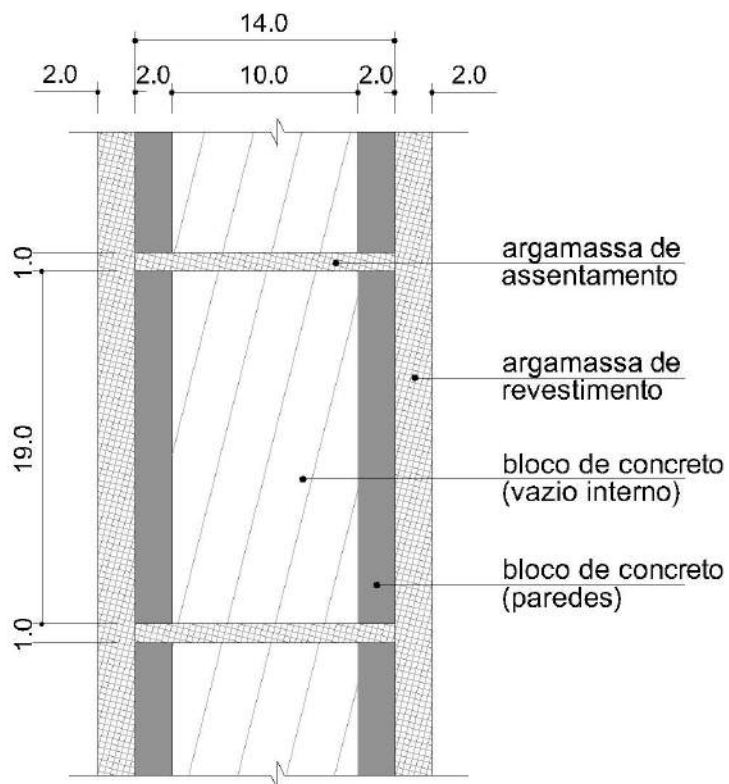
Para a unidade funcional acima, as seguintes alternativas serão comparadas:

- a) Alvenaria de blocos cerâmicos de 14 cm de espessura, com revestimento interno e externo de argamassa de 2 cm de espessura (Figura 11);

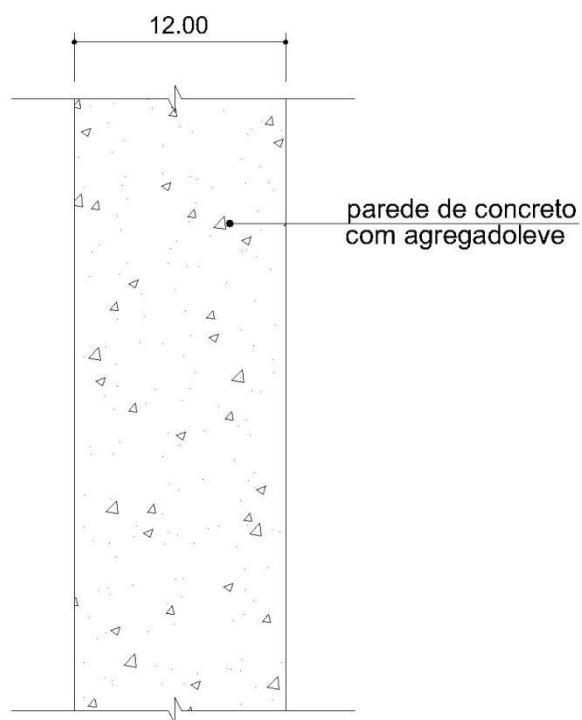


**Figura 11: Detalhamento Construtivo da Alvenaria de Blocos Cerâmicos: Corte Vertical**

- b) Alvenaria de blocos de concreto de 14 cm de espessura, com revestimento interno e externo de argamassa de 2 cm de espessura (Figura 12);
- c) Paredes de concreto leve com 12 cm de espessura (moldadas in loco com a utilização de formas de alumínio) (Figura 13);

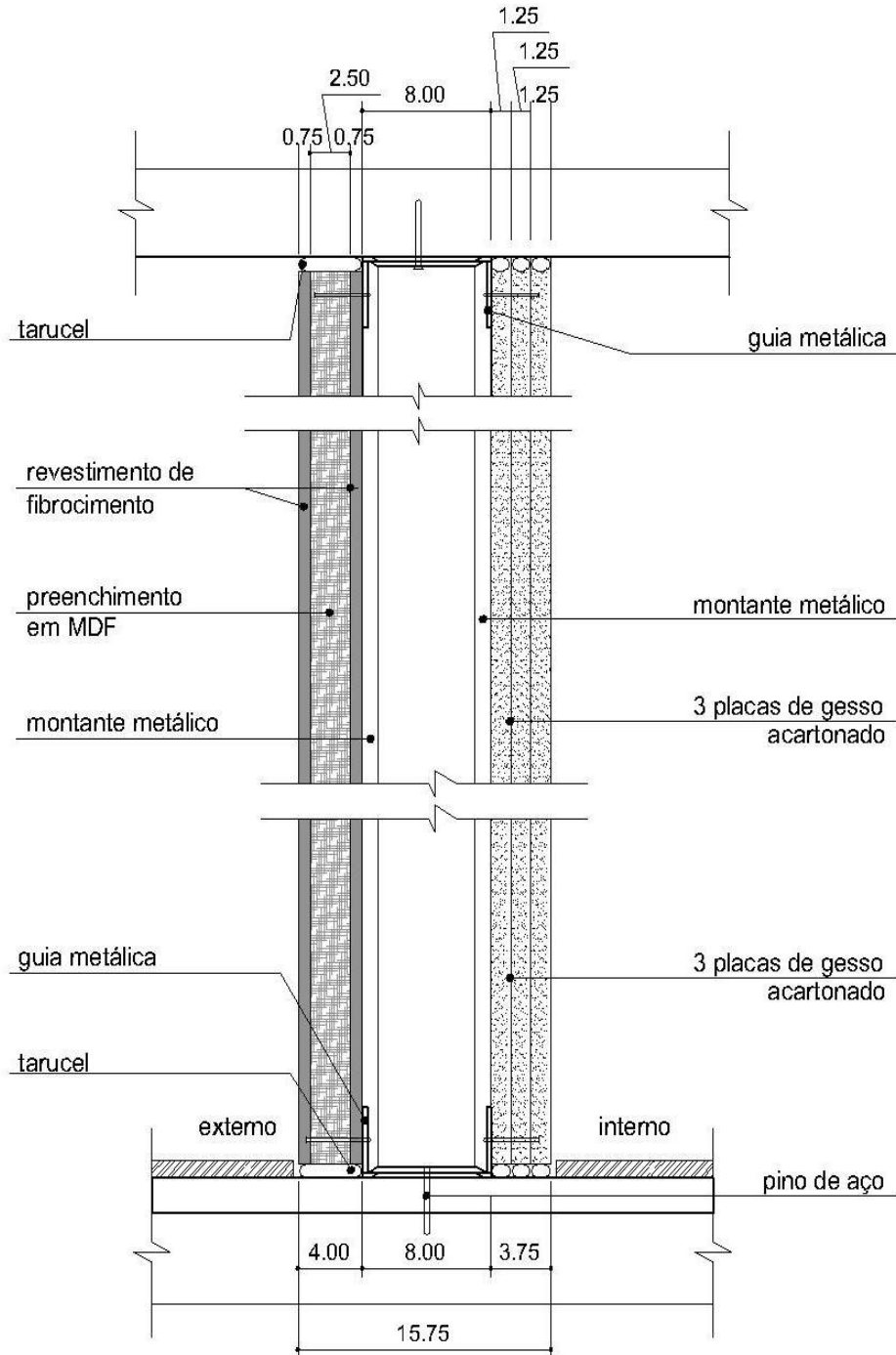


**Figura 12: Detalhamento Construtivo da Alvenaria de Blocos de Concreto: Corte Vertical**



**Figura 13: Detalhamento Construtivo da Parede de Concreto Leve: Corte Vertical**

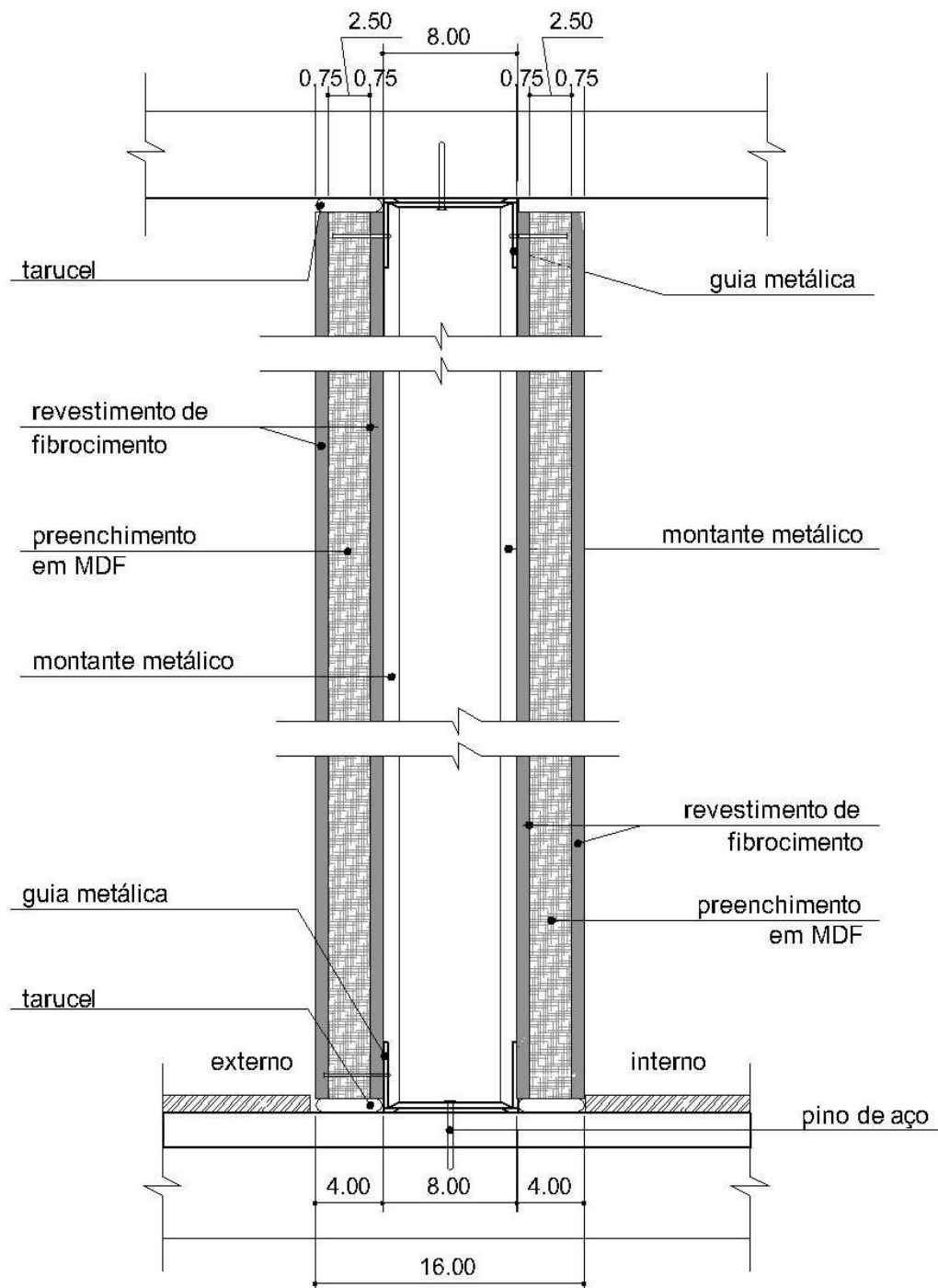
- d) Sistema *steel framing* com placa cimentícia, com preenchimento em placa de madeira, externa e três placas de gesso acartonado internas de 1,25cm de espessura, e câmara de ar não-ventilada de 8 cm entre placas (Figura 14);



**Figura 14: Detalhamento Construtivo do Sistema *steel framing* com placas de gesso internas e placa cimentícia externa: Corte Vertical**



- e) Sistema *steel framing* com placa cimentícia externa e interna de 4 cm de espessura, com preenchimento em placa de madeira, e câmara de ar não-ventilada de 8cm entre placas (Figura 15);



**Figura 15: Detalhamento Construtivo do Sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa: Corte Vertical**

Para as alternativas de alvenaria, os blocos serão considerados assentados em sua menor dimensão, dando à parede a espessura (sem revestimento) de 14 cm, e usando argamassa de assentamento de 1 cm de espessura.

As opções que utilizam o sistema *steel framing* serão consideradas como tendo a mesma estruturação em aço, e tendo, portanto, a mesma espessura final aproximada. Nesses casos, a única variação será o material e tipologia das placas de revestimento interno.

Com base nessas afirmações, os fluxos de referência para a unidade funcional de 1m<sup>2</sup> de vedação externa não estrutural consistem em:

a) Alvenaria de blocos cerâmicos: 16,67 blocos cerâmicos, 0,0126 m<sup>3</sup> de argamassa de assentamento e 0,04 m<sup>3</sup> de argamassa de revestimento;

b) Alvenaria de blocos de concreto: 16,67 blocos de concreto, 0,0126 m<sup>3</sup> de argamassa de assentamento e 0,04 m<sup>3</sup> de argamassa de revestimento;

c) Parede de concreto leve: 0,12 m<sup>3</sup> de concreto leve (com adição de agregado leve que consiste em brita e argila expandida) e 2 m<sup>2</sup> de painéis estruturados de alumínio de 3 mm de espessura, usados como formas para construção (0,009 m<sup>3</sup> de alumínio);

d) Sistema *steel framing* com placas de gesso internas e placa cimentícia externa: 3 m<sup>2</sup> de painéis de gesso acartonado de 1,25 cm de espessura, 1 m<sup>2</sup> de placa sanduíche de fibrocimento, com preenchimento em MDF, com espessura final de 4 cm e 0,004375 m<sup>3</sup> de aço;

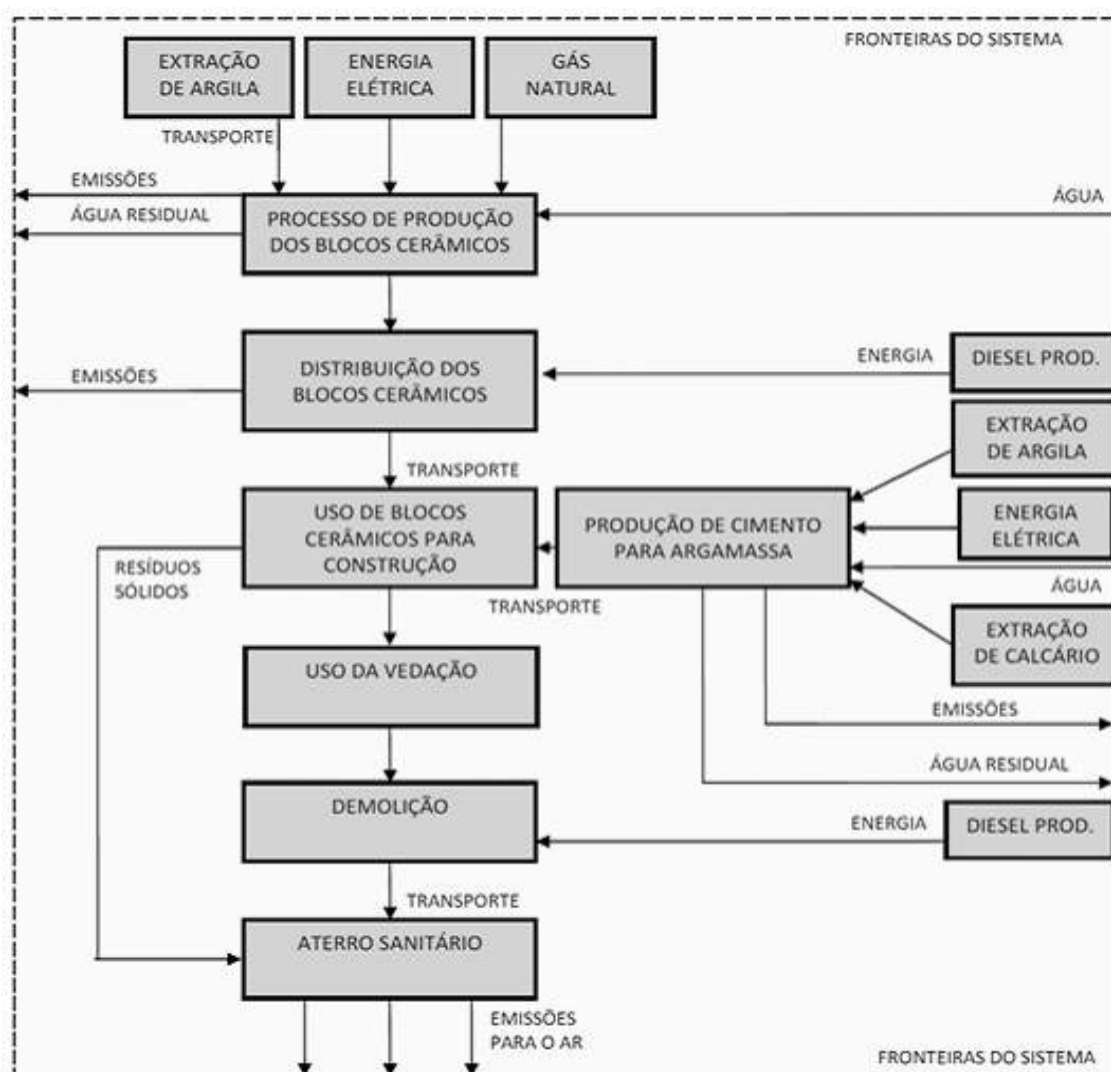
e) Sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa: 2 m<sup>2</sup> de placa sanduíche de fibrocimento, com preenchimento em MDF, com espessura final de 4 cm e 0,004375 m<sup>3</sup> de aço.

#### 6.1.2.3. Estrutura de modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

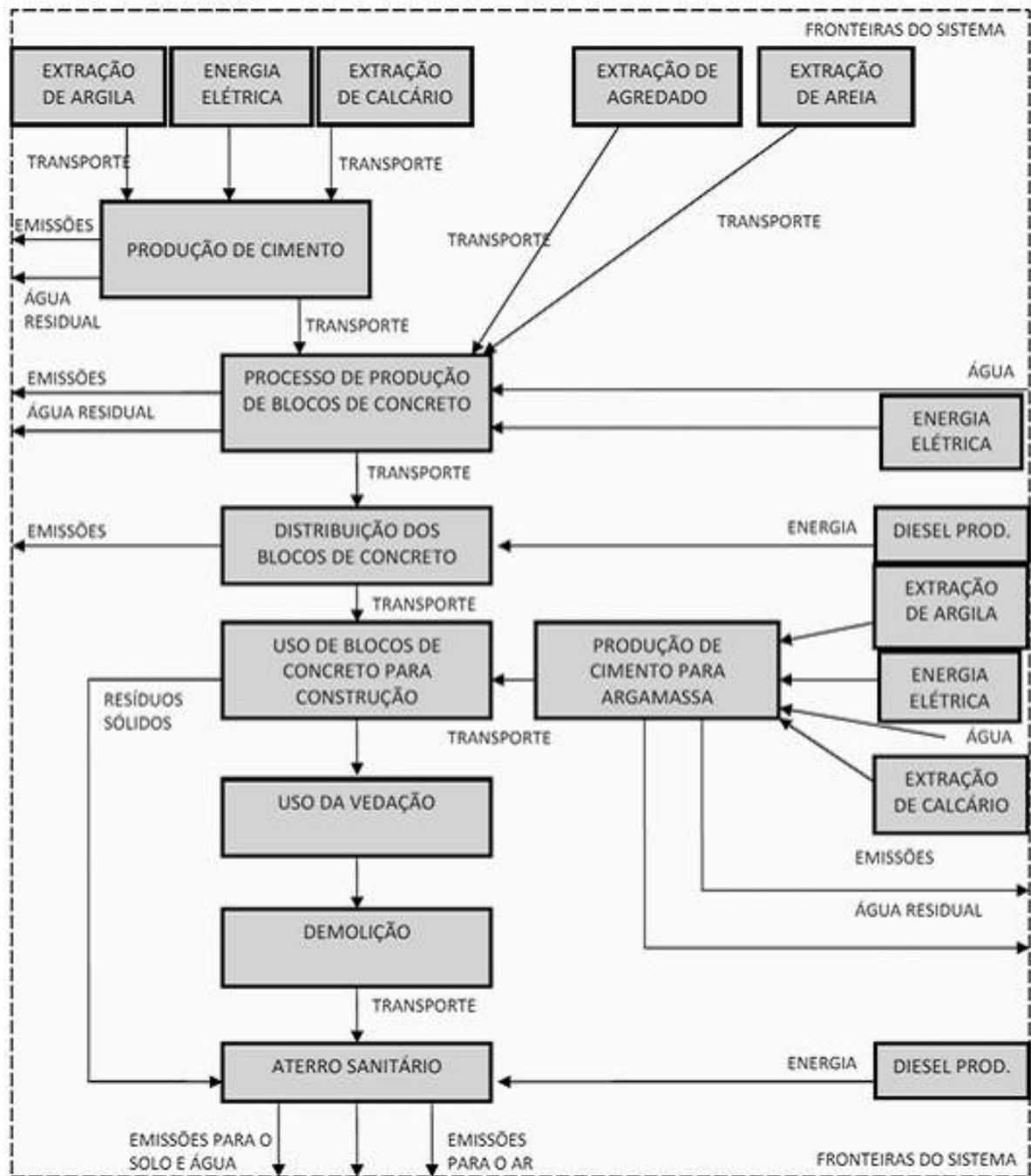
Este estudo se utilizará do modelo atribucional de ciclo de vida, o qual retrata sua cadeia de fornecimento real ou prevista, incorporando o sistema do produto em uma tecnosfera estática.

#### 6.1.2.4. Fronteiras do sistema e critérios de corte

Os sistemas de produto a serem comparados neste estudo de ACV são monofuncionais, ou seja, para cada sistema, há apenas um produto final. Portanto, inicialmente não foi constatada a necessidade de estratégias de alocação ou expansão dos sistemas, que serão estudados, da forma representada nas Figuras 16, 17, 18, 19 e 20. Importante notar que tais fluxogramas contemplam apenas os principais processos e fluxos elementares, suprimindo diversos processos intermediários de menor significância. Da mesma forma, é sabido que quaisquer processos elementares possuem fluxos primários de entrada e emissões, no entanto, nem todos esses fluxos estão aqui representados para efeito de simplificação.

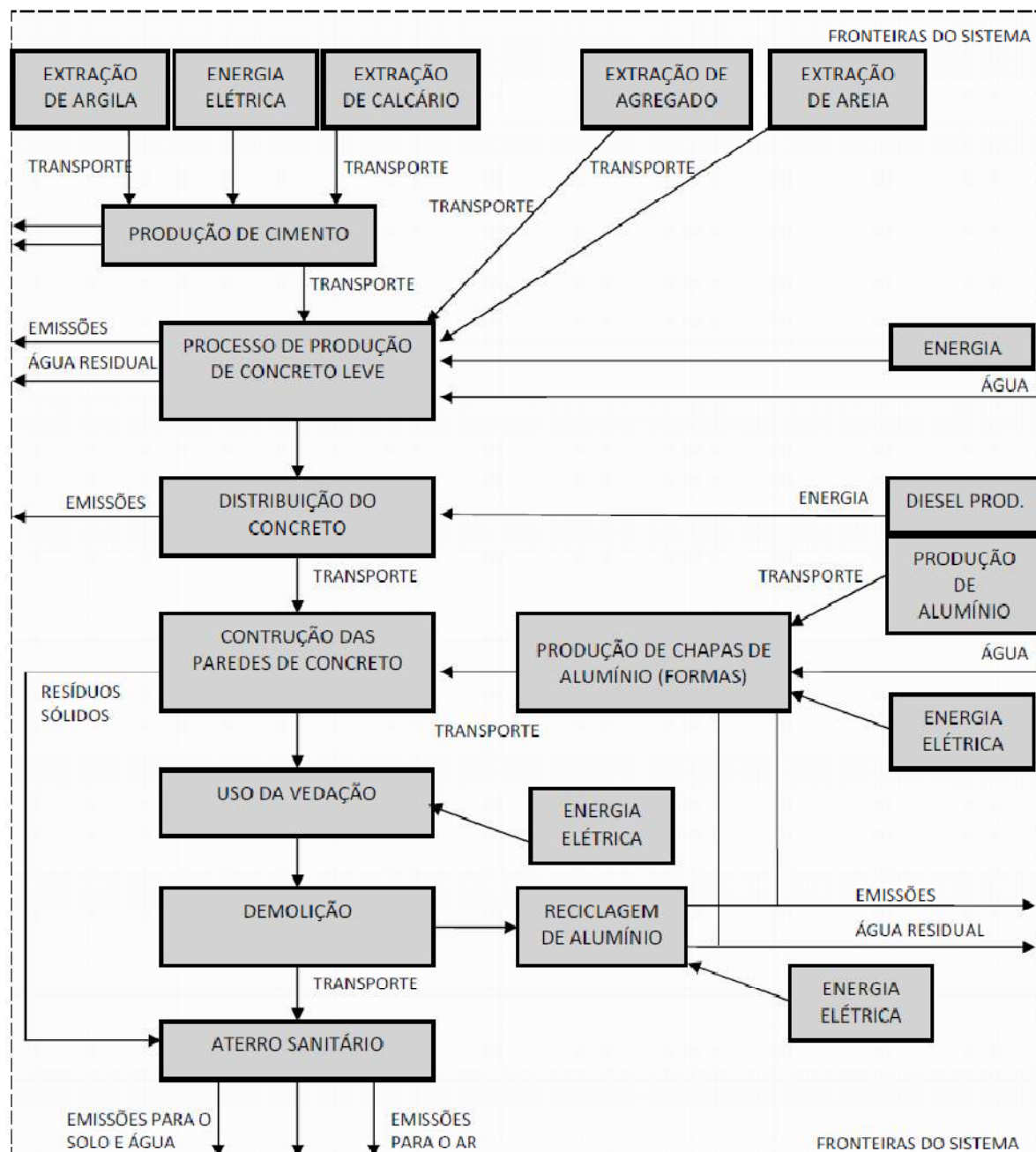


**Figura 16: Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da alvenaria de blocos cerâmicos.**



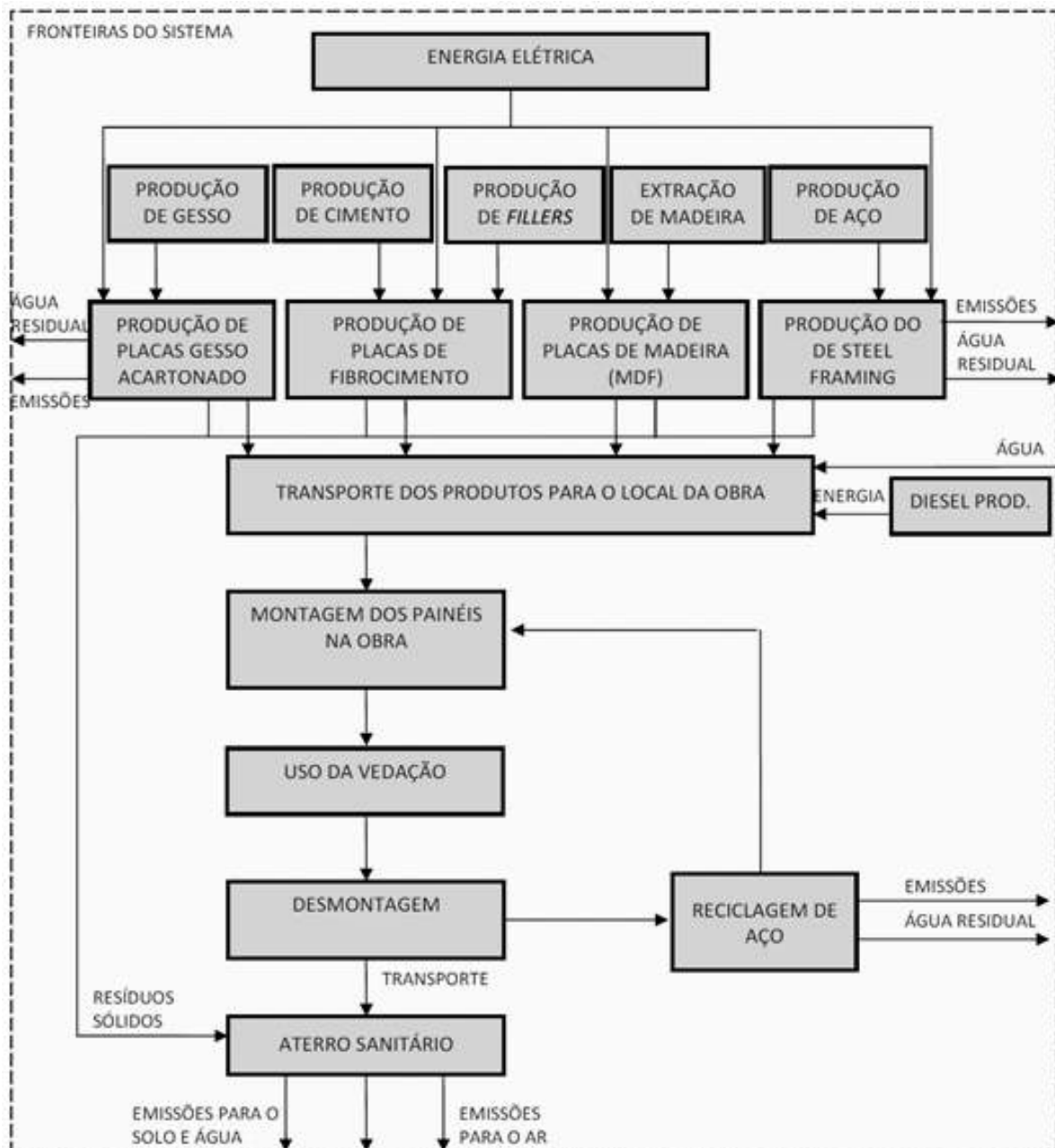
**Figura 17: Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da alvenaria de blocos de concreto.**

O critério de corte deste estudo deve definir o valor de corte a ser aplicado para produtos, resíduos e fluxos elementares que cruzam a fronteira do sistema analisado. Esses fluxos principais deverão incluir impreterivelmente fluxos de água, energia e massa, os quais deverão ser sempre considerados, e aos quais apenas será permitido o corte em casos em que sua relevância nos resultados finais da avaliação (de cada um dos tipos de fluxos citados) for menor de 0,1%.



**Figura 18: Processos elementares e fronteiras do sistema do produto da parede de concreto leve.**

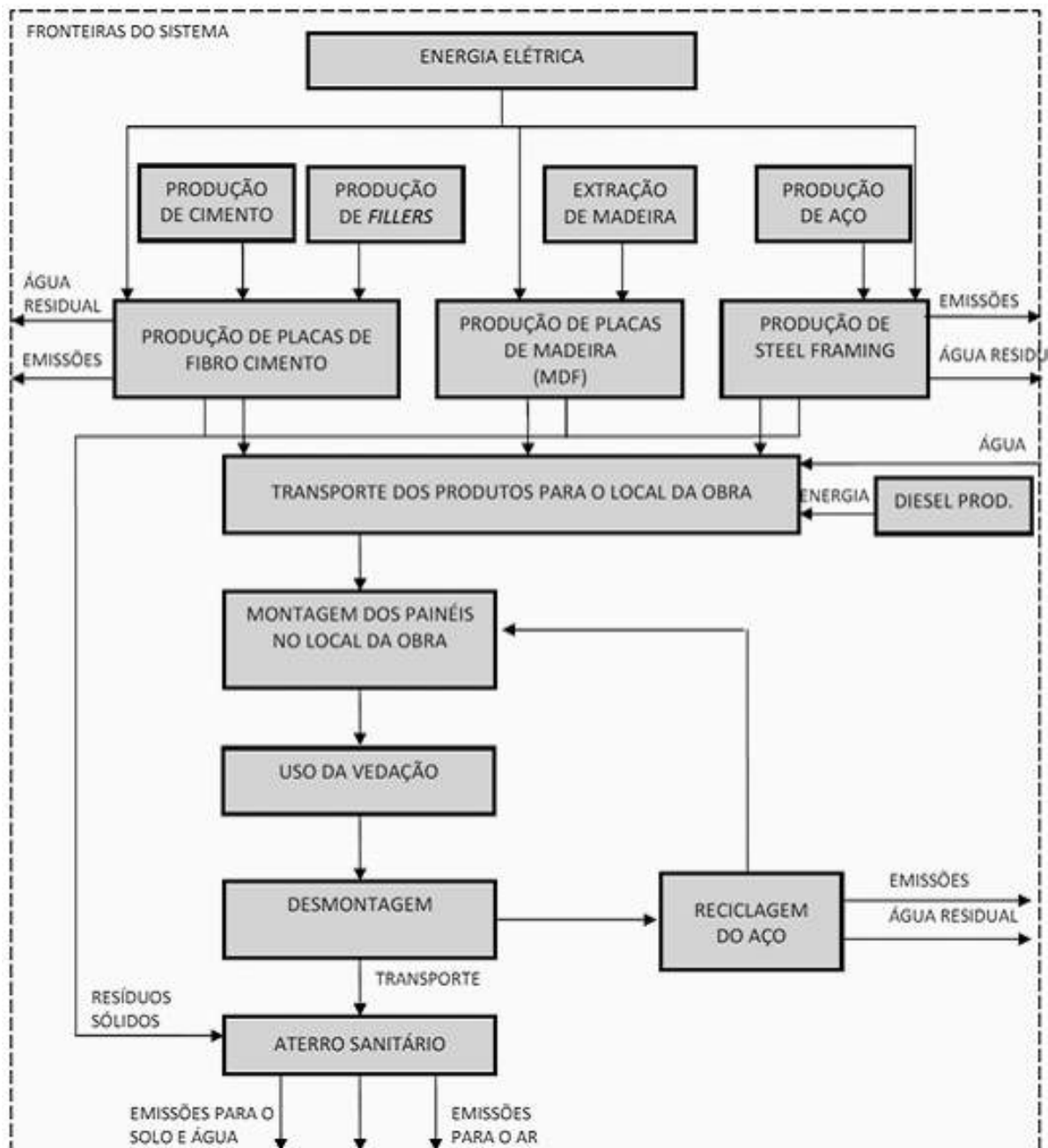
Esse critério de corte será utilizado inicialmente em todos os fluxos de entrada, no entanto, para emissões para ar, água e solo, ainda que a representatividade final do fluxo esteja abaixo de 0,1%, será necessária uma avaliação do potencial de impacto ambiental da substância em questão. Portanto, para a aplicação de critérios de corte, excluem-se do inventário quaisquer entradas que não atinjam o valor mínimo de 0,1% da massa total de entradas do sistema (exceto para os casos de entradas de recursos não-renováveis de grande representatividade para o sistema do produto).



**Figura 19: Processos elementares e fronteiras do sistema do produto do sistema *steel framing* com fechamento interno em gesso acartonado e externo em placa cimentícia.**

#### 6.1.2.5. Preparação do embasamento para a avaliação de impacto

Como este estudo se trata de uma afirmação comparativa a ser divulgada ao público, a seleção do método de AICV a ser aplicado, assim como dos níveis de avaliação (*midpoint* ou *endpoint*), deve ser feita durante a definição inicial do escopo, da mesma forma que a decisão a respeito da possibilidade de inclusão da fase de normalização.



**Figura 20: Processos elementares e fronteiras do sistema do produto do sistema *steel framing* com fechamento interno e externo em placas cimentícias.**

A metodologia utilizada será ReCiPe 2008 (GOEDKOOP et al., 2008), a qual foi escolhida por ter a maior representatividade de aplicação na atualidade, consistindo de abordagens *midpoint* e *endpoint*, e será utilizada em seus dois níveis de avaliação para fins de análise de sensibilidade neste trabalho. A metodologia ReCiPe 2008 foi desenvolvida como uma evolução de um conjunto

de metodologias previamente existente, fazendo dessa a metodologias de maior representatividade de aplicação na atualidade.

A normalização e ponderação dos resultados não serão abordadas neste estudo para fins de avaliação de impacto das alternativas comparadas, por se tratar de um estudo comparativo a ser divulgado ao público. No entanto, na fase posterior ao estudo, para análise das categorias de impacto de maior significância para os materiais estudados, a normalização será utilizada a fim de que seus resultados sejam comparados aos resultados não normalizados, de forma a se analisar se as categorias de impacto de maior magnitude serão as mesmas, para ambos os resultados.

#### 6.1.2.6. Escopo tecnológico, geográfico e temporal

Para que os dados de inventário possam representar de forma válida os impactos ambientais de um sistema, eles devem ter representatividade e adequação, abrangendo a coleta de dados relacionados à tecnologia, geografia e tempo.

O escopo tecnológico deste estudo está diretamente relacionado aos processos apresentados no sistema do produto, como representados pelas tecnologias atualmente utilizadas. Portanto, os dados a serem coletados na fase de ICV devem corresponder a entradas e saídas desses processos. O escopo tecnológico é considerado atual e estático, pois serão consideradas as tecnologias atualmente utilizadas, sem previsões de desenvolvimento de novas tecnologias.

O escopo geográfico de um processo ou sistema identifica a representatividade regional dos dados de inventário em relação à localização do processo/sistema do produto, sua operação, produção ou consumo.

A abrangência geográfica dos dados de ICV a serem coletados para o presente estudo, devido à indisponibilidade de dados primários e secundários para o contexto brasileiro, considerará, portanto, a coleta de dados secundários para realidade europeia, obtidos na base de dados Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005).



Na iteração futura promovida pela análise de sensibilidade, dados primários representativos de escopo geográfico brasileiro serão coletados para os processos que demonstrarem maiores contribuições para as categorias de impacto nos sistemas analisados.

A representatividade temporal prevista para esse trabalho é de 40 anos, durabilidade mínima prevista pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013) para sistemas construtivos de vedação externa, como os estudados nesta pesquisa.

#### 6.1.2.7. Pressupostos e comparabilidade entre sistemas

Este estudo de ACV destina-se à comparação de cinco sistemas construtivos de vedação externa não-estrutural, e é destinado a ser publicado em meios científicos, a fim de servir como apoio à tomada de decisão de profissionais da área do projeto de construção civil, no momento de opção por diferentes tipos de sistemas e componentes construtivos, especialmente nos processos de certificação ambiental de edificações.

Para tanto se buscou a total equivalência funcional das alternativas comparadas, de forma que estas possam ser comparadas de forma justa, não proporcionando resultados enganosos. Tal equivalência baseia-se em parâmetros de desempenho térmico estabelecidos pela norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

De acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) para a zona bioclimática 3, as paredes de vedação externa devem possuir transmitâncias térmica menor ou igual a  $3,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e capacidade térmica maior ou igual a  $130 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ .

Todas as alternativas comparadas neste estudo encontram-se nessa faixa de desempenho térmico exigida pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013). A Tabela 14 apresenta os valores para Transmitância térmica e Capacidade Térmica das alternativas, as quais foram calculadas de acordo com as orientações da NBR 15220 (ABNT, 2005), e cujos procedimentos de cálculo estão apresentados no ANEXO A, deste trabalho.

**Tabela 14: Transmitância Térmica e Capacidade Térmica das alternativas comparadas**

<b>Alternativas de vedação externa não-estrutural</b>	<b>Transmitância térmica W/(m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>Capacidade Térmica kJ/(m<sup>2</sup>.K)</b>
Alvenaria de blocos cerâmicos	2,43	160,00
Alvenaria de blocos de concreto	2,73	160,00
Paredes de concreto leve	2,92	168,00
Sistema <i>steel framing</i> com painéis internos de gesso acartonado e externo sanduíche de fibrocimento e MDF	2,59	106,06
Sistema <i>steel framing</i> com painéis interno e externo sanduíche de fibrocimento e MDF	2,08	149,12

Algumas das alternativas construtivas aplicadas neste trabalho tiveram de ser adaptadas de forma que seu desempenho térmico ficasse o mais próximo possível das demais, para fins comparativos. Esse é o caso, por exemplo, da alternativa de sistema *steel framing* com 3 placas de gesso acartonado interno. A terceira placa de gesso acartonado foi considerada de forma a se melhorar o desempenho térmico da alternativa.

A fase de uso dos sistemas aqui analisados – e, portanto o consumo de energia para climatização – não será considerada para efeito de coleta de dados de inventário e, conseqüentemente, avaliação de impacto neste estudo.

Buscou-se utilizar alternativas com desempenhos térmicos similares, de forma que as diferenças de seus impactos ambientais na fase de uso sejam o menos significativas possíveis. No entanto, é importante ressaltar que tais diferenças existem, uma vez que não é possível que tais alternativas alcancem exatamente o mesmo desempenho.

## 6.2. Análise de Inventários de Ciclo de Vida (ICV)

### 6.2.1. Identificação de processos dentro das fronteiras do sistema

A análise de inventário, neste estudo, se dará pela modelagem atribucional, a qual retrata o sistema da forma como este pode ser observado/mensurado, dentro da tecnosfera, ao longo dos fluxos de matéria, energia e serviços.

Os processos a terem seus fluxos inventariados neste estudo são todos aqueles observados dentro das fronteiras do sistema, nas Figuras 11, 12, 13, 14 e 15 apresentadas anteriormente.

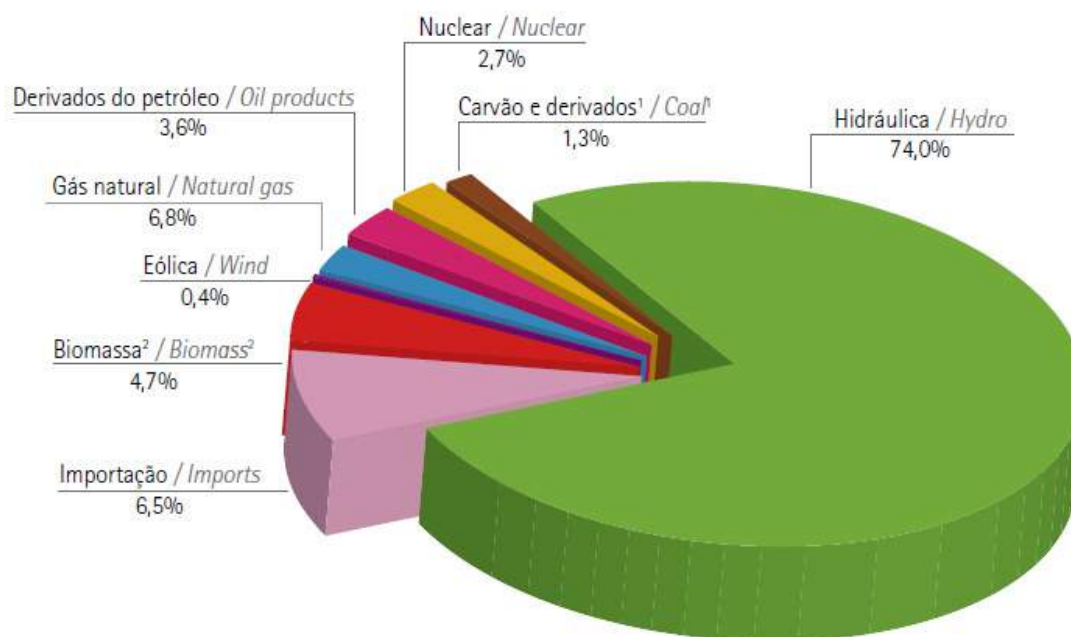
Para a coleta de dados de ICV é importante a determinação do processo de produção utilizado para cada um dos processos elementares analisados neste estudo, uma vez que atualmente, há diferentes processos para obtenção de tais produtos.

### 6.2.2. Inventários de Ciclo de Vida

Para uma estruturação mais organizada da apresentação dos dados de inventário coletados, os sistemas analisados neste estudo foram subdivididos de acordo com seus processos elementares. A modelagem de inventário foi realizada com a utilização do software GaBi 4.4 (IKP-PE, 2002), e os dados de inventário utilizados nesta primeira iteração do trabalho foram obtidos das bases de dados Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005).

Uma vez que este estudo de ACV foi idealizado para ser usado na escolha de sistemas de vedação externa não-estrutural no contexto brasileiro, a composição da matriz energética e as porcentagens médias de reciclagem de materiais como alumínio e aço, foram coletadas em relatórios de agências governamentais brasileiras.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2011) a matriz energética brasileira, a qual será considerada nesta pesquisa, é composta de acordo com as porcentagens apresentadas na Figura 21.



Notas/ Notes:

<sup>1</sup> Inclui gás de coqueria/ Includes coke gas.

<sup>2</sup> Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Biomass includes firewood, sugar cane bagasse, black liquor e other wastes.

**Figura 21: Fornecimento de energia elétrica no Brasil, por fonte.** Fonte: MME, 2011.

Em relação à porcentagem de reciclagem de materiais, mais uma vez, as informações consideradas baseiam-se em relatório de agências brasileiras: de acordo com ABAL (2011) a porcentagem média de reciclagem de Alumínio no Brasil, no ano base de 2010, foi de 33,8%, enquanto que, de acordo com SEBRAE (2012), a porcentagem de reciclagem de aço, no ano base de 2010, foi de 24%.

Assim essas foram as proporções de reciclagem e matriz energética consideradas na coleta de dados e modelagem dos inventários.

Além disso, no caso da alternativa de Paredes de Concreto Leve, a utilização do alumínio é destinada à produção de formas, as quais são utilizadas para moldagem in loco das paredes. Neste trabalho foi considerada a média de 300 reutilizações por forma antes que essas sejam consideradas inaptas para moldagem e sejam então destinadas à reciclagem ou à disposição final.

Para a elaboração dos inventários de entradas e saídas referentes ao transporte e distribuição dos materiais do local da produção até o usuário final (localização do edifício a ser construído), foram considerados, para efeito comparativo neste estudo, 100 km de distância, e os

dados brutos de inventário deverão ser coletados para a unidade de 100 km.t. Para descarte de entulho em aterro sanitário, a distância considerada neste estudo foi de 10 km, e os dados de inventário deverão ser coletados para a unidade de 10 km.t.

Mais uma vez, neste ponto, faz-se importante ressaltar que não serão inventariados fluxos relacionados à etapa de utilização da alvenaria, como manutenção e energia necessária para climatização, uma vez que, estando numa mesma faixa de desempenho térmico, as alternativas comparadas foram consideradas similares, dispensando a análise de inventários relacionada a esta etapa do ciclo de vida.

Os dados de inventário coletados para os processos dentro do ciclo de vida dos sistemas construtivos de vedação comparados neste trabalho são apresentados no ANEXO B.

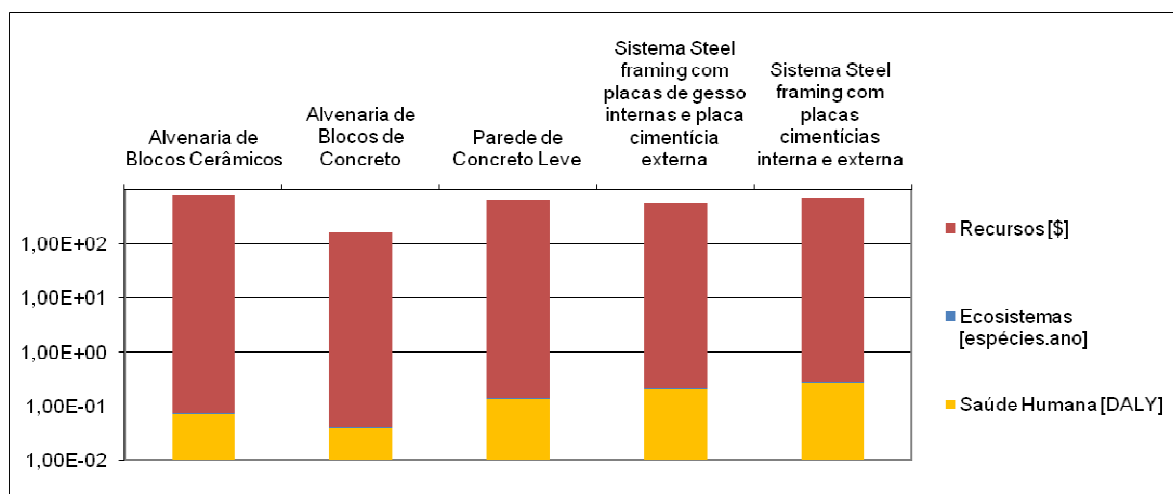
### **6.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)**

Neste trabalho a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) será realizada pela utilização da metodologia ReCiPe 2008 (GOEDKOOPE et al., 2008), conforme definido e justificado na definição do escopo deste estudo, aplicando as abordagens *endpoint* e *midpoint*, as quais cobrem a maioria dos impactos relacionados a emissões e consumo de recursos. Essa metodologia foi escolhida para aplicação devido a seu escopo regional direcionado aos impactos médios do continente europeu para todas as categorias de impacto, diferentemente de outros métodos os quais são mais direcionadas a contextos nacionais específicos, conferindo uma cobertura extremamente local às suas categorias de impacto. A ponderação não será abordada para fins de avaliação de impacto das alternativas comparadas.

No corpo do texto serão apresentados os resultados finais da AICV para todos os processos, por categoria de impacto. Os fatores de caracterização e normalização utilizados para cálculo na etapa da AICV podem ser encontrados na referência bibliográfica indicada para cada método de AICV utilizado ou no banco de dados do software GaBi (IKP-PE, 2002).

A interpretação já será realizada juntamente com a apresentação dos resultados, de forma que, para cada categoria de impacto será identificada a alternativa de vedação de maior contribuição e então, dentro do ciclo de vida de tal alternativa, serão identificados os processos elementares de maior contribuição para tal resultado.

A Figura 22 apresenta os resultados para todas as categorias de AICV *endpoint* constantes na metodologia ReCiPe 2008, para os sistemas construtivos analisados.



**Figura 22: Resultados da AICV para *endpoint* pela metodologia ReCiPe 2008.**

A AICV em nível *endpoint* leva à conclusão de que a alternativa mais impactante, de forma geral, é a alvenaria de blocos cerâmicos, devido ao seu grande potencial de impacto para Esgotamento de Recursos, enquanto a alvenaria de blocos de concreto mostra um potencial de impacto geral levemente menor no ciclo de vida. É possível concluir, também, que quase todas as alternativas apresentam grandes contribuições para Esgotamento de Recursos, enquanto em relação à Saúde Humana, a maior contribuição apresentada provém do ciclo de vida das opções em Sistema *steel framing*.

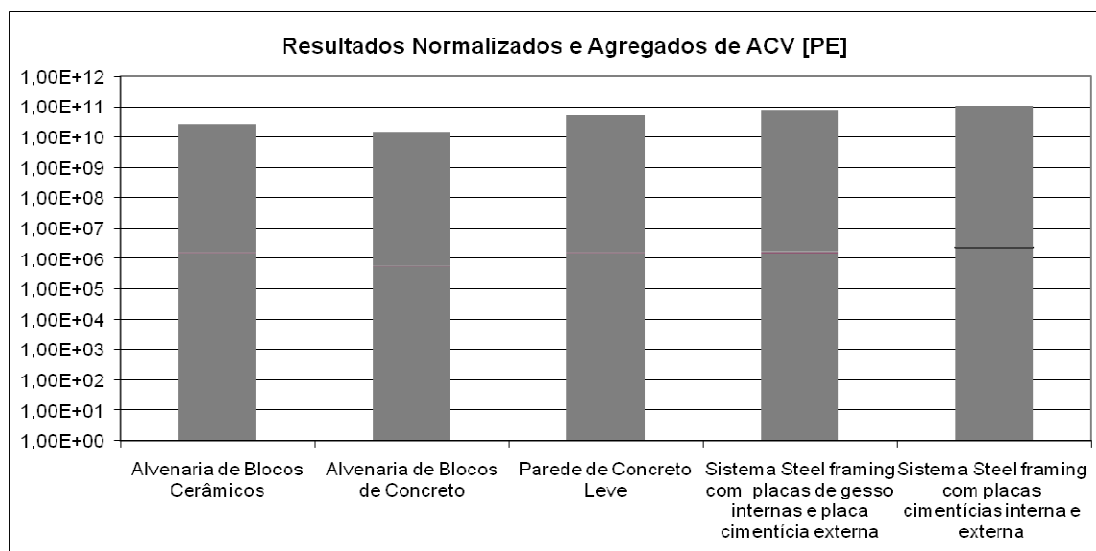
Finalmente, em relação à área de proteção relacionada aos Ecossistemas, a magnitude absoluta dos impactos apresenta-se menor, mostrando-se pouco significativa em relação às demais áreas de proteção, e parecendo imperceptível no gráfico geral. Os resultados mostram para essa categoria uma variação bastante similar à da categoria saúde humana, onde os maiores impactos advêm do ciclo de vida das opções em *steel framing*.

De forma a analisar a origem de tais resultados, passa-se então à avaliação de impacto em nível *midpoint*, cujos resultados totais estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15: Resultados de AICV em nível *midpoint* pela metodologia ReCiPe 2008.**

Categorias de Impacto	Alvenaria de Blocos Cerâmicos	Alvenaria de Blocos de Concreto	Parede de Concreto Leve	<i>Steel framing</i> com drywall internas e placa cimentícia externa	<i>Steel framing</i> com placa cimentícia interna e externa
Ocupação de solo agrícola [m2a]	2,88E+00	3,21E+00	4,16E+00	1,64E+01	3,11E+01
Mudanças climáticas [kg CO2-Equiv.]	1,39E+02	5,28E+01	1,41E+02	1,50E+02	2,20E+02
Esgotamento de recursos fósseis [kg petróleo eq]	5,05E+01	1,02E+01	4,02E+01	3,55E+01	4,32E+01
Ecotoxicidade em água doce [kg 1,4-DB eq]	5,86E-02	4,26E-02	2,80E-01	4,15E-01	5,14E-01
Eutrofização em água doce [kg P eq]	4,31E-04	2,57E-04	2,17E-03	2,83E-03	3,44E-03
Toxicidade Humana [kg 1,4-DB eq]	1,24E+00	5,44E-01	4,97E+00	5,53E+00	8,54E+00
Radiação ionizante [kg U235 eq]	4,33E+06	2,45E+06	8,64E+06	1,27E+07	1,76E+07
Ecotoxicidade marinha [kg 1,4-DB eq]	7,38E-02	3,85E-02	2,72E-01	4,00E-01	4,96E-01
Eutrofização marinha [kg N-Equiv.]	1,51E-01	7,01E-02	1,32E-01	1,10E-01	1,33E-01
Esgotamento de metais [kg Fe eq]	3,34E+00	4,19E+00	6,59E+00	3,72E+01	4,07E+01
Transformação de solo natural [m2]	2,96E-02	1,16E-02	3,49E-02	2,61E-02	3,17E-02
Depleção de ozônio [kg CFC-11 eq]	1,59E-05	3,66E-06	1,25E-05	1,77E-05	2,75E-05
Formação de partículas [kg PM10 eq]	1,57E-01	8,77E-02	2,46E-01	1,77E-01	2,02E-01
Formação de oxidantes fotoquímicos [kg NMVOC]	4,10E-01	1,89E-01	3,89E-01	2,94E-01	3,65E-01
Acidificação terrestre [kg SO2 eq]	3,18E-01	1,46E-01	6,68E-01	3,50E-01	4,32E-01
Ecotoxicidade terrestre [kg 1,4-DB eq]	3,97E-03	1,31E-03	6,18E-03	1,52E-02	2,65E-02
Ocupação de solo urbano [m2a]	8,19E-01	1,36E+00	1,38E+00	1,75E+00	2,10E+00
Esgotamento de água [m3]	1,53E+02	1,16E+02	1,27E+03	7,16E+02	9,05E+02

A fim de se obter informações mais consistentes, a normalização e a agrupamento também foram aplicadas e os dados obtidos a partir desses procedimentos estão apresentados na Figura 23.



**Figura 23: Resultados de AICV normalizados e agregados.**

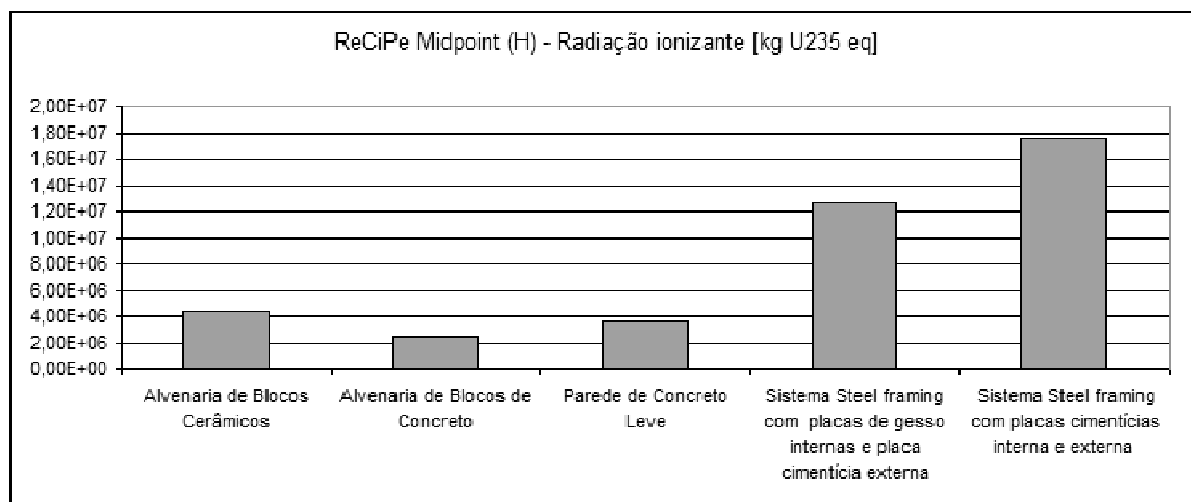
Na fase de normalização utilizou-se também o modelo ReCiPE, o qual normaliza os resultados em termos de emissões de um cidadão médio europeu com base no ano 2000 (PE - pessoa equivalente).

Os resultados normalizados e agregados (Figura 23) indicam que a alvenaria de blocos de concreto apresenta-se como a alternativa de melhor performance ambiental, seguida da alvenaria de blocos cerâmicos, paredes de concreto leve, sistema *steel framing* com placas de gesso internas e placa cimentícia externa e sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa.

No próximo passo desta avaliação todos os potenciais de impacto cobertos pela metodologia ReCiPe 2008 serão analisados individualmente de forma a se entender quais processos, e possivelmente quais entradas e saídas de tais processos, no ciclo de vida das alternativas, apresentam as maiores contribuições para tais resultados da AICV, e assim, identificar os *hotspots* do estudo.

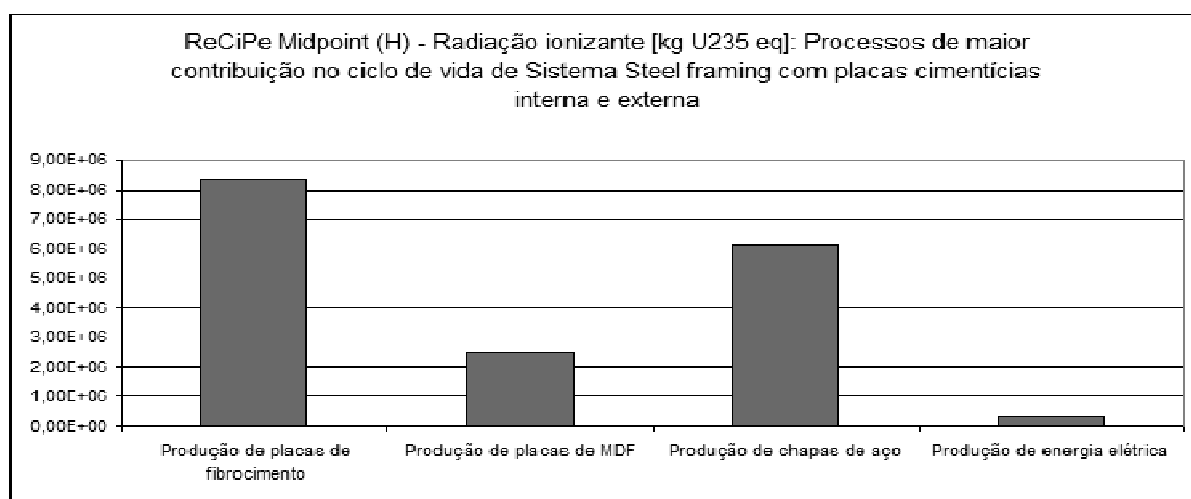
A primeira categoria a ser analisada é Radiação Ionizante, a qual apresentou a maior contribuição para impacto potencial advindo do ciclo de vida das alternativas de *steel framing*, conforme apresentado na Figura 24.





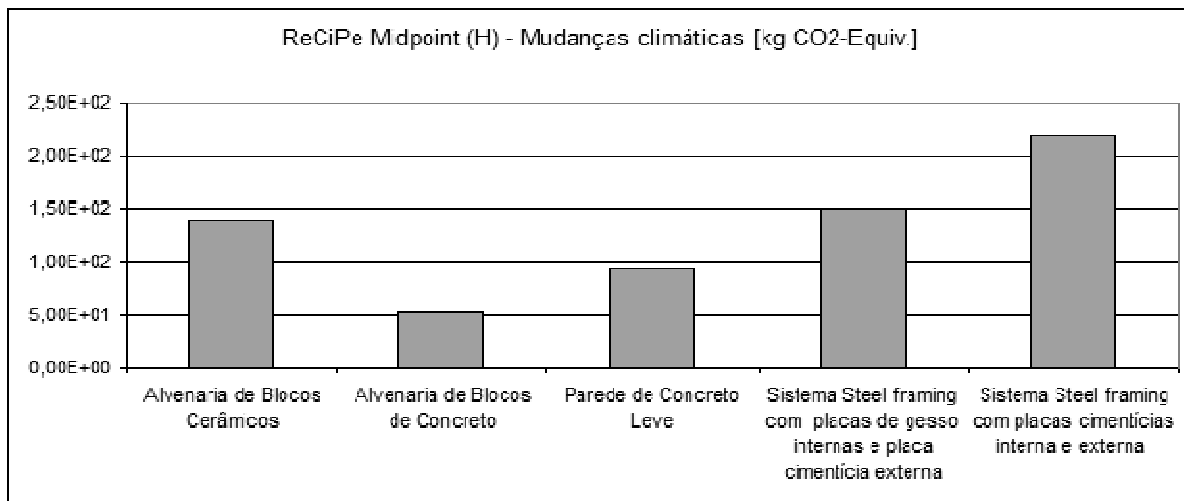
**Figure 24: Impactos potenciais das alternativas para Radiação Ionizante pela metodologia ReCiPe.**

Aprofundando-se nas contribuições de cada processo no ciclo de vida da opção de Sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa (Figura 25) é possível perceber que as maiores emissões estão concentradas no processo de produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF, o que explica também as grandes contribuições da outra opção de sistema *steel framing*, que também usa placa sanduíche de fibrocimento e MDF, no entanto, apenas na face externa da vedação.



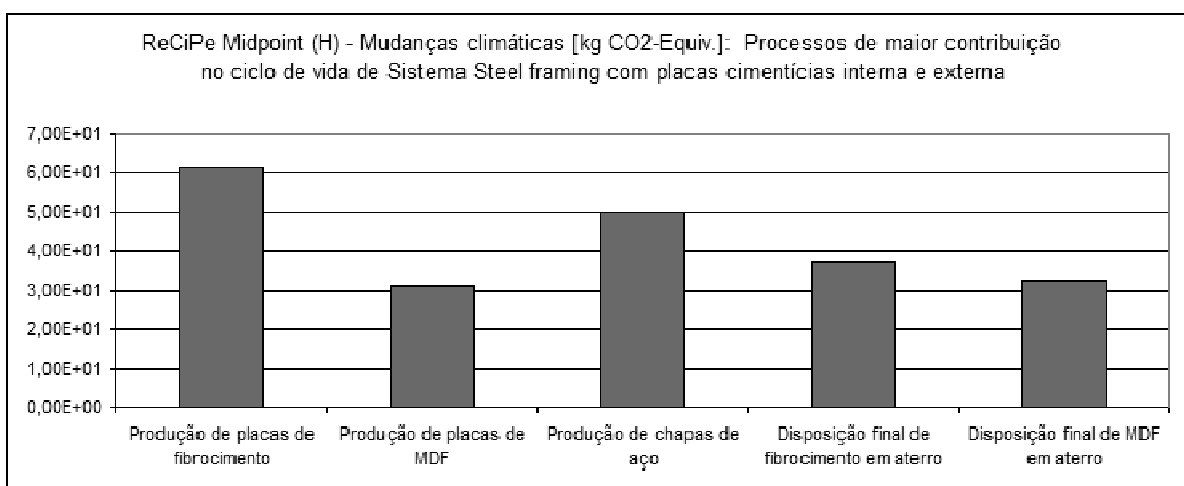
**Figura 25: Processos de maior contribuição para Radiação Ionizante no ciclo de vida do Sistema Steel Framing com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

A categoria Mudanças Climáticas apresentou também uma grande contribuição para o potencial de impacto ambiental no ciclo de vida dessa mesma alternativa de vedação com placa interna e externa sanduíche de fibrocimento e MDF, conforme ilustrado na Figura 26.



**Figure 26: Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas pela metodologia ReCiPe 2008.**

Da mesma forma que a categoria de impacto anterior, a análise dos processos no ciclo de vida da alternativa mais impactante (Figura 27) mostram que, mais uma vez, a produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF é o processo potencialmente mais impactante, acompanhado da produção de aço, que apresenta, porém, um potencial de impacto menor.

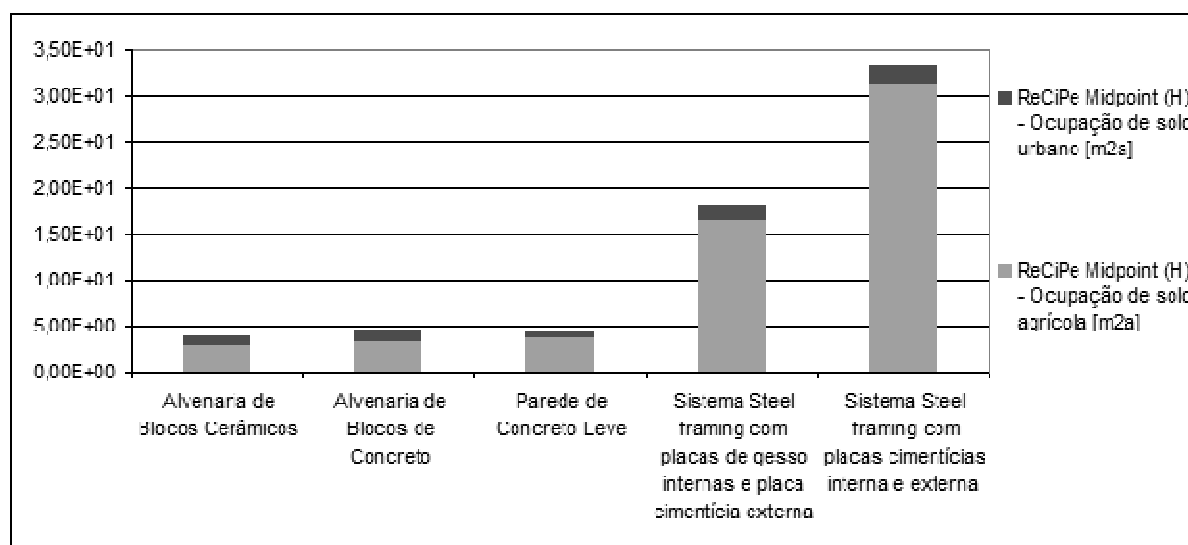


**Figure 27: Processos de maior contribuição para Mudanças Climáticas no ciclo de vida do Sistema Steel Framing com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

É importante notar, neste ponto, algumas incertezas da modelagem em relação às emissões provenientes do processo de produção de aço.

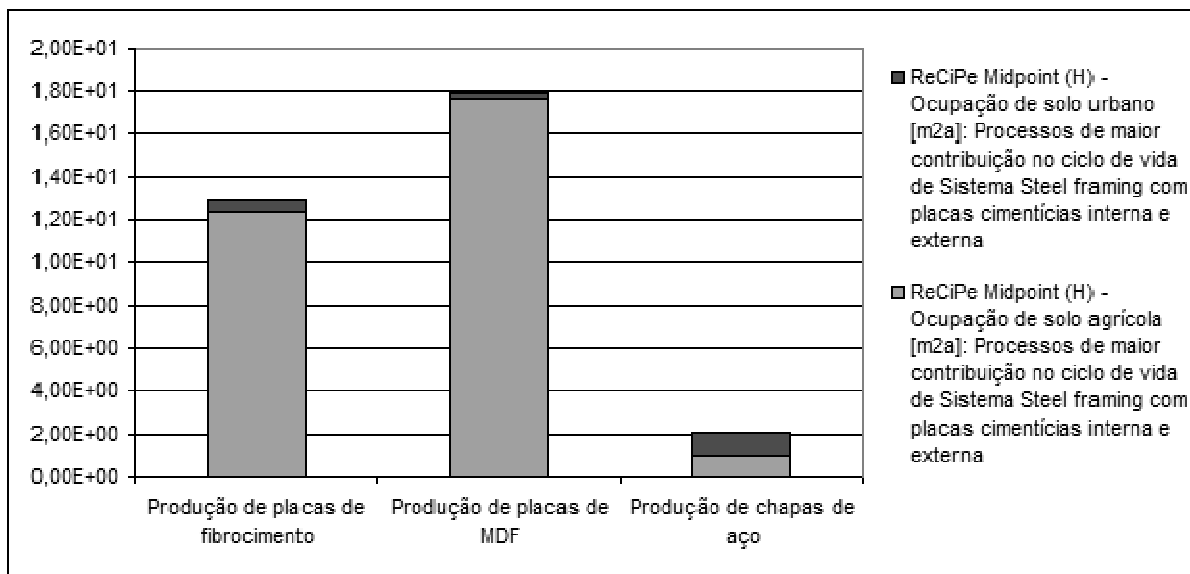
Na modelagem de inventário, a percentagem média de reciclagem de aço foi definida como 24%, de acordo com estatísticas de órgãos brasileiros, as quais, apesar de estarem próximas às médias mundiais, são, por exemplo, menores do que as estatísticas para a Europa. Assim, em um contexto tecnológico diferente, a previsão dos impactos potenciais desse processo pode variar, de acordo com as percentagens médias de reciclagem do aço.

As categorias de impacto Ocupação de Solo Agrícola e Ocupação de Solo Urbano demonstraram uma maior contribuição do potencial de impacto ambiental vindo do ciclo de vida do sistema *steel framing* com painéis interno e externo sanduíche de fibrocimento e MDF, conforme apresentado na Figura 28.



**Figura 28: Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo agrícola e urbano pela metodologia ReCiPe 2008.**

Observando-se os processos no ciclo de vida da alternativa potencialmente mais impactante, os processos da maior contribuição foram selecionados para discussão, conforme mostra a Figura 29.



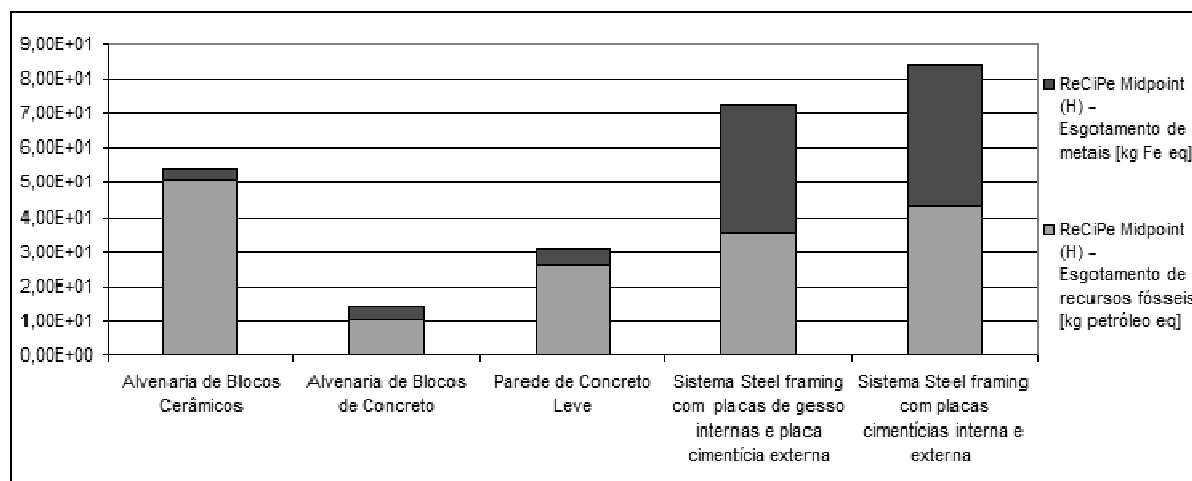
**Figura 29: Processos de maior contribuição para Ocupação do Solo Agrícola e Urbano no ciclo de vida do Sistema *Steel Framing* com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

Em primeiro lugar, pode-se observar que os impactos de ocupação do solo agrícola demonstram ser significativamente maiores do que os potenciais de impacto por ocupação do solo urbano. O gráfico na Figura 29 mostra ainda que os processos mais impactantes relacionados à Ocupação do Solo Agrícola são, mais uma vez, aqueles relacionados à produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF, assim como também o processo de produção de placas de MDF, sendo que este último apresenta uma contribuição consideravelmente maior. Um olhar mais aprofundado sobre o processo de produção do MDF aponta para as áreas de plantação de árvores, necessárias para extração de madeira. No caso da produção de fibrocimento, o maior potencial de impacto se encontra nas adições de argila ao cimento, cuja extração é a principal responsável por esse tipo de potencial de impacto no solo agrícola.

Por outro lado os resultados relacionados à Ocupação do Solo Urbano apontam para a produção de aço como maior contribuinte para o impacto, possivelmente devido à escala espacial necessária para a implantação de usinas siderúrgicas e plantas de manufatura de produtos em aço.

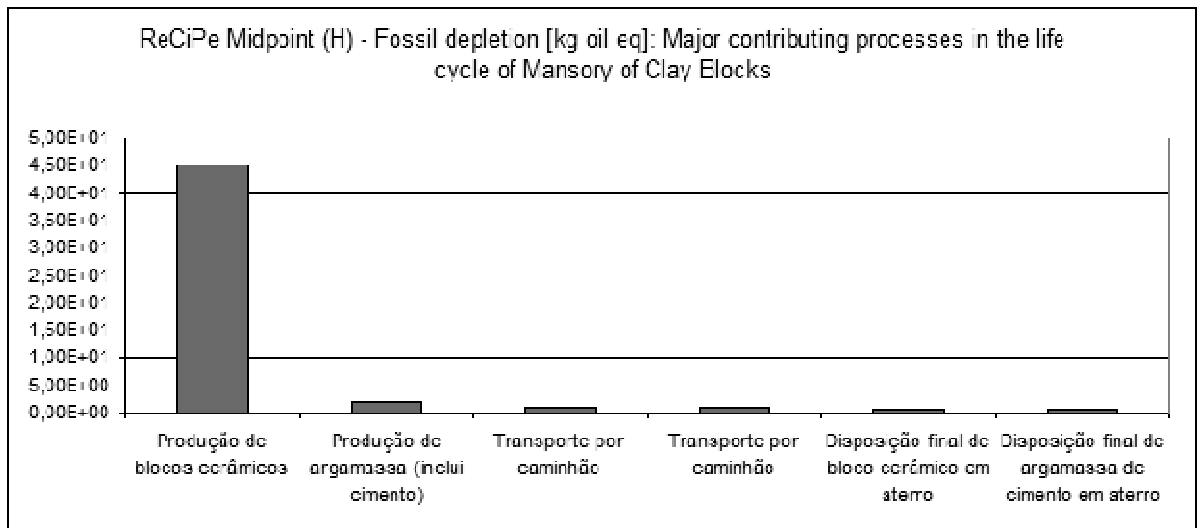
A categoria Transformação de Terra Natural apresenta resultados menos proeminentes na avaliação de impacto, no entanto, é importante ressaltar que tais impactos estão também concentrados no processo de produção do aço, presente no ciclo de vida das opções em sistema *steel framing*.

Os resultados para a categoria Esgotamento de Recursos Fósseis estão apresentados em conjunto com a categoria Esgotamento de Metais, na Figura 30. Observando o gráfico, a despeito do fato de as alternativas em sistema *steel framing* também apresentarem considerável potencial de impacto para Esgotamento de Recursos Fósseis, é possível notar a contribuição mais significativa do ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos. Por outro lado, os resultados para a categoria Esgotamento de Metais demonstraram um potencial de impacto significativamente maior no ciclo de vida das alternativas em sistema *steel framing*.



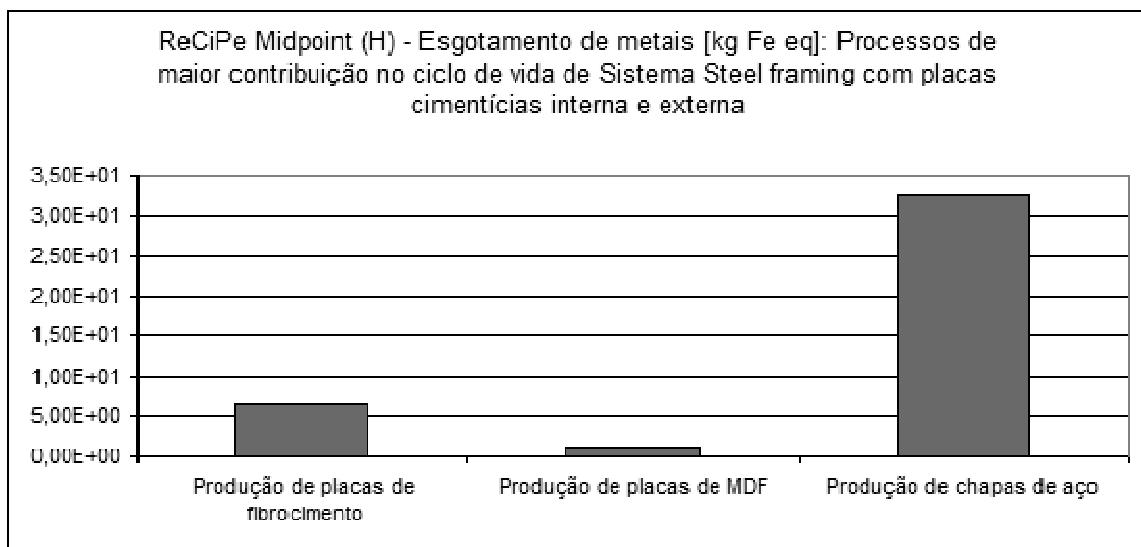
**Figura 30: Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Recursos Fósseis e Metais pela metodologia ReCiPe 2008.**

Analisando-se os impactos potenciais para Esgotamento de Recursos Fósseis individualmente para os processos no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos é possível afirmar que tais emissões estão concentradas no processo de produção dos blocos (Figura 31). Em tal processo, os blocos cerâmicos são queimados em um forno, cujo alto consumo de gás natural é responsável pelo grande consumo de combustíveis fósseis, e assim, pela maior contribuição da alvenaria de blocos cerâmicos para tal categoria de impacto.



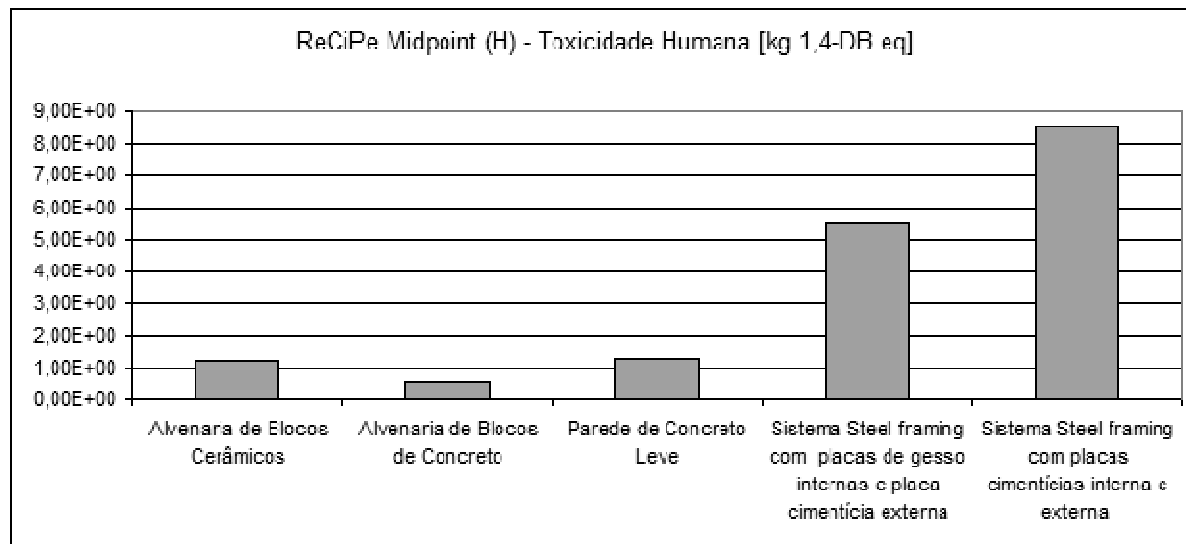
**Figure 31: Processos de maior contribuição para Esgotamento de Recursos Fósseis no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008.**

A respeito do Esgotamento de Metais, a observação dos processos no ciclo de vida do sistema *steel framing* com painéis interno e externo sanduíche de fibrocimento e MDF, conforme apresentado na Figura 32, revela que a contribuição mais notória é a do processo de produção de aço. Aqui, mais uma vez, é importante ressaltar que tal potencial de impacto poderia ser mitigado pelo aumento da porcentagem de reciclagem deste material, diminuindo assim a demanda por extração de tal matéria-prima.



**Figura 32: Processos de maior contribuição para Esgotamento de Metais no ciclo de vida Sistema Steel Framing com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

A avaliação de impacto para a categoria Toxicidade Humana demonstra uma contribuição substancialmente maior no ciclo de vida do Sistema *Steel Framing* com placas cimentícias interna e externa, conforme apresentado na Figura 33.

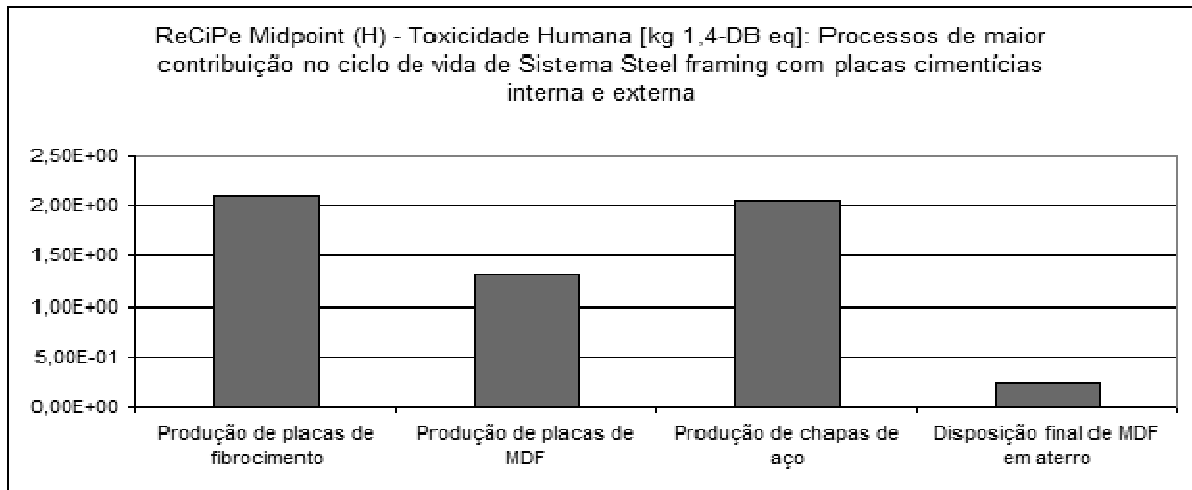


**Figura 33: Impactos potenciais das alternativas para Toxicidade Humana pela metodologia ReCiPe 2008.**

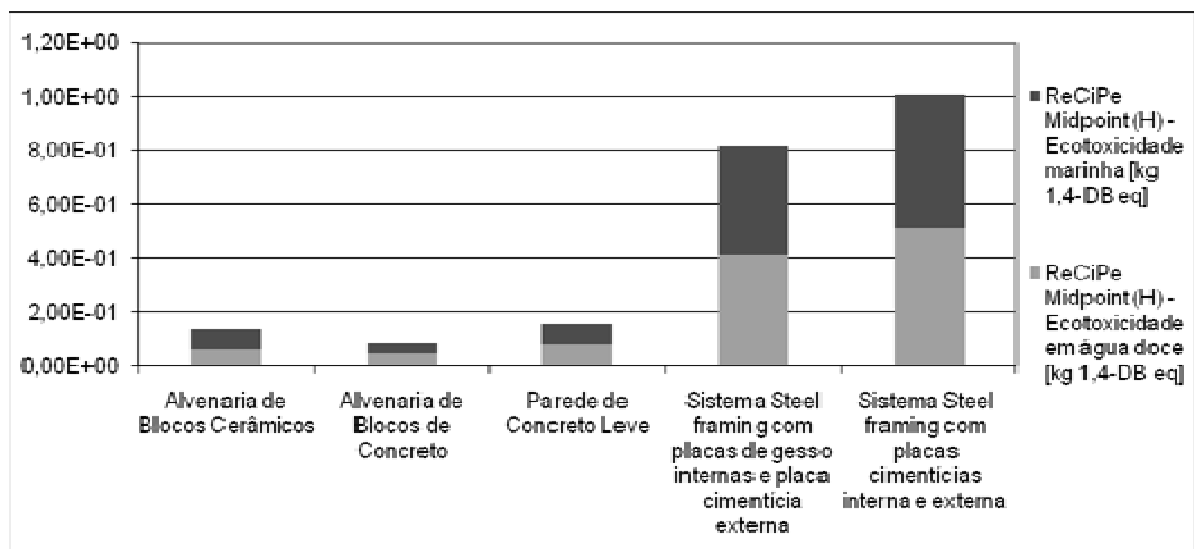
A análise dos impactos individuais por processo dentro do ciclo de vida de tal sistema construtivo (Figura 34) demonstra que os impactos estão relativamente divididos em dois processos principais: produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF e produção de aço.

Conforme salientado anteriormente neste trabalho, os resultados relacionados à produção de aço estão diretamente ligados à porcentagem de reciclagem assumida para este estudo, podendo ser mitigados pelo aumento da porcentagem média de reciclagem do material. Por essa razão, os impactos mais preocupantes, neste caso, são aqueles relacionados à produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF, os quais não são normalmente reutilizados ou reciclados, e são mais frequentemente descartados em aterros.

Os potenciais de impacto para Ecotoxicidade Marinha e Ecotoxicidade em Água Doce, são apresentados na Figura 35.



**Figura 34: Processos de maior contribuição para Toxicidade Humana no ciclo de vida do Sistema Steel Framing com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**



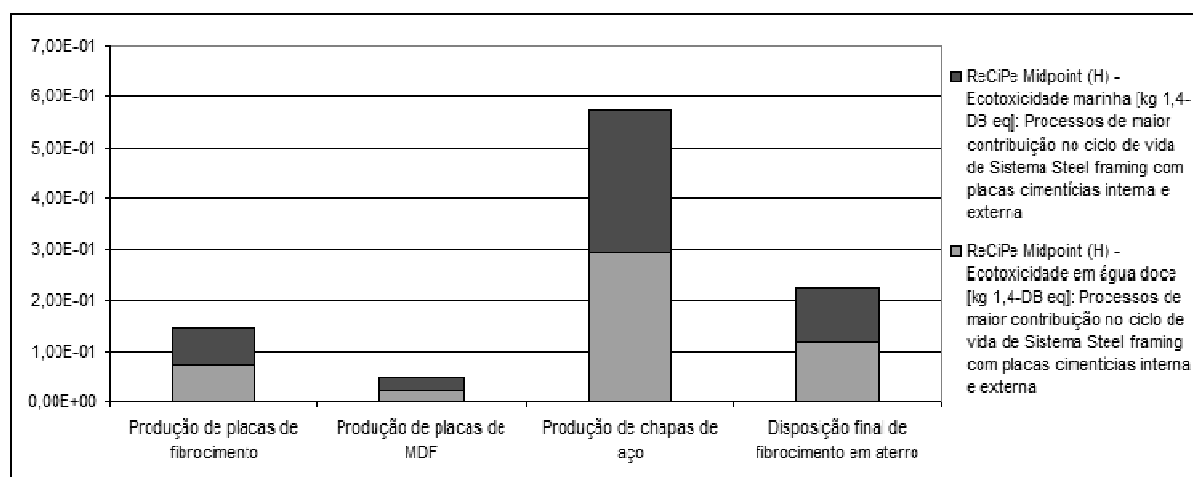
**Figure 35: Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Marinha e de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.**

Como mostra a Figura 35, os impactos para Ecotoxicidade Marinha e em Água Doce se destacam no gráfico, apontando para contribuições mais significativas no ciclo de vida do sistema *steel framing* com painéis interno e externo sanduíche de fibrocimento e MDF.

A Figura 36 apresenta a distribuição desses potenciais de impacto nos processos do ciclo de vida da alternativa de maior contribuição, levando à conclusão de que, mais uma vez, os processos

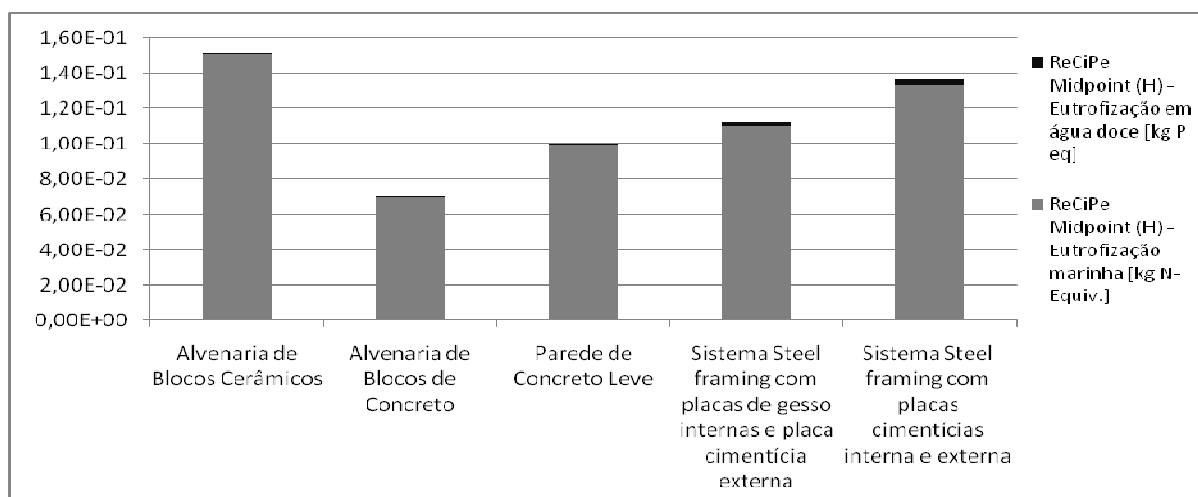


de produção do aço e de manufatura de seus produtos apresentam-se como os mais potencialmente impactantes.



**Figure 36: Processos de maior contribuição para Ecotoxicidade Marinha e em Água Doce no ciclo de vida Sistema *Steel Framing* com placas cimentícias interna e externa pela metodologia ReCiPe 2008.**

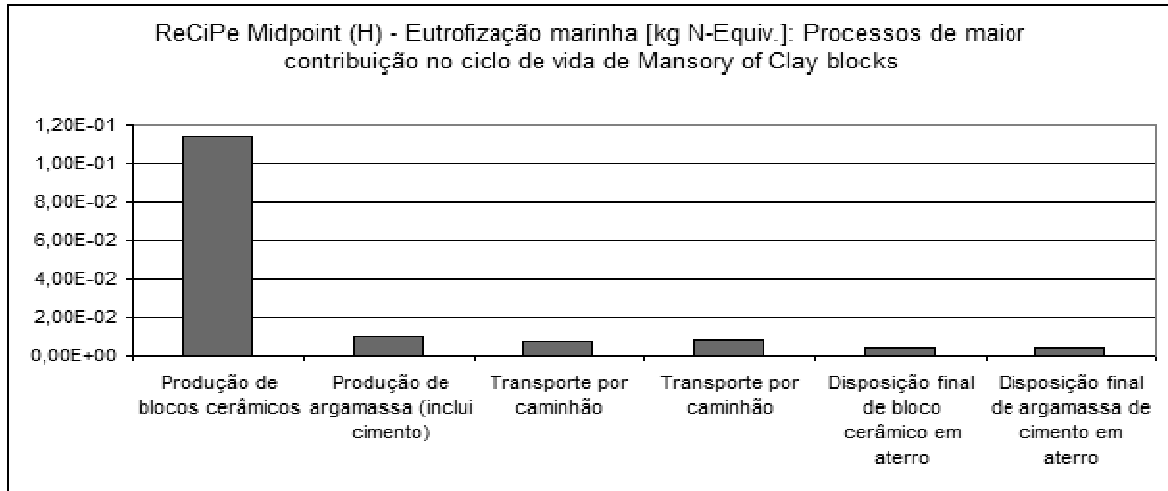
Quanto à Eutrofização marinha e em água doce, os maiores potenciais de impacto estão locados em diferentes alternativas (Figura 37).



**Figure 37: Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização Marinha e de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.**

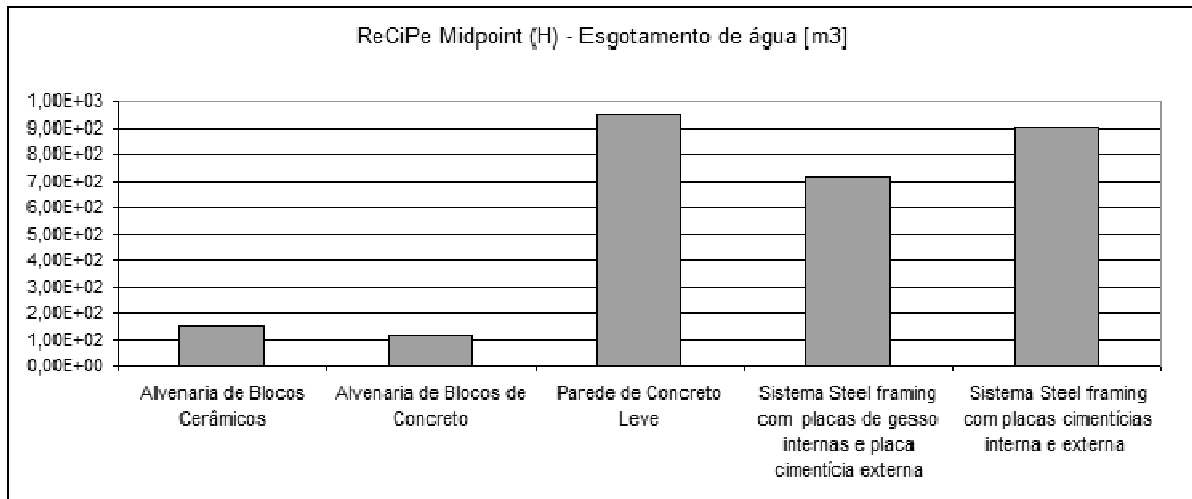
Para Eutrofização em Água Doce, os maiores impactos foram identificados, mais uma vez, no ciclo de vida do sistema *steel framing* com painéis sanduíche de fibrocimento e MDF interno e

externo. Diferentemente, para Eutrofização Marinha, a alternativa mais impactante demonstrou ser a alvenaria de blocos cerâmicos. A Figura 38 mostra que tais impactos estão mais concentrados, de novo, no processo de produção dos blocos.



**Figure 38: Processos de maior contribuição para Eutrofização Marinha no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008.**

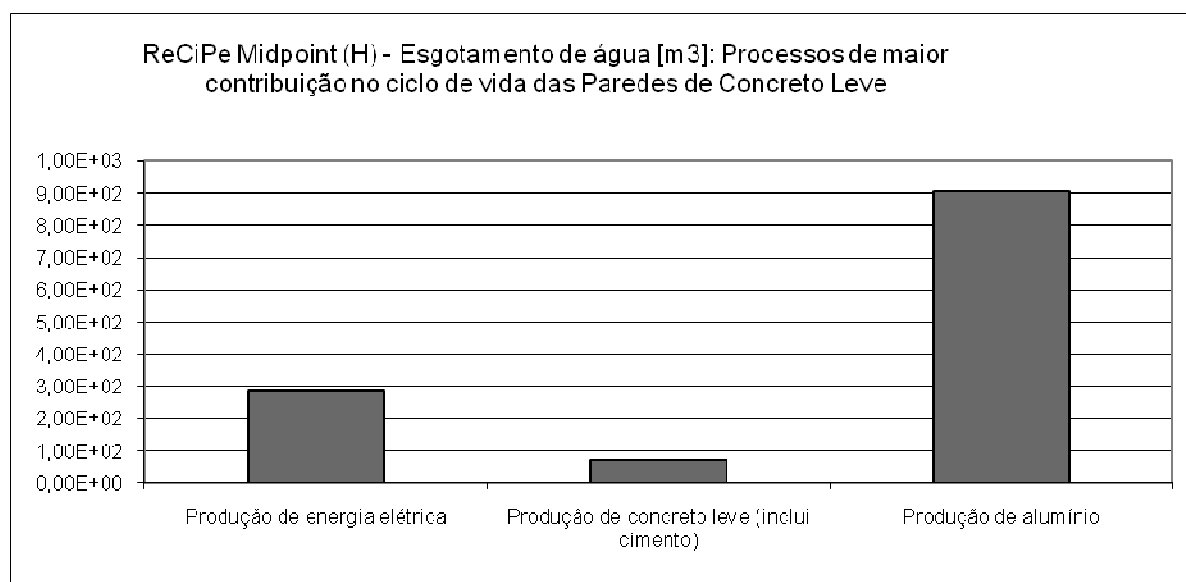
Ainda a respeito de impactos relacionados à água, os resultados para a categoria de impacto Esgotamento de Água estão apresentados na Figura 39.



**Figura 39: Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Água pela metodologia ReCiPe 2008.**

Nesta categoria, a alternativa mais impactante foi a Parede de Concreto Leve, no entanto, vale a pena ressaltar que as alternativas em sistema *steel framing*, mais uma vez também apresentaram contribuições consideráveis para o esgotamento de tal recurso.

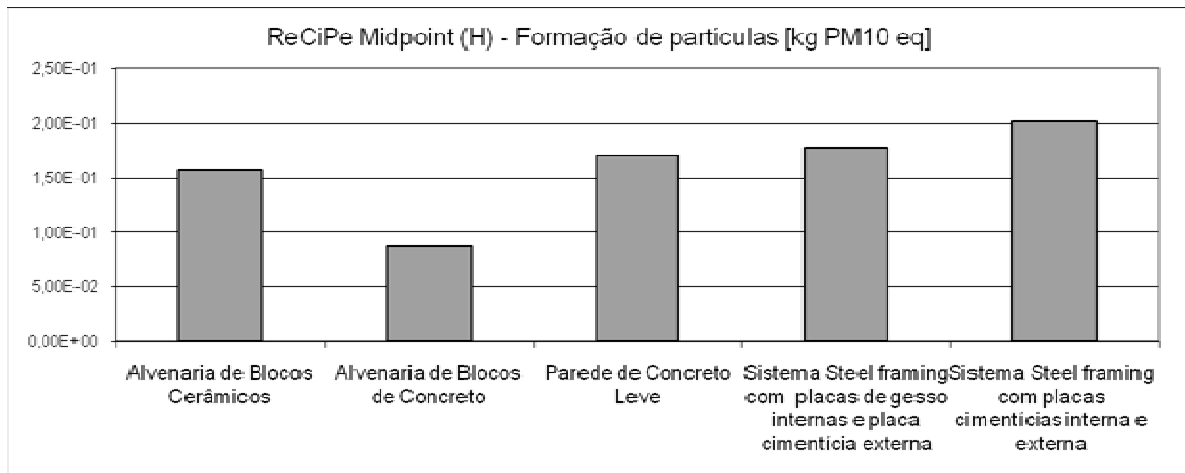
A determinação da localização de tais impactos pode ser observada na Figura 40, que mostra a grande concentração de potencial de impacto no processo de produção do alumínio, utilizados para confecção das formas para moldagem de tais paredes. Aqui, da mesma forma como levantado para o caso dos impactos advindos da produção de aço, as suposições quanto à média nacional de reciclagem deste material também pode interferir nos resultados finais do processo, assim como o número de reutilizações por forma, antes dessa alcançar seu fim de vida e ser então levada para reciclagem ou disposição final.



**Figure 40: Processos de maior contribuição para Esgotamento de Água no ciclo de vida das paredes de concreto leve pela metodologia Recipe 2008.**

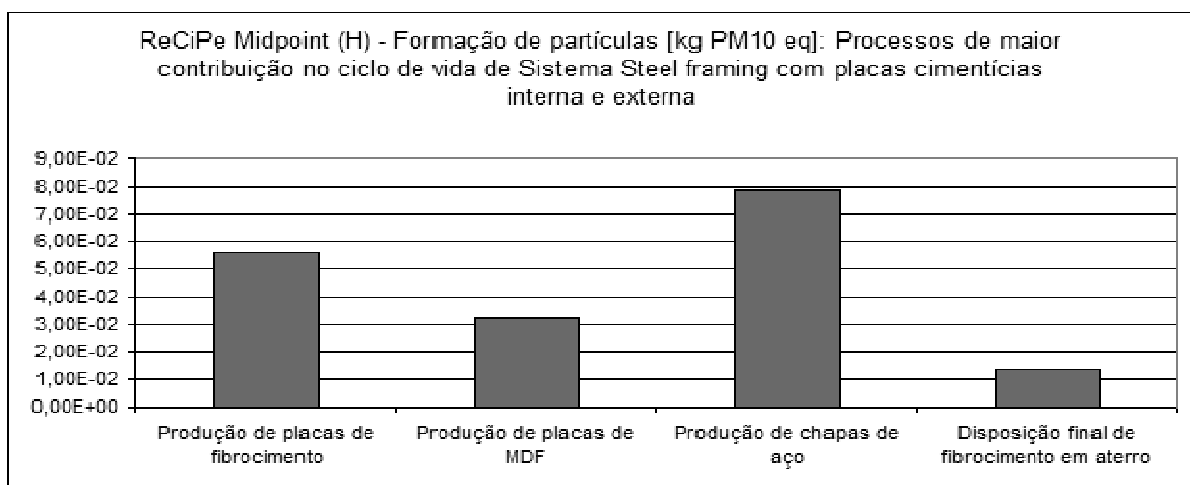
Além disso, os resultados apresentados levam à conclusão que, também nas alternativas em sistema *steel framing*, a maior parte dos impactos possa ser alocada para o processo de produção do aço.

A Figura 41 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Formação de Partículas.



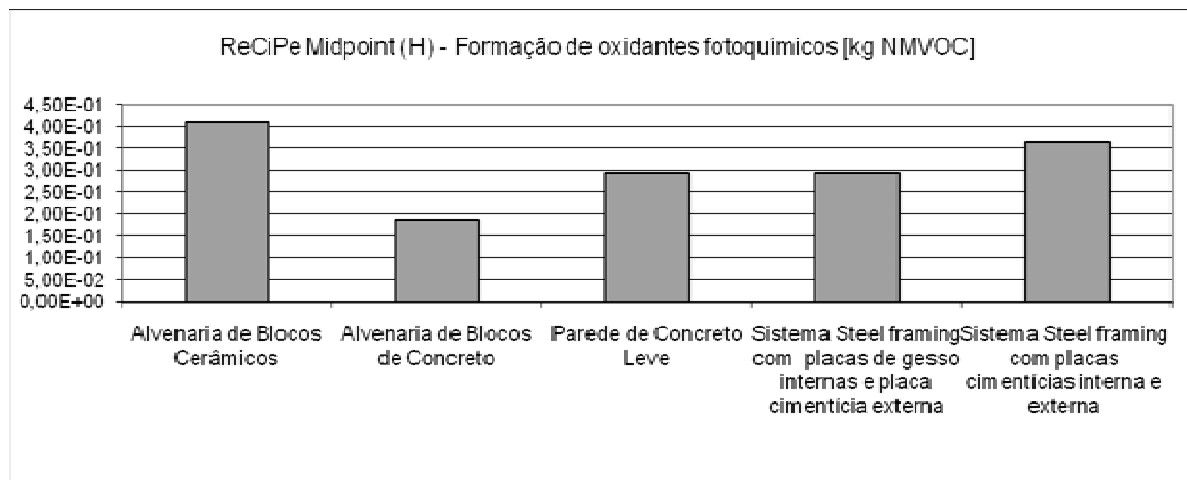
**Figura 41: Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.**

Com exceção da alvenaria de blocos de concreto, a qual apresenta contribuições menores para Formação de Partículas, todas as outras tipologias apresentaram resultados similares para tal categoria de impacto, na qual mais uma vez, a maior contribuição foi encontrada nas alternativas em sistema *steel framing*, especialmente aquela que se utiliza de painéis sanduíche de fibrocimento e MDF em suas faces interna e externa. No ciclo de vida dessa alternativa, cujos impactos estão apresentados na Figura 42, a despeito do fato de as maiores contribuições estarem alocadas no processo de produção do aço, é importante observar que o processo de produção de fibrocimento tem papel também proeminente, apresentando contribuições significativas.



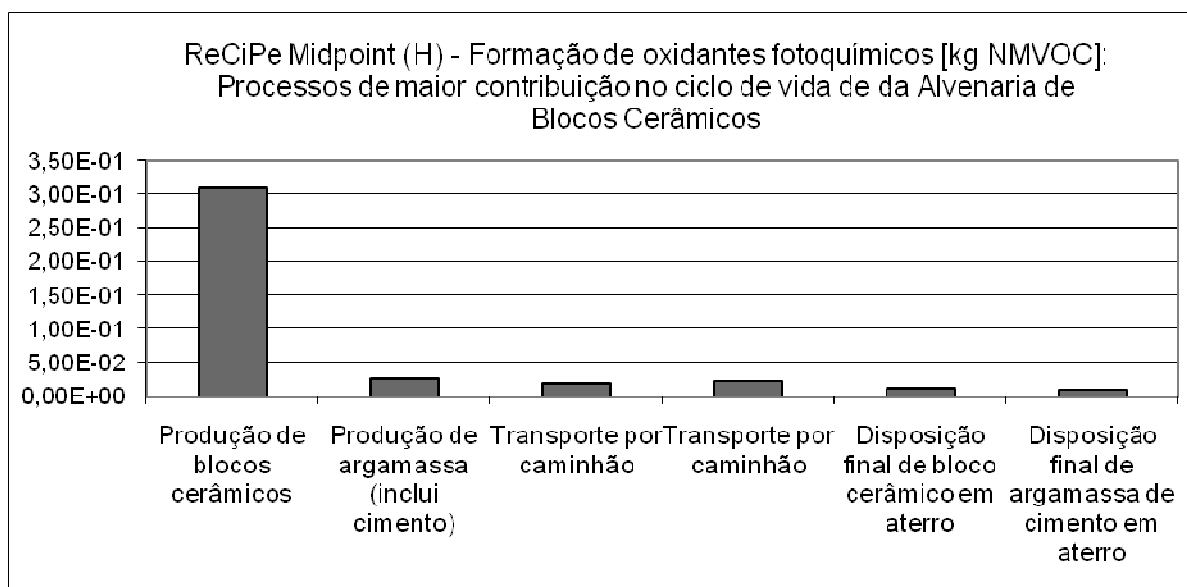
**Figure 42: Processos de maior contribuição para Formação de Partículas no ciclo de vida do sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

A Figura 43 apresenta os resultados da AICV para a categoria de impacto Formação de Oxidantes Fotoquímicos.



**Figura 43: Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.**

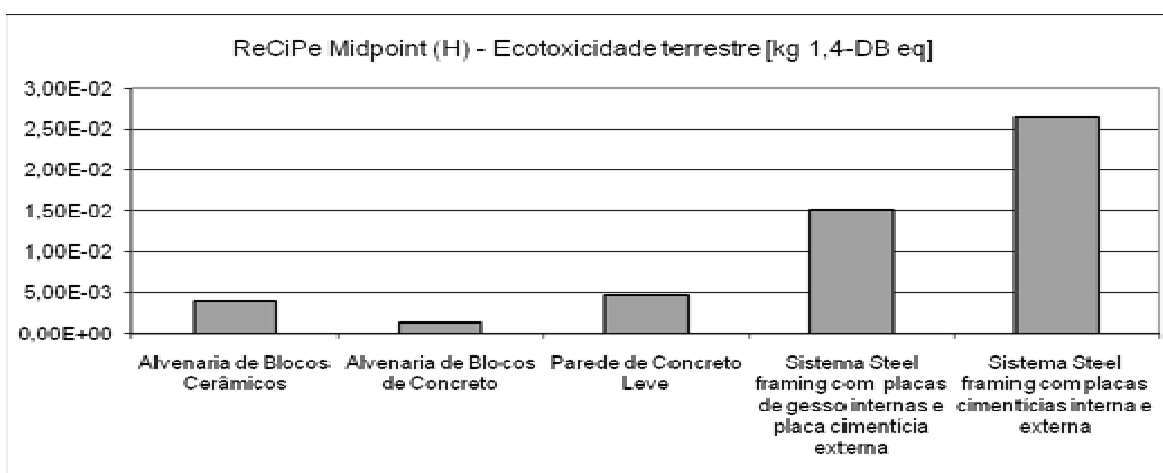
Para tal categoria, a alvenaria de blocos cerâmicos é responsável pelo potencial de impacto mais alto, o qual está quase totalmente concentrado no processo de produção dos blocos, como demonstrado na Figura 44.



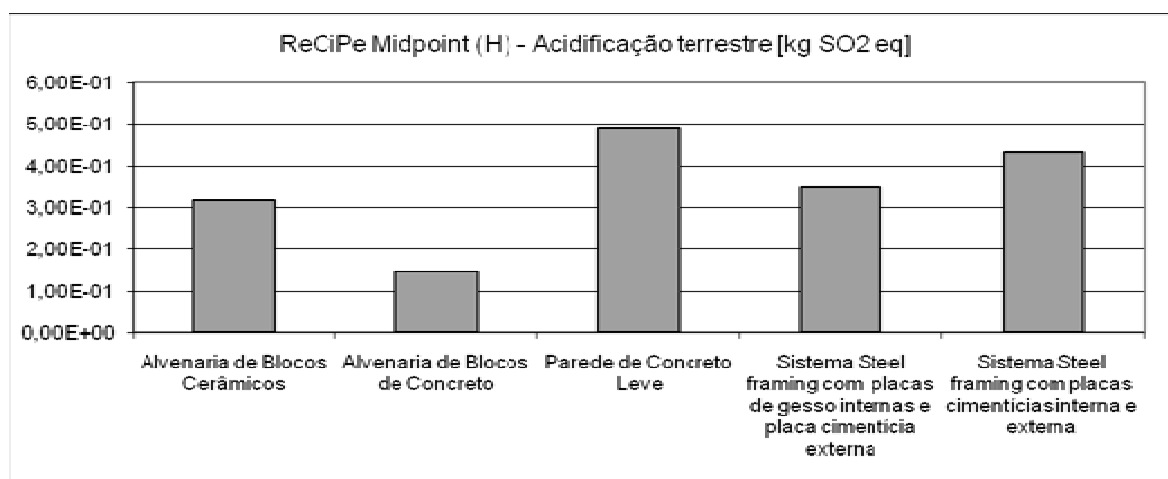
**Figura 44: Processos de maior contribuição para Formação de Oxidantes Fotoquímicos no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos pela metodologia Recipe 2008.**

Neste trabalho, as emissões de substâncias relacionadas à Depleção da Camada de Ozônio demonstraram ter uma significância muito pequena nos resultados da AICV, estando principalmente relacionadas à produção de painéis sanduíche de fibrocimento e MDF, mas apresentando magnitudes de impacto de, no máximo, E-05.

Finalmente, as últimas categorias analisadas pela metodologia ReCiPe são aquelas relacionadas a impactos de Ecotoxicidade e Acidificação Terrestres, cujos resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 45 e 46.



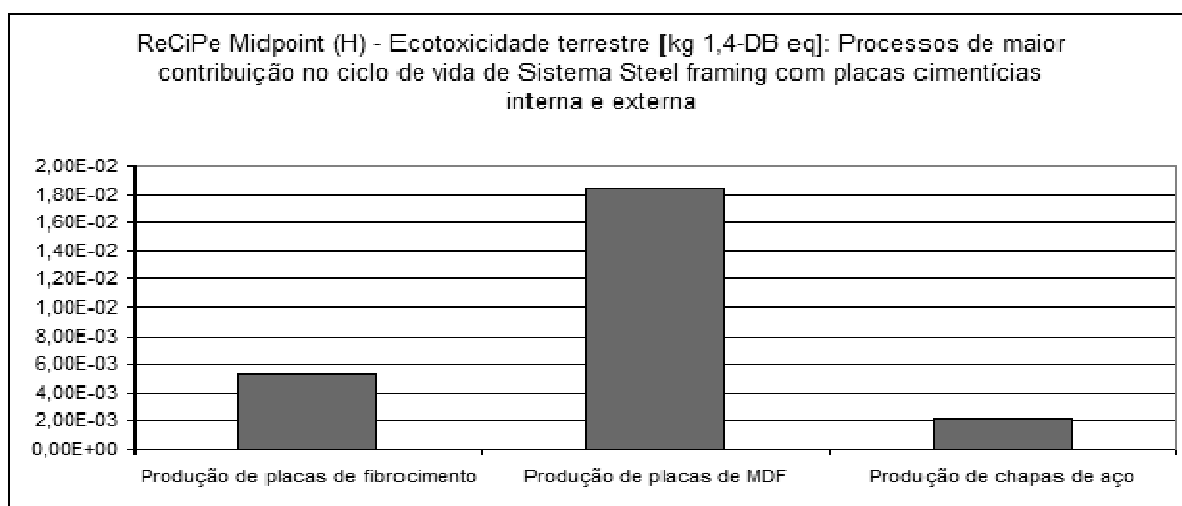
**Figura 45: Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.**



**Figura 46: Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.**

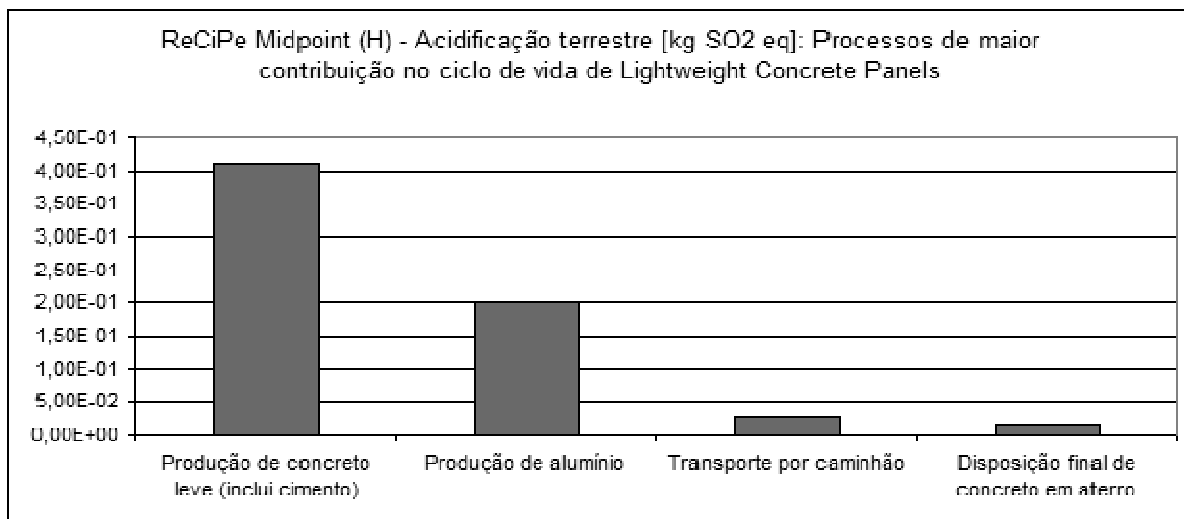
Os resultados apontam para uma maior proeminência de magnitude dos impactos em Acidificação Terrestre do que em Ecotoxicidade Terrestre. Outra informação importante que pode ser extraída de tais resultados é que a alternativa de parede de concreto leve é responsável pelos impactos mais significativos para Acidificação Terrestre, enquanto a alternativa em sistema *steel framing* com painéis interno e externo sanduíche de fibrocimento e MDF apresenta as principais emissões contribuintes para Ecotoxicidade Terrestres.

Observando a distribuição dos impactos relacionados à Ecotoxicidade Terrestre nos processos no ciclo de vida da alternativa em *steel framing*, é possível afirmar que a produção de placas de MDF apresenta a maior contribuição para tal potencial de impacto, conforme ilustrado na Figura 47.



**Figura 47: Processos de maior contribuição Ecotoxicidade Terrestre no ciclo de vida do sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa pela metodologia Recipe 2008.**

Em relação aos impactos em Acidificação Terrestre, no ciclo de vida das paredes de concreto leve, a Figura 48 mostra que esses estão concentrados no processo de produção do concreto leve, provavelmente, devido à grande quantidade de cimento Portland utilizada para a confecção de concreto para construção de tais paredes.



**Figura 48: Processos de maior contribuição Acidificação Terrestre no ciclo de vida das paredes de concreto leve pela metodologia Recipe 2008.**

#### 6.4. Interpretação do ciclo de vida

##### 6.4.1. Identificação das questões significativas

Os resultados *midpoint* normalizados e agregados (Figura 23) indicam que a alvenaria de blocos de concreto teve o melhor desempenho dentre as alternativas, seguida pela alvenaria de blocos cerâmicos, paredes de concreto leve, sistema *steel framing* com placas de gesso internas e placa cimentícia externa, e sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa. Por outro lado, os resultados *endpoint* (Figura 22) sugerem um perfil diferente, com a alvenaria de blocos cerâmicos aparecendo como a pior alternativa do ponto de vista ambiental, enquanto as demais tipologias de vedação mantêm a mesma classificação. É possível que tal resultado *endpoint* seja reflexo do alto consumo de recursos não renováveis pela alvenaria de blocos cerâmicos, especialmente de gás natural, o qual é utilizado no processo de queima dos blocos cerâmicos.

Em relação à avaliação de impacto no nível *midpoint*, foi realizada uma análise mais aprofundada dos processos inerentes ao ciclo de vida da alternativa de vedação de maior impacto para cada categoria, de forma a melhor se entender as principais contribuições para cada potencial de impacto.



Tal análise da contribuição de processos para a categoria Ocupação do Solo Agrícola para o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa mostrou que o impacto relacionado à produção de fibrocimento – cujo processo conta com a adição de argila no cimento e, portanto, mineração para extração de argila – é o principal responsável pela magnitude do impacto de tal categoria. Em relação à produção das placas de MDF, a qual contribuiu consideravelmente para essa categoria, uma análise mais profunda do processo de produção apontou diretamente para os processos florestais de plantio e cultivo, necessários para a produção de madeira.

A análise da categoria Ocupação de Solo Urbano revelou que a fabricação de aço – e manufatura de componentes em aço – é a principal contribuinte para a magnitude dos impactos, devido à localização de aciarias e indústrias de componentes em aço na zona urbana.

A categoria Transformação de Solo Natural, também apontou o processo de produção de aço, devido às intensas atividades de mineração decorrentes da extração de minérios para tal processo produtivo.

As principais contribuições de impacto para a categoria Depleção de Recursos Fósseis no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos estão concentradas no processo de produção do bloco, e podem ser explicadas pelo consumo de gás natural no processo de queima. É importante notar que o processo de queima dos blocos é o principal responsável pelo baixo desempenho ambiental desse sistema construtivo, em uma quantidade considerável de categorias de impacto.

Nas categorias de impacto Toxicidade Humana e Depleção de metais, mais uma vez, o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa aparece como a alternativa de pior desempenho ambiental. Tais impactos, para ambas as categorias em questão poderiam, entretanto, ser mitigados pelo aumento das taxas de reciclagem de aço, o que tem sido dificultado pela tecnologia de galvanização atualmente utilizada, cuja separação de materiais no fim de vida requer processos especializados e de alto custo. Sendo assim, para o caso da categoria Toxicidade Humana, os impactos advindos da produção de placas sanduíche de fibrocimento são ainda mais preocupantes, uma vez que tais painéis não contam com a possibilidade de reciclagem devido à

problemática da separação de diferentes materiais, e são inteiramente depositados em aterros no fim de vida do edifício.

Na presente pesquisa, as emissões de substâncias relacionadas aos impactos de Depleção da Camada de Ozônio demonstraram uma significância bastante pequena nos resultados da AICV, estando principalmente relacionados à produção de fibrocimento, no entanto, com baixa magnitude de impacto.

O processo de produção de concreto leve apenas se destaca por sua contribuição nos impactos referentes à categoria Acidificação Terrestre, devendo-se principalmente à grande quantidade, em massa, de materiais utilizados nesta tipologia e, portanto, à grande massa de entulho depositado em aterro proveniente de tal sistema construtivo.

#### 6.4.2. Avaliação do estudo

O presente estudo será avaliado de acordo com a norma NBR 14040 (2008) pela verificação de sua completeza, sensibilidade e consistência.

Conforme demonstrado na identificação das questões significativas do estudo, os dados obtidos, assim como os critérios de corte estabelecidos, visam à construção de um inventário o mais completo quanto possível dos sistemas analisados, utilizando-se de fontes de dados secundárias internacionalmente reconhecidas para todos os processos elementares, assim como pela aplicação de critérios de corte exigentes (0,1% para critério de corte baseado em massa, para entradas, e considerando toda e qualquer emissão contribuinte para as categorias de impacto da metodologia ReCiPe, independentemente de sua magnitude). É importante reafirmar aqui que todos os dados requeridos para coleta, assim como critérios de corte estabelecidos no Objetivo e Escopo deste estudo foram obedecidos.

Em relação à Análise de Sensibilidade, uma vez que os dados utilizados foram secundários, coletados de fontes confiáveis e provenientes de médias pré-calculadas, estes podem ser considerados pouco suscetíveis a amplas variações. A maior possibilidade contribuição para

possíveis desvios nos resultados está no fato de que, tanto as fontes de dados quanto a metodologia de AICV são baseadas majoritariamente no contexto europeu, o que pode consistir num desvio significativo em relação a dados hipotéticos correspondentes aos mesmos processos e potenciais de impacto no contexto brasileiro.

Finalmente, quanto à análise de consistência, todos os pressupostos de comparabilidade entre os sistemas podem ser considerados consistentes com o objetivo e escopo do estudo, uma vez que se baseiam na normatização brasileira correspondente, assim como em trabalhos científicos direcionados também ao contexto brasileiro. Para tanto, será desenvolvido trabalho futuro de coleta de dados primários para todos os processos aqui reconhecidos como de grande contribuição para impactos ambientais, de forma a minimizar tais possibilidades de inconsistência e, até mesmo, desenvolver-se uma discussão comparativa em relação aos resultados do presente estudo.

Não foi necessária a utilização de alocação de fluxos de inventário, uma vez que foram utilizados dados de fontes secundárias, inventariados para os produtos analisados, em processos monofuncionais.

Devido à lacuna de dados nacionais, incertezas são provenientes das suposições realizadas, necessárias para que o estudo pudesse ser conduzido. De forma a conferir transparência ao estudo, as suposições consideradas de mais importância e sensibilidade nos resultados serão discutidas abaixo.

É importante salientar que todos os dados de inventários aplicados neste estudo de ACV tem como fonte a base de dados Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005), a qual é majoritariamente composta por médias provenientes de dados de produção de países europeus.

O mix de energia utilizado foi o *grid* médio brasileiro, entretanto, baseado em dados de inventário de produção europeia, para cada tipo de energia específico.

Incetezas relacionadas à modelagem das emissões do processo de produção do aço também foram consideradas. No inventário, a porcentagem de reciclagem de aço foi estabelecida

como 24%, de acordo com a média brasileira (SEBRAE, 2012), a qual, apesar de ser muito próxima da média mundial, está bem ainda da média europeia. Mais do que isso, está bem acima da realidade de reciclagem do aço galvanizado no país, cujos números são ainda muito discretos. Sendo assim, a quantificação de impactos relacionados ao processo de produção do aço pode variar bastante de acordo com as taxas de reciclagem utilizadas.

As taxas de reciclagem de aço e alumínio utilizadas neste trabalho foram baseadas na literatura sobre taxas médias de reciclagem de metais relevantes no Brasil (ABAL, 2011; SEBRAE, 2012). A variação de tais taxas tem fortes consequências na classificação das alternativas de vedação em categorias de impacto como Depleção de Metais, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade, Depleção de Água e Formação de Matéria Particulada. Assim, para tais categorias de impacto, os resultados devem ser avaliados cuidadosamente, levando-se possíveis variações.

Para desenvolver o presente estudo de ACV, assegurou-se que todas as alternativas comparadas possuísem desempenhos térmicos próximos, de forma a evitar condições muito desiguais de comparação, como por exemplo, diferenças na demanda por climatização artificial na fase de uso, uma vez que os impactos inerentes à climatização artificial na operação do edifício não foram considerados na avaliação.

#### 6.4.3. Conclusões, Limitações e Recomendações

Os resultados do estudo de ACV mostraram que o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa (preenchidas em MDF) teve a maior contribuição para a maioria das categorias de impacto consideradas neste trabalho, enquanto a alvenaria de blocos de concreto demonstrou ser a alternativa de menor impacto ambiental.

O sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa destacou-se pelos maiores impactos potenciais nas categorias Radiação Ionizante, Mudanças Climáticas, Ocupação de Solo Urbano e Agrícola, Depleção de Metais, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Marinha, de Água Doce e Terrestre e Formação de Material Particulado.

Para as categorias Ocupação de Solo Urbano, Depleção de Metais, Ecotoxicidade Marinha e de água Doce, e Formação de Material Particulado, o processo de maior contribuição foi a produção de aço. Por outro lado, para as categorias Ocupação de Solo Agrícola e Ecotoxicidade Terrestre, o processo de maior contribuição foi a produção de MDF. Finalmente, a produção de fibrocimento foi a maior contribuinte para os potenciais de impacto das categorias Radiação Ionizante, Mudanças Climáticas e Toxicidade Humana.

No sistema do produto das paredes de concreto leve, o processo de produção do cimento demonstrou-se responsável pelas maiores contribuições para a categoria de impacto Acidificação Terrestre. Para o mesmo sistema construtivo, as maiores contribuições para a categoria Depleção de Água, foram observadas no processo de produção do alumínio.

As maiores contribuições de impacto da alvenaria de blocos cerâmicos forma nas categorias Depleção de Recursos Fósseis, Eutrofização Marinha e Formação de Oxidantes Fotoquímicos. Tais contribuições significativas estão relacionadas majoritariamente ao processo de produção dos blocos, especificamente ao processo de queima desses.

Pode-se concluir, portanto, que os principais impactos estão concentrados nos processos de produção dos seguintes materiais: cimento, fibrocimento, aço, MDF e blocos cerâmicos. As contribuições provenientes dos demais processos dentro de cada sistema do produto foram irrelevantes, se comparadas às supracitadas.

Ainda que os resultados deste estudo apontem o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa como a alternativa de maior impacto ambiental e a alvenaria de blocos de concreto como a alternativa de menor impacto, tal análise requer a coleta de dados regionais específicos para tais processos, para se tornar mais consistente.



## CAPÍTULO 7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

No presente capítulo, uma análise de sensibilidade será realizada, avaliando as possíveis variações dos resultados finais do estudo em relação à utilização de dados primários e secundários e à utilização das diferentes metodologias de AICV.

A análise de sensibilidade será realizada para avaliar as variações nos resultados finais do estudo de caso baseado totalmente em dados secundários e onde os processos de maior contribuição tiverem dados primários coletados no contexto brasileiro. Uma análise de sensibilidade será também aplicada em relação à utilização de diferentes metodologias de AICV.

Finalmente, uma análise de sensibilidade será realizada nas diferentes categorias de impacto dos diferentes métodos, para se avaliar em quais tipos de impactos os materiais estudados apresentam uma maior significância absoluta. A magnitude dos resultados em todas as categorias será comparada, a fim de se verificar se existem diferenças massivas de magnitude entre as categorias.

### 7. 1. Sensibilidade à variação de fontes de dados

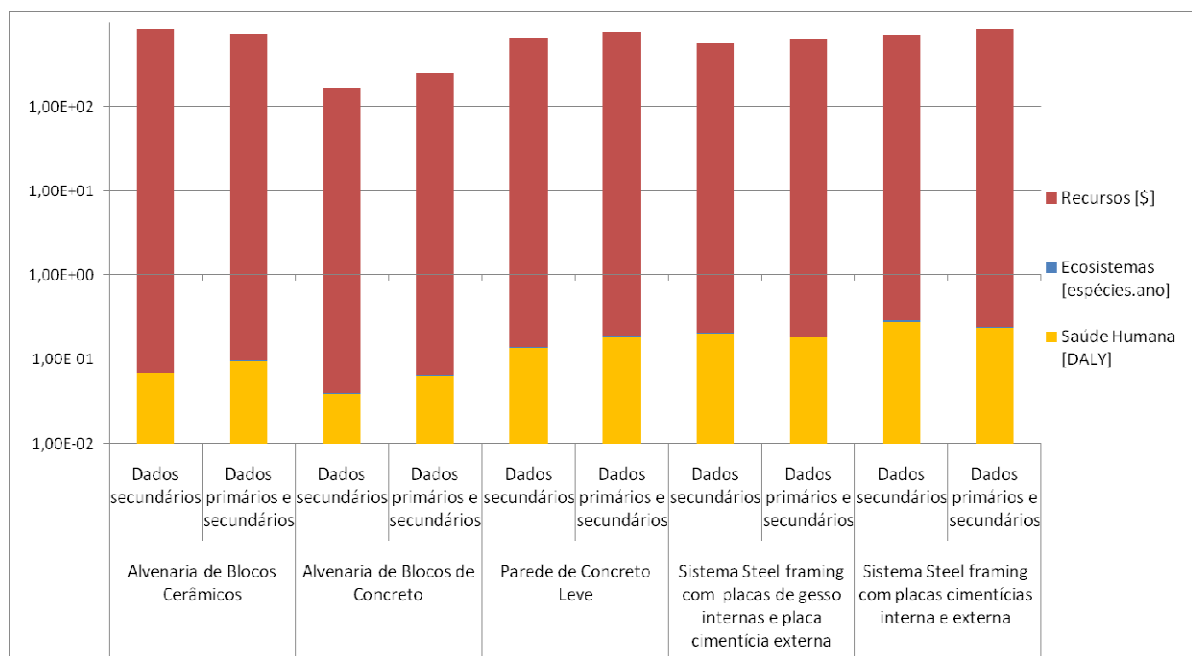
No estudo de caso baseado em dados secundários realizado no capítulo anterior concluiu-se que os principais potenciais de impacto estavam concentrados nos processos de produção do cimento, fibrocimento, aço, MDF e blocos cerâmicos.

Apenas no caso específico do aço uma alternativa de mitigação dos impactos ficou evidente: o aumento da demanda por reciclagem de tal material. A ideia proposta sugere que os sistemas *steel framing* tem a possibilidade de melhorar significativamente seu desempenho ambiental pela substituição do aço galvanizado, o qual apresenta empecilhos para a reciclagem devido à necessidade de um processo prévio de separação do aço e do zinco. Sendo assim, a utilização de aço não galvanizado em tal sistema, aumentaria suas possibilidades de reciclagem,

que poderiam chegar, assim, a praticamente 100%, diminuindo ostensivamente os impactos ambientais relacionados ao seu processo produtivo.

No corpo do texto serão apresentados os resultados finais da AICV para todos os processos, por categoria de impacto.

A Figura 49 apresenta os resultados para todas as categorias de AICV *endpoint* constantes na metodologia ReCiPe 2008, para os sistemas construtivos analisados, com a utilização de dados primários para os processos de maior contribuição, em comparação com os resultados anteriormente obtidos no estudo de caso baseado em dados secundários.



**Figura 49: Resultados da AICV *endpoint* pela metodologia ReCiPe 2008.**

Nos resultados *endpoint* já se pode observar diversas variações em relação aos resultados obtidos no estudo de caso baseado em dados secundários.

Enquanto naquele estudo a alvenaria de blocos cerâmicos apresentava-se como a alternativa mais impactante, seguida pelo sistema *steel framing* e paredes de concreto leve, na verificação de sensibilidade ao uso de dados primários é possível observar-se uma variação desse perfil ambiental, com o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa aparecendo



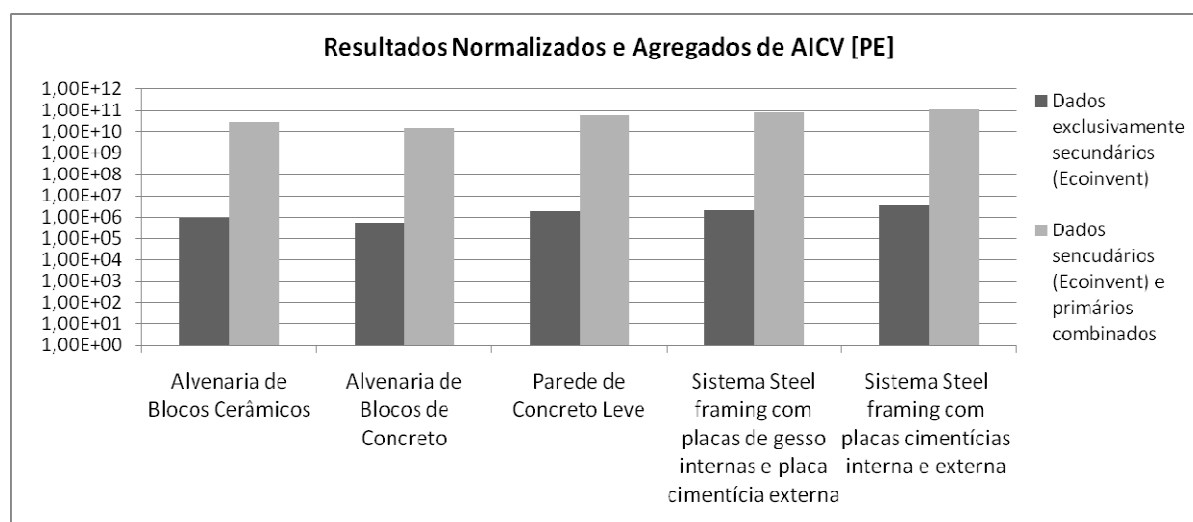
como a alternativa mais impactante, seguido das paredes de concreto leve e da alvenaria de blocos cerâmicos.

Os resultados *endpoint* agregados totais continuam apontando, entretanto, a alvenaria de blocos de concreto como alternativa de melhor perfil ambiental.

Tal diferença nos resultados se deve, principalmente, às alterações percebidas especificamente na área de proteção saúde humana, a qual apresentou variação de magnitudes semelhante às variações totais citadas acima. As áreas de proteção Ecossistemas e Recursos apresentaram perfis ambientais semelhantes aos obtidos no estudo de caso baseado em dados secundários.

De forma a melhor analisar a origem de tais resultados e suas conseqüentes alterações, passa-se então à avaliação de impacto em nível *midpoint*, cujos resultados totais estão apresentados na Tabela 16.

As etapas de Normalização e Agrupamento também foram aplicadas, a fim de se obter informações mais completas e consistentes. Os dados obtidos nessas etapas estão apresentados na Figura 50. Nesta etapa utilizou-se, mais uma vez, a metodologia ReCiPe, com a normalização dos resultados da AICV *midpoint* em termos de emissões de um cidadão médio europeu, com base no ano de 2000 (PE – pessoa equivalente).



**Figura 50: Resultados de AICV normalizados e agregados.**

**Tabela 16: Resultados de AICV em nível *midpoint* pela metodologia ReCiPe 2008.**

Categorias de Impacto	Alvenaria de Blocos Cerâmicos	Alvenaria de Blocos de Concreto	Parede de Concreto Leve	<i>Steel framing</i> com drywall internas e placa cimentícia externa	<i>Steel framing</i> com placa cimentícia interna e externa
Ocupação de solo agrícola [m2a]	3,75E+00	2,88E+00	4,96E+00	1,55E+02	3,08E+02
Mudanças climáticas [kg CO2-Equiv.]	7,81E+01	5,10E+01	1,61E+02	1,85E+02	2,89E+02
Esgotamento de recursos fósseis [kg petróleo eq]	4,52E+01	1,53E+01	4,80E+01	3,96E+01	5,12E+01
Ecotoxicidade em água doce [kg 1,4-DB eq]	8,74E-02	3,47E-02	2,90E-01	3,97E-01	4,77E-01
Eutrofização em água doce [kg P eq]	4,49E-04	2,23E-04	2,24E-03	2,54E-03	2,86E-03
Toxicidade Humana [kg 1,4-DB eq]	1,62E+00	5,65E-01	5,14E+00	5,28E+00	8,04E+00
Radiação ionizante [kg U235 eq]	5,94E+06	4,03E+06	1,16E+07	1,12E+07	1,47E+07
Ecotoxicidade marinha [kg 1,4-DB eq]	8,80E-02	3,07E-02	2,81E-01	3,81E-01	4,59E-01
Eutrofização marinha [kg N-Equiv.]	1,06E-01	6,53E-02	1,42E-01	1,37E-01	1,87E-01
Esgotamento de metais [kg Fe eq]	3,94E+00	2,03E+00	6,89E+00	3,47E+01	3,57E+01
Transformação de solo natural [m2]	4,92E-02	6,48E-03	3,98E-02	3,06E-02	4,07E-02
Depleção de ozônio [kg CFC-11 eq]	1,73E-05	6,52E-06	1,61E-05	2,12E-05	3,44E-05
Formação de partículas [kg PM10 eq]	1,31E-01	8,37E-02	2,59E-01	3,31E-01	5,10E-01
Formação de oxidantes fotoquímicos [kg NMVOC]	3,05E-01	1,85E-01	4,26E-01	3,75E-01	5,25E-01
Acidificação terrestre [kg SO2 eq]	3,09E-01	1,47E-01	7,06E-01	4,07E-01	5,48E-01
Ecotoxicidade terrestre [kg 1,4-DB eq]	8,37E-03	2,76E-03	7,90E-03	7,85E-03	1,19E-02
Ocupação de solo urbano [m2a]	9,43E-01	8,57E-01	1,42E+00	1,50E+00	1,61E+00
Esgotamento de água [m3]	2,95E+03	2,56E+03	3,80E+03	3,16E+03	5,80E+03

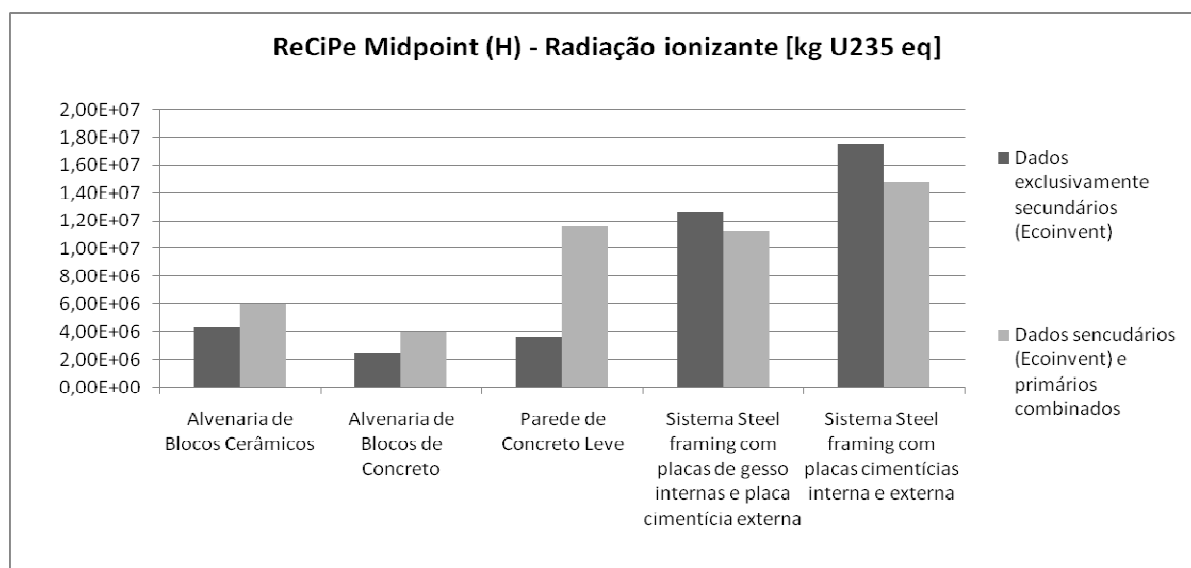
Os resultados normalizados e agrupados (Figura 50) do presente estudo de verificação de sensibilidade apresentam o mesmo perfil ambiental geral do estudo anterior, completamente baseado em dados secundários, observando-se a alvenaria de blocos de concreto como a alternativa de melhor perfil ambiental e o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e

externa como a pior alternativa do ponto de vista ambiental. No entanto, com maiores diferenças de magnitude de impacto entre as alternativas.

Enquanto no estudo inicial, baseado em dados secundários, os valores totais agrupados apresentavam magnitudes variando de E+05 a E+07, na verificação de sensibilidade com utilização de dados primários, esses resultados passaram a variar apenas dentro da magnitude E+10, apresentando-se, portanto, maiores e menos variados.

Na próxima etapa desta verificação de sensibilidade, todos os potenciais de impacto cobertos pela metodologia ReCiPe 2008 serão analisados individualmente, comparando-se os resultados iniciais, totalmente baseados em dados do Ecoinvent (FRISCHKNECHT et al., 2005), com os resultados da verificação de sensibilidade, com utilização de dados primários específicos para os processos de maior contribuição.

A primeira categoria a ser analisada é Radiação Ionizante (Figura 51), a qual apresentou alguns desvios quando comparada aos resultados iniciais. Salvas diferenças gerais de magnitude, o perfil ambiental geral das alternativas manteve-se para essa categoria, com alteração apenas na colocação da parede de concreto leve, a qual passou de segunda melhor alternativa, para a segunda pior colocação.

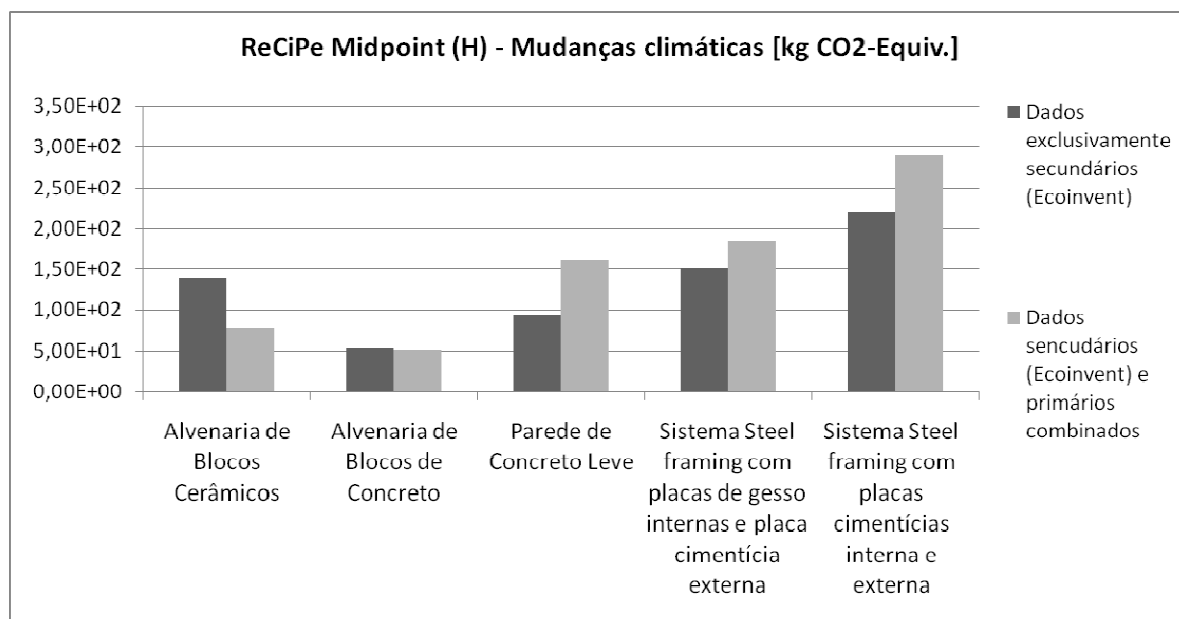


**Figura 51: Impactos potenciais das alternativas para Radiação Ionizante pela metodologia**

**ReCiPe.**

A produção de concreto leve (incluindo-se o processo de produção de cimento) tem contribuição significativa para os impactos desta alternativa, sendo, portanto o responsável pelas alterações de magnitude de potenciais de impacto, uma vez que os dados de inventário para o processo de produção de alumínio não foram coletados de fontes primárias.

Para a categoria de impacto Mudanças Climáticas (Figura 52) a melhor e a pior alternativa de vedação, do ponto de vista ambiental, também se mantiveram as mesmas: alvenaria de blocos de concreto e sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa, respectivamente. Porém houve uma inversão de posições entre as alternativas de vedação de parede de concreto leve e alvenaria de blocos cerâmicos, onde esta última, a qual se apresentava como terceira de maior magnitude de potencial de impacto foi ultrapassada em magnitude pelas paredes de concreto leve.

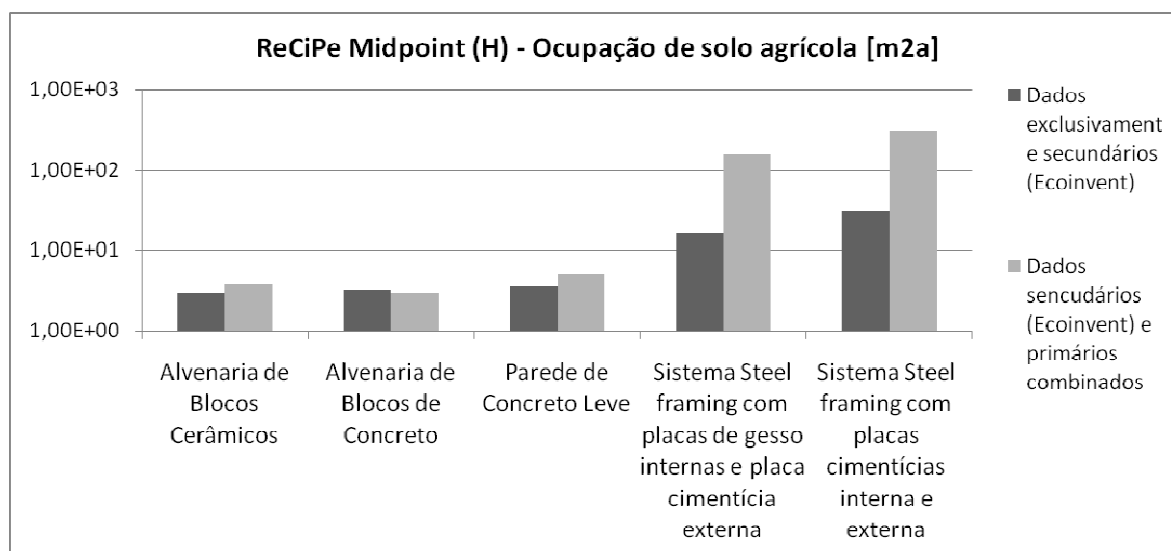


**Figure 52: Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas pela metodologia ReCiPe 2008.**

Avaliando-se os processos de maior contribuição pode-se concluir que a diminuição do potencial de impacto, na alvenaria de blocos cerâmicos, se deu devido à diminuição de substâncias contribuintes para tal categoria no processo de produção de blocos cerâmicos, especialmente devido à diminuição da utilização de gás natural e, portanto, das emissões consecutivas.

Em relação às paredes de concreto leve, o aumento do potencial de impacto para Mudanças climáticas está diretamente ligado ao aumento das emissões de substâncias contribuintes no processo de produção do cimento Portland com a introdução de dados primários brasileiros.

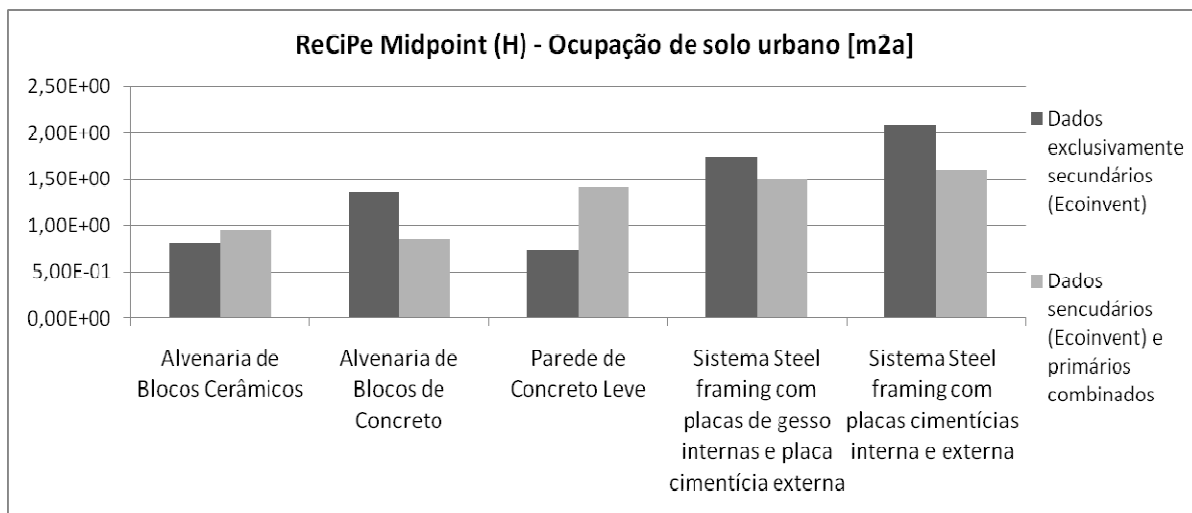
A Figura 53 apresenta as alterações na categoria de impacto Ocupação do Solo Agrícola, provenientes da inserção de dados primários de inventário.



**Figura 53: Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo agrícola pela metodologia ReCiPe 2008.**

Para essa categoria, a despeito das variações de magnitude de impacto, não houve mudanças significativas na ordem de preferência ambiental das alternativas. A única alteração foi observada nas duas alternativas de menor impacto ambiental potencial (alvenarias de blocos cerâmicos e de concreto), no entanto, foram alterações pouco significativas, como pode ser observado na Figura 53.

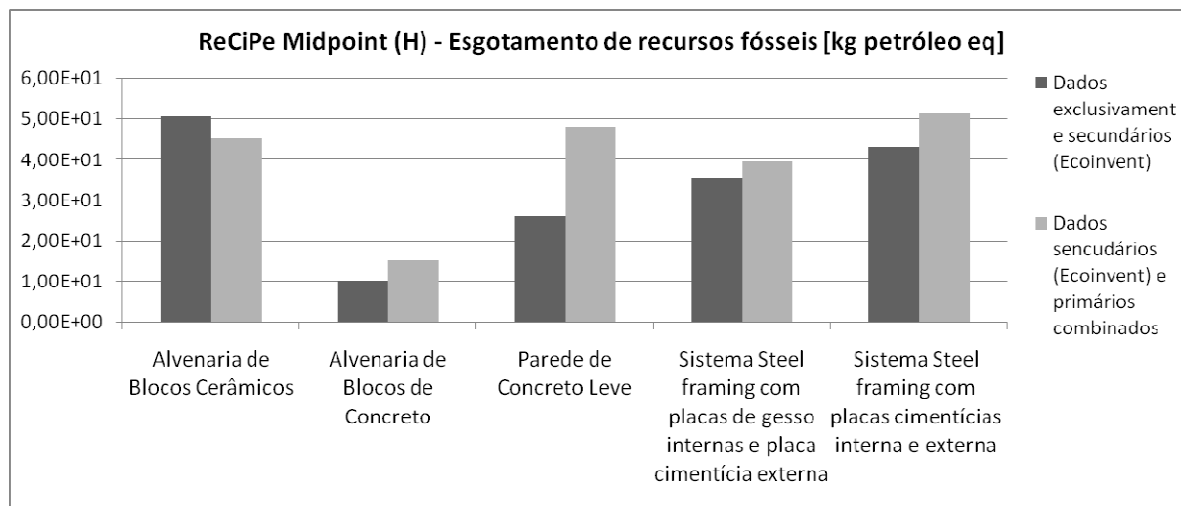
Em contrapartida, os perfis ambientais das alternativas para a categoria Ocupação do Solo Urbano (Figura 54) apresentaram-se mais contundentes. Embora as alternativas de *steel framing* tenham se mantido como as de maior potencial de impacto, as alterações em sua magnitude foram consideráveis, e acompanhadas por grandes alterações também nas demais alternativas de vedação.



**Figura 54: Impactos potenciais das alternativas para Ocupação de solo urbano pela metodologia ReCiPe 2008.**

As alterações de maior significância foram observadas na alvenaria de blocos de concreto e nas paredes de concreto leve, onde a primeira sofreu uma diminuição dos potenciais de impacto enquanto a segunda observou o crescimento de tais potenciais. Sendo as duas alternativas massivamente baseadas na utilização de cimento Portland, tais alterações podem parecer incoerentes, no entanto, observando-se a fundo as contribuições dos processos dentro do ciclo de vida de cada uma das alternativas, conclui-se que as diferenças provenientes da coleta de dados primários para a produção de cimento Portland, levariam a um aumento do potencial de impacto. Entretanto, para a produção de blocos de concreto, observou-se uma diminuição das quantidades necessárias de concreto para a produção dos blocos, minimizando assim, os potenciais de impacto finais.

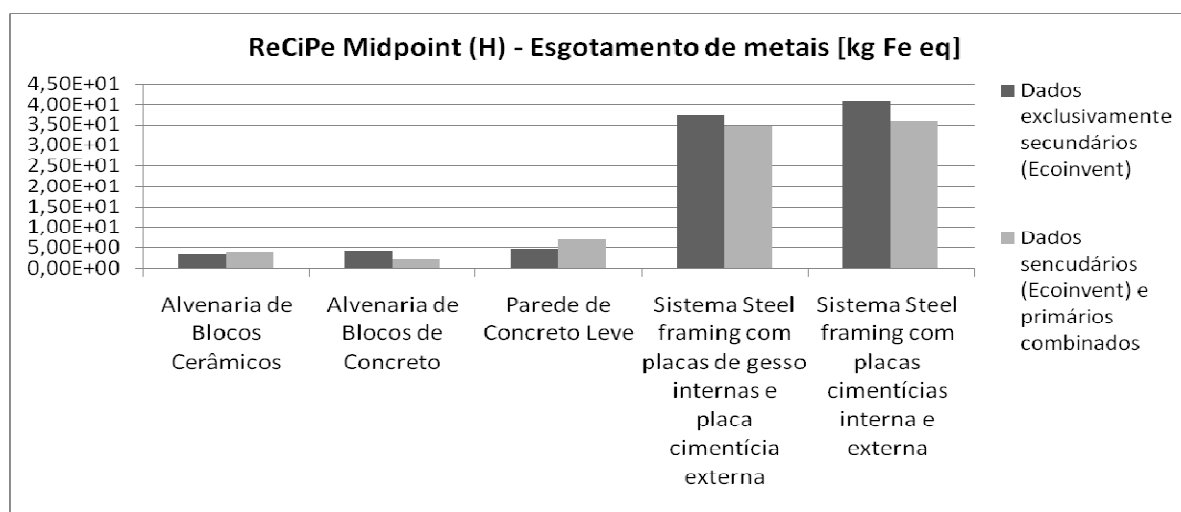
Para a categoria Esgotamento de Recursos Fósseis (Figura 55), observou-se um aumento de magnitude de potencial de impacto para quase todas as alternativas, exceto para a alvenaria de blocos cerâmicos, a qual apresentou diminuição, mais uma vez, devido à redução do consumo de gás natural observada nos dados primários coletados. O ranqueamento dos perfis ambientais também apresentou alterações significativas, as quais poderiam levar os tomadores de decisão a diferentes conclusões em cada um dos estudos.



**Figura 55: Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Recursos Fósseis pela metodologia ReCiPe 2008.**

A pior alternativa ambiental passaria a ser o sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa ao invés da alvenaria de blocos cerâmicos, conforme concluído no estudo inicial. Além disso, a classificação das demais alternativas subsequentes também sofreu alteração de ordem de potencial de impacto, como pode ser observado na Figura 55.

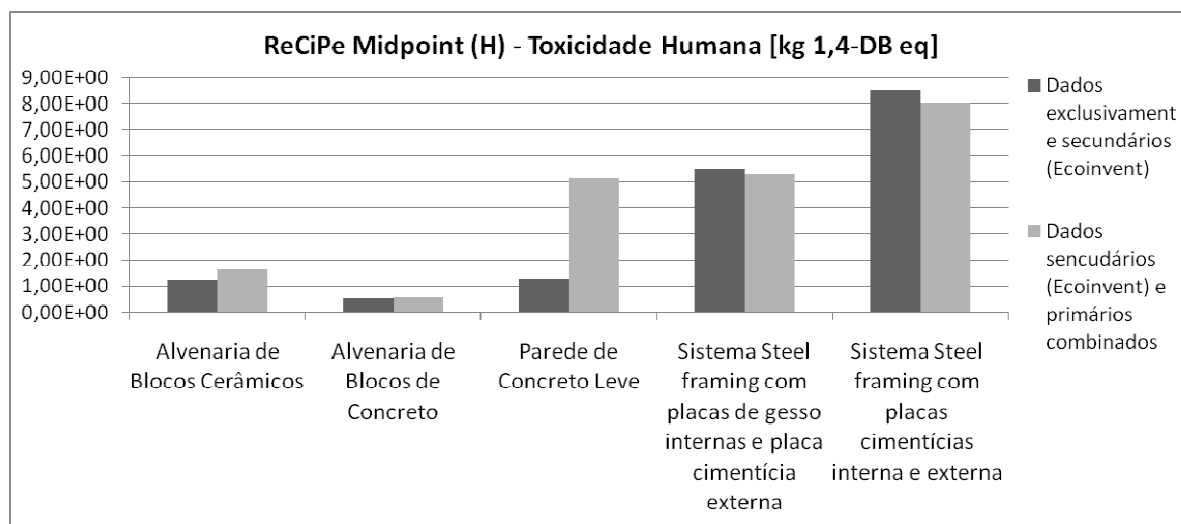
As alterações dos potenciais de impacto da categoria Esgotamento de Metais, pelo uso de dados primários para os processos de maior contribuição, estão apresentadas na Figura 56.



**Figura 56: Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Metais pela metodologia ReCiPe 2008.**

A despeito de pequenas alterações de magnitude, previsíveis devido à alteração dos dados de inventário, para todas as alternativas, o ranqueamento dessas mantém-se o mesmo para as três tipologias de maior potencial de impacto, apresentado apenas a inversão de posições entre a alvenaria de blocos cerâmicos e alvenaria de blocos de concreto, esta última apresentando-se agora como a de menor potencial de impacto ambiental.

A categoria de impacto Toxicidade Humana manteve o padrão de ranqueamento das alternativas depois da inserção de dados primários, não levando, portanto, os tomadores de decisão a conclusões diferentes quando se baseando nos estudos (Figura 57). Entretanto, é importante chamar atenção para a grande diferença de magnitude apresentada pela parede de concreto leve, a qual, se comparada a alternativas não abordadas neste estudo, poderia levar a conclusões equivocadas.



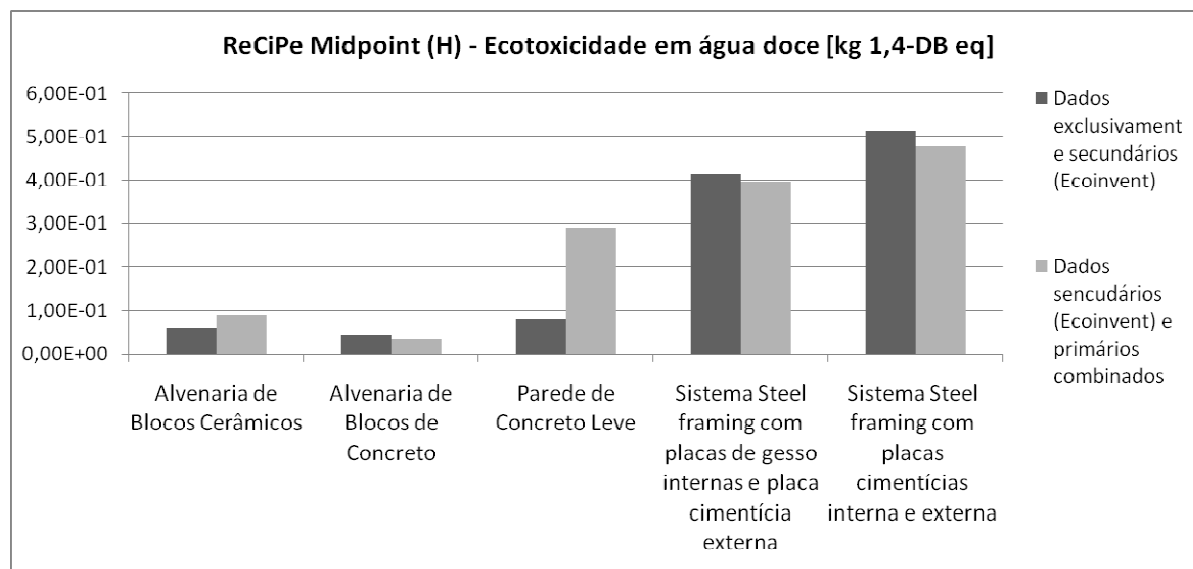
**Figura 57: Impactos potenciais das alternativas para Toxicidade Humana pela metodologia ReCiPe 2008.**

Pela análise dos dados de inventário e resultados detalhados de AICV é possível concluir que tal diferença deve-se à alteração dos dados de inventário da produção de concreto leve, principalmente pela introdução da argila expandida como agregado leve predominante.

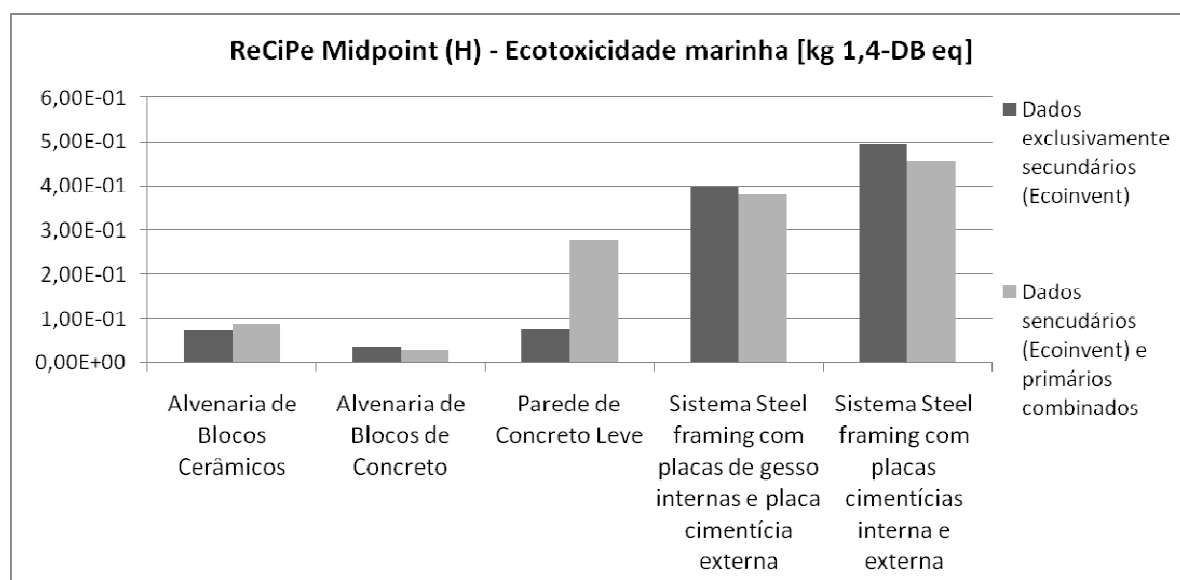
As mesmas alterações de perfil ambiental são também apresentadas pelas categorias Ecotoxicidade de Água Doce (Figura 58) e Exotoxicidade Marinha (Figura 59), às quais podemos



aplicar as mesmas justificativas adotadas pela categoria Toxicidade Humana. É importante notar, neste ponto, que devido à extensão de tais alterações, recomenda-se que os dados de inventário causadores de tal alteração sejam futuramente revistos, de forma a se evitar conclusões equivocadas, baseadas em limitações e especificidades dos dados coletados.

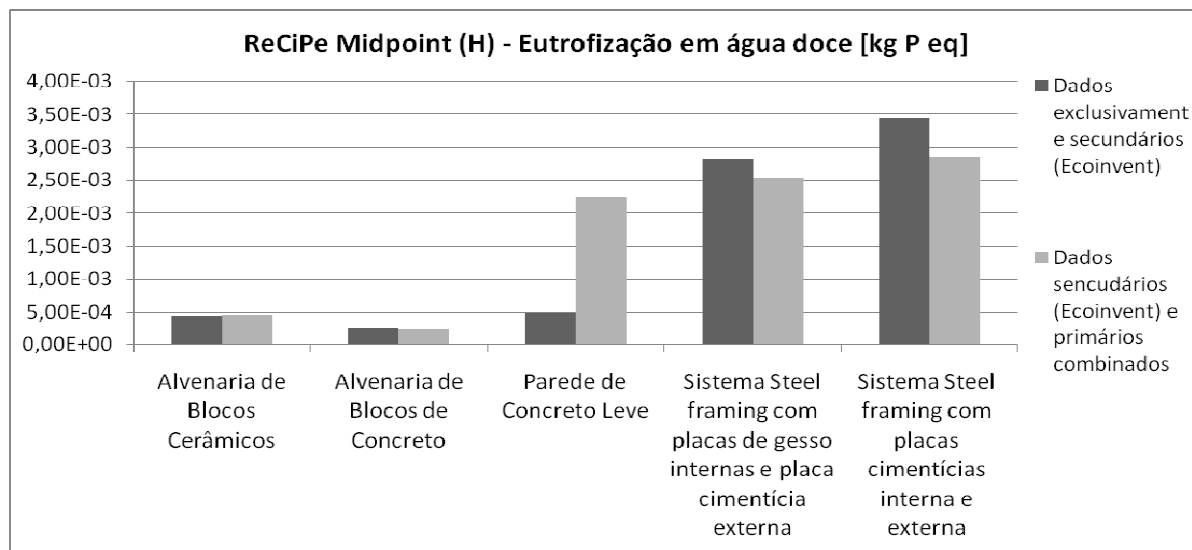


**Figure 58: Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.**

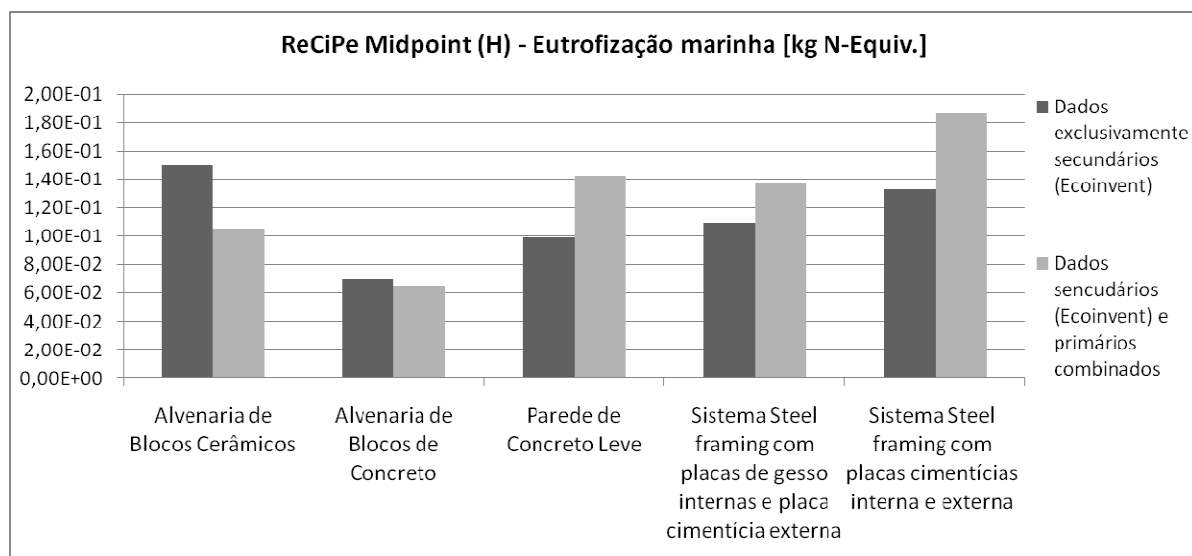


**Figure 59: Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Marinha pela metodologia ReCiPe 2008.**

As Figuras 60 e 61 apresentam, respectivamente, as alterações de potenciais de impacto das alternativas para as categorias Eutrofização de Água Doce e Eutrofização Marinha.



**Figure 60: Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização de Água Doce pela metodologia ReCiPe 2008.**

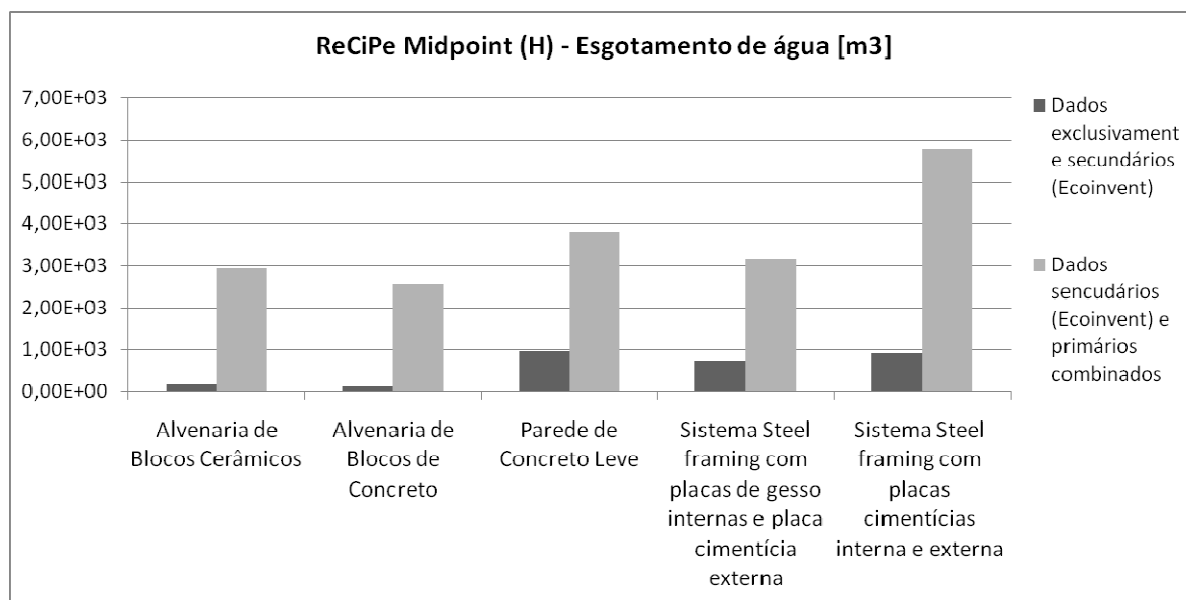


**Figure 61: Impactos potenciais das alternativas para Eutrofização Marinha pela metodologia ReCiPe 2008.**

No caso da Eutrofização em Água Doce (Figura 60), a diminuição dos potenciais de impacto nas alternativas de pior desempenho ambiental (as que utilizam sistema *steel framing*) se deve a uma diminuição das substâncias contribuintes para tal categoria no processo de produção do fibrocimento.

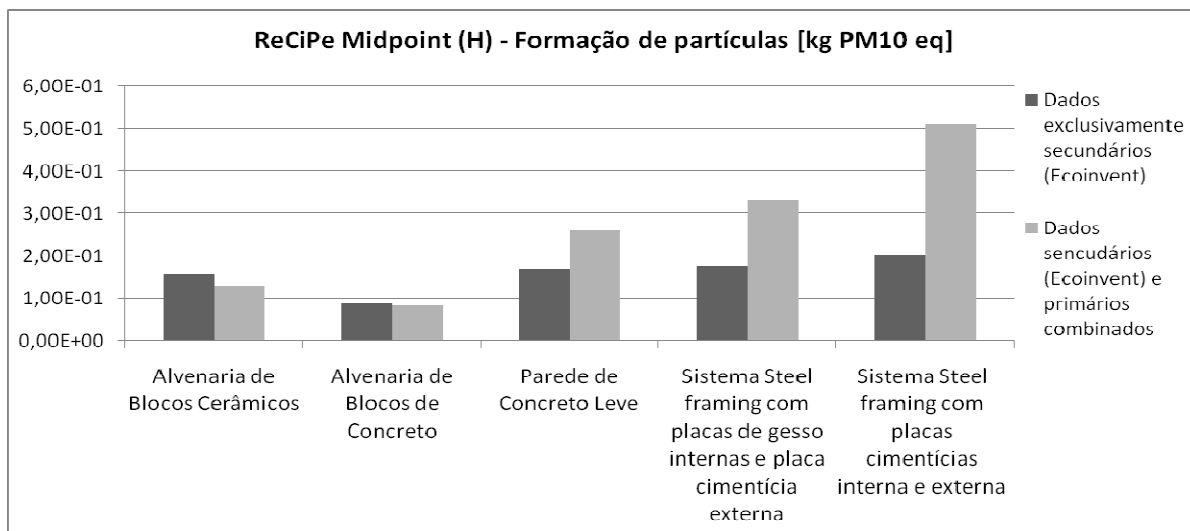
Por outro lado os impactos potenciais para Eutrofização Marinha (Figura 61) cresceram para esses mesmos sistemas construtivos, devido ao aumento das emissões provenientes do transporte de materiais em insumos no processo de produção do fibrocimento, em relação ao estudo de caso inicial.

Os potenciais de impacto relacionado ao Esgotamento de Água tiveram um aumento relativamente equilibrado de magnitude para todas as alternativas construtivas, mantendo assim, o mesmo ranqueamento e classificação de perfis ambientais dentre os sistemas construtivos de vedação comparados (Figura 62).

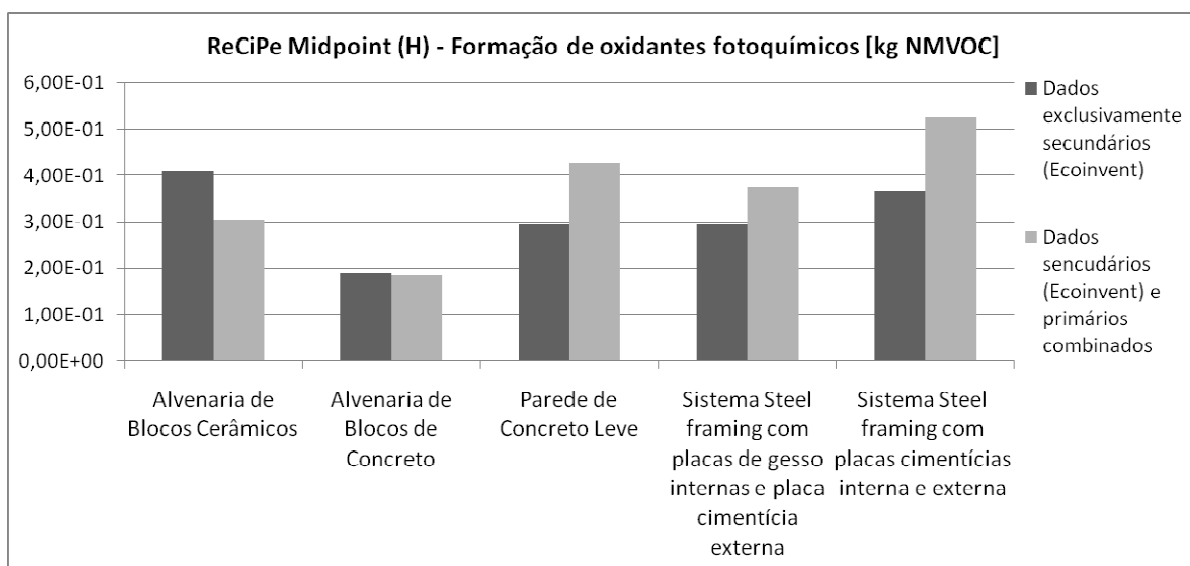


**Figura 62: Impactos potenciais das alternativas para Esgotamento de Água pela metodologia ReCiPe 2008.**

Para as categorias de impacto Formação de Partículas (Figura 63) e Formação de Oxidantes Fotoquímicos (Figura 64), as alterações de perfis ambientais seguiram a mesma lógica, apresentando crescimento da magnitude de impacto para as alternativas com sistema *steel framing* e paredes leves, e diminuição da magnitude nas alternativas referentes a sistemas construtivos de alvenaria.



**Figura 63: Impactos potenciais das alternativas para Formação de Partículas pela metodologia ReCiPe 2008.**



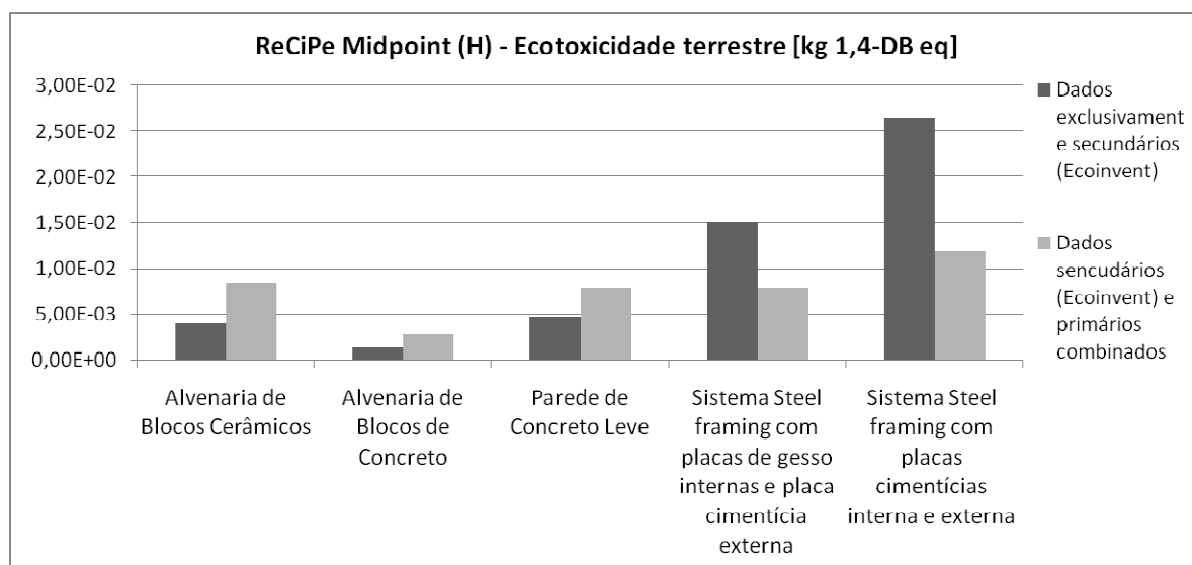
**Figura 64: Impactos potenciais das alternativas para Formação de Oxidantes Fotoquímicos pela metodologia ReCiPe 2008.**

Para Formação de Partículas (Figura 63), parte de tal crescimento de magnitude se deve às maiores emissões provenientes do processo de produção de cimento Portland, entretanto, a maior diferença é, de fato, atribuída ao aumento das emissões relacionadas à categoria provenientes do processo de produção de placas de MDF. Isso explica porque o aumento de

magnitude é crescente quando olhamos as alternativas de parede de concreto leve, e sistema *steel framing* com placa cimentícia apenas interna, e interna e externa.

Em relação à categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos, ao analisar os processos dentro do ciclo de vida das alternativas comparadas, nota-se uma diminuição de contribuição das emissões provenientes do processo de produção de blocos cerâmicos, acompanhada de um aumento das emissões contribuintes provenientes do processo de produção de cimento Portland, explicando-se dessa forma, as alterações de perfil ambiental observadas na Figura 64.

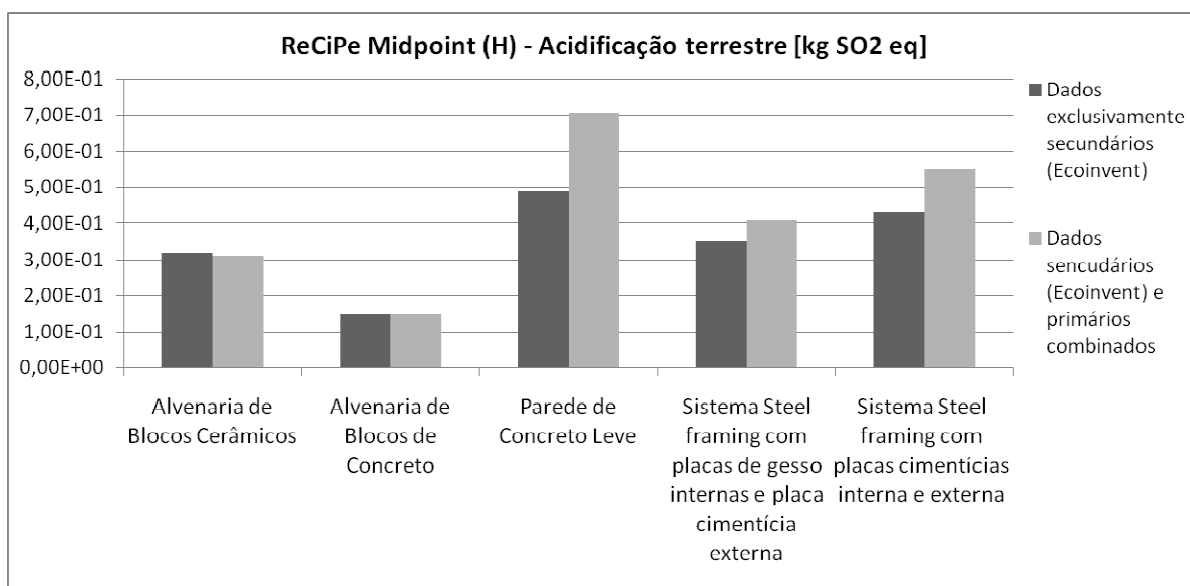
Na análise da categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre (Figura 65) a análise dos processos de maior contribuição no ciclo de vida das alternativas construtivas comparadas revela uma significativa diminuição da contribuição de emissões relacionadas ao processo de produção de placas de MDF, o que explica a diminuição da magnitude dos potenciais de impacto para as alternativas que se utilizam do sistema *steel framing*, uma vez que as emissões de tal processo eram as principais responsáveis pelo potencial de impacto no estudo de caso inicial. Por outro lado, no processo de produção do cimento Portland, foi observado um crescimento do potencial de impacto para tal categoria, o que explica o aumento de magnitude de impacto para as demais alternativas construtivas.



**Figura 65: Impactos potenciais das alternativas para Ecotoxicidade Terrestre pela metodologia**

**ReCiPe 2008.**

Finalmente para a categoria Acidificação Terrestre (Figura 66), o ranqueamento ambiental das alternativas manteve-se estável após a inserção dos dados primários para os processos de maior contribuição, com alterações suaves principalmente para as paredes de concreto leve e as alternativas que utilizam o sistema *steel framing*. Os sistemas construtivos citados apresentaram aumento de magnitude de impactos potenciais para a categoria discutida, principalmente devido ao aumento de emissões contribuintes provenientes do processo de produção de cimento Portland.

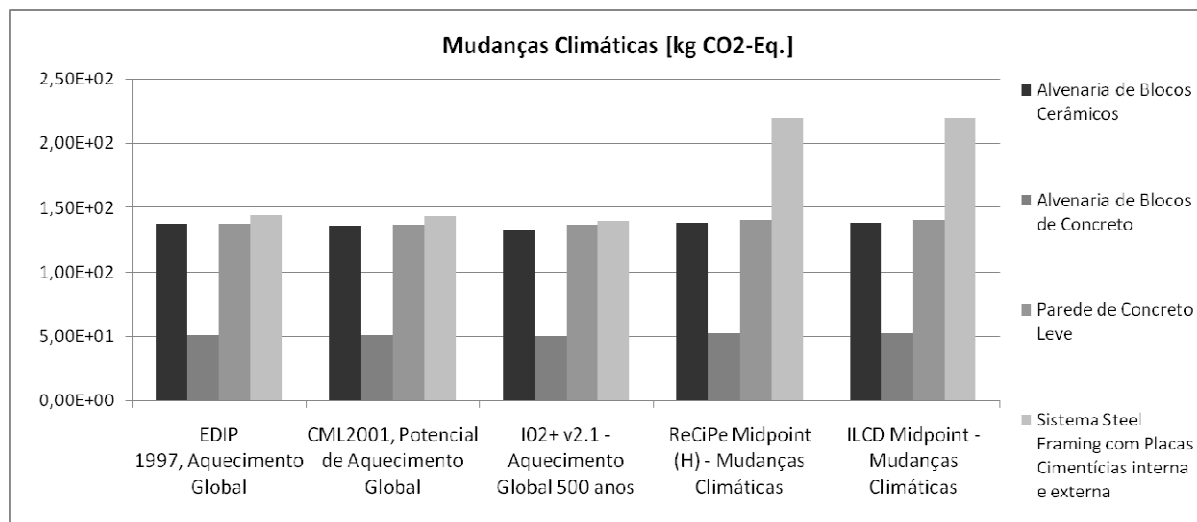


**Figura 66: Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre pela metodologia ReCiPe 2008.**

## 7.2. Sensibilidade à variação de metodologias de AICV

O presente tópico analisou as possíveis implicações e consequências da escolha do método de AICV nos resultados do estudo de caso inicial, baseado em dados secundários do Ecoinvent 2.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005), de forma a entender as limitações inerentes a tal escolha durante a definição de escopo.

A Figura 67 mostra os resultados da AICV em nível *midpoint* para a categoria de impacto Mudanças Climáticas (também chamada de Aquecimento Global por alguns métodos).



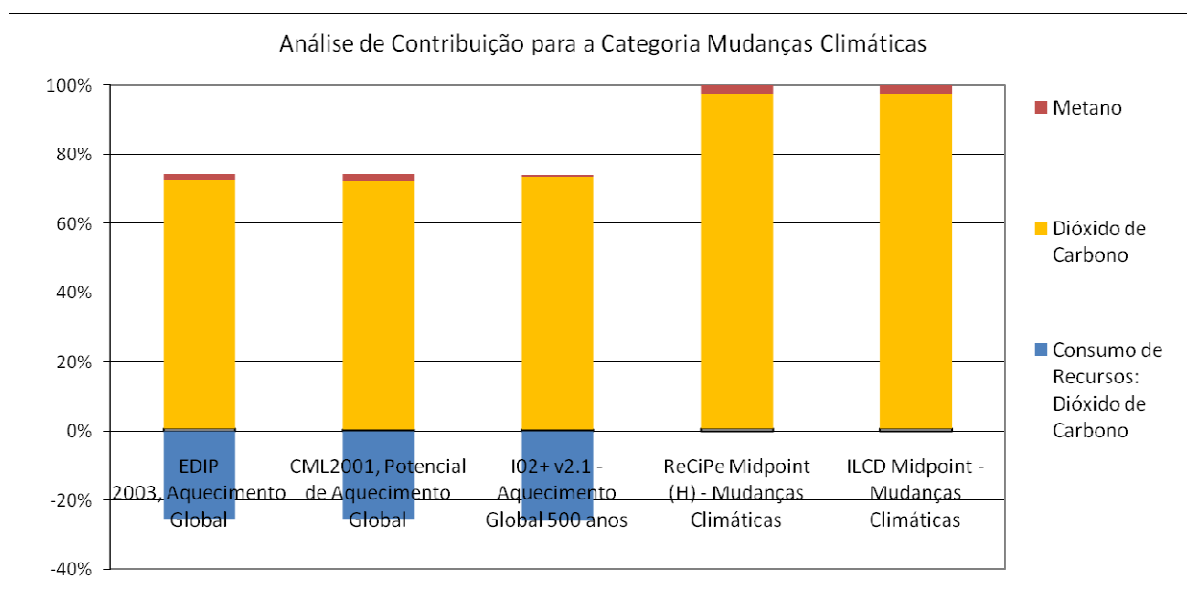
**Figura 67: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Mudanças Climáticas.**

Os resultados demonstraram-se consistentes para a categoria Mudanças Climáticas. Apesar das diferenças de magnitude de impacto, todas as metodologias apresentaram quase a mesma gradação entre a melhor e a pior alternativa do ponto de vista ambiental. Neste caso, um tomador de decisão tiraria, de forma geral, as mesmas conclusões, independentemente da metodologia de AICV aplicada.

Esse padrão de desempenho para as quatro alternativas construtivas analisadas é majoritariamente o mesmo para todos os métodos de AICV. O potencial de impacto da alvenaria de blocos de concreto é sempre menor em comparação com as paredes de concreto leve, uma vez que a quantidade de cimento Portland utilizada é também proporcionalmente menor. Os impactos da alvenaria de blocos de concreto são também consideravelmente menores do que os da alvenaria de blocos cerâmicos, devido à grande quantidade de energia necessária para a queima desses últimos blocos, a qual é realizada a temperaturas muito altas, consumindo uma grande quantidade de gás natural. Finalmente, a principal razão para o maior potencial de impacto concentrado na alternativa de sistema *steel framing* está relacionada aos processos de produção e galvanização do aço, os quais demandam altas quantidades de energia elétrica.

No entanto, existe uma diferença de magnitude entre os resultados provenientes dos métodos mais antigos e mais novos em relação ao sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa.

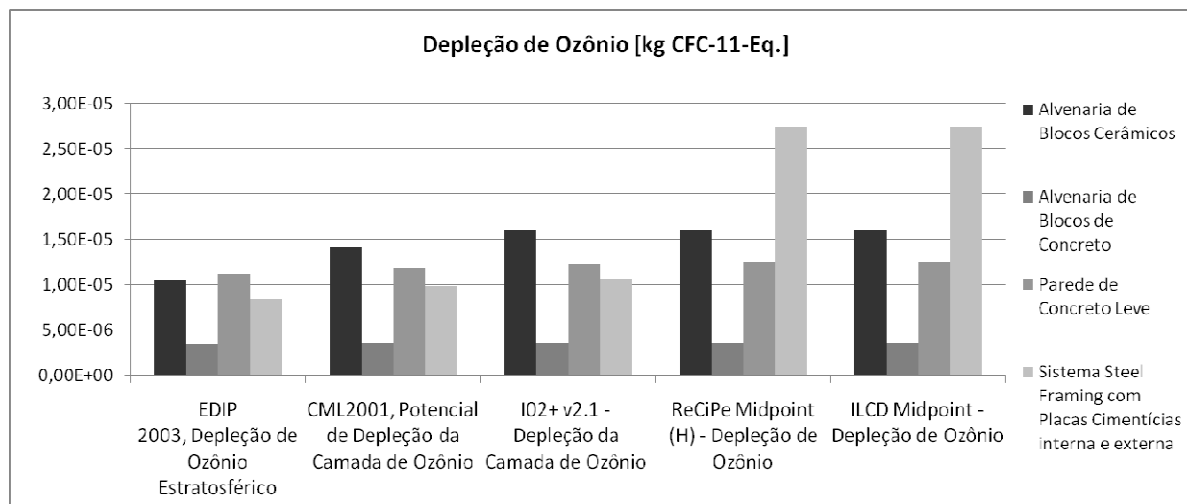
A análise de contribuição para essa categoria de impacto (Figura 68) foi realizada para a alternativa de sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa (o qual apresentou as alterações mais significativas), e mostra a mesma variação relacionada a emissões de substâncias em cada método de AICV. Entretanto, os métodos mais antigos como EDIP, CML e Impact 2002+ consideram como impacto negativo o sequestro de Dióxido de Carbono pelas plantações de madeira (consideradas no processo de produção de placas de MDF), o qual não é considerado pelos modelos de caracterização mais atuais usados nos métodos ReCiPe e ILCD. Essa discrepância entre métodos mais antigos e mais novos é visível apenas na alternativa que utiliza tais placas de MDF.



**Figura 68: Análise de Contribuição da categoria Mudanças Climáticas para o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa.**

Os resultados para Depleção de Ozônio Estratosférico estão apresentados na Figura 69. Nessa categoria os métodos apresentaram resultados diferentes dentre todos os métodos aplicados.



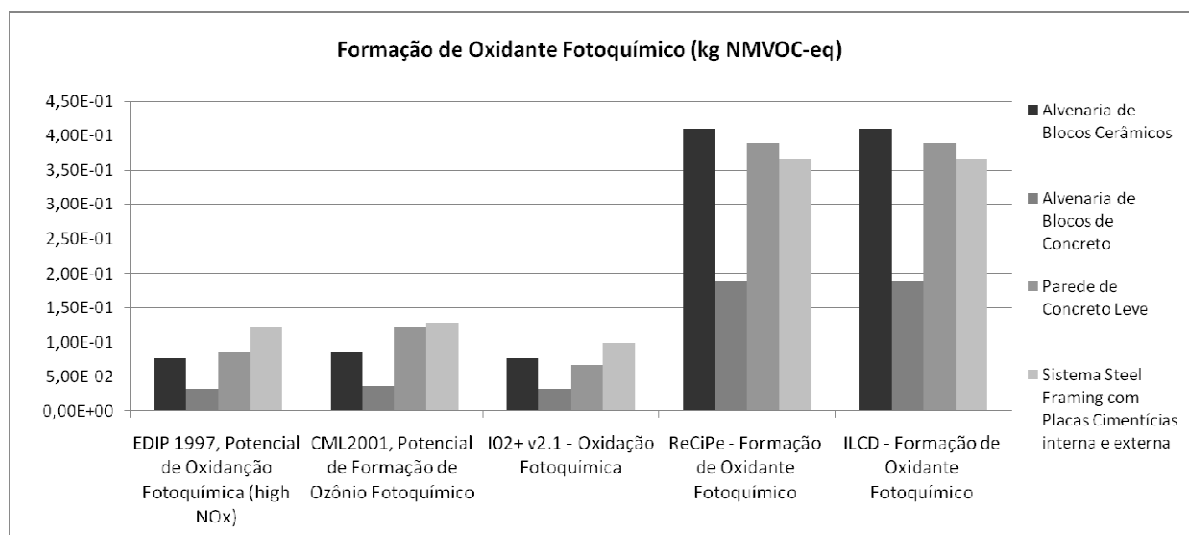


**Figura 69: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Depleção de Ozônio.**

A alvenaria de blocos cerâmicos foi a alternativa de maior potencial de impacto pelo método CML, enquanto a parede de concreto leve foi a opção mais impactante pelo metodologia EDIP. A situação é similar quando comparando os métodos Impact 2002+ e ReCiPe 2008 (este última utiliza-se do mesmo indicador que as melhores práticas recomendadas pelo ILCD). O perfil de impacto é parecido para as alternativas de alvenaria de blocos cerâmicos, alvenaria de blocos de concreto e parede de concreto leve, no entanto a alternativa que utiliza o sistema *steel framing* demonstrou maior potencial de impacto pela metodologia ReCiPe, mas não pela metodologia Impact 2002+.

Os resultados para essa categoria têm valores muito baixos, e apenas uma substância a qual não possua fator de caracterização em algum dos métodos pode fazer uma grande diferença na análise final. Por outro lado, como a maioria das emissões substâncias depletoras de Ozônio não é mais relevante, uma vez que a sua utilização já se encontra massivamente proibida (a presença dessas substâncias reflete a idade da base de dados utilizada), esta pesquisa não se aprofundará na discussão dessa categoria.

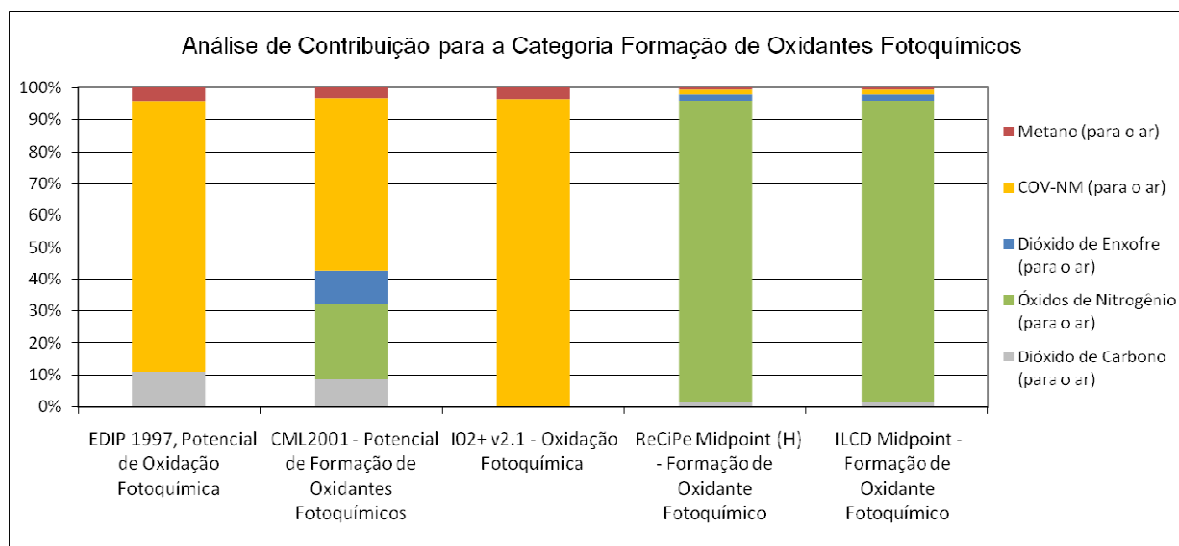
O mesmo tipo de variação ocorreu na categoria Formação de Ozônio Fotoquímico, como apresentado na Figura 70.



**Figura 70: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Formação de Oxidantes Fotoquímicos.**

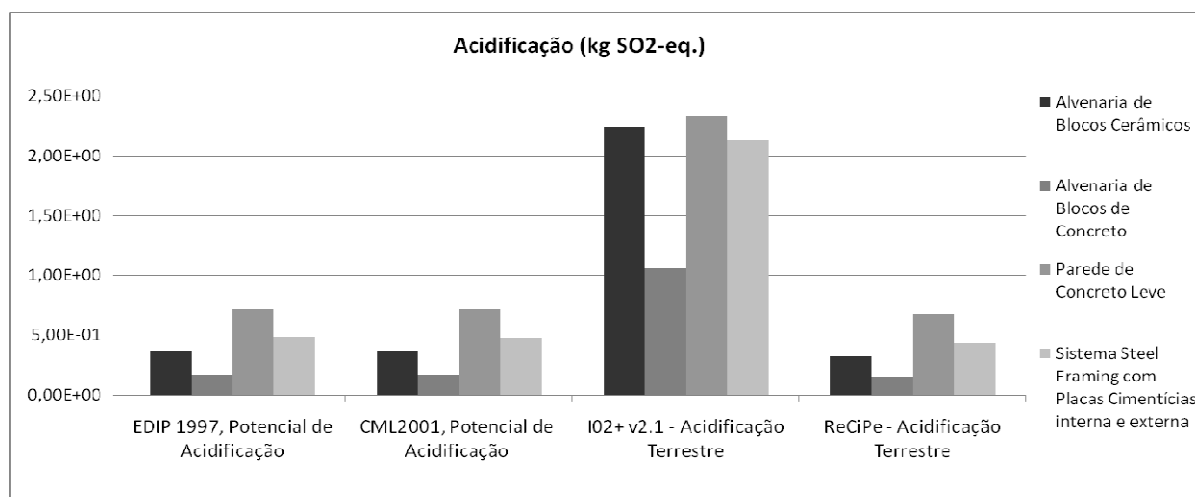
Os três métodos mais antigos (EDIP, CML e Impact 2002+) apresentam diferentes perfis de impacto. Ainda que a alternativa construtiva de maior potencial de impacto de tenha sido a mesma para todos os métodos – o sistema *steel framing* com placa cimentícia interna e externa – o perfil de ranqueamento para as demais alternativas variou bastante. A variação mais proeminente se deu quando comparando os métodos antigos com o ReCiPe 2008 (o qual usa o mesmo indicador recomendado pelas melhores práticas do ILCD) que apresentou a alvenaria de blocos cerâmicos como a alternativa mais impactante. O método ReCiPe também apresentou um perfil de ranqueamento completamente diferente para as demais alternativas, o que levaria um tomador de decisão a conclusões diferentes. Por outro lado, é importante notar que se a versão EDIP 2003 fosse aplicada ao invés da versão de 1997, os resultados deste método seriam então significativamente similares ao método ReCiPe.

A análise de contribuição (Figura 71) mostrou significâncias advindas de substâncias completamente diferentes dentre os métodos de AICV comparados, refletindo as diferenças entre os fatores de caracterização utilizados e levando a tal variedade de resultados. Enquanto as emissões de maior contribuição para CML, EDIP e Impact 2002+ foram os COV-NM (Compostos Orgânicos Voláteis, não-Metânicos), Óxidos de Nitrogênio foram predominantes no perfil de contribuição do método ReCiPe.



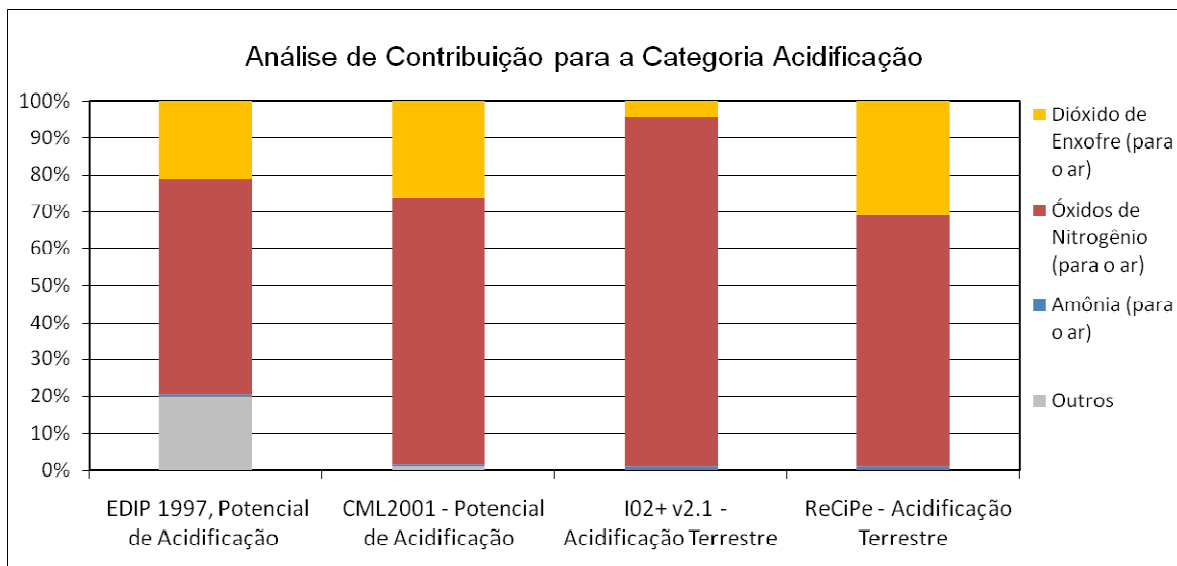
**Figura 71: Análise de Contribuição da categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

Os resultados para Acidificação (Figura 72) tiveram perfis de impacto consistentes dentre as alternativas comparadas. A parede de concreto leve apresentou-se como a alternativa de maior potencial de impacto mesmo para as melhores práticas recomendados pelo ILCD, a qual utiliza um indicador diferente para a categoria e, portanto, não foi incluída nesta análise.



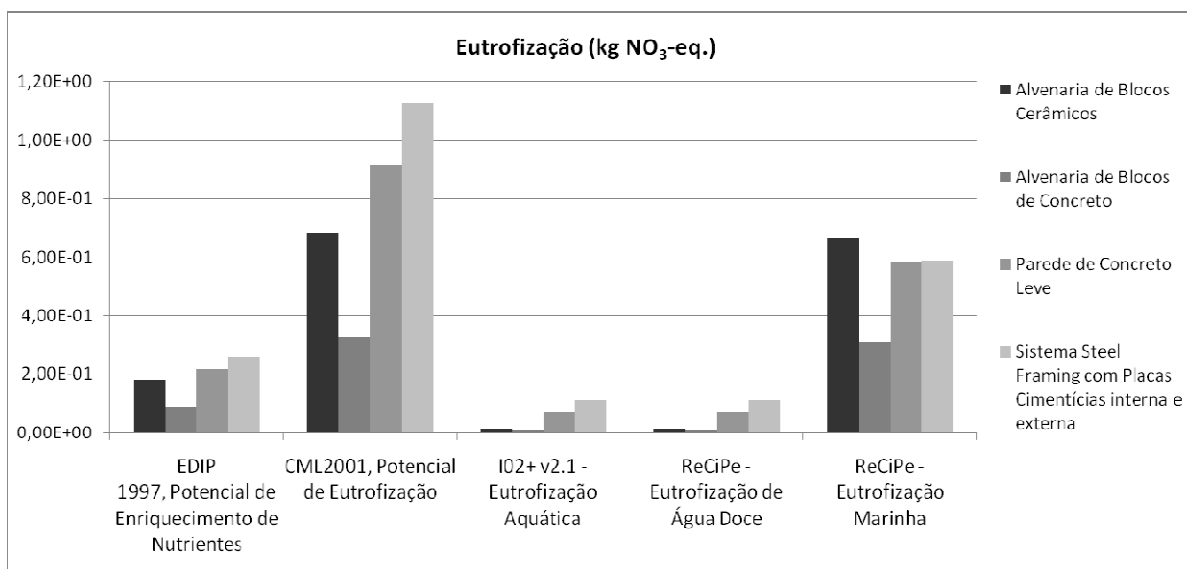
**Figura 72: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Acidificação.**

A análise de contribuição para a Categoria Acidificação (Figura 73) demonstrou-se consistente em relação às substâncias de maior significância, com maior similaridade entre resultados dos métodos EDIP, CML e ReCiPe, e algumas diferenças nos resultados do método Impacto 2002+.



**Figura 73: Análise de Contribuição da categoria Acidificação para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

Em relação à avaliação de impacto para Eutrofização, cada método utiliza uma abordagem diferente: alguns métodos apresentam uma única categoria agregada, enquanto outros dividem tal avaliação em Eutrofização Terrestre e Aquática. A avaliação de impacto para Eutrofização total, Terrestre e Aquática está apresentada na Figura 74.



**Figura 74: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Eutrofização.**

Apenas duas metodologias apresentam categorias de impacto específicas para Eutrofização Terrestre: EDIP 2003 e as melhores práticas recomendadas pelo ILCD. Tais métodos usam

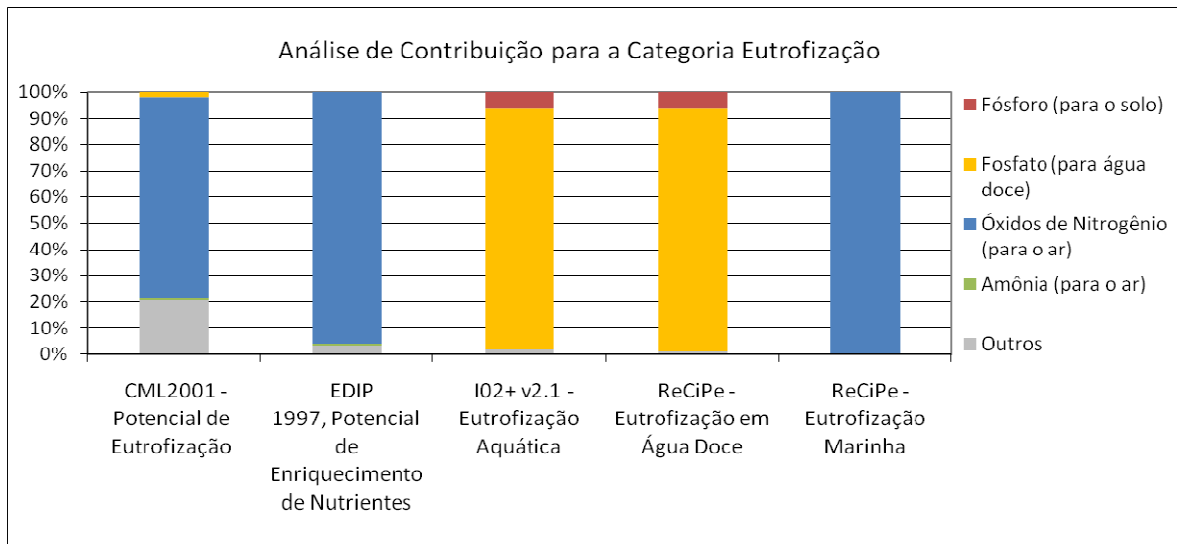
diferentes unidades e modelos de caracterização, e resultam em perfis de impacto totalmente diferentes, os quais não demonstram nenhuma consistência quando comparados e, portanto, foram excluídos desta análise.

Em relação à Eutrofização Aquática, o método Impact 2002+ utiliza uma abordagem que considera todas as reservas aquáticas em uma mesma categoria. Diferentemente, o método ReCiPe avalia Eutrofização separadamente para Água Doce e Marinha (para esta última, utiliza o mesmo indicador recomendado pelo ILCD). O ranqueamento é consistente entre os métodos EDIP, Impact 2002+ e a categoria Eutrofização em Água Doce do método ReCiPe, apresentando o sistema *steel framing* como a alternativa de maior potencial de impacto e seguindo o mesmo perfil de impacto para as demais tipologias construtivas. Entretanto, para a categoria Eutrofização Marinha do método ReCiPe os resultados foram diferentes, apontando a alvenaria de blocos cerâmicos como a alternativa de maior potencial de impacto e um ranqueamento diferente das demais tipologias de vedação. As categorias referentes a Eutrofização de Água Doce e Marinha das melhores práticas recomendadas pelo ILCD não foram apresentadas nesta análise por se utilizarem dos mesmos indicadores da metodologia ReCiPe.

Finalmente, os métodos EDIP 97 e CML 2001 utilizam uma abordagem integrada para a avaliação da Eutrofização, e apresentam resultados consistentes entre si.

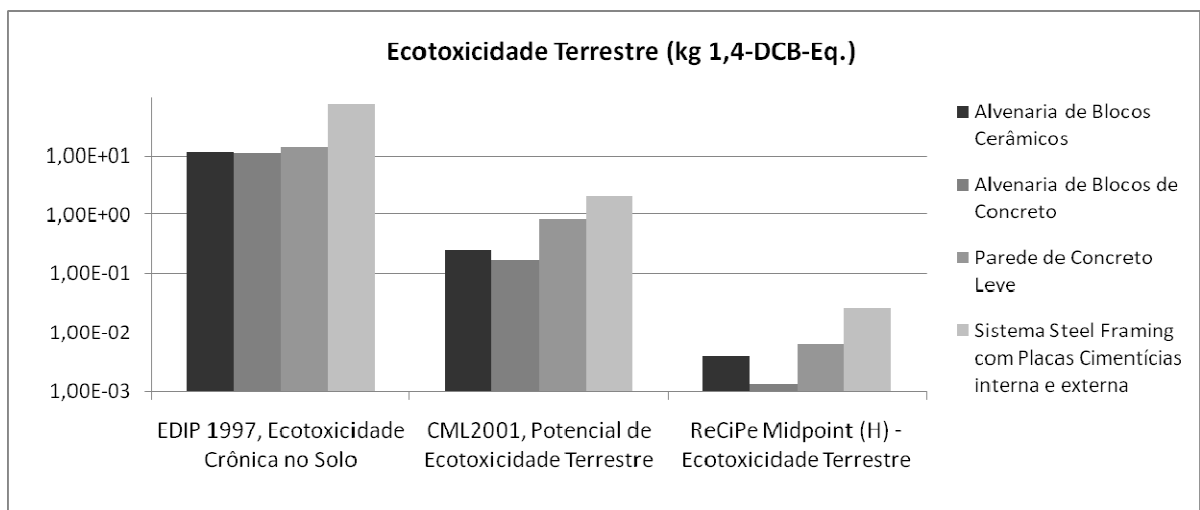
A análise de contribuição para a categoria Eutrofização (Figura 75) vem reforçar as conclusões discutidas acima.

Outra categoria a qual apresenta diversas possibilidades de subdivisão é Ecotoxicidade. A avaliação de Ecotoxicidade pode ser dividida em Terrestre e Aquática, e esta última ainda subdividida em Marinha e em Água Doce. Para as categorias de impacto relacionadas a Ecotoxicidade os gráficos estão apresentados em escala logarítmica devido à grande diferença de magnitude dos resultados.



**Figura 75: Análise de Contribuição da categoria Eutrofização para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

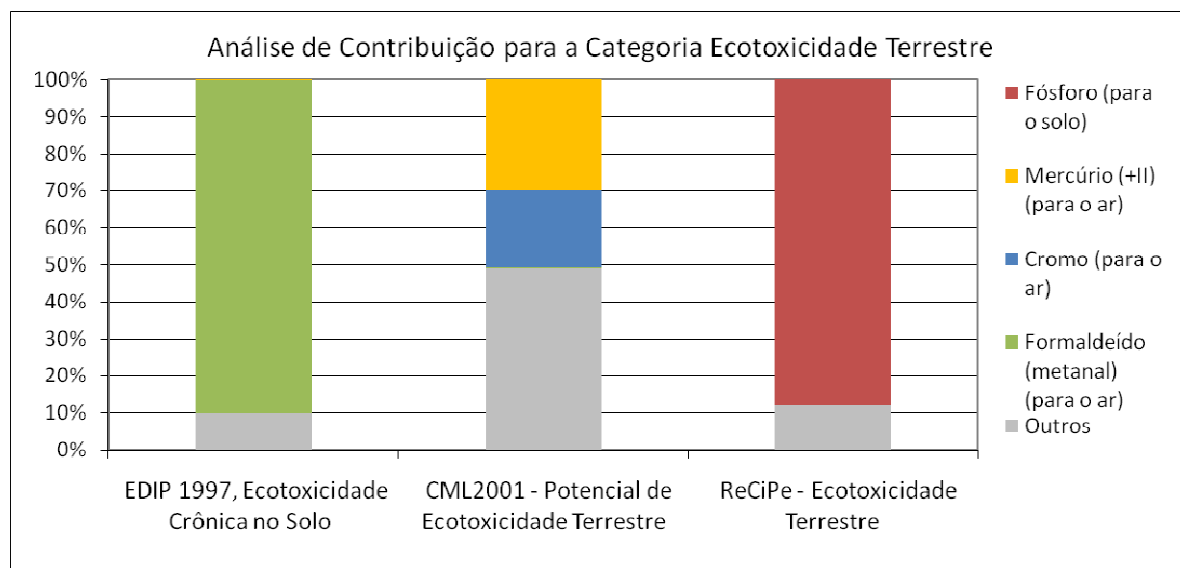
Para Ecotoxicidade Terrestre (Figura 76) apenas três métodos possuem modelos de caracterização e apresentaram perfis de impacto similares, no entanto, com grandes diferenças de magnitude. A única discrepância foi observada nos impactos das alvenarias de blocos cerâmicos e blocos de concreto, as quais mostraram resultados diferentes para cada método.



**Figura 76: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Ecotoxicidade Terrestre.**

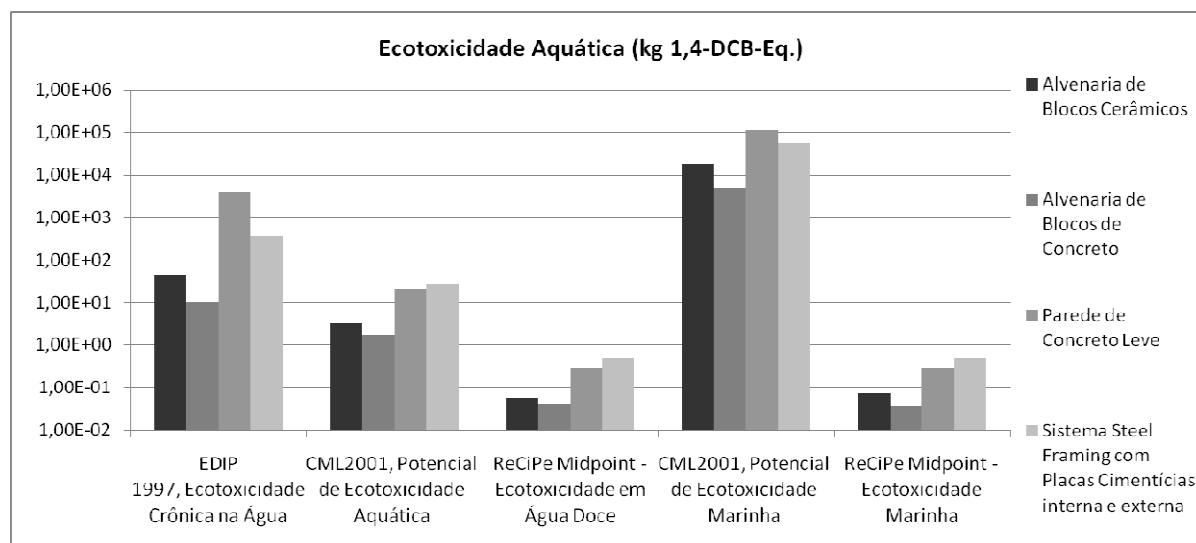
A análise de contribuição (Figura 77) mostra os vários padrões de emissões dentre os métodos, com diferentes substâncias predominantes: Formaldeído no método EDIP, Mercúrio e Cromo no CML, e emissões de Fósforo para o solo, no método ReCiPe. Dessa forma, pode-se

concluir que quaisquer similaridades nos perfis de impacto foram apenas ocasionais para este estudo de caso específico.



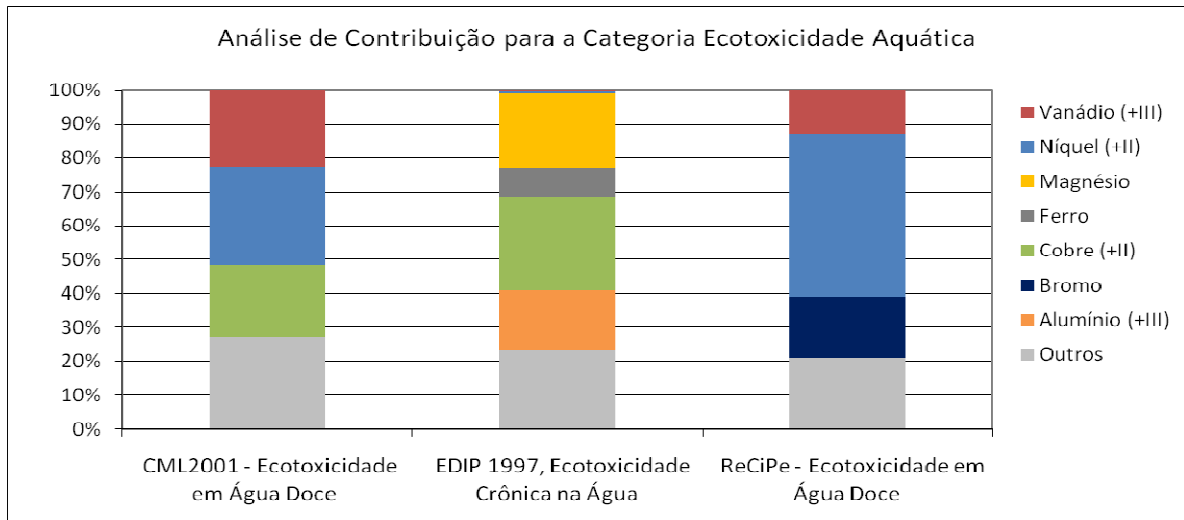
**Figura 77: Análise de Contribuição da categoria Ecotoxicidade Terrestre para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

Os resultados para Exotoxicidade de Água Doce (Figura 78) foram coerentes para os métodos CML e ReCiPe, apresentando perfil de impacto diferente apenas para o método EDIP. O mesmo não ocorreu para Ecotoxicidade Marinha, onde os valores mais discrepantes foram observados nos potenciais de impacto da parede de concreto leve, a qual variou de alternativa de maior potencial de impacto no método CML para a terceira posição no método ReCiPe.



**Figura 78: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Ecotoxicidade Aquática.**

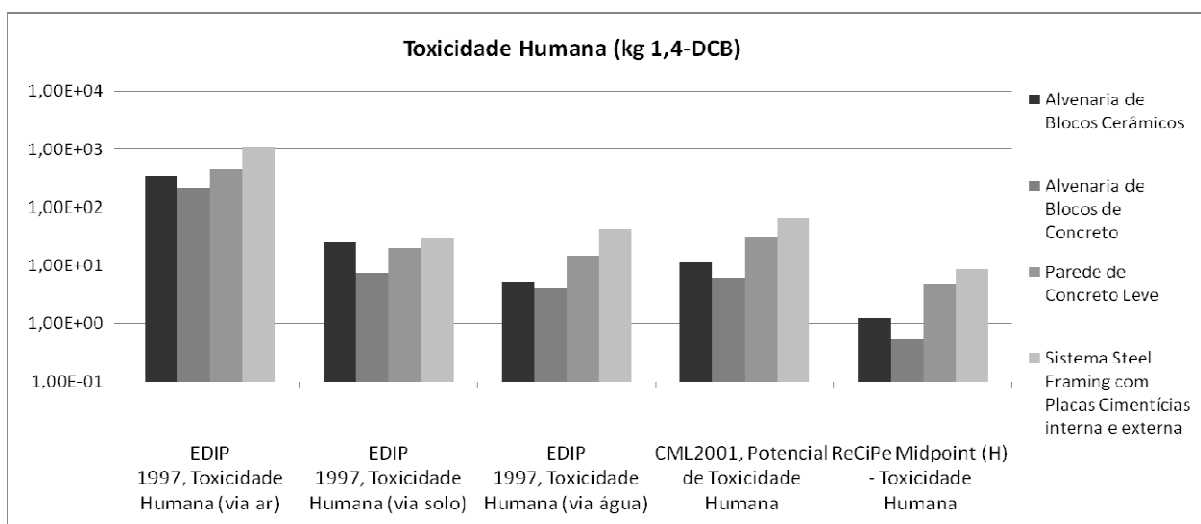
A coerência dos resultados para Ecotoxicidade de Água Doce entre os métodos CML e ReCiPe demonstrou ser apenas ocasional para este estudo específico, uma vez que as principais substâncias contribuintes mostraram ser diferentes para os métodos analisados (Figura 79).



**Figura 79: Análise de Contribuição da categoria Ecotoxicidade Aquática para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

Ecotoxicidade foi aplicada como uma única categoria de impacto integrada apenas pelo método recomendado pelo ILCD, no entanto, não há nenhum outro método, daqueles aqui estudados, que utilize o mesmo modelo de avaliação para que uma comparação seja possível.

Uma consistência significativa foi encontrada no grupo de categorias relacionadas à Toxicidade Humana, conforme apresentado na Figura 80.

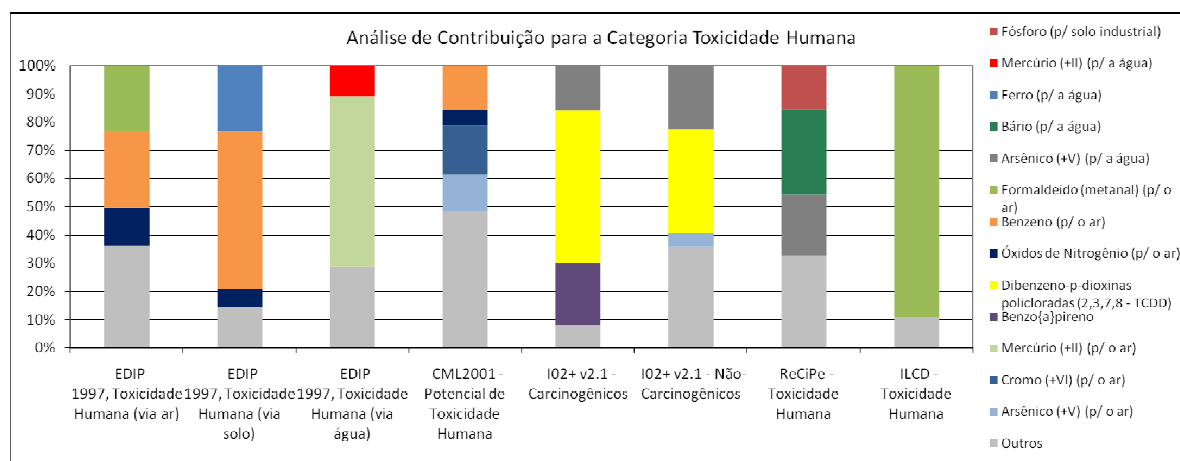


**Figura 80: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Toxicidade Humana.**



Os resultados para os três tipos de Toxicidade Humana avaliados pelo método EDIP 97 demonstraram-se coerentes com os resultados dos métodos CML e ReCiPe, a categoria Carcinogênicos do método Impact 2002+ e a recomendação do ILCD, ainda que utilizando-se de diferentes unidades. Depois da harmonização na mesma unidade, os resultados fornecidos pelos métodos EDIP, CML e ReCiPe continuaram demonstrando-se coerentes.

No entanto, a análise de contribuição (Figura 81) demonstrou, mais uma vez, que tal consistência é apenas aparente e ocasional, uma vez que as principais substâncias contribuintes variam largamente entre os métodos comparados. Cada um dos métodos de AICV avalia a Toxicidade Humana utilizando-se de uma abordagem diferente, o que leva, muito provavelmente, a resultados inconsistentes entre eles.



**Figura 81: Análise de Contribuição da categoria Toxicidade Humana para a Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

As categorias Radiação Ionizante e Formação de Partículas mostraram resultados consistentes para todos os métodos, independentemente das diferenças de unidade, levando à mesma conclusão dentre todos os métodos aplicados. Para Radiação Ionizante, os modelos de caracterização aplicados pelos vários métodos de AICV são muito similares, explicando os resultados coerentes.

Em relação à avaliação de impactos relacionados ao Uso do Solo, os perfis de impacto variaram bastante dentre os métodos, ainda que a maioria leve à mesma conclusão quanto à

alternativa com maior potencial de impacto: sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa. O único método que mostrou um resultado diferente foi o ReCiPe, em sua categoria Transformação do Solo Natural, que apontou para as paredes de concreto leve como alternativa mais impactante.

Uma diversidade ainda maior de resultados – e possíveis conclusões enganosas – foi observada na avaliação de impacto de Depleção de Recursos. Esse grupo compreende as categorias de AICV Depleção de Recursos, Abiótica, de Metais, de Recursos Fósseis e não-renováveis. Cada uma dessas categorias apresenta um modelo diferente para contabilizar a depleção de recursos pela utilização de abordagens mais amplas ou específicas.

A categoria de impacto Recursos, do método EDIP 97, é uma contabilização simples da massa de recursos (renováveis e não-renováveis) utilizados por um dado sistema do produto. Esse modelo não possui fatores de caracterização para depleção de recursos e, portanto, não pode ser comparado às categorias dos demais métodos.

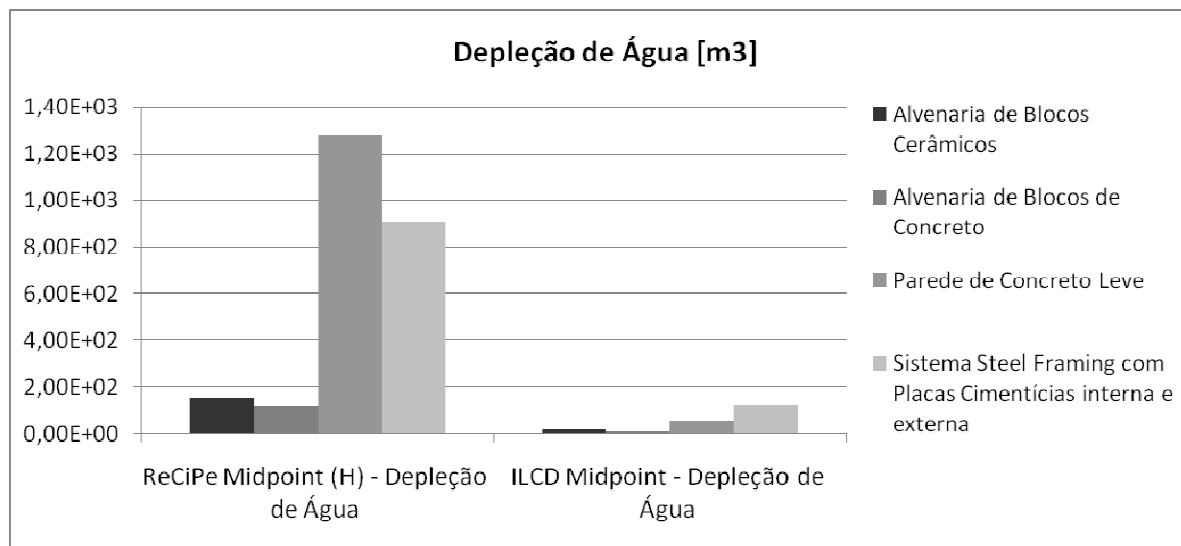
As categorias denominadas Depleção Abiótica – aplicadas no método CML e nas melhores práticas recomendadas pelo ILCD – utilizam-se do mesmo modelo de caracterização, portanto, provêm os mesmos resultados.

Extração Mineral (Impact 2002+) e Depleção de Metais (ReCiPe) também apresentaram resultados consistentes entre si para perfil de impacto e magnitudes.

Finalmente, as categorias de impacto Energia não-renovável (Impact 2002+) e Depleção de Recursos Fósseis (ReCiPe) também apresentaram o mesmo ranqueamento de potenciais de impacto para as alternativas construtivas, mas com diferentes magnitudes, devido à utilização de indicadores diversos.

Ainda que os resultados aparentem algumas inconsistências, uma análise mais profunda demonstrou que esses são perfeitamente consistentes, desde que suas especificidades sejam consideradas, conforme demonstrado na análise acima.

A última categoria de impacto analisada foi Depleção de Água (Figura 82).



**Figura 82: Resultados da AICV para a Categoria de Impacto Depleção de Água.**

Os únicos métodos que consideram a Depleção de Água independentemente são os mais recentes – ReCiPe e as melhores práticas recomendadas pelo ILCD – e, ainda que utilizem-se da mesma unidade, são baseados em modelos de caracterização diferentes, e assim, apresentam resultados bastante diversos.

Enquanto o modelo recomendado pelo ILCD aponta para o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa como a alternativa de maior potencial de impacto – com magnitudes bem próximas entre todas as alternativas construtivas comparadas –, o método ReCiPe apresenta a parede de concreto leve como a alternativa de vedação mais impactante, com grandes diferenças de magnitude dentre as opções de vedação avaliadas.

Assim, neste caso, tal discrepância nos resultados não pode ser atribuída a diferenças nas unidades e indicadores, mas na abordagem adotada pelo modelo de caracterização utilizado.

### 7.3. Avaliação de significância das categorias de impacto

Observando os resultados normalizados de AICV, pelo método ReCiPe, podemos avaliar quais as categorias que apresentam maior magnitude de potenciais de impacto para os sistemas construtivos tradicionalmente utilizados no contexto brasileiro, os quais foram abordados no estudo de caso do presente trabalho (Figura 83).

### Resultados de AICV normalizados (ReCiPe Midpoint)

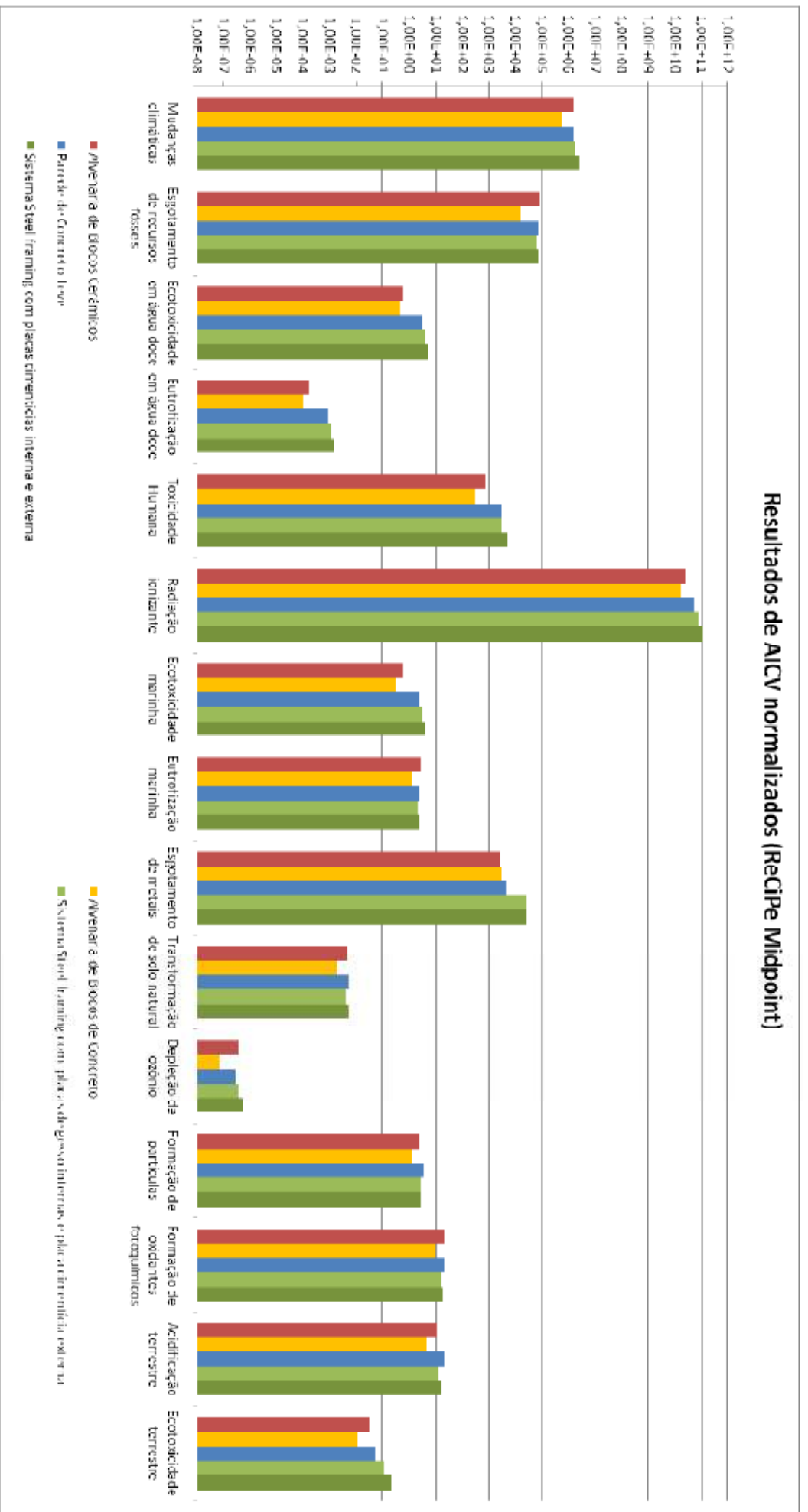


Figura 83: Resultados Normalizados de AICV pelo método ReCiPe.

As categorias que apresentaram maiores magnitudes para potencial de impacto normalizado foram respectivamente: Radiação Ionizante, Mudanças Climáticas, Esgotamento de Recursos Fósseis e Esgotamento de Metais.

Aprofundando-se nas contribuições para cada categoria específica é possível identificar quais os processos responsáveis pelas principais emissões.

No caso de Radiação Ionizante, as principais emissões contribuintes estão concentradas no processo de produção de placas sanduíche de fibrocimento e MDF, o que explica as grandes contribuições das opções de sistema *steel framing*.

O mesmo perfil de impacto e concentração de emissões se repete para a categoria mudanças climáticas. Uma vez que essas duas categorias apresentam maiores magnitudes para todas as alternativas construtivas, pode-se concluir que o processo que enraíza tais contribuições é, de fato a produção de cimento Portland, material presente em todas as cinco alternativas construtivas analisadas, em maior ou menor quantidade.

Para as categorias Esgotamento de Recursos Fósseis e Metais, as fontes de emissões de maior contribuição variam de alternativa para alternativa, dando apenas o panorama geral de que, no setor da construção civil, o consumo de energia e matérias-primas de fontes não-renováveis ainda é fator determinante para a magnitude de impacto.

No caso do Esgotamento de Recursos fósseis, o consumo de gás natural é o de maior magnitude, no ciclo de vida da alvenaria de blocos cerâmicos, enquanto para as demais alternativas, as quais têm uso massivo de cimento Portland, tal magnitude de impacto está ligada ao consumo de energia de fontes não renováveis para produção de cimento Portland e transporte de materiais.

Em relação ao Esgotamento de Metais, os principais contribuintes são os sistemas *steel framing* (os quais utilizam grandes quantidades de metais para produção de aço) e das paredes de concreto leve, as quais são moldadas em formas de alumínio.

Cabe ainda, neste momento, citar os potenciais impactos relacionados às atividades de mineração, ainda subavaliados pelos métodos de AICV correntes.

Das alternativas construtivas avaliadas no presente estudo de caso, todas são compostas majoritariamente por materiais provenientes de processos de extração por mineração, como a Argila, o Calcário e Metais de forma geral. No entanto, os impactos de tais atividades de extração são avaliados apenas de forma superficial por categorias como Esgotamento de Metais e Transformação do Solo Natural.

Essa última categoria, por exemplo, avalia a área de solo modificado por diversas atividades, inclusive as de mineração, mas não avalia as mudanças de qualidade e poluição do solo, decorrentes de tais atividades.

Uma vez que o consumo de matérias-primas obtidas por processos de mineração é predominante no setor da construção civil, a avaliação mais aprofundada de tais impactos é um ponto chave para a avaliação dos impactos desse setor. Sendo assim, esta foi considerada a maior lacuna avaliativa observada nos métodos de AICV atualmente disponíveis, e um ponto chave para futuros desenvolvimentos na área.

## CAPÍTULO 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentamos uma sumarização das principais conclusões tiradas a partir da observação dos resultados da análise de sensibilidade realizada no capítulo anterior, de forma a obter-se um fechamento dos principais resultados, conclusões e recomendações deste trabalho de doutorado.

Um ponto inicial importante a ser salientado é a necessidade de se estabelecer a interferência das incertezas inerentes aos resultados aqui obtidos. Quando elas são grandes, num dado estudo de caso, diferenças no ranqueamento das alternativas podem não ser tão significativas para discussão, uma vez que elas podem ser apenas reflexos de diferenças nas incertezas.

Os dados de inventário do Ecoinvent utilizados no estudo de caso inicial têm certamente incertezas menores do ponto de vista de variações dos processos, uma vez que são coletados para períodos de tempo mais longos (de pelo menos cinco anos) e para regiões mais vastas (contexto Europeu, de forma geral), o que dá aos resultados uma maior completeza e coesão. Por outro lado, os dados primários de inventário coletados para a análise de sensibilidade, são muito mais específicos, uma vez que coletados para empresas específicas num dado ano de forma pontual. Dessa forma, essas informações apresentam menores incertezas para o cenário específico de tais fornecedores, no entanto, as incertezas são maiores quanto ao procedimento de coleta de dados, e principalmente quando da extensão do uso de tais dados para avaliar os sistemas construtivos de uma dada região de forma mais ampla, uma vez que podem não refletir a média dos processos de tal contexto geográfico.

Sendo assim, dados específicos são mais apropriados, e contém menos incerteza, quando aplicados a estudos direcionados apenas a uma dada empresa, fornecedora de um produto específico. Quando o objetivo é a ampliação do escopo de aplicação de tais dados, tornando-os reproduzíveis para o mesmo processo produtivo em diferentes empresas ou regiões, a prática mais

recomendada é a da coleta de dados médios para um período de tempo mais extenso (aproximadamente cinco anos) e para um escopo geográfico mais amplo, o qual englobe todas as diferentes regiões onde tais dados são passíveis de serem aplicados.

A análise de sensibilidade apresentou resultados discrepantes quando comparando as diferentes fontes de dados na avaliação *endpoint*, onde a alvenaria de blocos cerâmicos apresentou-se como a alternativa mais impactante no estudo de caso baseado em dados secundários, seguida pelo sistema *steel framing* e paredes de concreto leve, enquanto que, no estudo com o uso de dados primários observou-se uma variação desse perfil ambiental, com o sistema *steel framing* com placas cimentícias interna e externa aparecendo como a alternativa mais impactante, seguido das paredes de concreto leve e da alvenaria de blocos cerâmicos.

Mudanças significativas de ranqueamento de perfis ambientais foram observadas nas categorias de impacto *midpoint* Mudanças Climáticas, Ocupação de Solo Industrial, Esgotamento de Recursos Fósseis, Eutrofização Marinha e Ecotoxicidade Terrestre. Tais variações levam a conclusões totalmente diferentes sobre os perfis ambientais das alternativas comparadas, constituindo um ponto de grande sensibilidade do estudo.

Por outro lado, as categorias Radiação Ionizante, Ocupação do Solo Agrícola, Esgotamento de Metais, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade de Água Doce, Exotoxicidade Marinha, Eutrofização em Água Doce, Esgotamento de Água, Formação de Partículas, Formação de Oxidantes Fotoquímicos e Acidificação Terrestre, apresentaram poucas ou nenhuma alteração no ranqueamento das alternativas, apresentando coerência com os resultados do estudo de caso inicial. Entretanto, mesmo para essas categorias, em sua maioria, foram observadas grandes variações de magnitude de impacto, as quais apontam para também grande sensibilidade dos resultados a tais fontes de dados, a qual pode levar, em diferentes casos, a resultados enganosos.

Dessa forma, pode-se concluir, a partir dos resultados obtidos de variações de fontes de dados, que este é um ponto de grande sensibilidade nos resultados de um estudo de ACV. Ainda que o escopo tecnológico tenha sido mantido integralmente para a coleta de dados, e o escopo



temporal tenha sido muito próximo entre os dois estudos de caso, a alteração do escopo geográfico demonstrou uma forte sensibilidade nos resultados finais, os quais sofreram alterações significativas de magnitude.

Na análise de sensibilidade ao uso de diferentes métodos de AICV, uma grande sensibilidade também foi observada nos resultados. Todas as observações e comparações realizadas levaram em conta principalmente o ponto de vista do tomador de decisão, e não consideraram de forma mais aprofundada as diferenças intrínsecas aos modelos de caracterização.

Em relação à AICV *midpoint*, o ranqueamento das alternativas comparadas mostrou-se completamente consistente em todos os métodos para as seguintes categorias de impacto: Eutrofização, Ecotoxicidade Aquática e de Água Doce, Radiação Ionizante, Formação de Material Particulado e Depleção de Recursos. Neste último caso, apenas quando comparando apenas categorias com abordagens específicas consistentes entre si.

Algumas categorias como Mudanças Climáticas, Ecotoxicidade Terrestre, Toxicidade Humana (com exceção da categoria Não-carcinogênicos, do método Impact 2002+) e Uso do Solo (com exceção da categoria Transformação do Solo Natural, do método ReCiPe) apresentaram resultados parcialmente consistentes, apontando para a mesma alternativa como a de maior potencial de impacto, mas com algumas pequenas diferenças nos perfis de impacto das demais alternativas construtivas. Tais resultados podem ser considerados como parcialmente consistentes para o presente estudo de caso, no entanto, tal consistência pode ser considerada ocasional, uma vez que tais diferenças de ranqueamento apontam para inconsistências intrínsecas aos modelos de caracterização aplicados, como demonstrou a análise de contribuição.

Outras categorias, como Depleção de Ozônio e Formação de Oxidantes Fotoquímicos, apresentaram resultados totalmente discrepantes. Foi claramente notável para essas categorias que os perfis de impacto dos métodos mais antigos mostraram-se diferentes dos mais recentemente desenvolvidos.

Algumas categorias como Acidificação, Eutrofização Terrestre e Aquática, Ecotoxicidade Marinha e Depleção de Água, apresentaram resultados substancialmente inconsistentes, sem o estabelecimento de nenhum padrão de comportamento entre os métodos mais antigos ou atuais.

Poucas diferenças de ranqueamento foram encontradas entre os métodos. Para algumas categorias de impacto, como acidificação, isso era esperado, mas para outras, tal observação é bastante surpreendente considerando-se as grandes diferenças encontradas nas análises de contribuição. Tais resultados e considerações foram impactantes na sensibilidade á escolha do método de AICV e levam à necessidade por recomendações globais sobre as melhores práticas relacionadas a tal escolha durante a definição de escopo.

Finalmente, na análise das categorias de impacto de maior significância de impactos para os sistemas construtivos estudados, as que apresentaram maiores magnitudes para potencial de impacto normalizado foram respectivamente, Radiação Ionizante, Mudanças Climáticas, Esgotamento de Recursos Fósseis e Esgotamento de Metais.

Além disso, observou-se que os potenciais de impacto relacionados às atividades de mineração, ainda encontram-se subavaliados pelos métodos de AICV estudados, uma vez que os impactos decorrentes das atividades de extração de minerais são avaliados apenas de forma superficial por categorias como Esgotamento de Metais e Transformação do Solo Natural.

Uma vez que, das alternativas construtivas avaliadas no presente estudo de caso, todas são compostas majoritariamente por materiais provenientes de processos de extração por mineração, concluiu-se que a avaliação mais aprofundada de tais impactos é um ponto chave para a avaliação dos impactos desse setor, e esta foi considerada a maior lacuna avaliativa nos métodos de AICV atualmente disponíveis, e um ponto chave para futuros desenvolvimentos na área.

Assim, os resultados obtidos e discutidos neste trabalho de doutorado levam à conclusão de que o escopo geográfico das fontes de dados, assim como as possibilidades de escolha entre diferentes metodologias de AICV constituem pontos de grande sensibilidade dos estudos de ACV,

os quais devem ser detalhadamente avaliados e descritos, de forma a se evitar resultados enganosos.

Os impactos da sensibilidade às fontes de dados podem ser minimizados sempre pela detalhada descrição das fontes e escopo dos dados utilizados em um estudo, de forma que o tomador de decisão tenha total dimensão das especificidades dos resultados que tem em mãos. Além disso, quanto mais abrangente a coleta de dados para um determinado escopo geográfico e temporal, menores as incertezas e, portanto, menor a sensibilidade dos resultados do estudo ao uso de tais dados.

Por outro lado, em relação à escolha do método de AICV, a recomendação é sempre pela escolha do método que apresente melhor representatividade geográfica e temporal em relação ao escopo do estudo em questão. Para estudos realizados no Brasil, onde ainda não se dispõe de métodos específicos ao escopo geográfico local, a recomendação é pela realização da AICV por diferentes métodos, de forma que a sensibilidade dos resultados do estudo a tal escolha fique clara para o tomador de decisão que for deles utilizar-se.

Finalmente, o desenvolvimento de categorias direcionadas especificamente aos impactos das atividades de mineração apresentou-se como a principal demanda para futuros desenvolvimentos no campo da AICV direcionada à avaliação de sistemas construtivos tradicionais de forma geral, por se tratar de um ponto de grande sensibilidade, e ainda muito pouco explorado dentro dos métodos de AICV e seus modelos de caracterização.

Uma questão importante levantada nesta pesquisa foi a das possibilidades e limitações de integração da metodologia de ACV nos sistemas de certificação ambiental de edificações. Concluiu-se que, apesar de a metodologia se apresentar como a mais completa para avaliação ambiental quantitativa de materiais e sistemas construtivos, a sua complexidade de aplicação acaba se apresentando como um fator limitante. Tal complexidade é inerente ao conceito avaliativo da metodologia, mas acaba por se agravar devido à falta de dados de inventário disponíveis, assim como de um consenso sobre as melhores práticas em AICV.

As metodologias de AICV atualmente disponíveis direcionam-se a contextos de aplicação ainda limitados e apresentam métodos de caracterização divergentes entre si – como observado na análise de sensibilidade desenvolvida neste trabalho – dificultando a escolha prática da metodologia mais adequada a um determinado estudo.

Adicionalmente à complexidade e grande demanda de tempo, a execução de um estudo de ACV também requer o envolvimento de equipe multidisciplinar, com profissionais especializados na execução desse tipo de estudo, devido à necessidade de conhecimentos específicos sobre os protocolos de aplicação da metodologia, utilização de softwares e bancos de dados, caracterização de impacto de substâncias, etc.

As implicações aqui descritas acabam por limitar a aplicação da ACV, por sua complexidade e demanda de tempo para execução do estudo, não apenas nos processos de certificação ambiental, assim como também para a escolha de materiais e sistemas construtivos na etapa de projeto do edifício.

Dessa forma, as sugestões para continuidade deste trabalho de pesquisa se dividem em duas linhas principais: a primeira, ligada à coleta de dados nacionais para os processos no ciclo de vida de componentes construtivos, e, a segunda, ao desenvolvimento de modelos de caracterização de AICV dedicados ao contexto brasileiro.

Neste trabalho, encontrou-se grande dificuldade na obtenção de dados primários a partir das empresas do setor, no entanto, tais dados, coletados de forma mais abrangente possível, são de suma importância para a obtenção de resultados confiáveis para tomada de decisão pautada no contexto geográfico nacional. Dessa forma, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas com foco na coleta e tratamento de dados primários para os processos dentro do ciclo de vida dos principais sistemas construtivos de emprego tradicional no cenário brasileiro, de forma a estabelecer-se um banco de dados nacionais completo, confiável e com poucas incertezas.

Com relação ao desenvolvimento de modelos de caracterização de AICV direcionados ao contexto brasileiro, a sugestão desse trabalho é que tais modelos sejam parte dos esforços para

desenvolvimento da metodologia Impact World +. Tal método dispõe de um módulo de avaliação voltado à América Latina, no qual podem ser implementados dados para contextos regionais específicos, de forma a tornar a avaliação de impacto o mais direcionada possível. Sendo assim, o desenvolvimento de modelos de caracterização baseados nas características ambientais brasileiras, tendo-se como base a estrutura já desenvolvida pela equipe de pesquisadores do Impact World +, poderia resultar num módulo de AICV muito mais específico, conferindo mais confiabilidades aos resultados de estudos de ACV de produtos brasileiros, e diminuindo significativamente as incertezas inerentes a seus resultados.



## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Reciclagem no Brasil**. 2011. Disponível em:  
<http://www.abal.org.br/reciclagem/brasil.asp>.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). **Norme NF P01-010** - Qualité environnementale des produits de construction, Déclaration des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction et de leur contribution aux impacts environnementaux d'un ouvrage donné. Paris, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681** – Ações e Segurança nas Estruturas. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_ **NBR 10151** – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- \_\_\_\_\_ **NBR 10152** – Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_ **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_ **NBR 15575-4** – Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_ **NBR ISO 14040** – Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- \_\_\_\_\_ **NBR ISO 14044** – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- BARE, J.C.; NORRIS, G.A.; PENNINGTON, D.W.; MCKONE, T. **TRACI**: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology* 6(3), pp. 49-78. 2003.
- BUENO, C.; ROSSIGNOLO, J. A.; FIORELLI, J.; SAVASTANO, H. **Avaliação de Desempenho Ambiental de Edificações Habitacionais**: Apresentação de Metodologia para Análise Comparativa de

- Sistemas de Certificação no Contexto Brasileiro. In: IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS, v. 1. p. 1-10. Vitória, 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, vol. 44, pp. 2510–2520. 2009.
- BYGGERIETS EVALUERINGS CENTER. **Afprøvning af certificeringsordninger til måling af bæredygtighed i byggeri** (Testing certification systems for sustainable buildings), 9 -10. 2010.
- CANEGHEM, J. V.; BLOCK, C.; VANDECASTEELE, C. **Assessment of the impact on human health of industrial emissions to air: Does the result depend on the applied method?** Journal of Hazardous Materials, 184:788 –797. 2010.
- CAVALLET, O.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. **Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods.** International Journal of Life Cycle Assessment 18: 647-658. 2012.
- DREYER, L. C.; NIEMANN, A. L.; HAUSCHILD, M. Z. **Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 e does it matter which one you choose?** International Journal of Life Cycle Assessment 8:191 – 200. 2003.
- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). **Directive européenne sur les produits de construction et documents interprétatifs.** Cahier du CSTB, (Paris: CSTB), 1994.
- CHEVALIER, J.L.; LE TENO, J.F. **Requirements for an LCA-based model for the evaluation of the environmental quality of building products.** Building and Environment, vol. 31(5), pp. 487–91. 1996.
- COLE, R. J.; LARSSON, N. **Green Building Challenge 2002: GBTool User Manual.** 2002.
- DE SCHRUYVER, A. M.; BRAKKEE, K. W.; GOEDKOOP, M. J.; HUIJBREGTS, M. A. J. **Characterization Factors for Global Warming in Life Cycle Assessment Based on Damages to Humans and Ecosystems.** Environmental Science and Technology 43 (6), 1689–1695. 2009.



ERLANDSSON, M.; BORG, M. **Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services** — today practice and development needs. *Building and Environment*, vol. 38, pp. 919 – 938. 2003.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE OF THE (EC-JRC). **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. 2010a.

\_\_\_\_\_ **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Analysis of existing Environmental Impact Assessment Methodologies for use in Life Cycle Assessment** – Background document. 2010b.

EUROPEAN PLATFORM ON LIFE CYCLE ASSESSMENT (EPLCA). **List of tools: Internet site developed by the European Commission**. Direction Generale. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability, 2010. Disponível em <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/toolList.vm>. Acessado em 01.abr.2013.

FRANKE, C. **Ciclo de vida de produtos**. Trabalho desenvolvido entre a Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin) e o Grupo de Adequação Ambiental em Manufatura (AMA). Disponível em <http://www.numa.org.br>, 2004.

FRISCHKNECHT, T.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.J.; DOKA, G.; DONES, R. and HECK, T. et al. **The Ecoinvent Database: overview and methodological framingwork**. *International Journal of Life Cycle Assessment* 10:3–9. 2005.

FRISCHKNECHT, T.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.J.; et al. **Implementation of life cycle impact assessment methods, Ecoinvent report No.3**. Swiss Center for Life Cycle Inventories. 2007.

FUNDAÇÃO CARLOS ALBERTO VANZOLINI (FCAV). **Referencial Técnico de Certificação: Edifícios do Setor de Serviços – Processo AQUA**. Disponível em: <http://www.geaconstruction.com/arquivos/HQE%20FCAV%202007%20%20Completo%2015%2010%2007%20v21%20sem%20revisões%20-rm2-ca..pdf>. Acessado em: 11.set.2013.

- GALDIANO, G. P. **Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.
- GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA. **Eco-indicator 99**, a damage-oriented method for lifecycle Impact assessment, methodology report. 2000.
- GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008** - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Available at: <http://lcia.wik.is>. 2008.
- GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A.; VAN OERS, L.; SLEESWIJK, A. W.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; DE BRUIJN, J.A.; VAN DUIN, R.; HUIJBREGTS, M.A.J. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 2002.
- GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A. **Life cycle primary energy analysis of residential buildings**. Energy and Buildings, vol. 42 (2). 2010.
- HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. **A critical review of building environmental assessment tools**. Environmental Impact Assessment Review 28:469–82. 2008.
- HANS, J.; CHORIER, J.; CHEVALIER, J. L.; LUPICA, S. **French national service life information platform**. 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul - Turkey, May 11-14th, 2008.
- HAUSCHILD, M.Z.; GOEDKOOP, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; SCHRYVER, A.; HUMBERT, S.; LAURENTE, A.; SALA, S.; PANT, R. **Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment**. The International Journal of Life Cycle Assessment. Setembro, 2012.
- IMPACT WORLD +. **IMPACT WORLD +**: Presentation. Disponível em: <http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php>. Acessado em: 19.out.2012.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Metodologia Padrão para Elaboração de Inventários de Ciclo de Vida da Indústria Brasileira** – Documento Consolidado. Projeto “SICV Brasil – Sistema de Inventários do Ciclo de Vida Brasil”. Abril, 2009.
- IKP, PE. **GaBi 4: Software-System and Databases for Life Cycle Engineering**. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen 1992-2002.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO TR 14049** - Technical report - analyse du cycle de vie: exemples d’application de l’ISO 14040 traitant de la définition de l’objectif et du champ d’étude de l’inventaire. 45 p. Genebra, Suíça, 2000.
- \_\_\_\_\_ **ISO TS 14048** - Technical specification – LCA: data documentation format. 40 p. Genebra, Suíça, 2002.
- \_\_\_\_\_ **ISO TR 14047** - Technical report environmental management - Life cycle impact assessment: examples of application of ISO 14042. 87 p. Genebra, Suíça, 2003.
- ITSUBO, N.; SAKAGAMI, M.; WASHIDA, T.; KOKUBU, K.; INABA, A. **Weighting Across Safeguard Subjects for LCIA through the Application of Conjoint Analysis**, International Journal of LCA, 9 (3) pp. 196-205. 2004.
- JOHN, V.M.; OLIVEIRA, D.P.; AGOPYAN, V.. **Critérios de sustentabilidade para seleção de materiais e componentes** - uma perspectiva de sustentabilidade para países em desenvolvimento. Journal of Building Environment, 2006.
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAVET, J., REBITZER, G.; ROSEMBAUM, R. **IMPACT 2002+**: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int J. of LCA 8 (6) 324-330. 2003.
- KEMNA, R.; VAN ELBURG, M.; LI, W.; VAN HOLSTEIN, R. **MEEuP** – The methodology Report. EC, Brussels. Delft, 2005.
- KULAY, L.A.; HANSEN, A. P.; SILVA, G. A. **Invetário do ciclo de vida de porcelanato esmaltado obtido via rota úmida de processamento**. Anais do 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em Produtos e Serviços. Florianópolis. Novembro, 2010.

- LEMAIRE, S.; CHEVALIER, J.; GUARRACINO, G.; HUMBERT, H. **Using the French EPDs to compare and to choose building products.** CIB World Building Congress 2007: Construction for Development, Cape Town, 21-25 May 2007.
- MULLER-WENK, R. **The Ecoscarcity Method as a Valuation Instrument within the SETAC - Framingwork,** in: Udo de Haes/Jensen/Klöpffer/Lindfors (Ed.): Integrating Impact Assessment into LCA, SETAC-Europe, Brussels 1994, p. 115-120.
- NIBEL, S.; LUETZKENDORF, T.; KNAPEN, M.; BOONSTRA, C.; MOFFAT, S. **Annex 31: energy related environmental impact of buildings, technical synthesis report.** International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iisbe.org/annex31/index.html>. 2005.
- OMETTO, A. R. **Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia.** Tese de Doutorado. Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005.
- PANT, R.; VAN HOOFF, G.; SCHOWANEK, D.; FEIJTEL, T. C. J.; DE KONING, A.; HAUSCHILD, M.; PENNINGTON, D. W.; OLSEN, S. I.; ROSENBAUM, R. **Comparison between three different LCIA methods for aquatic ecotoxicity and a product environmental risk assessment e insights from a detergent case study within OMNIITOX.** International Journal of Life Cycle Assessment 9:295 – 306. 2004.
- PATRICIO, R. M. R.; GOUVINHAS, R. P. **Avaliação de Desempenho Ambiental em Edificações:** Diretrizes para o Desenvolvimento de uma nova metodologia adaptada à realidade do Nordeste. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável/10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. 10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004.
- PIZZOL, M.; CHRISTENSEN, P.; SCHMIDT, J. H.; THOMSEN, M. **Impacts of “ metals ” on human health: a comparison between nine different methodologies for life cycle impact assessment (LCIA).** Journal of Cleaner Production 19:646 – 656. 2011a.

- PIZZOL, M.; CHRISTENSEN, P.; SCHMIDT, J. H.; THOMSEN, M. **Eco-toxicological impact of “ metals ” on the aquatic and terrestrial ecosystem:** a comparison between eight different methodologies for life cycle impact assessment (LCIA). *Journal of Cleaner Production* 19:687 – 698. 2011b.
- POTTING, J.; HAUSCHILD, M. **Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology.** *Environmental News* n. 80. The Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2005.
- ROSENBAUM, R. K. **Interpretation: Uncertainty and sensitivity.** Material didático da disciplina Life Cycle Assessment of Products and Systems. Division for Quantitative Sustainability Assessment, DTU Management Engineering, Technical University of Denmark, 2012.
- ROSENBAUM, R. K.; HUIJBREGTS, M.; HENDERSON, A.; MARGNI, M.; MCKONE, T. E.; VAN DE MEENT, D.; HAUSCHILD, M. Z.; SHAKED, S.; LI, D. S.; SLONE, T. H.; GOLD, L. S.; JOLLIET, O. **USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis:** sensitivity to key chemical properties. *International Journal of Life Cycle Assessment* 16(8):710–727. 2011.
- SACHT, H. M. ; ROSSIGNOLO, J. A. **Habitações térreas e multipavimentos de interesse social: avaliação de desempenho térmico para tipologias com vedações em alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.** *PARC - Pesquisa em arquitetura e construção*, v. 1, p. 1-18, 2009.
- SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, Cresce o uso de sucata na produção de aço do país.** 2012. Disponível em: <http://sustentabilidade.sebrae.com.br/portal/site/Sustentabilidade>. Acessado em: 10.out.2012.
- SILVA, V. G. **Uso de Materiais e Sustentabilidade.** *Revista Sistemas Prediais (Online)*, julho, 2007. Disponível em <<http://www.nteditorial.com.br/revista/Materias/index.asp?RevistaID1=7&Edicao=22&id=200&TopicoID=318>>. Acessado em: 10.ago.2009.
- SKOPEK, J.; BRYAN, H. **Green Globes:** and online assessment tool for benchmarking building performance. Canadá, 2002.

- SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. **Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida.** Ambiente Construído: Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 83-94, abr./jun. 2004.
- SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **Avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil.** Coletânea Habitare - vol. 7 - Construção e Meio Ambiente. Porto Alegre, 2006.
- STEEN, B. **A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development Version 2000** – General System Characteristics. Chalmers University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and material Systems (CPM) Report 1999:4, Gothenburg, 1999.
- UDO DE HAES, H. A. **Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice.** Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). ISBN 1-880611-54-6, 2002.
- US GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). **LEED (Leadership and Energy & Environmental Design): Green Building Rating System – Version 3.** Janeiro, 2009.
- VERBEECK, G.; HENS, H. **Life cycle inventory of buildings: A calculation method.** Building and Environment, vol. 45, pp. 1037–1041. 2010a.
- VERBEECK, G.; HENS, H. **Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis.** Building and Environment, Volume 45, Issue 4. 2010b.
- WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products.** Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers. v.1 e 2. 1997.

## ANEXO A. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DE TRANSMITÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA

Todas as alternativas comparadas neste estudo tiveram sua Transmitância Térmica e Capacidade Térmica calculadas de acordo com as orientações da NBR 15220 (ABNT, 2005).

De acordo com tal norma (ABNT, 2005) a capacidade térmica de componentes pode ser determinada pela Equação A1.

### Equação A1:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

Onde:

$\lambda_i$  é a condutividade térmica do material da camada ia. ;

$R_i$  é a resistência térmica da camada ia.;

$e_i$  é a espessura da camada ia.

$c_i$  é o calor específico do material da camada ia.;

$\rho_i$  é a densidade de massa aparente do material da camada ia.

A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela Equação A2 (ABNT, 2005).

### Equação A2:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}}$$

Onde:

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$  são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela Equação A1;

$A_a, A_b, \dots, A_n$  são as áreas de cada seção.

Para o cálculo de câmaras de ar internas, como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ), a sua capacidade térmica, em componentes com câmaras de ar, pode ser desprezada (ABNT, 2005).

A transmitância térmica de componentes, é o inverso da resistência térmica total, conforme Equação A3 (ABNT, 2005).

**Equação A2:**

$$U = 1/R_T$$

Onde:

**U** é a Transmitância Térmica total;

**R<sub>T</sub>** é a resistência térmica total;

E a resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela Equação A4.

**Equação A4:**

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}$$

Onde:

**R<sub>a</sub>, R<sub>b</sub>, ... , R<sub>n</sub>** são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela **Equação A5**;

**A<sub>a</sub>, A<sub>b</sub>, ..., A<sub>n</sub>** são as áreas de cada seção.

**Equação A5:**

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn}$$

Onde:

**R<sub>t1</sub>, R<sub>t2</sub>, ..., R<sub>tn</sub>** são as resistências térmicas das camadas homogêneas, determinadas pela Equação A6;

**R<sub>ar1</sub>, R<sub>ar2</sub>, ... , R<sub>arn</sub>** são as resistências térmicas das n câmaras de ar, cujos valores estão determinados na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

**Equação A6:**

$$R = e/\lambda$$

Onde:



$R$  é a resistência térmica do material;

$\lambda$  é a condutividade térmica do material;

$e$  é a espessura do material.

De acordo com os procedimentos de cálculo descritos acima, os valores utilizados para cálculo da capacidade e transmitância térmicas de cada uma das alternativas de vedação não estrutural analisadas no estudo de caso estão apresentados nas Tabelas A1, A2, A3, A4 e A5.

**Tabela A1: Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Alvenaria de Blocos Cerâmicos.**

$\rho_{\text{cerâmica}}$	1600 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{cerâmica}}$	0,90 W/(m.K)
$C_{\text{cerâmica}}$	0,92 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{argamassa}} = \rho_{\text{reboco}}$	2000 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{argamassa}} = \lambda_{\text{reboco}}$	1,15 W/(m.K)
$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}}$	1,00 kJ/(kg.K)

**Tabela A2: Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Alvenaria de Blocos de Concreto.**

$\rho_{\text{concreto}}$	2400 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{concreto}}$	1,75 W/(m.K)
$C_{\text{concreto}}$	1,00 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{argamassa}} = \rho_{\text{reboco}}$	2000 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{argamassa}} = \lambda_{\text{reboco}}$	1,15 W/(m.K)
$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}}$	1,00 kJ/(kg.K)

**Tabela A3: Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas da Parede de Concreto Leve.**

$\rho_{\text{concreto leve}}$	1400 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{concreto}}$	0,46W/(m.K)
$C_{\text{concreto}}$	1,00 kJ/(kg.K)

**Tabela A4: Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas do Sistema *Steel Framing* com placas de gesso acartonado internas e placas cimentícias externas.**

$\rho_{\text{gesso}}$	750-1000 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{gesso}}$	0,35 W/(m.K)
$C_{\text{gesso}}$	0,84 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{aço}}$	7800 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{aço}}$	55 W/(m.K)
$C_{\text{aço}}$	0,45 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{fibrocimento}}$	1700 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{fibrocimento}}$	0,65 W/(m.K)
$C_{\text{fibrocimento}}$	0,84 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{MDF}}$	550 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{MDF}}$	0,15 W/(m.K)
$C_{\text{MDF}}$	2,30 kJ/(kg.K)

**Tabela A5: Valores utilizados para cálculo da Capacidade e Transmitância Térmicas do Sistema *Steel Framing* com placas cimentícias interna e externa.**

$\rho_{\text{aço}}$	7800 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{aço}}$	55 W/(m.K)
$C_{\text{aço}}$	0,45 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{fibrocimento}}$	1700 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{fibrocimento}}$	0,65 W/(m.K)
$C_{\text{fibrocimento}}$	0,84 kJ/(kg.K)
$\rho_{\text{MDF}}$	550 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{\text{MDF}}$	0,15 W/(m.K)
$C_{\text{MDF}}$	2,30 kJ/(kg.K)

## ANEXO B. INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA DOS PRINCIPAIS FLUXOS BASEADOS EM DADOS

## SECUNDÁRIOS

Tabela B1: Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Alvenaria de Blocos

## Cerâmicos

	Fluxos (kg)					
	Total no Ciclo de Vida	Produção de Blocos Cerâmicos	Produção de Argamassa	Transporte (Caminhão)	Disposição final de Blocos Cerâmicos	Disposição final de Argamassa
<b>Recursos</b>						
<b>Recursos energéticos não-renováveis</b>						
Petróleo	9,74E+00	6,07E+00	1,08E+00	1,46E+00	5,22E-01	4,70E-01
Carvão	6,11E+00	4,87E+00	1,01E+00			
Lenhite	9,34E+00	9,00E+00	2,05E-01			
Gás Natural	2,83E+01	2,79E+01				
<b>Elementos não-renováveis</b>						
Argila	1,21E+02	1,14E+02	6,71E+00			
Calcário	2,06E+01	2,58E+00	1,78E+01			
Agregado natural	1,03E+02	5,62E+00	7,22E+01	4,82E+00	1,10E+01	9,55E+00
<b>Recursos renováveis</b>						
Água	1,16E+03	8,83E+02	1,99E+02	3,78E+01	2,28E+01	2,00E+01
Dióxido de Carbono	1,78E+00	8,67E-01	8,92E-01			
<b>Emissões para o ar</b>						
Arsênico (+V)	3,10E-06	2,25E-06	5,50E-07	2,18E-07	3,94E-08	3,49E-08
Cromo (+VI)	4,17E-07	3,37E-07	5,71E-08	1,32E-08	5,00E-09	4,57E-09
Cromo	1,75E-05	1,42E-05	2,07E-06	7,71E-07	2,47E-07	2,25E-07
Cobre (+II)	3,79E-05	1,77E-05	1,25E-05	6,18E-06	8,47E-07	7,63E-07
Mercúrio (+II)	2,64E-06	1,76E-06	6,20E-07	1,88E-07	4,01E-08	3,60E-08
Zinco (+II)	4,90E-05	2,43E-05	1,54E-05	7,25E-06	1,07E-06	9,56E-07
Amônia	1,21E-03	5,73E-04	5,20E-04	7,84E-05	1,79E-05	1,61E-05
Monóxido de Carbono	1,49E-01	1,16E-01	1,17E-02	1,43E-02	3,64E-03	3,36E-03
Óxidos de Nitrogênio	3,87E-01	2,91E-01	2,55E-02	4,72E-02	1,18E-02	1,10E-02
Dióxido de Enxofre	9,85E-02	7,96E-02	1,03E-02	5,49E-03	1,63E-03	1,50E-03
Benzo{a}pireno	6,92E-07	6,38E-07	2,50E-08	1,51E-08	7,20E-09	6,75E-09

Halônio(1211)	1,78E-06	1,77E-06	5,08E-09	2,83E-09	6,83E-10	6,24E-10
Halônio (1301)	3,76E-07	2,13E-07	4,93E-08	6,95E-08	2,33E-08	2,08E-08
Dibenzo-p-dioxinas policloradas (2,3,7,8 - TCDD)	3,50E-11	1,39E-11	1,93E-11	1,30E-12	2,67E-13	2,41E-13
R 114 (diclorotetrafluorometano)	4,45E-07	3,91E-07	4,45E-08	7,74E-09	1,34E-09	1,19E-09
Benzeno	6,73E-04	6,19E-04	2,37E-05	2,24E-05	4,51E-06	4,03E-06
Formaldeído (metanal)	4,62E-04	1,52E-04	2,84E-05	2,48E-04	1,80E-05	1,56E-05
COV-NM	6,77E-02	5,20E-02	4,01E-03	7,38E-03	2,28E-03	2,08E-03
Metano	2,48E-01	2,24E-01	1,35E-02	6,73E-03	2,32E-03	2,05E-03
<b>Emissões para a água</b>						
Arsênio (+V)	1,79E-05	1,57E-05	1,08E-06	7,49E-07	1,63E-07	1,47E-07
Cobre (+II)	3,88E-06	2,07E-06	4,62E-07	1,11E-06	1,27E-07	1,13E-07
Ferro	1,52E-02	1,46E-02	3,53E-04	1,71E-04	4,00E-05	3,60E-05
Mercúrio (+II)	9,20E-08	7,05E-08	1,11E-08	7,46E-09	1,56E-09	1,40E-09
Níquel (+II)	4,11E-06	2,88E-06	5,40E-07	5,22E-07	8,93E-08	8,00E-08
Vanádio (+III)	3,50E-06	2,79E-06	5,26E-07	1,35E-07	2,79E-08	2,48E-08
Alumínio (+III)	1,50E-04	1,15E-04	2,73E-05	5,44E-06	1,22E-06	1,09E-06
Bário	3,64E-04	2,29E-04	3,98E-05	5,90E-05	1,90E-05	1,71E-05
Bromo	3,10E-04	1,98E-04	3,42E-05	4,84E-05	1,57E-05	1,41E-05
Magnésio (+III)	2,61E-03	1,77E-03	2,61E-04	3,61E-04	1,16E-04	1,04E-04
Fosfato	1,18E-05	7,50E-06	1,47E-06	2,17E-06	3,72E-07	3,37E-07
Sulfato	6,91E-02	6,37E-02	3,51E-03	1,32E-03	3,11E-04	2,79E-04
<b>Emissões para solo agrícola</b>						
Fósforo	5,92E-06	5,37E-06	4,27E-07	8,78E-08	1,99E-08	1,79E-08
<b>Emissões para solo industrial</b>						
Cobre (+II)	8,96E-06	7,16E-06	6,08E-07	1,02E-06	9,57E-08	8,36E-08
Zinco (+II)	4,77E-05	6,46E-06	1,80E-06	3,47E-05	2,55E-06	2,22E-06
Fósforo	2,04E-05	1,67E-05	1,03E-06	1,73E-06	5,22E-07	4,78E-07

**Tabela B2: Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Alvenaria de Blocos de Concreto**

	Fluxos (kg)					
	Total no Ciclo de Vida	Produção de Blocos de Concreto	Produção de Argamassa	Transporte (caminhão)	Disposição final de Blocos de Concreto	Disposição final de Argamassa
<b>Recursos</b>						
<b>Recursos energéticos não renováveis</b>						
Petróleo	6,37E+00	1,31E+00	1,08E+00	2,37E+00	1,07E+00	4,70E-01
Carvão	3,29E+00	1,92E+00	1,01E+00	1,60E-01		
Lenhite	9,22E-01	5,08E-01	2,05E-01			
Gás Natural	7,69E-01	2,78E-01	1,50E-01	1,30E-01		
<b>Recursos não-renováveis</b>						
Ferro	9,22E-01	5,69E-01		1,30E-01		
Argila	1,67E+01	9,88E+00	6,71E+00			
Calcário	4,40E+01	2,59E+01	1,78E+01	1,21E-01		
Agregado Natural	2,68E+02	1,57E+02	7,22E+01	7,34E+00	2,18E+01	9,55E+00
<b>Recursos renováveis</b>						
Água	6,96E+02	3,74E+02	1,99E+02	5,75E+01	4,56E+01	2,00E+01
Dióxido de Carbono	1,53E+00	6,10E-01	8,92E-01			
<b>Emissões para o ar</b>						
Arsênico (+V)	3,71E-06	2,71E-06	5,50E-07	3,31E-07	7,97E-08	3,49E-08
Cromo (+VI)	4,83E-07	3,91E-07	5,71E-08	2,01E-08	1,04E-08	4,57E-09
Cromo	1,99E-05	1,59E-05	2,07E-06	1,17E-06	5,15E-07	2,25E-07
Cobre (+II)	3,61E-05	1,17E-05	1,25E-05	9,40E-06	1,74E-06	7,62E-07
Mercúrio (+II)	2,50E-06	1,48E-06	6,20E-07	2,87E-07	8,22E-08	3,60E-08
Zinco (+II)	5,37E-05	2,42E-05	1,54E-05	1,10E-05	2,18E-06	9,56E-07
Amônia	1,97E-03	1,28E-03	5,20E-04	1,19E-04	3,67E-05	1,61E-05
Monóxido de Carbono	7,62E-02	3,17E-02	1,17E-02	2,18E-02	7,67E-03	3,36E-03
Óxidos de Nitrogênio	1,79E-01	4,57E-02	2,55E-02	7,19E-02	2,50E-02	1,10E-02
Dióxido de Enxofre	4,10E-02	1,75E-02	1,03E-02	8,35E-03	3,43E-03	1,50E-03
Benzo{a}pireno	1,37E-07	6,72E-08	2,50E-08	2,30E-08	1,54E-08	6,75E-09
Formaldeído (metanal)	4,82E-04	2,48E-05	2,84E-05	3,78E-04	3,57E-05	1,56E-05
Benzeno	1,06E-04	3,47E-05	2,37E-05	3,40E-05	9,21E-06	4,03E-06
COV-NM	2,86E-02	6,56E-03	4,01E-03	1,12E-02	4,75E-03	2,08E-03

Metano	5,21E-02	2,17E-02	1,35E-02	1,02E-02	4,68E-03	2,05E-03
Alumínio	1,10E-03	7,17E-04	2,80E-04	7,17E-05	2,01E-05	8,79E-06
Partículas (> PM10)	3,80E-02	8,47E-03	3,95E-03	2,15E-03	1,63E-02	7,12E-03
Partículas (PM2,5 -10)	2,47E-02	4,14E-03	1,44E-03	1,45E-03	1,23E-02	5,37E-03
Partículas (PM2.5)	1,48E-02	3,38E-03	1,23E-03	3,08E-03	4,97E-03	2,17E-03
<b>Emissões para a água</b>						
Arsênico (+V)	6,25E-06	3,54E-06	1,08E-06	1,14E-06	3,35E-07	1,47E-07
Cobre (+II)	3,92E-06	1,41E-06	4,62E-07	1,68E-06	2,57E-07	1,13E-07
Ferro	1,68E-03	9,44E-04	3,53E-04	2,60E-04	8,23E-05	3,60E-05
Merúrio (+II)	7,54E-08	4,84E-08	1,11E-08	1,13E-08	3,20E-09	1,40E-09
Níquel (+II)	3,76E-06	2,17E-06	5,40E-07	7,94E-07	1,83E-07	8,00E-08
Vanádio (+III)	1,44E-06	6,31E-07	5,26E-07	2,06E-07	5,66E-08	2,48E-08
Alumínio (+III)	9,27E-05	5,36E-05	2,73E-05	8,28E-06	2,48E-06	1,09E-06
Bário	2,34E-04	4,82E-05	3,98E-05	8,98E-05	3,90E-05	1,71E-05
Bromo	2,17E-04	6,31E-05	3,42E-05	7,36E-05	3,22E-05	1,41E-05
Magnésio (+III)	1,47E-03	3,14E-04	2,61E-04	5,49E-04	2,37E-04	1,04E-04
Fosfato	8,10E-06	2,23E-06	1,47E-06	3,30E-06	7,71E-07	3,37E-07
Sulfato	1,55E-02	9,05E-03	3,51E-03	2,01E-03	6,38E-04	2,79E-04
<b>Emissões para solo agrícola</b>						
Fósforo	1,29E-06	6,65E-07	4,27E-07	1,34E-07	4,09E-08	1,79E-08
<b>Emissões para solo industrial</b>						
Cobre (+II)	3,14E-06	7,11E-07	6,08E-07	1,55E-06	1,91E-07	8,36E-08
Ferro	6,53E-04	2,39E-04	1,69E-04	1,59E-04	5,98E-05	2,62E-05
Zinco (+II)	6,39E-05	2,04E-06	1,80E-06	5,28E-05	5,07E-06	2,22E-06
Fósforo	6,53E-06	1,29E-06	1,03E-06	2,64E-06	1,09E-06	4,77E-07

Tabela B3: Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida da Parede de Concreto

Leve

	Fluxos (kg)						
	Total no Ciclo de Vida	Produção de Energia Elétrica	Disposição final de Alumínio	Disposição final de Concreto	Produção de Concreto Leve	Transporte (caminhão)	Produção de Alumínio
<b>Recursos</b>							
<b>Recursos energéticos não-renováveis</b>							
Petróleo	2,20E+01			9,59E-01	1,42E+01	1,38E+00	4,90E+00
Carvão	1,08E+01				2,58E+00		7,73E+00
Lenhite	9,71E+00				1,99E+00		7,55E+00
Gás Natural	5,41E+00	5,46E-01			1,12E+00		3,48E+00
<b>Recursos não-renováveis</b>							
Alumínio	2,92E+00						2,90E+00
Ferro	1,29E+00				7,64E-01		4,76E-01
Argila	1,74E+02				1,74E+02		6,88E-01
Calcário	2,02E+01				1,87E+01		1,20E+00
Agregado natural	4,08E+01	4,07E-01	2,97E+00	1,95E+01	5,40E+00	5,17E+00	7,34E+00
Cloreto de Sódio	4,74E-01						6,14E-01
<b>Recursos renováveis</b>							
Água	2,11E+03	2,64E+01	8,99E+00	4,07E+01	4,46E+02	4,08E+01	1,55E+03
Dióxido de Carbono	2,55E+00	2,86E-01			1,52E+00		7,24E-01
<b>Emissões para o ar</b>							
Arsênico (+V)	1,33E-05	4,80E-08	3,27E-08	7,13E-08	3,22E-06	2,36E-07	9,69E-06
Cromo (+VI)	7,31E-07	1,41E-08	7,61E-09	9,33E-09	4,50E-07	1,43E-08	2,36E-07
Cromo	2,91E-05	5,89E-07	3,13E-07	4,60E-07	1,86E-05	8,36E-07	8,36E-06
Cobre (+II)	1,15E-04	2,22E-07	2,17E-07	1,56E-06	1,46E-05	6,70E-06	9,16E-05
Mercúrio (+II)	4,44E-06	3,00E-08	1,24E-08	7,34E-08	1,92E-06	2,04E-07	2,20E-06
Zinco (+II)	2,01E-04	5,91E-07	2,83E-07	1,95E-06	3,29E-05	7,86E-06	1,57E-04
Amônia	4,04E-03	5,47E-05	1,40E-05	3,28E-05	1,49E-03	8,51E-05	2,37E-03
Monóxido de Carbono	3,77E-01	1,89E-02	9,57E-04	6,90E-03	8,00E-02	1,57E-02	2,55E-01
Dióxido de Carbono	1,26E+02	2,07E+00	3,23E-01	2,22E+00	7,02E+01	5,58E+00	4,58E+01

Óxidos de Nitrogênio	3,26E-01						
Vapor	1,80E+01						1,80E+01
Dióxido de Enxofre	4,75E-01				3,14E-01		
Benzo{a}pireno	7,22E-06	2,97E-09	1,94E-09	1,38E-08	1,44E-07	1,64E-08	7,04E-06
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	2,27E-04	1,60E-07	9,47E-08	1,13E-06	2,81E-06	4,90E-07	2,22E-04
Formaldeído (metanal)	5,05E-04	1,06E-06	2,72E-06	3,19E-05	6,02E-05	2,69E-04	1,40E-04
Benzeno	3,32E-04	2,59E-06	1,73E-06	8,23E-06	1,29E-04	2,43E-05	1,66E-04
COV-NM	5,83E-02	8,77E-04	5,01E-04	4,24E-03	3,23E-02	8,00E-03	1,24E-02
Metano	1,63E-01	9,01E-03	7,22E-04	4,18E-03	6,67E-02	7,30E-03	7,49E-02
Alumínio	3,48E-03	1,11E-05	6,92E-04	1,79E-05	7,89E-04	5,11E-05	1,91E-03
<b>Partículas</b>							
> PM10	7,34E-02	2,44E-03	9,23E-05	1,45E-02	1,42E-02	1,53E-03	4,06E-02
PM2,5 -10	3,89E-02	1,66E-04	4,69E-05	1,10E-02	6,37E-03	1,04E-03	2,03E-02
PM2.5	3,91E-02	2,08E-04	1,47E-04	4,44E-03	1,58E-02	2,19E-03	1,63E-02
<b>Emissões para a água</b>							
Demanda química de oxigênio	3,55E-01						
Alumínio (+III)	1,60E+01		1,59E+01				
Sólidos em suspensão	6,73E-01						5,76E-01
Cloro	1,16E+00				6,74E-01		4,59E-01
Sódio (+I)	3,97E-01						



**Tabela B4: Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida do Sistema *Steel Framing* com placas de gesso acartonado internas e placas cimentícias externas**

	Fluxos (kg)										
	Total no Ciclo de Vida	Produção Energia Elétrica	Disposição Final de Fibrocimento	Disposição final de Aço	Disposição final de MDF	Disposição final de Gesso	Produção de Fibrocimento	Produção de Gesso Acartonado	Transporte caminhão)	Produção de placa de MDF	Produção e manufat. de Aço
<b>Recursos</b>											
<b>Recursos energéticos não-renováveis</b>											
Petróleo	1,10E+01	1,20E-01	1,47E-01	5,52E-01	1,66E-02	1,37E-01	2,42E+00	2,13E+00	9,88E-01	9,80E-01	3,40E+00
Carvão	1,34E+01	2,08E-01	4,08E-02	3,53E-02	1,17E-02	7,78E-03	2,76E+00	6,64E-01	7,02E-02	1,04E+00	8,57E+00
Lenhite	1,23E+01	0,02646	1,60E-02	2,45E-02	4,78E-03	5,22E-03	1,32E+00	1,18E+00	0,00E+00	1,59E+00	8,11E+00
Gás Natural	9,46E+00	5,46E-01	6,99E-02	3,81E-02	2,08E-02	1,34E-02	1,48E+00	7,23E-01	3,16E-02	2,20E+00	4,27E+00
<b>Elementos não-renováveis</b>											
Alumínio	6,58E-02	9,71E-05	1,70E-04	1,22E-04	3,79E-05	6,90E-05	2,77E-02	2,38E-03	1,62E-03	1,37E-02	2,00E-02
Cromo	6,36E-02	1,60E-04	2,24E-04	8,59E-05	6,86E-05	1,42E-05	4,69E-03	6,45E-04	1,15E-04	1,81E-03	5,58E-02
Cobre	4,42E-02	5,37E-05	6,13E-05	4,69E-05	1,65E-05	2,34E-05	2,22E-02	9,22E-04	4,31E-04	2,84E-03	1,76E-02
Ferro	6,37E+00	1,08E-02	3,70E-02	2,73E-02	1,03E-02	5,46E-03	9,03E-01	1,28E-01	8,89E-02	1,36E-01	5,02E+00
Manganês	7,76E-02	3,81E-05	1,90E-05	9,74E-05	2,47E-06	1,41E-05	2,65E-03	2,87E-04	5,97E-05	4,09E-04	7,41E-02
Molibdênio	8,31E-02	4,11E-05	2,02E-05	1,04E-04	2,57E-06	1,52E-05	3,15E-03	3,17E-04	6,89E-05	4,88E-04	7,89E-02
Níquel	3,08E-01	5,01E-04	8,01E-04	5,51E-04	2,33E-04	9,00E-05	2,15E-02	2,72E-03	8,32E-04	6,08E-03	2,75E-01
<b>Recursos não-renováveis</b>											
Sulfato de Bário	5,43E-02	1,33E-03	6,15E-04	2,57E-03	9,26E-05	3,89E-04	8,73E-03	9,96E-03	3,85E-03	5,14E-03	2,16E-02

Basalto	3,02E-02	2,07E-05	2,83E-05	3,59E-05	5,39E-06	2,50E-05	3,96E-03	9,31E-04	1,62E-04	1,09E-03	2,39E-02
Bentonite	8,41E-02	2,67E-04	4,93E-04	4,83E-04	1,32E-04	9,06E-05	1,24E-02	2,27E-03	1,34E-03	2,24E-03	6,44E-02
Argila	1,12E+01	1,54E-02	2,25E-02	3,25E-03	8,74E-03	1,65E-03	1,03E+01	4,91E-02	2,45E-02	1,04E-01	6,47E-01
Gesso	3,12E+01	4,65E-08	7,26E-08	6,46E-08	8,48E-09	4,52E-08	5,84E-06	3,12E+01	2,31E-07	4,64E-07	4,73E-06
Calcário	3,01E+01	4,63E-02	7,01E-02	1,49E-02	2,69E-02	4,39E-03	2,70E+01	1,45E-01	8,30E-02	1,62E-01	2,50E+00
Carbonato de Magnésio	9,46E-02	1,59E-04	5,16E-04	3,64E-04	1,47E-04	7,06E-05	2,10E-02	1,53E-03	1,17E-03	1,73E-03	6,79E-02
Agregado Natural	2,98E+01	4,06E-01	2,09E+00	3,03E+00	1,95E-01	4,22E+00	2,77E+00	3,10E+00	3,17E+00	1,87E+00	8,91E+00
Cloreto de Sódio	3,88E-01	4,17E-04	5,03E-03	9,02E-04	3,74E-03	4,05E-04	1,01E-01	1,35E-02	1,56E-02	5,90E-03	2,41E-01
TiO <sub>2</sub> , 54% em ilmenita, 2.6%	1,43E-01	1,62E-05	6,05E-04	3,41E-05	2,05E-04	1,04E-05	1,39E-01	3,84E-04	2,65E-04	2,89E-04	1,65E-03
<b>Recursos renováveis</b>											
Água	2,59E+03	2,63E+01	4,26E+01	1,19E+01	1,29E+01	7,68E+00	6,46E+02	1,50E+02	2,47E+01	2,17E+02	1,45E+03
Dióxido de Carbono	3,89E+01	2,85E-01	2,42E-03	2,66E-03	6,20E-04	7,56E-04	2,79E+00	2,31E-01	0,00E+00	3,46E+01	9,44E-01
<b>Emissões para o ar</b>											
Dióxido de Carbono	9,96E+01	2,06E+00	6,22E-01	1,68E+00	1,28E-01	2,46E-01	2,76E+01	1,05E+01	3,42E+00	9,43E+00	4,39E+01
Monóxido de Carbono	2,43E-01	1,89E-02	9,59E-03	5,83E-03	2,84E-03	7,40E-04	5,09E-02	1,05E-02	9,53E-03	1,42E-02	1,55E-01
Óxidos de Nitrogênio	2,56E-01	3,23E-03	1,50E-02	1,97E-02	4,26E-03	2,30E-03	4,88E-02	3,15E-02	3,11E-02	2,27E-02	7,72E-02
Vapor	2,91E+01	1,63E-05	1,48E-05	1,47E-05	4,15E-06	3,23E-06	1,41E-03	6,97E-04	4,66E-05	2,83E-04	2,91E+01
Dióxido de Enxofre	1,86E-01	2,80E-03	7,83E-04	2,52E-03	1,57E-04	3,51E-04	3,45E-02	1,43E-02	3,61E-03	2,06E-02	1,06E-01

COV-NM	5,88E-02	8,74E-04	2,83E-03	3,01E-03	7,69E-04	5,45E-04	2,09E-02	6,38E-03	4,85E-03	4,09E-03	1,45E-02
Metano	1,77E-01	8,98E-03	1,16E-03	1,53E-03	2,56E-04	6,96E-04	4,33E-02	1,42E-02	4,43E-03	2,10E-02	8,19E-02
Partículas											
> PM10	1,05E-01	2,43E-03	3,15E-03	3,24E-04	9,11E-05	5,87E-05	1,28E-02	3,76E-02	9,30E-04	6,35E-03	4,16E-02
PM2,5 - PM10	4,62E-02	1,65E-04	2,34E-03	1,89E-04	5,01E-05	3,51E-05	5,90E-03	1,33E-02	6,28E-04	1,42E-03	2,21E-02
PM2.5	3,48E-02	2,08E-04	1,06E-03	1,77E-03	9,91E-05	1,66E-04	4,27E-03	4,08E-03	1,33E-03	4,88E-03	1,69E-02
<b>Emissões para a água</b>											
Demanda biológica de oxigênio	2,52E-01	1,66E-03	4,14E-02	6,94E-03	3,60E-02	8,63E-04	3,78E-02	2,48E-02	9,48E-03	7,06E-03	8,62E-02
Demanda química de oxigênio	5,07E-01	1,51E-03	1,23E-01	6,01E-03	1,10E-01	6,98E-04	6,85E-02	2,30E-02	8,28E-03	7,60E-03	1,59E-01
Sólidos Dissolvidos	6,95E-02	1,48E-04	8,70E-05	1,32E-04	2,76E-05	2,66E-05	6,47E-03	4,41E-03	3,06E-04	6,02E-03	5,19E-02
Total de Carbono orgânico dissolvido	3,36E-02	4,07E-04	4,59E-04	1,70E-03	1,56E-04	2,08E-04	7,05E-03	6,03E-03	2,35E-03	1,67E-03	1,35E-02
Total de Carbono Orgânico	3,36E-02	4,08E-04	4,61E-04	1,70E-03	1,56E-04	2,09E-04	7,08E-03	6,06E-03	2,36E-03	1,68E-03	1,35E-02
Alumínio (+III)	3,31E-01	3,95E-04	2,41E-01	1,10E-04	8,90E-04	2,57E-05	9,35E-03	3,55E-03	3,28E-04	6,04E-03	6,92E-02
Cálcio (+II)	4,25E+00	4,41E-04	4,01E+00	3,42E-04	1,17E-02	8,29E-05	2,95E-02	1,26E-02	9,92E-04	2,01E-02	1,67E-01
Ferro	1,83E-01	5,95E-05	1,14E-01	5,68E-05	1,33E-04	1,47E-05	4,07E-03	3,14E-03	1,49E-04	3,06E-03	5,82E-02
Magnésio (+III)	3,79E-02	1,16E-04	2,27E-03	4,45E-05	2,01E-03	9,44E-06	3,74E-03	1,93E-03	1,19E-04	2,84E-03	2,48E-02
Sódio (+I)	2,76E-01	3,05E-03	9,28E-02	7,32E-03	7,24E-04	1,86E-03	3,12E-02	3,32E-02	1,92E-02	9,30E-03	7,70E-02
Sólidos em suspensão	7,80E-01	2,67E-03	9,82E-03	1,45E-03	1,26E-03	3,18E-04	9,41E-02	2,61E-02	4,76E-03	5,57E-02	5,84E-01

Sulfato	7,15E-01	1,67E-03	3,31E-01	5,67E-04	5,47E-03	1,33E-04	3,52E-02	1,79E-02	1,54E-03	2,61E-02	2,96E-01
Cloro	7,20E-01	1,05E-02	9,09E-03	1,57E-02	4,34E-03	3,98E-03	2,07E-01	7,92E-02	3,67E-02	3,54E-02	3,18E-01
<b>Emissões para solo agrícola</b>											
Fósforo	7,64E-05	9,97E-07	1,43E-08	2,07E-08	4,16E-09	4,81E-09	1,83E-06	6,79E-07	5,77E-08	6,60E-05	6,87E-06
Enxofre	2,10E-04	9,39E-07	3,73E-08	2,54E-08	2,01E-08	7,46E-09	2,17E-06	7,34E-07	1,79E-07	6,20E-05	1,44E-04
<b>Emissões para solo industrial</b>											
Cromo (+VI)	5,44E-05	1,59E-08	3,80E-08	4,28E-08	1,00E-08	1,59E-08	3,96E-06	1,09E-06	2,14E-07	2,00E-06	4,70E-05
Cobre (+II)	3,49E-05	1,08E-08	4,60E-08	4,30E-08	9,82E-09	2,07E-08	2,52E-06	9,45E-07	6,68E-07	1,29E-06	2,94E-05
Manganês (+II)	1,21E-05	3,09E-07	1,38E-07	6,01E-07	1,82E-08	9,39E-08	1,95E-06	2,30E-06	9,13E-07	1,06E-06	4,69E-06
Zinco (+II)	4,47E-05	1,48E-07	9,81E-07	8,92E-07	1,54E-07	4,84E-07	2,34E-06	1,19E-05	2,28E-05	1,94E-06	3,08E-06
Alumínio	3,02E-04	7,72E-06	3,46E-06	1,50E-05	4,55E-07	2,35E-06	4,88E-05	5,74E-05	2,28E-05	2,65E-05	1,17E-04
Bário	1,51E-04	3,86E-06	1,73E-06	7,52E-06	2,27E-07	1,17E-06	2,44E-05	2,87E-05	1,14E-05	1,33E-05	5,87E-05
Cálcio (+II)	1,21E-03	3,09E-05	1,38E-05	6,01E-05	1,82E-06	9,39E-06	1,95E-04	2,30E-04	9,13E-05	1,06E-04	4,69E-04
Cloro	4,95E-02	4,00E-05	3,40E-04	2,88E-04	5,36E-05	1,67E-04	8,20E-04	4,37E-03	7,99E-03	6,89E-04	3,48E-02
Fluoreto	5,19E-05	3,97E-07	1,99E-07	7,81E-07	2,95E-08	1,28E-07	5,12E-06	3,61E-06	1,29E-06	2,68E-06	3,77E-05
Magnésio (+III)	2,42E-04	6,17E-06	2,77E-06	1,20E-05	3,64E-07	1,88E-06	3,90E-05	4,59E-05	1,83E-05	2,12E-05	9,39E-05
Fósforo	1,51E-05	3,86E-07	1,73E-07	7,52E-07	2,27E-08	1,17E-07	2,44E-06	2,87E-06	1,14E-06	1,33E-06	5,87E-06
Potássio (+I)	1,06E-04	2,70E-06	1,21E-06	5,26E-06	1,59E-07	8,22E-07	1,71E-05	2,01E-05	7,99E-06	9,29E-06	4,11E-05
Sódio (+I)	2,32E-02	1,55E-05	8,04E-06	3,09E-05	1,09E-06	5,23E-06	1,06E-04	1,31E-04	7,22E-05	5,56E-05	2,28E-02
Enxofre	1,81E-04	4,63E-06	2,08E-06	9,02E-06	2,73E-07	1,41E-06	2,93E-05	3,44E-05	1,37E-05	1,59E-05	7,04E-05

Tabela B5: Inventários dos principais fluxos elementares no Ciclo de Vida do Sistema *Steel Framing* com placas cimentícias internas e externas

	Fluxos (kg)								
	Total no Ciclo de Vida	Produção de Energia Elétrica	Produção de Fibrocimento	Produção de placas de MDF	Produção e manufat. de Aço	Transporte (caminhão)	Disposição Final de Fibrocimento	Disposição final de Aço	Disposição Final de MDF
<b>Recursos</b>									
<b>Recursos energéticos não-renováveis</b>									
Petróleo	1,23E+01		4,83E+00	1,96E+00	3,40E+00	7,39E-01		5,52E-01	
Carvão	1,66E+01		5,52E+00	2,09E+00	8,57E+00				
Lenhite	1,41E+01		2,65E+00	3,19E+00	8,11E+00				
Gás Natural	1,24E+01	5,44E-01	2,91E+00	4,39E+00	4,20E+00				
<b>Recursos não-renováveis</b>									
Ferro	7,32E+00		1,81E+00		5,02E+00				
Argila	2,16E+01		2,06E+01		8,51E-01				
Calcário	5,72E+01		5,40E+01		2,50E+00				
Agregado Natural	2,96E+01	4,06E-01	5,54E+00	3,74E+00	8,91E+00	3,07E+00	4,18E+00	3,03E+00	3,90E-01
Cloreto de Sódio	4,91E-01								
<b>Recursos renováveis</b>									
Água	3,35E+03	2,63E+01	1,29E+03	4,35E+02	1,45E+03	2,64E+01	8,51E+01	1,19E+01	2,58E+01
Dióxido de Carbono	7,61E+01	2,85E-01	5,58E+00	6,92E+01	1,24E+00	9,98E-03	4,83E-03	2,66E-03	1,24E-03

<b>Emissões para o ar</b>									
Arsênico (+V)	2,30E-05	4,79E-08	1,24E-05	2,25E-06	7,99E-06	1,52E-07	6,08E-08	2,93E-08	1,67E-08
Cromo (+VI)	5,96E-06	1,40E-08	7,86E-07	3,37E-07	4,76E-06	9,26E-09	3,54E-08	7,11E-09	1,08E-08
Cromo	3,40E-04	5,87E-07	1,27E-04	1,35E-05	1,96E-04	5,39E-07	1,51E-06	3,43E-07	4,57E-07
Cobre (+II)	1,67E-04	2,22E-07	6,10E-05	1,12E-05	8,89E-05	4,32E-06	7,48E-07	9,27E-07	1,35E-07
Mercurio (+II)	1,28E-05	2,99E-08	4,06E-06	9,89E-07	7,38E-06	1,32E-07	1,01E-07	4,07E-08	3,15E-08
Zinco (+II)	6,18E-04	5,89E-07	3,65E-04	4,94E-05	1,94E-04	5,07E-06	1,65E-06	1,02E-06	4,10E-07
Amônia	1,15E-02	5,45E-05	2,16E-03	4,60E-03	3,85E-03	5,49E-05	5,66E-04	1,80E-05	1,93E-04
Monóxido de Carbono	2,95E-01	1,77E-03	9,67E-02	2,23E-02	1,53E-01	1,00E-02	3,99E-03	5,82E-03	7,74E-04
Óxidos de Nitrogênio	3,15E-01	3,23E-03	9,75E-02	4,54E-02	7,72E-02	3,31E-02	3,01E-02	1,97E-02	8,51E-03
Dióxido de Enxofre	2,28E-01	2,80E-03	6,90E-02	4,12E-02	1,06E-01	3,84E-03	1,57E-03	2,52E-03	3,13E-04
Benzo{a}pireno	1,14E-06	2,96E-09	3,35E-07	2,33E-07	5,31E-07	1,06E-08	7,10E-09	1,41E-08	1,37E-09
Benzeno	5,94E-04	2,58E-06	1,24E-04	1,99E-04	2,04E-04	1,57E-05	3,39E-05	4,15E-06	1,05E-05
Formaldeído (metanal)	2,85E-03	1,06E-06	8,47E-05	2,44E-03	1,30E-04	1,74E-04	1,46E-05	5,09E-06	2,45E-06
COV-NM	8,07E-02	8,74E-04	4,18E-02	8,18E-03	1,45E-02	5,17E-03	5,66E-03	3,01E-03	1,54E-03
Metano	2,29E-01	8,98E-03	8,66E-02	4,20E-02	8,19E-02	4,71E-03	2,31E-03	1,53E-03	5,13E-04
Alumínio	6,15E-03	1,11E-05	1,88E-03	3,97E-04	3,79E-03	3,30E-05	2,05E-05	9,92E-06	5,89E-06
Partículas									
(> PM10)	9,02E-02	2,43E-03	2,57E-02	1,27E-02	4,16E-02	9,89E-04	6,30E-03	3,24E-04	1,82E-04
(PM2,5-PM10)	4,26E-02	1,65E-04	1,18E-02	2,84E-03	2,21E-02	6,68E-04	4,69E-03	1,89E-04	1,00E-04
(PM2.5)	4,09E-02	2,08E-04	8,54E-03	9,75E-03	1,69E-02	1,41E-03	2,12E-03	1,77E-03	1,98E-04

<b>Emissões para a água</b>									
Arsênico (+V)	7,68E-05	1,99E-07	1,63E-05	1,02E-05	3,97E-05	5,24E-07	5,37E-06	1,77E-07	4,40E-06
Cobre (+II)	2,46E-05	5,03E-08	4,52E-06	1,01E-06	1,80E-05	7,74E-07	1,77E-07	1,03E-07	4,21E-08
Ferro	2,42E-02	4,86E-05	4,49E-03	5,15E-03	1,43E-02	1,20E-04	6,01E-05	4,39E-05	1,67E-05
Mercúrio (+II)	7,62E-07	2,83E-09	1,47E-07	2,25E-08	3,98E-07	5,22E-09	1,08E-07	1,64E-09	7,71E-08
Níquel (+II)	4,11E-05	6,70E-08	6,12E-06	1,52E-06	3,22E-05	3,65E-07	6,55E-07	8,84E-08	6,06E-08
Vanádio (+III)	1,19E-05	1,74E-07	4,50E-06	1,77E-06	4,86E-06	9,46E-08	4,86E-07	2,26E-08	1,21E-08
Alumínio (+III)	1,15E-03	7,61E-06	4,56E-04	6,38E-05	6,07E-04	3,81E-06	9,31E-06	1,06E-06	5,86E-07
Bário	3,94E-04	4,71E-06	1,48E-04	3,83E-05	1,30E-04	4,13E-05	1,05E-05	2,03E-05	1,23E-06
Bromo	5,02E-04	4,02E-06	1,37E-04	4,31E-05	2,56E-04	3,39E-05	9,49E-06	1,65E-05	1,27E-06
Magnésio (+III)	4,77E-03	5,40E-05	1,05E-03	3,76E-04	2,80E-03	2,52E-04	8,19E-05	1,22E-04	2,32E-05
Fosfato	9,60E-04	9,70E-07	1,63E-05	8,62E-06	9,30E-04	1,52E-06	1,65E-06	4,58E-07	6,22E-07
Sulfato	3,40E-01	7,84E-04	3,98E-02	2,63E-02	2,09E-01	9,25E-04	6,10E-02	3,10E-04	1,60E-03
<b>Emissões para solo agrícola</b>									
Fósforo	1,44E-04	9,97E-07	3,65E-06	1,32E-04	6,87E-06	6,14E-08	2,87E-08	2,07E-08	8,32E-09
Enxofre	2,74E-04	9,39E-07	4,33E-06	1,24E-04	1,44E-04	1,90E-07	7,46E-08	2,54E-08	4,02E-08
<b>Emissões para solo industrial</b>									
Cobre (+II)	3,79E-05	1,08E-08	5,03E-06	2,58E-06	2,94E-05	7,11E-07	9,19E-08	4,30E-08	1,96E-08
Ferro	3,22E-03	2,22E-05	1,27E-03	8,87E-04	8,94E-04	7,29E-05	3,17E-05	3,56E-05	7,58E-06
Zinco (+II)	3,92E-05	1,48E-07	4,68E-06	3,88E-06	3,08E-06	2,43E-05	1,96E-06	8,92E-07	3,08E-07
Fósforo	1,61E-05	3,86E-07	4,88E-06	2,65E-06	5,87E-06	1,21E-06	3,46E-07	7,52E-07	4,55E-08
Sódio (+I)	2,32E-02	1,55E-05	2,12E-04	1,11E-04	2,28E-02	7,68E-05	1,61E-05	3,09E-05	2,18E-06





## ANEXO C. MODELOS DE QUESTIONÁRIO PARA COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS

Tabela C1: Questionário para coleta de dados: Processo de produção de blocos cerâmicos

<b>ENTRADAS</b> (ADICIONAR QUAISQUER ENTRADAS/INSUMOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)			
Material/Fluxo	Origem do material*	Período para o qual os dados foram coletados**	Quantidade (ton)***
Argila			
Calcário			
Eletricidade			
Diesel (maquinário ind.)			
Gás natural			
Água			
Óleo lubrificante (maq.)			
Embalagem prod. final			
Transporte de matéria-prima			
Transporte do produto final			
<b>SAÍDAS</b> (ADICIONAR QUAISQUER SAÍDAS/COPRODUTOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)			
Blocos cerâmicos			
Água residual			
Resíduos sólidos			
Outros (especificar):			

\*Origem do material: Especificar se o material é extraído diretamente pela empresa ou se é proveniente de outro fornecedor e especificá-lo. Em ambos os casos, especificar a distância aproximada percorrida por tal material entre a área de extração ou fornecedor até a fábrica.

\*\*Período para o qual os dados foram coletados: Informar o período de coleta ao qual os dados fornecidos se referem. Por exemplo: “dados relativos ao consumo e produção do ano de 2012”

\*\*\*Quantidade (ton): Quantidade total de entradas (insumos) e saídas (produtos) para o período referido no item acima. Por exemplo, se o período de coleta dos dados for o ano de 2012, a quantidade deve ser referente a todo o consumo e produção do ano de 2012.

Tabela C2: Questionário para coleta de dados: Processo de produção de cimento Portland

<b>ENTRADAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER ENTRADAS/INSUMOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
<b>Material/Fluxo</b>	<b>Origem do material*</b>	<b>Período para o qual os dados foram coletados**</b>	<b>Quantidade (ton)***</b>
Clinker			
Eletricidade			
Transporte de matérias-primas			
Transporte do produto final			
Etilenoglicol			
Aço			
Embalagem			
<b>SAÍDAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER SAÍDAS/COPRODUTOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
<b>Produto (Cimento Portland)</b>			
<b>Água residual</b>			
<b>Resíduos sólidos</b>			
<b>Outros (especificar):</b>			

\*Origem do material: Especificar se o material é extraído diretamente pela empresa ou se é proveniente de outro fornecedor e especificá-lo. Em ambos os casos, especificar a distância aproximada percorrida por tal material entre a área de extração ou fornecedor até a fábrica.

\*\*Período para o qual os dados foram coletados: Informar o período de coleta ao qual os dados fornecidos se referem. Por exemplo: “dados relativos ao consumo e produção do ano de 2012”

\*\*\*Quantidade (ton): Quantidade total de entradas (insumos) e saídas (produtos) para o período referido no item acima. Por exemplo, se o período de coleta dos dados for o ano de 2012, a quantidade deve ser referente a todo o consumo e produção do ano de 2012.

Tabela C3: Questionário para coleta de dados: Processo de produção de clínquer

<b>ENTRADAS</b> (ADICIONAR QUAISQUER ENTRADAS/INSUMOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)			
Material/Fluxo	Origem do material*	Período para o qual os dados foram coletados**	Quantidade (ton)***
Amônia, líquida			
Marga calcária			
Argila			
Areia			
Calcário			
Cal hidratada, solta			
Gas natural			
Petróleo			
Hulha/carvão			
Coque			
Óleo lubrificante			
Aço cromo 18/8			
Diesel, maquinário			
Bauxita			
Refratário			
Água			
Transporte de matérias-primas			
Transporte de produto final			
<b>SAÍDAS</b> (ADICIONAR QUAISQUER SAÍDAS/COPRODUTOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)			
Produto (Clínquer)			
Água residual			
Resíduos sólidos			
Outros (especificar):			

\*Origem do material: Especificar se o material é extraído diretamente pela empresa ou se é proveniente de outro fornecedor e especificá-lo. Em ambos os casos, especificar a distância aproximada percorrida por tal material entre a área de extração ou fornecedor até a fábrica.

\*\*Período para o qual os dados foram coletados: Informar o período de coleta ao qual os dados fornecidos se referem. Por exemplo: “dados relativos ao consumo e produção do ano de 2012”

\*\*\*Quantidade (ton): Quantidade total de entradas (insumos) e saídas (produtos) para o período referido no item acima. Por exemplo, se o período de coleta dos dados for o ano de 2012, a quantidade deve ser referente a todo o consumo e produção do ano de 2012.

Tabela C4: Questionário para coleta de dados: Processo de produção de Fibrocimento

<b>ENTRADAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER ENTRADAS/INSUMOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
<b>Material/Fluxo</b>	<b>Origem do material*</b>	<b>Período para o qual os dados foram coletados**</b>	<b>Quantidade (ton)***</b>
Cimento Portland			
Eletricidade			
Petróleo			
Calcário, moído			
Embalagem			
Verniz acrílico			
Óleo lubrificante			
Gás natural			
Sulfato de Celulose			
Acetato de Vinil			
Água			
Transporte de matérias-primas			
Transporte de produto final			
Fibra polimérica			
Outros (especificar):			
<b>SAÍDAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER SAÍDAS/COPRODUTOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
Produto (Fibrocimento)			
Água residual			
Resíduos sólidos			
Efluentes			
Resíduos de papel			
Outros (especificar):			

\*Origem do material: Especificar se o material é extraído diretamente pela empresa ou se é proveniente de outro fornecedor e especificá-lo. Em ambos os casos, especificar a distância aproximada percorrida por tal material entre a área de extração ou fornecedor até a fábrica.

\*\*Período para o qual os dados foram coletados: Informar o período de coleta ao qual os dados fornecidos se referem. Por exemplo: "dados relativos ao consumo e produção do ano de 2012"

\*\*\*Quantidade (ton): Quantidade total de entradas (insumos) e saídas (produtos) para o período referido no item acima. Por exemplo, se o período de coleta dos dados for o ano de 2012, a quantidade deve ser referente a todo o consumo e produção do ano de 2012.

Tabela C5: Questionário para coleta de dados: Processo de produção de MDF

<b>ENTRADAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER ENTRADAS/INSUMOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
<b>Material/Fluxo</b>	<b>Origem do material*</b>	<b>Período para o qual os dados foram coletados**</b>	<b>Quantidade (ton)***</b>
Lascas de madeira			
Madeira residual industrial			
Gás Natural			
Parafina			
Transporte de matérias-primas			
Transporte de produto final			
Resina de formaldeído de ureia			
Eletricidade			
<b>SAÍDAS</b> <i>(ADICIONAR QUAISQUER SAÍDAS/COPRODUTOS IMPORTANTES QUE NÃO ESTEJAM LISTADOS ABAIXO)</i>			
Produto (MDF)			
Água residual			
Resíduos sólidos			
Resíduos perigosos			
Efluentes			
Outros (especificar):			

\*Origem do material: Especificar se o material é extraído diretamente pela empresa ou se é proveniente de outro fornecedor e especificá-lo. Em ambos os casos, especificar a distância aproximada percorrida por tal material entre a área de extração ou fornecedor até a fábrica.

\*\*Período para o qual os dados foram coletados: Informar o período de coleta ao qual os dados fornecidos se referem. Por exemplo: “dados relativos ao consumo e produção do ano de 2012”

\*\*\*Quantidade (ton): Quantidade total de entradas (insumos) e saídas (produtos) para o período referido no item acima. Por exemplo, se o período de coleta dos dados for o ano de 2012, a quantidade deve ser referente a todo o consumo e produção do ano de 2012.



## ANEXO D. DADOS PRIMÁRIOS COLETADOS PARA OS PROCESSOS DE MAIOR CONTRIBUIÇÃO

**Tabela D1: Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Blocos Cerâmicos**

ENTRADAS			
Material/Fluxo	Origem do material*	Unidade para o qual os dados foram coletados**	Quantidade (kg)***
Argila		kg	1,63E+06
Calcário			-
Eletricidade			-
Diesel (maquinário ind.)		litros	5,20E+03
Gás natural		m <sup>3</sup>	5,00E+02
Água		litros	2,66E+05
Óleo lubrificante (maq.)		litros	8,00E+02
Embalagem prod. final			-
Transporte de matéria-prima			-
Transporte do produto final			-
SAÍDAS			
Blocos cerâmicos		kg	1,80E+06
Água residual			-
Resíduos sólidos			-
Outros (especificar):			-

**Tabela D2: Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Cimento Portland**

ENTRADAS			
Material/Fluxo	Origem do material*	Período para o qual os dados foram coletados**	Quantidade (ton)***
Clínquer	Produzido internamente por descarbonatação do calcário	Ano de 2012	Produção: 1.741.961,35 Consumo: 1.691.978,521
Gesso	Fabrica de fertilizantes (adição do cimento para dar liga no cimento)	Ano 2012	Consumo: 93.653,613
Calcário	Extração da mina interna da fábrica (aditivo na moagem de cimento)	Ano 2012	Consumo : 215.170,013
Escória	Votorantim Metais - Fortaleza de Minas (MG)	Ano 2012	Consumo : 88.838
Escória (Pozolona Artificial)	Morro Azul (MG)	Ano 2012	Consumo : 92.767
Água	Própria	-----	-----
Aditivo Produção	Grace Construction Products – Sorocaba (SP)	Ano 2012	Consumo : 211.450,088
Aditivo de Qualidade	Grace Construction Products – Sorocaba (SP)	Ano 2012	Consumo : 213.105,863
Carga Moedora dos Moinhos	Magotteaux – Contagem (MG)	Ano 2012	Consumo : 132,800
Eletricidade	Compra de fornecedor - Mercado livre	Ano 2012	Adquirida : 16.672.636 kwh Geração Própria: 4.047.346 kwh
Transporte de matérias-primas	Movimentação interna com prestadora de serviço. Transporte de depósito para a produção	Ano 2012	R\$ 450,00
Transporte do produto final	Via cintas transportadoras até entrar e ficar estocado nos silos	Ano 2012	2.052.000



SAÍDAS			
Produto (Cimento Portland)	Ensacado ou a Granel	Ano 2012	2.139.863
Resíduos sólidos	Movimentação interna, todo material de processo retorna para a produção	Ano 2012	----
Água residual	Proveniente da refrigeração de equipamentos	----	----
Emissão de Gases e Particulados	Despoeiramento	----	----

**Tabela D3: Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de Fibrocimento**

<b>ENTRADAS</b>			
<b>Material/Fluxo</b>	<b>Origem do material*</b>	<b>Período para o qual os dados foram coletados**</b>	<b>Quantidade (ton)***</b>
Cimento Portland	MG-400 Km	Jan-dez/12	63.352
Eletricidade			
Petróleo			-
Calcário, moído	MG-220 km	Jan-dez/12	25.132
Embalagem			-
Verniz acrílico			-
Óleo lubrificante			-
Gás natural			-
Sulfato de Celulose			-
Acetato de Vinil			-
Água		Jan-dez/12	32.265
Transporte de matéria-prima			
Transporte de produto final			Autônomos
Fibra polimérica			-
Amianto	GO-1150 Km	Jan-dez/12	8.384
Aparas de Jornal	RJ-600 Km	Jan-dez/12	2.125
Celulose	Chile	Jan-dez/12	466
Filler	próprio	Jan-dez/12	2.564
PVA	China	Jan-dez/12	232
SILICA	BA-1900 km	Jan-dez/12	77
<b>SAÍDAS</b>			
Produto (Fibrocimento)		Jan-dez/12	134.597
Água residual			-
Resíduos sólidos			-
Efluentes			-
Resíduos de papel			-

**Tabela D4: Inventário dos fluxos elementares de maior contribuição para potenciais de impacto no Processo de Produção de MDF**

<b>ENTRADAS</b>			
<b>Material/Fluxo</b>	<b>Período para o qual os dados foram coletados**</b>	<b>Unidade para o qual os dados foram coletados</b>	<b>Quantidade (kg)***</b>
Calcário	2010	kg	2,00E+01
Lubrificantes (óleo e graxa)	2010	g	1,88E+01
Mudas para plantio	2010	kg	5,20E-01
Sulfato de Amônia	2010	kg	1,38E+00
Emulsão de Parafina	2010	kg	5,47E+00
Resina ureia-formaldeído	2010	kg	7,17E+01
Água	2010	kg	1,75E+02
Diesel	2010	kg	6,57E+00
Eletricidade	2010	Mj	5,07E+02
Óleo pesado	2010	kg	1,37E+01
Resíduos de madeira	2010	kg	3,85E+01
<b>Pesticidas</b>			
Sulfluramida formicida	2010	kg	1,12E-01
Glifosato herbicida	2010	kg	1,54E-01
<b>Fertilizantes</b>			
Cloreto de Potássio (60% K2O)	2010	kg	2,75E+00
Ureia (46% N)	2010	kg	1,00E-01
Sulfato de Amônia (21,2% N)	2010	kg	4,00E-01
Superfosfato (18,5% P2O5)	2010	kg	5,77E+00
<b>SAÍDAS</b>			
<b>Emissões para o ar</b>			
Amônia	2010	g	7,51E+01
Cinzas (de resíduos de madeira)	2010	kg	3,90E-01
Dióxido de Carbono	2010	kg	6,31E+01
Monóxido de Carbono	2010	g	5,40E+01
Partículas de Glifosato	2010	kg	2,70E-01
Dióxido de Nitrogênio	2010	g	1,00E+01

Óxidos de Nitrogênio	2010	kg	2,96E-01
Material particulado	2010	kg	1,80E-01
Dióxido de Enxofre	2010	g	8,07E+00
Óxidos de Enxofre	2010	kg	1,32E+00
NM-COV	2010	g	7,80E+01
COV	2010	kg	3,60E-01
Formaldeído	2010	kg	1,50E-01
Hidrocarbonetos	2010	g	1,64E+00
Metano	2010	g	1,69E+00
Emissões para a água			
Partículas de Glifosato	2010	g	1,44E+00
Escoamento superficial (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2010	kg	1,10E-01
Escoamento superficial e percolação (N)	2010	kg	1,00E-01
Amônia	2010	g	1,21E-01
Demanda bioquímica de oxigênio	2010	g	6,16E-01
Efluente	2010	kg	6,00E+00
Formaldeído	2010	g	7,29E-02
Suspensão de sólidos	2010	g	2,44E+01
Emissões para o solo			
Resíduos de Lubrificantes	2010	g	1,83E+01
Resíduos de madeira	2010	kg	9,72E+01