

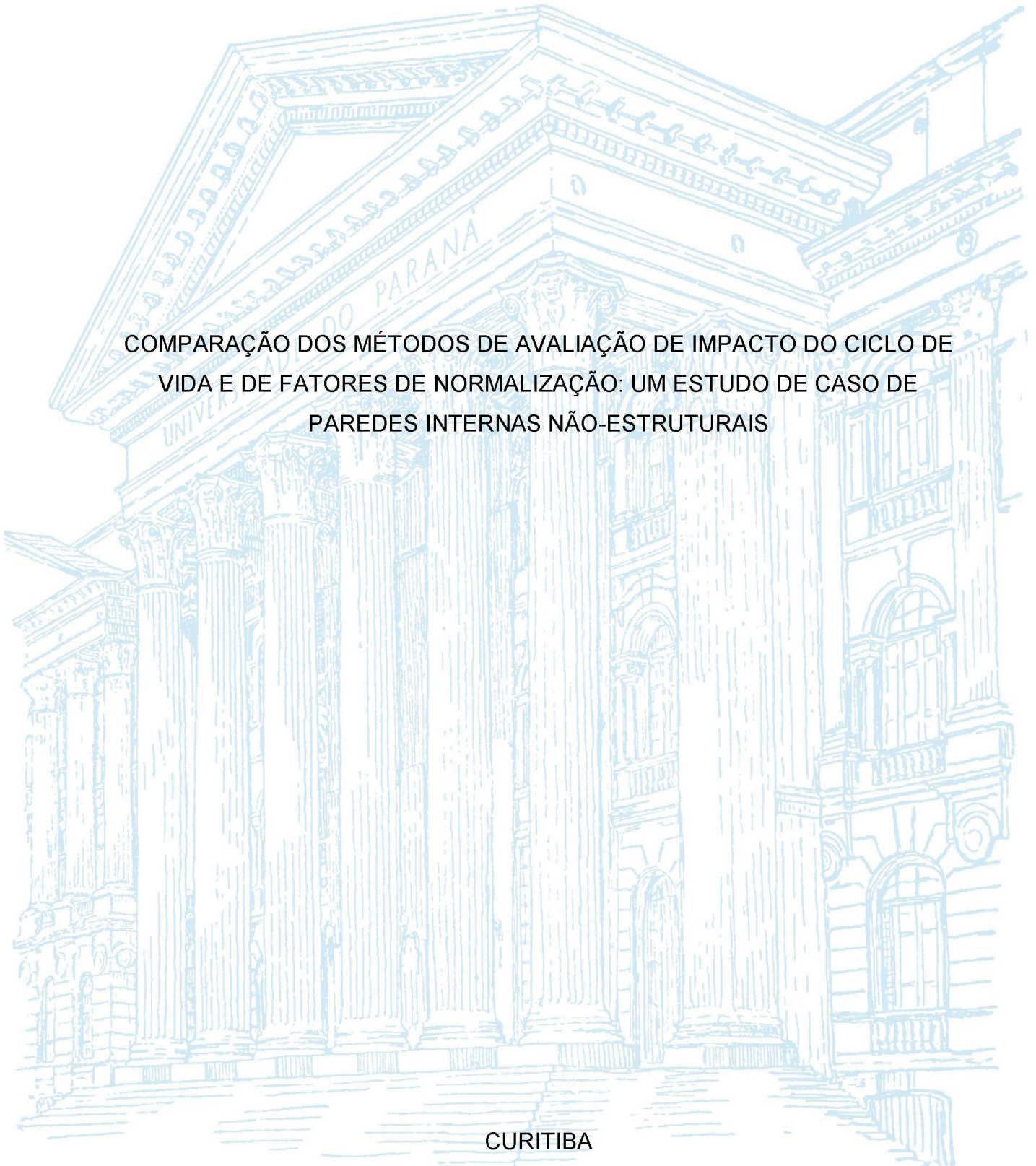
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAISA LANA PILZ

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA E DE FATORES DE NORMALIZAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO DE PAREDES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS

CURITIBA

2020



THAISA LANA PILZ

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE  
VIDA E DE FATORES DE NORMALIZAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO DE  
PAREDES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

CURITIBA

2020



CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

P643c

Pilz, Thaisa Lana

Comparação dos métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida e de fatores de normalização: um estudo de caso de paredes internas não-estruturais [recurso eletrônico]/ Thaisa Lana Pilz. Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Engenharia de produção. I. Maceno, Marcell Mariano Corrêa. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 658.5

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **THAISA LANA PILZ** intitulada: **COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA E DE FATORES DE NORMALIZAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO DE PAREDES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Maio de 2020.

Assinatura Eletrônica  
20/07/2020 21:18:21.0  
MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
21/07/2020 11:44:21.0  
MARIANA KLEINA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
24/07/2020 17:54:28.0  
CASSIA MARIA LIE UGAYA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
21/07/2020 12:15:19.0  
OSIRIS CANGILIERI JUNIOR  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO  
PARANÁ)

Aos meus pais e irmão, Elizabeth de Fátima Pilz, Jefferson Carlos Pilz e Lucas Pilz, pelo apoio e amor incondicional. Nenhuma conquista seria tão gratificante sem a presença de vocês ao meu lado.



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno, pelo apoio absoluto e pela imensa paciência e compreensão diante dos desafios durante o desenvolvimento dessa dissertação. Agradeço, sobretudo, pela amizade, conselhos e incentivo ao longo dos anos de trabalho juntos. Sinto imenso carinho e admiração pelo profissional e pessoa que você é.

Ao meu irmão, Lucas Pilz, pelo apoio e amor incondicional. Agradeço por ter realizado diversas tarefas domésticas e por ter me alimentado saudavelmente no último ano. Agradeço, especialmente, por ter sido o meu conselheiro e meu maior incentivador nos momentos em que pensei em desistir. A sua presença na minha vida me dá forças para continuar a seguir meus sonhos.

Aos meus pais, Elizabeth de Fátima Pilz e Jefferson Carlos Pilz, por todo o amor e total apoio em todos os momentos da minha vida. Todas as minhas conquistas são resultado do esforço, dedicação, investimento e carinho de vocês. Estamos passando por tempos inimagináveis, por culpa da pandemia. Por outro lado, estar em casa na companhia de vocês, tomando nosso café da manhã juntos e compartilhando momentos foi o que me fortaleceu para que eu finalizasse essa dissertação. Sem vocês, nada disso seria possível ou teria sentido.

Ao Ozzy, meu gato, por ser o meu despertador e o meu companheiro nos longos dias e madrugadas de trabalho.

Às minhas amigas que conheci durante o mestrado, Ana Elisa Vianna Magalhães e Isabella Roze Villar Showalter. Por todas as caronas, desabafos, passeios aleatórios, crises de riso e de desespero compartilhadas e todo o apoio e amizade, não somente no mestrado. Admiro demais vocês duas e me inspiro em vocês. Vocês fizeram toda a diferença nessa etapa cheia de desafios.

Aos meus amigos da UFPR, em especial, Gustavo, Janilce, Tiago e Valéria, pelo convívio e por compartilhar comigo conhecimento e momentos de alegria e de angústia. Aos amigos que não citei, não me estendo por receio de faltar alguém, porém saibam que sou igualmente grata pelo carinho e suporte! Meu carinho por todos vocês é imensurável!

A todos os meus amigos, desde os que me acompanham de longa data até os mais recentes, por todo o carinho, desabafo e momentos de distração, fazendo

com que esse caminho fosse mais tranquilo e divertido. Podem contar comigo para tudo.

À Rafaella Laureano Scaramella por todo o auxílio como secretária do PPGEF e pela imensa amizade, almoços no RU, conversas, cafés, chás maravilhosos e palavras de incentivo. Sou muito grata por ter te conhecido.

Aos professores Cássia Maria Lie Ugaya, Osiris Canciglieri Júnior e Mariana Kleina pelos valiosos conhecimentos transmitidos e contribuições à essa dissertação. Agradeço, enquanto aluna externa da UTFPR e PUC-PR, principalmente, à professora Cássia e ao professor Osiris pelos conhecimentos repassados sobre ACV e por ampliar a minha visão sobre revisão sistemática da literatura.

Aos professores Marcelo Gechele Cleto e Robson Seleme pelas sugestões prestadas ao projeto de qualificação.

Aos professores Izabel Zattar e Robson Seleme pelo apoio como coordenação do curso ao longo do mestrado.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e fomento dessa pesquisa.

Enfim, a todos que, diretamente ou indiretamente, me auxiliaram na realização desse trabalho.

*“C'est le temps que tu as perdu pour ta rose qui fait ta rose si importante.  
Tu deviens responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé”.*

***Antoine de Saint-Exupéry***

*“Nada é absoluto. Tudo muda, tudo se move, tudo gira, tudo voa e  
desaparece”.*

***Frida kahlo***



## RESUMO

Embora o desenvolvimento e o uso de métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de vida (AICV) facilitem a análise ambiental, são necessárias informações que tratem das inconsistências nos resultados de impacto durante a normalização. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo a constatação das semelhanças e inconsistências dos resultados oriundos da fase de AICV, para incentivar esforços voltados à harmonização dos fatores de normalização. Dessa forma, com base em uma revisão sistemática da literatura de estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) de residências unifamiliares, publicados entre 2008 e 2019, foram selecionados seis métodos de AICV mais usados para a construção civil: BEES+, CML Baseline, ILCD 2011, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 e TRACI 2.1. A partir disso, uma análise comparativa dos resultados normalizados com os métodos de AICV e com fatores de normalização globais, recomendados pela Comissão Europeia - Centro Comum de Pesquisa (EC-JRC), foi realizada com base em um estudo de caso de paredes internas não-estruturais. Os resultados indicaram inconsistências entre o desempenho ambiental das vedações analisadas e o comportamento dos resultados normalizados pelos métodos de AICV e em escala global. Além disso, as maiores variações dos resultados na etapa de normalização foram identificados nos métodos CML Baseline, ILCD 2011, IMPACT 2002+ e ReCiPe 2016. As categorias de impacto que apresentaram maiores disparidades de magnitude e desempenho ambiental foram a eutrofização marinha, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana (com e sem efeitos cancerígenos) e depleção de água. Sabe-se que, atualmente, há uma escassez de métodos consolidados para aplicações em regiões específicas do mundo, indicando a existência de diversas limitações associadas à implementação dos métodos de AICV para expandir o escopo geográfico. Com base nisso, esse estudo destaca as lacunas resultantes da análise comparativa da etapa de normalização e discute a necessidade de realizar pesquisas focadas no desenvolvimento, aprimoramento e adaptação dos fatores de normalização para o Brasil.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Normalização. Categorias de Impacto. Paredes não-estruturais. Fatores de normalização global.

## ABSTRACT

Even though the development and use of life cycle impact assessment (LCIA) methods facilitate environmental analysis, information addressing the inconsistencies in impact results is needed during normalization. In this context, this study aimed to verify the similarities and inconsistencies in the results of the LCIA phase to encourage efforts focused on the harmonization of normalization factors. Based on an extensive review of life cycle assessment (LCA) studies of single-family houses published between 2008 and 2019, six most used LCIA methods for civil construction were selected: BEES+ CML baseline, ILCD 2011, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 and TRACI 2.1. Thus, a comparative analysis of the normalized results of LCIA methods among the results using global normalization factors recommended by the European Commission – Joint Research Centre (EC-JRC) was performed in a case study of non-structural internal walls to identify the existing shortcomings. Results have indicated inconsistencies between the environmental performance of the analyzed walls and the behavior of the normalized results using the normalization factors from the LCIA methods and EC-JRC report. Also, the greatest variations in the results of the normalization step were identified in the CML Baseline, ILCD 2011, IMPACT 2002+ and ReCiPe 2016 methods. The most prominent differences in magnitude and environmental performance were highlighted through the results of the impact categories of marine eutrophication, photochemical oxidation, ecotoxicity freshwater, human toxicity (cancer and non-cancer effects) and water depletion. It is known that, currently, there is a shortage of consolidated methods for applications in specific regions of the world, indicating that there are several limitations associated with the implementation of LCIA methods to expand the geographic scope. Based on this, this study highlights the gaps resulting from the comparative analysis of the normalization step and discusses the need to conduct researches focused on the development, improvement, and adaptation of the normalization factors for Brazil.

Keywords: Life Cycle Assessment. Life Cycle Impact Assessment. Normalization. Impact Categories. Non-structural walls. Global normalization factors.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EMISSÕES E ENERGIA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL .....	34
FIGURA 2 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM AC.....	37
FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM LSF .....	39
FIGURA 4 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM LWF .....	40
FIGURA 5 – FASES DO CICLO DE VIDA DE CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS....	42
FIGURA 6 – FASES DA ACV.....	43
FIGURA 7 – MECANISMO AMBIENTAL SIMPLIFICADO .....	49
FIGURA 8 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	64
FIGURA 9 – PROTOCOLO DE PESQUISA.....	66
FIGURA 10 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	68
FIGURA 11 – VEDAÇÕES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS EM AC, DEA E DEM	70
FIGURA 12 – PROPORÇÃO DE ARTIGOS POR OBJETO DE ESTUDO.....	80
FIGURA 13 – EVOLUÇÃO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SOBRE O TEMA ....	81
FIGURA 14 – <i>H-INDEX</i> E FREQUÊNCIA DE ARTIGOS POR <i>JOURNAL</i> .....	82
FIGURA 15 – FATOR DE IMPACTO DOS <i>JOURNALS</i> .....	83
FIGURA 16 – FREQUÊNCIA DE ARTIGOS POR ÁREA DE AVALIAÇÃO.....	84
FIGURA 17 – CENTROS DE PESQUISA DOS AUTORES .....	87
FIGURA 18 – <i>H-INDEX</i> E FREQUÊNCIA DOS AUTORES NOS ARTIGOS.....	89
FIGURA 19 – NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE.....	90
FIGURA 20 – MÉTODOS DE AICV APLICADOS NOS ESTUDOS .....	92
FIGURA 21 – PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO .....	98
FIGURA 22 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE AICV .....	99
FIGURA 23 – FRONTEIRA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO EM AC .....	103
FIGURA 24 – FRONTEIRA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO EM DEA.....	104
FIGURA 25 – FRONTEIRA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO EM DEM .....	104
FIGURA 26 – CORTE DE 3% NA VISUALIZAÇÃO DA REDE .....	110



## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO BEES+ .....	119
GRÁFICO 2 – PERCENTUAL ACUMULADO DA CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO BEES+ .....	120
GRÁFICO 3 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	123
GRÁFICO 4 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	124
GRÁFICO 5 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	125
GRÁFICO 6 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO ILCD 2011.....	126
GRÁFICO 7 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO IMPACT 2002+.....	129
GRÁFICO 8 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	130
GRÁFICO 9 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO RECIPE 2016.....	131
GRÁFICO 10 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO RECIPE 2016.....	132
GRÁFICO 11 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	133
GRÁFICO 12 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	134
GRÁFICO 13 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO BEES+ .....	136

GRÁFICO 14 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO BEES+.....	137
GRÁFICO 15 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO BEES+.....	137
GRÁFICO 16 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO BEES+.....	138
GRÁFICO 17 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	139
GRÁFICO 18 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	140
GRÁFICO 19 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	140
GRÁFICO 20 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	141
GRÁFICO 21 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	142
GRÁFICO 22 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	143
GRÁFICO 23 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	143
GRÁFICO 24 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	144
GRÁFICO 25 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	144
GRÁFICO 26 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	145
GRÁFICO 27 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	146

GRÁFICO 28 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	146
GRÁFICO 29 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016.	147
GRÁFICO 30 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO RECIPE 2016.....	148
GRÁFICO 31 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO RECIPE 2016 .....	148
GRÁFICO 32 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016.....	149
GRÁFICO 33 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	149
GRÁFICO 34 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	150
GRÁFICO 35 –CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO TRACI 2.1.....	151
GRÁFICO 36 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	151
GRÁFICO 37 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO BEES+.....	158
GRÁFICO 38 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO BEES+.....	160
GRÁFICO 39 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	161
GRÁFICO 40 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO CML <i>BASELINE</i> .....	162
GRÁFICO 41 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	163



GRÁFICO 42 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO ILCD 2011 .....	164
GRÁFICO 43 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	165
GRÁFICO 44 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO IMPACT 2002+ .....	166
GRÁFICO 45 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016 .....	167
GRÁFICO 46 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO NOS SISTEMAS EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016 .....	168
GRÁFICO 47 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	169
GRÁFICO 48 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO TRACI 2.1 .....	170
GRÁFICO 49 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL ....	172
GRÁFICO 50 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL .....	172
GRÁFICO 51 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO TERRESTRE .....	173
GRÁFICO 52 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO TERRESTRE .....	174
GRÁFICO 53 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO MARINHA	175
GRÁFICO 54 - RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO MARINHA .....	175

GRÁFICO 55 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE.....	176
GRÁFICO 56 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE ...	176
GRÁFICO 57 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA.	177
GRÁFICO 58 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA.....	178
GRÁFICO 59 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE.....	179
GRÁFICO 60 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE..	179
GRÁFICO 61 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO CARCINOGÊNICOS.....	180
GRÁFICO 62 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO CARCINOGÊNICOS.....	181
GRÁFICO 63 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO NÃO-CARCINOGÊNICOS....	181
GRÁFICO 64 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO NÃO-CARCINOGÊNICOS.....	182
GRÁFICO 65 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO TOXICIDADE HUMANA .....	183
GRÁFICO 66 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO TOXICIDADE HUMANA .....	183
GRÁFICO 67 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO INORGÂNICOS INALÁVEIS.	184
GRÁFICO 68 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO INORGÂNICOS INALÁVEIS.....	184
GRÁFICO 69 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE ÁGUA .....	185
GRÁFICO 70 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE ÁGUA .....	185

GRÁFICO 71 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL (COMBUSTÍVEL FÓSSIL) .....	186
GRÁFICO 72 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL (COMBUSTÍVEL FÓSSIL) .....	187
GRÁFICO 73 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS) .....	187
GRÁFICO 74 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS) .....	188
GRÁFICO 75 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS E ENERGIA).....	188
GRÁFICO 76 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS E ENERGIA).....	189

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – MATRIZ <i>PEDIGREE</i> PARA QUALIDADE DOS DADOS .....	46
QUADRO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE AICV .....	54
QUADRO 3 – INFORMAÇÕES GERAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM ...	71
QUADRO 4 – PARÂMETROS DE BUSCA .....	77
QUADRO 5 – CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS .....	91
QUADRO 6 – ARTIGOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DE CONTEÚDO .....	95
QUADRO 7 – FRONTEIRA DE AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS DE ACV .....	97
QUADRO 8 – ESCOPO DA ACV PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM.....	102
QUADRO 9 – PROCESSOS CONSIDERADOS NO ESTUDO .....	107
QUADRO 10 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS POTENCIAIS TOTAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM ENTRE OS MÉTODOS DE AICV .....	152
QUADRO 11 – UNIDADES DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE OS MÉTODOS DE AICV.....	154
QUADRO 12 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS POTENCIAIS TOTAIS GLOBAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM ENTRE OS MÉTODOS DE AICV.....	171

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÚMERO DE ARTIGOS SELECIONADOS NAS BASES DE DADOS.	79
TABELA 2 – PONTUAÇÃO DE CITAÇÕES AO LONGO DO ANOS .....	85
TABELA 3 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM .....	112
TABELA 4 – CENÁRIOS DE TRANSPORTE PARA OS SISTEMAS EM AC, DEA E DEM .....	115
TABELA 5 – FATORES DE CONVERSÃO DAS UNIDADES ENTRE OS MÉTODOS DE AICV .....	155

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	– Alvenaria Convencional
ACV	– Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	– Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
BEES	– <i>Building for Environmental and Economic Sustainability</i>
BIM	– <i>Building Information Model</i>
CED	– <i>Cumulative Energy Demand</i>
CML	– <i>Centre of Environmental Science of Leiden University</i>
CTU	– <i>Comparative Toxic Units</i>
DALY	– <i>Disability Adjusted Life Years</i>
DEA	– <i>Drywall</i> com estrutura em aço
DEM	– <i>Drywall</i> com estrutura em madeira
EDIP	– <i>Environmental Development of Industrial Products</i>
EF	– <i>Environmental Footprint</i>
EN	– <i>European Norm</i>
EPA	– <i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPS	– <i>Environmental Priority Strategies</i>
FC	– Fator de Caracterização
GHG	– <i>Greenhouse gases</i>
GWP	– <i>Global Warming Potential</i>
ICV	– Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	– <i>International Life Cycle Data system</i>
IPCC	– <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IMPACT	– <i>Impact Assessment of Chemical Toxics</i>
ISO	– <i>International Organization for Standardization</i>
JCR	– <i>Journal Citation Reports</i>
LIME	– <i>Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling</i>
LCT	– <i>Life Cycle Thinking</i>
LSF	– <i>Light Steel Framing</i>
LWF	– <i>Light Wood Framing</i>
MEEUP	– <i>Methodology study for Ecodesign of Energy-using Products</i>

NBR	– Norma Brasileira
NMVOC	– <i>Non-methane volatile organic compound</i>
OSB	– <i>Oriented Strand Board</i>
PAE	– Pó de Aciaria Elétrica
PB	– Portfólio Bibliográfico
PCA	– <i>Principal Component Analysis</i>
PDF	– <i>Potentially Disappeared Fraction of Species</i>
PM	– <i>Particulate Matter</i>
PNUMA	– Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
Proknow-C	– <i>Knowledge Development Process-Constructivist</i>
RCD	– Resíduos da Construção e Demolição
RDU	– <i>Resource Depletion Units</i>
RoW	– <i>Rest of World</i>
RSL	– Revisão Sistemática da Literatura
SCP	– Consumo e Produção Sustentável
SETAC	– <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SIMAPRO	– <i>System for Integrated Environmental Assessment of Products</i>
TRACI	– <i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts</i>
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
UFSC	– Universidade Federal de Santa Catarina
UNEP	– <i>United Nations Environment Programme</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

CO <sub>2</sub>	– Dióxido de Carbono
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	– Eteno
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	– Benzeno
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	– Metil benzeno
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	– Cloroeteno
Cu	– Cobre
DCB	– 1,4-Diclorobenzeno
N	– Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	– Óxidos de nitrogênio
O <sub>3</sub>	– Ozônio
P	– Fósforo
PO <sub>4</sub>	– Fosfato
Sb	– Antimônio
SO <sub>2</sub>	– Dióxido de enxofre
TEG	– Trietileno glicol



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	28
1.2 OBJETIVO GERAL .....	29
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	30
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTOS AMBIENTAIS .....	33
2.2 SISTEMAS DE VEDAÇÕES VERTICAIS.....	36
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	41
2.3.1 Estrutura metodológica da ACV .....	43
2.3.2 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida .....	48
2.3.3 Metodologias de AICV.....	53
2.3.4 Estudos correlatos de avaliações comparativas entre os métodos de AICV ....	56
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>64</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	64
3.2 PROTOCOLO DE PESQUISA.....	65
3.2.1 Etapa 1 – Estado da arte.....	66
3.2.2 Etapa 2 – Estudo de caso de ACV de sistemas de vedações internas não- estruturais.....	69
3.2.3 Etapa 3 – Resultados e análises .....	73
3.2.4 Etapa 4 – Considerações finais.....	75
<b>4 ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>76</b>
4.1.1 Seleção do portfólio bibliográfico.....	76
4.1.1.1 Planejamento da pesquisa .....	76
4.1.1.2 Protocolo de coleta.....	78
4.1.2 Análise bibliométrica do portfólio.....	80
4.1.2.1 Evolução do tema.....	81
4.1.2.2 Relevância dos periódicos.....	82
4.1.2.3 Reconhecimento científico dos artigos .....	84
4.1.2.4 Autores de maior destaque.....	86
4.1.2.5 Palavras-chave mais utilizadas .....	89

4.1.2.6 Metodologias de AICV e categorias de impacto .....	90
4.1.3 Análise sistemática do portfólio .....	93
4.1.3.1 Seleção por meio do conteúdo .....	94
4.1.3.2 Análise de conteúdo .....	96
<b>5 ESTUDO DE CASO DE ACV DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES INTERNAS NÃO- ESTRUTURAIS .....</b>	<b>101</b>
5.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO .....	101
5.1.1 Função, unidade funcional e fluxo de referência .....	101
5.1.2 Sistema de produto, fronteira de sistema, alocação e critérios de corte .....	102
5.1.3 Pressupostos e considerações do estudo .....	106
5.1.4 Qualidade dos dados .....	108
5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	111
5.2.1 Cadastro no <i>software</i> SimaPro.....	116
5.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....	117
<b>6 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>118</b>
6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO .....	118
6.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO E SELEÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO MAIS SIGNIFICATIVAS .....	135
6.3 HARMONIZAÇÃO DOS INDICADORES DAS CATEGORIAS DE IMPACTO... ..	153
6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NORMALIZADOS DOS MÉTODOS DE AICV COM FATORES DE NORMALIZAÇÃO GLOBAIS .....	157
6.4.1 Análise comparativa dos resultados da normalização.....	158
6.4.2 Análise comparativa da contribuição das categorias de impacto por método de AICV .....	171
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>191</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>197</b>
<b>APÊNDICE 1 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM AC.....</b>	<b>212</b>
<b>APÊNDICE 2 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM DEA .....</b>	<b>214</b>
<b>APÊNDICE 3 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM DEM .....</b>	<b>216</b>
<b>APÊNDICE 4 – TRANSPORTE DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>218</b>
<b>APÊNDICE 5 – MATRIZ PEDIGREE (QUALIDADE DOS DADOS).....</b>	<b>220</b>
<b>APÊNDICE 6 – PROCESSOS ADAPTADOS DO ECOINVENT 3.5 .....</b>	<b>222</b>
<b>APÊNDICE 7 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO BEES+.....</b>	<b>225</b>
<b>APÊNDICE 8 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO CML.....</b>	<b>226</b>

<b>APÊNDICE 9 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO ILCD 2011 .....</b>	<b>227</b>
<b>APÊNDICE 10 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO IMPACT 2002+....</b>	<b>228</b>
<b>APÊNDICE 11 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO RECIPE 2016 .....</b>	<b>229</b>
<b>APÊNDICE 12 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO TRACI 2.1 .....</b>	<b>230</b>
<b>APÊNDICE 13 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS CENÁRIOS PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM.....</b>	<b>231</b>
<b>APÊNDICE 14 – MÉDIA DOS IMPACTOS NORMALIZADOS COM OS MÉTODOS DE AICV E FATORES DE NORMALIZAÇÃO GLOBAIS.....</b>	<b>233</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em decorrência da geração de poluição nos últimos anos, cientistas, governos e sociedade começaram a pressionar o setor industrial por ações para reduzir os impactos ambientais oriundos de suas atividades. Nesse contexto, para alcançar padrões de produção e consumo mais sustentáveis, o pensamento do ciclo de vida (LCT) e a avaliação do ciclo de vida (ACV) ganharam destaque no âmbito público e privado. Essas abordagens científicas são as principais responsáveis pelo fomento das políticas ambientais modernas e por promover apoio às decisões de negócios relacionadas ao Consumo e Produção Sustentável (SCP) (EC-JRC, 2010c).

Notoriamente, a ACV é vista como uma das técnicas mais completas para a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados à produção, uso, descarte e reciclagem de produtos (ROSSI; MARIQUE; REITER, 2012). Em contraste com a robustez comprovada dessa técnica, a realização de estudos que visam destacar o desempenho ambiental de produtos não é trivial e demanda de análises e considerações com um maior rigor científico. O intuito disso é de evitar a proliferação de muitas informações diferentes e que poderiam dificultar a comparação de produtos (SALA *et al.*, 2017).

Nesse contexto, apesar das facilidades existentes para a realização de estudos de ACV, tal como a disponibilidade de diversas bases de dados, *softwares* de apoio para o cálculo do inventário do ciclo de vida (ICV) e metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) com diferentes modelos de caracterização e fatores de normalização, ainda existem algumas limitações durante o desenvolvimento dos estudos.

Uma dessas limitações corresponde à atualização de bancos de dados que refletem os processos do cenário latino americano, especialmente, do cenário brasileiro. Como consequência, os dados de inventário do ciclo de vida acabam sendo escassos para a realidade brasileira, sendo necessário o uso de dados estrangeiros (PAULSEN; SPOSTO, 2013) para a maior parte dos estudos de caso.

Além da complexidade da coleta de dados, um dos desafios da ACV é relativo ao processo de escolha das metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida (metodologias de AICV) mais adequadas para a aplicação desejada. Diante disso, as categorias de impacto devem refletir os principais problemas ocasionados

pelo produto em análise e os métodos de AICV devem possuir fatores de caracterização e normalização que correspondam à realidade da região na qual o objeto de estudo está localizado.

No Brasil, existem algumas universidades e iniciativas que promovem a ACV, como a ACV Brasil, ACV de A a Z, Rede ACV Embrapa, Fundação Espaço ECO (FEE), EnCiclo Soluções Sustentáveis Ltda., Rede Brasileira de Avaliação do Ciclo de Vida, Grupo de Gestão Ambiental Avançada (GAMA), Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) – com a criação do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) – e a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) (IBICT, 2020).

Destas, a Rede Brasileira de Avaliação de Impacto no Ciclo de Vida, fundada em 2014, é uma das principais responsáveis por incentivar o desenvolvimento, aperfeiçoamento e aplicação dos métodos de AICV voltados para o contexto econômico, social e ambiental do Brasil (DE SOUZA, 2020). Além disso, possui como uma de suas premissas a simplificação do intercâmbio de conhecimento com o governo, empresas e sociedade, para contribuir com a formulação de políticas públicas e fomento da educação científica sobre o assunto (UGAYA *et al.*, 2016).

Entre os temas de trabalho, a rede enfoca no aprimoramento da etapa de AICV com relação à acidificação, biodiversidade (DE SOUZA *et al.*, 2013; DE SOUZA; TEIXEIRA; OSTERMANN, 2015), escassez hídrica (ANDRADE *et al.*, 2016; CASTRO *et al.*, 2016), eutrofização, material particulado, recursos abióticos (SWART, ALVARENGA e DEWULF, 2015), recursos bióticos e serviços ecossistêmicos (PAVAN *et al.*, 2016; PAVAN; OMETTO, 2016; UGAYA *et al.*, 2016). Contribuí, também, no âmbito nacional e internacional com publicações sobre os temas citados, indicando os desafios e recomendações sobre o uso e regionalização dos métodos de AICV.

As pesquisas realizadas pela RAICV têm como objetivo a identificação de modelos de caracterização cientificamente robustos, que permitam a futura regionalização, a fim de reduzir as incertezas dos resultados na fase de AICV e promover o desenvolvimento de fatores de caracterização para as diferentes regiões do Brasil (DE SOUZA *et al.*, 2016).

Assim como existem grupos no Brasil que incentivam essas ações, diversas pesquisas científicas no mundo abordam temas relativos aos métodos de AICV e às

consequências do seu uso em avaliações do desempenho ambiental. Essas iniciativas e pesquisas são fundamentais para a busca de soluções e melhorias dos resultados de impacto, uma vez que os métodos de AICV existentes nem sempre são maduros o suficiente para a prática recomendada (HUIJBREGTS, 2014). Como consequência disso, um dos principais temas de discussão, até hoje, é relativo à falta de consenso entre a comunidade científica sobre a escolha da melhor metodologia de AICV para avaliar determinado produto (LIEBEREI; GHEEWALA, 2017).

Além da escolha da metodologia, existem limitações pertinentes associadas à aplicação da normalização para a interpretação dos resultados de impacto. Essa etapa introduz perspectivas significativas para as avaliações e, por outro lado, intensifica as incertezas relativas à fase de avaliação de impacto do ciclo de vida. Além disso, a aplicação inadvertida ou proposital da normalização, pode gerar conclusões tendenciosas, que resultaria no baixo suporte à decisão e em desconfiança dos resultados da ACV (HUIJBREGTS, 2014; PIZZOL *et al.*, 2017)

Diante disso, especialistas incentivam a condução de mais estudos de ACV, que apliquem diferentes abordagens metodológicas para a avaliação do mesmo produto e de um conjunto de categorias de impacto (ALVARENGA; DA SILVA JÚNIOR; SOARES, 2012; DE SOUZA *et al.*, 2016), com o objetivo de evidenciar as incertezas contidas nos modelos de caracterização e fornecer maior suporte à decisão.

Dessa forma, devido à dificuldade de encontrar um método de AICV ideal para aplicação em estudos de ACV, essa pesquisa visa ampliar as discussões sobre as metodologias de AICV, a partir da análise da aplicabilidade dos métodos em um estudo de caso, com o foco na etapa de normalização. Assim, a pesquisa está voltada para a seguinte questão:

Quais são as semelhanças e diferenças entre os resultados normalizados das categorias de impacto, ao se utilizar os fatores de normalização dos métodos de AICV e fatores de normalização globais, em um estudo comparativo de ACV entre vedações internas não-estruturais em alvenaria convencional de blocos cerâmicos (AC), *drywall* com estrutura de aço (DEA) e *drywall* com estrutura de madeira (DEM)?

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A maioria dos métodos de AICV foram desenvolvidos levando em consideração a cobertura geográfica da Europa. Como consequência, os modelos de caracterização e fatores de normalização presentes nos métodos abrangem as características do escopo europeu, podendo implicar em resultados distantes da realidade regional quando estudos de ACV são conduzidos em outros países, como o Brasil. Além disso, a maior parte dos métodos possuem modelos de caracterização e abordagens próprias para a normalização, com o uso de fatores de que refletem regiões específicas (BUENO *et al.*, 2016), muitas vezes não aplicáveis para países em desenvolvimento.

Com base nisso, para suprir a carência de métodos consolidados para aplicações específicas, diversos esforços têm sido feitos para o desenvolvimento ou adaptação de metodologias de AICV. O objetivo principal desses esforços é de expandir a abrangência geográfica dos métodos, para minimizar a imprecisão dos resultados. Além disso, encontrar consenso científico entre as metodologias de AICV tem sido o foco de grande parte das pesquisas relacionadas à avaliação do ciclo de vida (HUIJBREGTS, 2014), conforme já evidenciados nos relatórios da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) e Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Sabe-se que, métodos diferentes atribuem diferentes fatores de normalização e diferentes categorias de impacto ambiental, podendo alterar drasticamente os resultados (CAVALETT *et al.*, 2013). Além do exposto, os fatores de normalização dos métodos atuais de AICV podem não fornecer as especificidades do contexto social e ambiental do Brasil, implicando em resultados distorcidos dos impactos ambientais (IBICT, 2019).

De acordo com o *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations based on existing environmental impact assessment models and factors for Life Cycle Assessment in a European Context*, as principais recomendações e informações técnicas fornecidas sobre as metodologias de AICV são feitas para os fatores de caracterização desses métodos, sem incluir recomendações sobre os fatores de normalização para determinada categoria de impacto (WOLF *et al.*, 2012).

Para a construção civil, com base nas constatações identificadas a partir da

análise da literatura, autores afirmam que não há consenso sobre os fatores de normalização entre as metodologias (BUENO *et al.*, 2016). Ainda, é evidente a elevada quantidade de estudos de caso voltados ao setor da construção civil, quando comparados aos estudos comparativos com o foco na melhoria das análises ambientais.

Salienta-se que dos poucos estudos comparativos encontrados para o setor da construção civil, entre os métodos de AICV, todos foram voltados à etapa de caracterização, não incluindo a análise dos resultados da normalização (ALLACKER; SOUZA; SALA, 2014; BUENO *et al.*, 2016; LASVAUX *et al.*, 2016; OWSIANIAK *et al.*, 2014).

Por essa razão, os mesmos autores dos estudos citados no parágrafo anterior incentivam a realização de análises que incluam a normalização, uma vez que essa etapa pode gerar diferentes percepções sobre o assunto.

Nesse sentido, esse estudo visa contribuir com o estado da arte para a seleção de categorias de impacto mais significativas para a construção civil, com base na etapa de normalização, e na análise das consequências da escolha das metodologias de AICV nos resultados da normalização. Para complementar essa análise, utilizou-se, também, fatores de normalização globais, que foram comparados para a identificação das principais inconsistências nos resultados da avaliação de impacto entre as categorias de impacto.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse estudo consiste em realizar recomendações de categorias de impacto de maior significância ambiental para a construção civil e investigar, comparativamente, as consequências do uso de fatores de normalização globais e de diferentes metodologias de AICV na fase de interpretação.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral fosse alcançado, os seguintes objetivos específicos foram planejados:



- a) Definir as principais categorias de impacto e os principais métodos de AICV, a partir da análise sistemática de estudos sobre a avaliação do ciclo de vida de residências unifamiliares;
- b) Avaliar comparativamente, por meio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida, os resultados da caracterização dos principais métodos de AICV para os sistemas de vedações internas não-estruturais;
- c) Avaliar comparativamente, por meio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida, os resultados da normalização dos principais métodos de AICV para os sistemas de vedações internas não-estruturais;
- d) Selecionar as categorias de impacto que apresentarem como resultado normalizado maior significância ambiental para os três sistemas de vedações internas não-estruturais;
- e) Comparar os resultados normalizados dos métodos de AICV com os resultados normalizados a partir de uma referência de fatores de normalização globais;
- f) Propor recomendações sobre a consistência dos resultados normalizados das categorias de impacto analisadas.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa direciona esforços para a análise e discussão — no âmbito da construção civil — da sensibilidade dos resultados das contribuições dos impactos ambientais potenciais das categorias de impacto, com a alteração dos métodos de AICV. Dessa forma, os resultados apresentados nesse estudo refletem cenários simulados, que podem sofrer alterações de acordo com as decisões tomadas pelos pesquisadores ao longo das descrições das fases da ACV. Com base nisso, as principais delimitações desse estudo foram referentes aos sistemas de vedações selecionados, dados utilizados no ICV (quantitativo de materiais e processos adaptados da base de dados) e abrangência geográfica (dados específicos para região metropolitana de Curitiba).

No que concerne aos sistemas de vedações, delimitou-se a avaliação de sistemas de vedações internas sem função estrutural (Alvenaria Convencional de

Blocos Cerâmicos, *Light Steel Framing* e *Light Wood Framing*), que empregassem diferentes tipos de materiais e fossem comumente utilizados no Brasil. Essa delimitação foi feita com o objetivo de verificar se os resultados das avaliações, para os diferentes tipos de sistemas, apresentariam tendências nas categorias de impacto com a alteração dos métodos de AICV.

Outra delimitação da pesquisa correspondeu aos dados utilizados para o inventário quantitativo de materiais e para os processos da base de dados *Ecoinvent* 3.5. Todos os dados e cálculos dimensionais foram coletados e realizados com o auxílio de profissionais da área, documentos técnicos, tabelas da construção civil e artigos científicos. Além disso, o inventário do ciclo de vida foi feito com base em dados secundários e as principais diferenças entre os sistemas de vedações foram os materiais utilizados. Os processos contidos na base de dados foram modificados para que os resultados dos impactos ambientais se aproximassem da realidade do local definido para o estudo.

Por fim, a delimitação de abrangência geográfica diz respeito ao local onde o estudo foi conduzido. Todos os resultados apresentados nessa dissertação refletem a construção de paredes de vedações internas na cidade de Curitiba, estado do Paraná. Dessa forma, ao replicar o estudo, os resultados podem sofrer algumas alterações, devido aos aspectos específicos de cada região, como materiais disponíveis, condições climáticas, modais de transporte e local de coleta de dados de processos unitários.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está organizada em sete capítulos principais, seguidos pelas referências bibliográficas e pelo apêndice.

O primeiro capítulo – **Introdução** – é constituído pela descrição do tema, problema, justificativa, objetivo geral, objetivos específicos, delimitação e estrutura do trabalho.

No segundo capítulo – **Revisão de Literatura**, os assuntos abordados nessa dissertação foram fundamentados e contextualizados para sustentar as principais discussões apresentadas no capítulo de resultados.

No terceiro capítulo – **Metodologia**, são abordados os procedimentos metodológicos empregados na elaboração dessa pesquisa, juntamente com o protocolo de pesquisa e a descrição de cada etapa de trabalho.

No quarto capítulo – **Estado da Arte**, os resultados oriundos da revisão bibliométrica e sistemática da literatura são apresentados e descritos detalhadamente, servindo como suporte para a escolha dos métodos de AICV e categorias de impacto analisadas no estudo de caso realizado nessa dissertação.

No quinto capítulo – **Estudo de Caso de ACV de Sistemas de Vedações Internas Não-Estruturais**, o levantamento quantitativo de materiais e todas as fases da ACV para o estudo de caso proposto são definidos com detalhes, para posterior cadastramento e simulação no *software* SimaPro®.

No sexto capítulo – **Resultados e Análises**, são apresentados os resultados quantitativos e discussões acerca dos impactos ambientais dos sistemas de vedação, em uma análise comparativa dos resultados da caracterização e da normalização entre os métodos de AICV e as categorias de impacto. Nesse capítulo, foi realizada, também, a comparação dos resultados normalizados das metodologias de AICV com os resultados normalizados a partir de uma referência com fatores de normalização globais.

Por fim, no sétimo capítulo – **Considerações Finais**, as principais recomendações e limitações do estudo são apresentadas, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse capítulo são apresentados os conceitos fundamentais para a compreensão dessa dissertação. O detalhamento desses conceitos é contextualizado nos tópicos sobre a Construção Civil e Impactos Ambientais (2.1), Sistemas de Vedações Verticais (2.2) e Avaliação do Ciclo de Vida (2.3).

### 2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTOS AMBIENTAIS

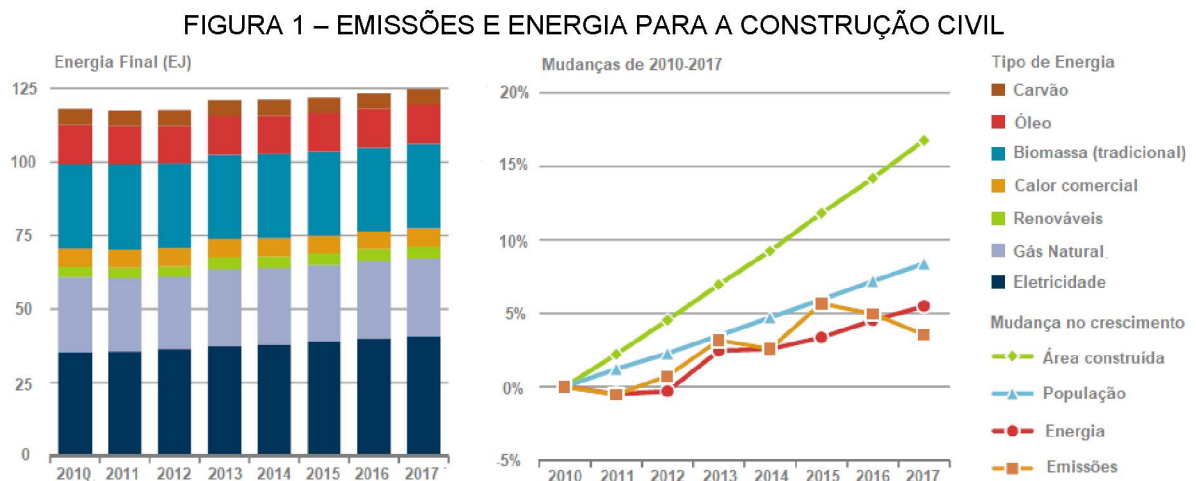
A construção civil, apesar de ter sido afetada pela recessão econômica nos últimos anos, conforme sinalizam os dados do relatório de Crescimento da Economia Brasileira 2018 – 2023, do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2018), destaca-se como um dos setores fundamentais ao impulsionamento dos avanços econômicos e sociais no país. Sua cadeia reúne uma ampla gama de fornecedores, encarregados desde a extração e fabricação dos principais insumos e equipamentos até a comercialização e prestação de serviços do setor.

Na contramão do seu desenvolvimento, devido à natureza de diversas atividades, o setor enfrenta desafios quanto à sustentabilidade, principalmente, por ser reconhecido pelo elevado potencial de ocasionar impactos ambientais consideráveis ao longo de sua cadeia produtiva (DUTIL; ROUSSE; QUESADA, 2011).

Estima-se que os produtos gerados por meio das atividades do setor da construção civil são responsáveis pelo alto consumo de recursos, altos índices de emissões globais de gases do efeito estufa (GHG), elevado potencial de poluição de ecossistemas e geração de grandes volumes de resíduos (OLIVEIRA *et al.*, 2014; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Esses elevados índices são oriundos dos processos de fabricação das principais matérias-primas, do transporte e dos processos de construção e demolição de edificações (MONAHAN; POWELL, 2011).

De acordo com os relatórios publicados em 2009 e 2010, pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), a construção civil contribui com até 30% das emissões globais anuais de GHG e consome até 40% de energia, 30% de recursos, 25% de água e 12% do solo (UNEP, 2009; UNEP, 2010). Dados recentes indicam que, em 2017, a contribuição global foi de 36% do uso de energia e 39%

das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a construção e o uso das edificações (UNEP, 2018). Os resultados do consumo de energia e das emissões, entre 2010 e 2017, foram consequência do intenso crescimento das atividades do setor, não significando que ações para minimizar os impactos não tenham sido praticadas. A FIGURA 1 destaca o comportamento das emissões e do consumo de energia ao longo dos anos, de acordo com o tipo de fonte de energia, crescimento da população e área construída.



FONTE: UNEP (2018), tradução nossa.

Já as altas taxas de consumo de energia são resultantes da fase de ocupação das edificações (ASDRUBALI; BALDASSARRI; FTHENAKIS, 2013; CONDEIXA; HADDAD; BOER, 2014; ROSSI; MARIQUE; REITER, 2012; ZHANG *et al.*, 2014), na qual o consumo energético é contabilizado durante o uso (para aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação, eletrodomésticos, etc.) ao longo do tempo de vida útil. Enquanto 80 a 90% da energia é consumida nessa fase, os outros 10 a 20% são consumidos durante a extração de matérias-primas, fabricação de produtos, construção e demolição (UNEP, 2010).

Sobre os altos índices de emissões, os processos de transporte e de produção de agregados e cimentos são comprovadamente considerados os principais responsáveis pelo aumento dessas taxas (LAVAGNA *et al.*, 2018), contribuindo diretamente com o aquecimento global, formação de chuva ácida e poluição atmosférica (LASVAUX *et al.*, 2016). Ainda, dados contidos no “*Global Carbon Budget 2013*” revelam que as emissões de CO<sub>2</sub>, provenientes da queima de

combustíveis fósseis e da produção de cimento entre 2003 e 2012, foram equivalentes à 90% do total de emissões (QUÉRÉ *et al.*, 2014).

Além disso, as atividades da construção civil geram aproximadamente 25% dos resíduos sólidos mundiais (UNEP, 2009). Sabe-se que, principalmente no Brasil, as edificações habitacionais são caracterizadas pela produção artesanal, desprovida, na maior parte dos casos, de um sistema de controle que auxilie na melhoria dos processos e do produto final (VIVAN; PALIARI; NOVAES, 2010). Nesse cenário, além da demolição, o processo de construção provoca a geração de grandes quantidades de resíduos, devido à falta de capacitação durante o trabalho, má qualidade dos materiais, ineficácia no controle dos processos ou não adaptação do projeto. Tais resíduos representam um grande problema quando não gerenciados de forma adequada, podendo gerar complicações de ordem estética, ambiental e de saúde pública (SMMA, 2017).

Dados contidos no “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil” revelam que as prefeituras brasileiras gerenciaram em 2017, aproximadamente, 117 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo a indústria da construção civil uma das atividades econômicas que mais contribuíram para o aumento desse número – 45 milhões de toneladas de resíduos provenientes da construção e demolição (RCD) (ABRELPE, 2017). Esse valor ainda não reflete com precisão o volume total de resíduos gerados pelo setor, cujo manejo é de responsabilidade dos respectivos geradores.

Para o município de Curitiba, conforme o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, realizado pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA, 2017), a prefeitura realiza a coleta de até 500 litros, por obra, de resíduos de construção e demolição a cada 2 meses. Quando a quantidade ultrapassa esse valor, o gerador se torna responsável pela contratação de empresas licenciadas ao órgão ambiental para a destinação adequada dos resíduos.

Apesar de existirem legislações específicas que orientem pessoas físicas e jurídicas quanto ao descarte de entulhos excedentes em locais autorizados, ainda é comum o descarte ilegal em logradouros públicos no Brasil. Essa prática, assim como o desconhecimento da natureza dos resíduos e a ausência de uma cultura de separação (SMMA, 2017), dificulta o gerenciamento apropriado dos RCD.

Em virtude dessas dificuldades de gerenciamento, diretrizes e procedimentos, como os apresentados na resolução CONAMA (2002), são

disponibilizados para a população e construtoras, a fim de incentivar a classificação, separação, coleta, reaproveitamento e reciclagem. Essas práticas, aliadas ao armazenamento adequado dos resíduos, ajudam a mitigar os impactos ambientais, econômicos e sociais provocados pela fase de construção e demolição.

Nesse contexto, vale ainda salientar que os impactos resultantes das atividades do setor podem ser apresentados em diferentes escalas de análises, que dependem diretamente da abordagem definida durante a execução de um estudo de avaliação de desempenho ambiental. Nesse sentido, ainda que a fase operacional contribua de modo significativo com os impactos ambientais, devido ao uso das edificações, (EVANGELISTA *et al.*, 2018; OYARZO; PEUORTIER, 2014; ZHANG *et al.*, 2014), os resultados dessa fase podem variar em função do perfil de consumo, área construída e material de construção utilizado.

Por exemplo, para a construção de residências, a fundação, estrutura, alvenaria e revestimento são os subsistemas que apresentam os maiores impactos ambientais, fazendo com que a fase pré-operacional seja muito significativa para as emissões de CO<sub>2</sub>, devido ao carbono e energia incorporados nos principais materiais: cimento, agregados e aço (EVANGELISTA *et al.*, 2018; MONTEIRO; FREIRE, 2012; ZHANG *et al.*, 2014). Entre os materiais mencionados, o cimento Portland é o principal contribuinte, possuindo uma alta energia incorporada de 0,83 kg CO<sub>2</sub> por kg de produto na fábrica (MONAHAN; POWELL, 2011). Além disso, como o concreto armado é um dos elementos mais contribuintes para a construção (DAHLSTRØM *et al.*, 2012; HOXHA *et al.*, 2017, MONAHAN; POWELL, 2011), sendo aplicado em grandes volumes em estruturas utilizadas para sustentar as cargas nas edificações (fundação, vigas, lajes e pilares), foi delimitado para esse trabalho o estudo de sistemas de vedações verticais sem função estrutural.

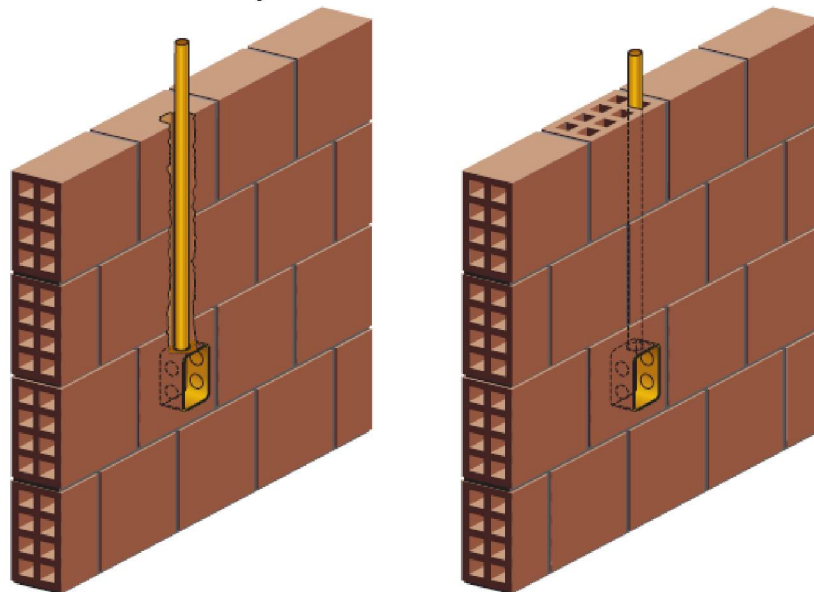
A principal razão dessa delimitação se deve ao propósito de verificar o comportamento dos resultados da AICV em sistemas com diferentes materiais empregados, assumindo-se como pressuposto que as paredes avaliadas nessa dissertação não dependem do tipo de estrutura da edificação, uma vez que são aplicadas unicamente para o fechamento de ambientes.

## 2.2 SISTEMAS DE VEDAÇÕES VERTICAIS

A necessidade de avanços orientados ao desenvolvimento sustentável da construção civil está além de estudos guiados somente à substituição de materiais de construção. A quantidade de resíduos gerados nos canteiros de obras, resultantes das atividades de construção, representam falhas no controle dos processos e indicam uma carência no planejamento do projeto. Notadamente, os sistemas construtivos são fundamentais para o atendimento dos requisitos técnicos e de adequação ao uso em diferentes países, podendo acentuar as perdas ou ganhos durante a execução de obras do setor (BERARDI, 2012).

No Brasil, devido à sua ampla extensão territorial, diferentes fatores climáticos e disponibilidade de materiais locais, ainda há o predomínio do uso de técnicas de construção convencionais (JUNIOR *et al.*, 2015; VATAN, 2018). As técnicas de construção convencionais são compostas pela estrutura de laje, vigas, pilares e fundação, com paredes de blocos cerâmicos ou de concreto unidos com argamassa de assentamento, sem nenhuma função estrutural (FIGURA 2), servindo somente como fechamento externo e separação de ambiente (SALOMÃO *et al.*, 2019).

FIGURA 2 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM AC



FONTE: THOMAZ *et al.* (2009).

O uso dos sistemas convencionais indica a forte influência da cultura construtiva brasileira, predominantemente direcionada ao uso de blocos cerâmicos de vedação (SOUZA, 2013). Esses métodos de construção são geralmente marcados por processos com custos elevados, baixo nível de planejamento, baixa qualificação



do trabalhador, altos índices de desperdícios, baixa qualidade, incidências de manifestações patológicas e baixo desempenho ambiental (ABDI, 2015; SOUZA, 2013; VIVAN; PALIARI; NOVAES, 2010).

Algumas características desses sistemas construtivos são o uso intensivo de mão-de-obra, altos prazos de execução e perdas relacionadas ao corte das alvenarias para o embutimento de instalações elétricas e hidráulicas (ABDI, 2015). Outra característica desses sistemas corresponde ao uso temporário de madeira como material de suporte, tipicamente descartada com reutilização ou reciclagem mínima (KERN *et al.*, 2018), por consequência dos agentes contaminantes da construção.

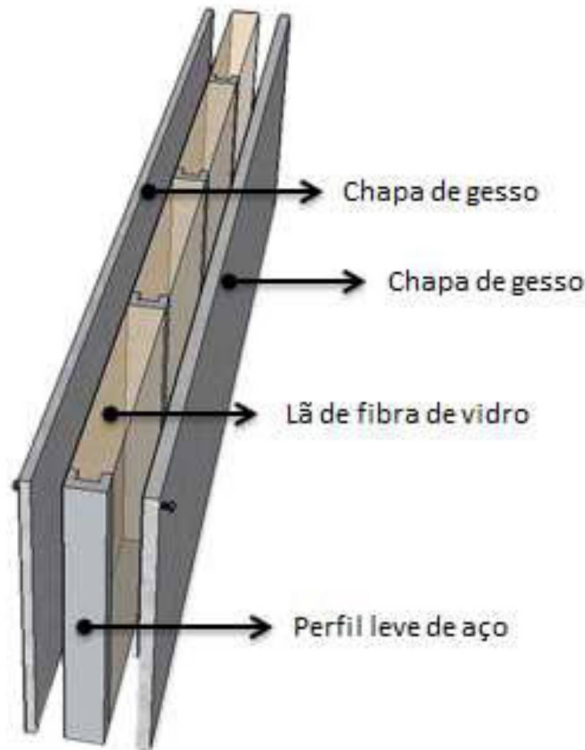
Em resposta aos problemas associados aos sistemas convencionais, a indústria da construção civil vem se modificando a partir da adoção de sistemas racionalizados e sistemas pré-fabricados ou industriais (ABDI, 2015; YAMAZAKI, 2004). No Brasil, de acordo com Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), as primeiras aplicações de sistemas pré-fabricados ou industriais foram vistas a partir de 1970, com maior impulsionamento em 1990, por meio do uso de concreto armado e estruturas metálicas com chapas de gesso acartonado para vedações do tipo *drywall*.

Atualmente, com o foco na inovação dos sistemas e na busca por processos que possam ser controlados facilmente, sistemas leves de madeira (*Light Wood Framing*), aço galvanizado (*Light Steel Framing*), painéis de PVC preenchidos com concreto, painéis pré-moldados, painéis mistos de blocos cerâmicos ou de concreto, entre outros, têm sido utilizados para vários projetos de edificações (ABDI, 2015). Destes, diversos estudos são encontrados na literatura voltados, principalmente, às análises dos sistemas em *Light Steel Framing* (LSF) e *Light Wood Framing* (LWF).

A tecnologia em LSF, além de promover uma produção mais limpa (VIVAN; PALIARI; NOVAES, 2010), vem sendo utilizada para a construção de residências de médio e alto padrão (JUNIOR *et al.*, 2015). O sistema em LSF é um sistema construtivo industrializado composto por estruturas em aço que são fechadas com placas cimentícias ou chapas de gesso acartonado (ABDI, 2015). Essas estruturas são formadas por perfis de aço zincado conformados a frio, que são obtidos por dobramento em prensa com o aço em temperatura ambiente (ABNT NBR 6355), tendo que atender às tolerâncias dimensionais estabelecidas na ABNT NBR 15253 (BRASIL, 2016). Além disso, as paredes internas sem função estrutural para esse

sistema (FIGURA 3) são constituídas por perfis metálicos, chapas de gesso acartonado (*drywall*) e placas de lã de rocha ou lã de vidro que estejam de acordo com as especificações de condutividade térmica e que não afetem a segurança ao fogo (BRASIL, 2016).

FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM LSF



FONTE: BRASIL (2016).

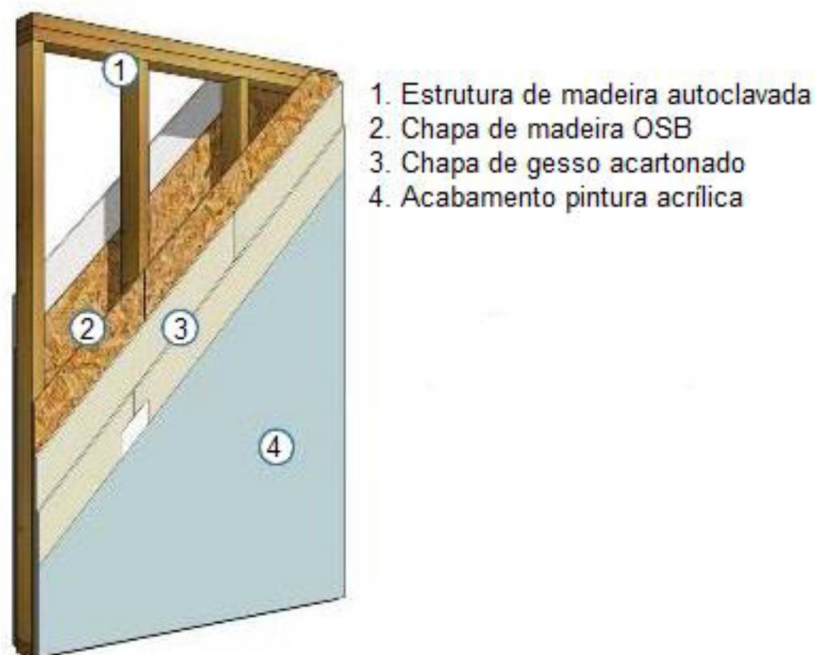
Os componentes da parede podem variar de acordo com a função desejada e área de aplicação. De acordo com a diretriz SINAT nº 003 – “Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Steel Framing*””, além dos componentes estruturais em aço, os componentes de fechamento podem ser constituídos de chapas delgadas (como placas cimentícias), perfis de PVC rígido (*siding*), chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) e chapas de gesso acartonado (*drywall*) (BRASIL, 2016). Não necessariamente são empregados todos os componentes descritos, contanto que todos os materiais utilizados tenham características de acordo com as normas técnicas pertinentes e atendam aos critérios de desempenho mínimo estabelecidos nas normativas para o sistema (por exemplo, segurança estrutural, resistência ao fogo, durabilidade, estanqueidade,

desempenho térmico, desempenho acústico, entre outros) (BRASIL, 2016; SPOSTO; CALDAS; NABUT NETO, 2016).

Já o sistema em LWF difere do LSF por ser formado por painéis estruturais de madeira provenientes de florestas plantadas (ABDI, 2015; VATAN, 2018) ou áreas de reflorestamento (JUNIOR *et al.*, 2015). Amplamente usado em outros países há muitos anos, por proporcionar resistência aos abalos sísmicos (VATAN, 2018), esse sistema ganhou destaque no Brasil somente nos últimos anos, com a instalação da primeira fábrica (Tecverde) na região metropolitana de Curitiba no final de 2010, autorizada à produzir a tecnologia (SOUZA, 2013).

Conforme apresentado no DATec N° 020-C – “Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – Tecverde (tipo *light wood framing*)”, as paredes internas desse sistema (FIGURA 4) são compostas por quadros estruturais de madeira, chapas OSB e duas camadas de chapas de gesso *drywall* do tipo *Standard* para áreas secas ou do tipo resistente à umidade, para áreas molhadas (BRASIL, 2018b).

FIGURA 4 – COMPOSIÇÃO DA PAREDE INTERNA DO SISTEMA EM LWF



FONTE: Adaptado de BRASIL (2018b).

No Brasil, o uso de tecnologias como LSF e LWF ocorre por questões que estão além dos critérios de sustentabilidade ambiental. Os sistemas construtivos inovadores, quando comparados aos convencionais, apresentam maior

produtividade, maior velocidade de execução e menor percentual de homens-hora na fase de execução ou instalação (JAILLON; POON, 2009; SPOSTO; CALDAS; NABUT NETO, 2016). Como os sistemas permitem que os projetos sejam modulados com dimensões específicas, os elementos construtivos chegam prontos no canteiro de obras, e as operações se tornam limitadas somente à montagem destes elementos (ABDI, 2015). Além disso, o uso de sistemas racionalizados e pré-fabricados possibilitam, além da redução da geração de resíduos, emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de água e energia no canteiro de obras, maior controle dos custos do projeto.

### 2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Bastante discutida na comunidade científica desde o seu princípio, a técnica de ACV tem sido aplicada na avaliação de produtos de diversos segmentos, especialmente para a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental nas várias etapas do ciclo de vida.

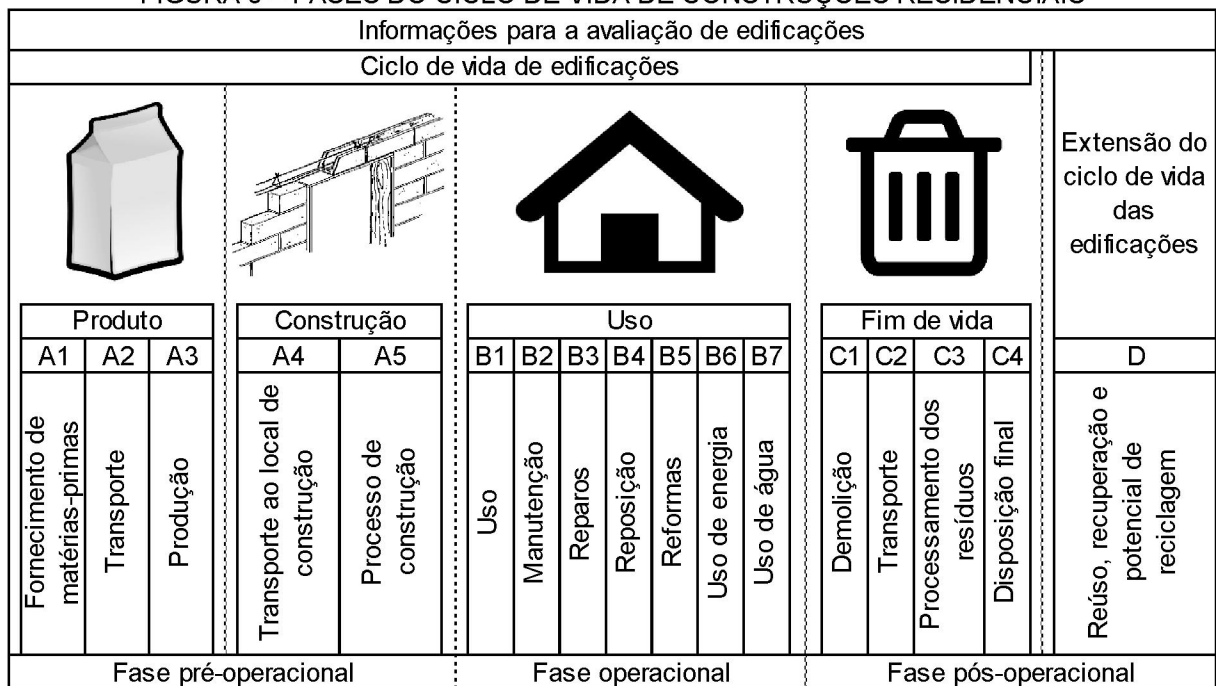
Em suma, a ACV é definida pela NBR ISO 14040 como uma técnica de gestão ambiental que avalia de forma sistemática o desempenho ambiental do ciclo de vida de sistemas de produtos (ABNT, 2009a). Por meio dessa técnica, as atividades com maior contribuição nos impactos são indicadas, a fim de possibilitar a elaboração de estratégias e políticas públicas para a tomada de decisões.

Quanto à classificação, esta é essencialmente quantitativa, pois os resultados numéricos refletem as categorias de impacto e permitem comparações entre produtos semelhantes (IBICT, 2018), possibilitando a identificação dos processos e materiais críticos do ciclo de vida.

Devido à eficácia e transparência metodológica, a ACV tem sido amplamente utilizada para a avaliação de edificações e produtos da construção civil (EVANGELISTA *et al.*, 2018), sendo reconhecida como uma técnica de grande magnitude para a promoção de construções sustentáveis desde a década de 90 (BOONSTRA; PETTERSEN, 2003).

Em virtude do aumento de estudos de ACV no setor da construção civil, a norma europeia EN 15978 (2011) determinou, em uma abordagem de ciclo de vida, as principais informações que podem estar contidas no escopo para a avaliação da sustentabilidade de edificações (FIGURA 5).

FIGURA 5 – FASES DO CICLO DE VIDA DE CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS



FONTE: Adaptado de EN 15978 (2011), tradução nossa.

Conforme a FIGURA 5, a fase pré-operacional é formada pelas subfases que abrangem as atividades de extração e fabricação das matérias-primas, transporte de dos insumos e construção das edificações.

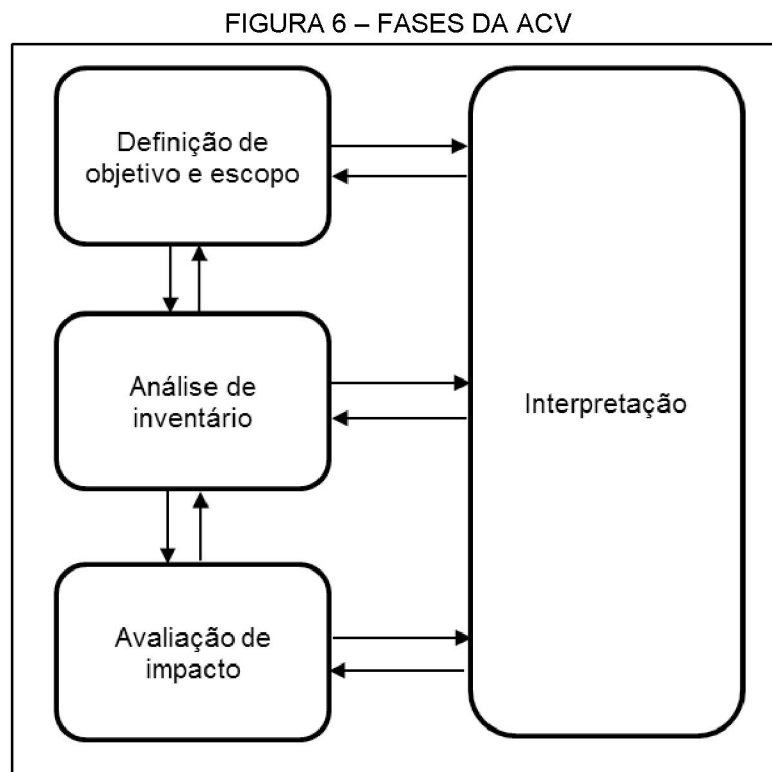
Na fase operacional, a etapa de uso engloba todas as atividades resultantes da ocupação da residência pelo período de vida útil, compreendendo o consumo de energia e água e a manutenção devido ao desgaste das estruturas ao longo dos anos.

Por fim, a fase pós-operacional é composta pelas atividades de demolição e disposição final dos entulhos (transporte até o local de destino), podendo haver a extensão do ciclo de vida desses resíduos mediante o reuso, recuperação e reciclagem destes.

A normativa europeia EN 15978 – *Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*, junto às diretrizes estabelecidas na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), reforça os estágios do ciclo de vida, diferenciando-se somente em relação ao foco da avaliação do desempenho ambiental, que são os aspectos de sustentabilidade específicos das obras e dos produtos de construção.

### 2.3.1 Estrutura metodológica da ACV

Para o desenvolvimento de um estudo de ACV, é necessária a estruturação e descrição de quatro fases iterativas: (i) definição do objetivo e escopo, (ii) criação do inventário do ciclo de vida, (iii) cálculo e avaliação de impacto do ciclo de vida e (iv) interpretação dos resultados (FIGURA 6).



FONTE: ABNT (2009a).

A definição do (i) objetivo e escopo é a primeira fase de qualquer estudo de ACV. O objetivo definido em uma ACV deve declarar as razões pela qual o estudo está sendo conduzido, a aplicação pretendida, se há intenção de divulgação pública dos resultados e o público-alvo (ABNT, 2009a). Logo após definido o objetivo, deve-se estabelecer o escopo, “para assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo declarado” (ABNT, 2009a, p. 12).

Para isso, a NBR ISO 14040 indica que o escopo deve incluir e detalhar o sistema de produto, função do sistema de produto, unidade funcional, fluxo de referência, fronteira do sistema, procedimentos de alocação, metodologias de AICV, categorias de impacto, pressupostos, limitações e requisitos de qualidade dos dados

(ABNT, 2009a). De acordo com as normas ISO 14040, 14044 e 14049 (ABNT, 2009a; ABNT 2009b; ISO, 2012), define-se como:

- **Sistema de produto:** conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, que desempenha uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto;
- **Função e unidade funcional:** a unidade funcional é a quantificação da função do produto, sendo a função definida como as características de desempenho esperado;
- **Fluxo de referência:** trata-se da quantidade de produtos necessária para desempenhar a função determinada na quantidade estabelecida pela unidade funcional;
- **Fronteira do sistema:** interface entre um sistema de produto e o meio ambiente (IBICT, 2015, p. 28), definida por critérios que especificam quais processos elementares fazem parte do sistema de produto;
- **Alocação:** convém que seja considerada a necessidade de procedimentos de alocação, quando os sistemas envolvem múltiplos produtos (processos industriais com uma relação não linear entre entradas de matérias-primas e saídas);
- **Categoria de impacto e indicador de categoria:** categoria de impacto é a classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados e indicador de categoria é representação quantificável de uma categoria de impacto (ABNT, 2009a, p. 6);
- **Requisitos de qualidade dos dados:** especificam em termos gerais as características dos dados necessários para o estudo.

Um aspecto pertinente que emerge das avaliações do ciclo de vida é o papel da unidade funcional utilizada para explicar os fenômenos sob investigação. Por exemplo, para o contexto da construção civil, os resultados de impacto ambiental expressos por habitação ou por metro quadrado de área útil, podem sofrer alterações (LAVAGNA *et al.*, 2018), visto que outras características são integradas nas avaliações quando se delimita uma área maior.

Além disso, considerações relativas aos procedimentos de alocação também são descritas nessa fase, pois sabe-se que uma das dificuldades da utilização da técnica está relacionada com a questão da multifuncionalidade de sistemas de produto.

A alocação é definida pela “distribuição proporcional das entradas e saídas de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas de produto” (IBICT, 2015, p. 6). Resumidamente, na prática industrial, é frequente o caso de um processo unitário produzir mais de um produto, ou seja, possuir mais de uma saída (HEIJUNGS; SUH, 2011). Assim, como mais de um produto é gerado, os aspectos ambientais devem ser divididos entre os produtos finais, para que a distribuição dos fluxos intermediários<sup>1</sup> seja coerente com o objeto de estudo. Dessa forma, para que o problema da multifuncionalidade seja solucionado, uma alternativa é evitar a alocação. Para isso, a norma recomenda a divisão dos processos elementares em dois ou mais subprocessos ou a expansão do sistema de produto (ABNT, 2009b). Dependendo da complexidade do sistema de produto, quando a alocação não pode ser evitada, convém a utilização de métodos de alocação baseados em propriedades físicas (massa ou energia) ou fatores econômicos (IBICT, 2015). Normalmente, nos estudos de ACV, a alocação é evitada de acordo com as recomendações da norma.

Outra análise que pode ser delimitada no escopo da ACV é relativa à qualidade esperada dos dados do ICV. De acordo com a norma ISO 14044 (ABNT, 2009b), convém que os requisitos de qualidade dos dados abranjam a cobertura temporal, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, precisão, completeza, representatividade, consistência, reprodutividade, fonte dos dados e incerteza da informação. Para isso, Weidema e Wesnaes (1996) propuseram um modelo de pontuações, chamado matriz *pedigree*, no qual os processos são avaliados por meio de indicadores de qualidade (com uma escala de classificação de 1 a 5, com 5 critérios), conforme os requisitos de qualidade dos dados definidos pelo pesquisador (QUADRO 1).

---

<sup>1</sup> Fluxo intermediário: fluxo de produto, material ou energia que ocorre entre processos elementares do sistema de produto em estudo (ex: emissões geradas a partir da queima de combustíveis fósseis). Diferente do fluxo intermediário, o fluxo elementar é definido pelo material ou energia retirado ou liberado no meio ambiente sem sofrer transformação por interferência humana (ex: água de rios) (ABNT, 2009a).



QUADRO 1 – MATRIZ *PEDIGREE* PARA QUALIDADE DOS DADOS

Pontuação do Indicador	1	2	3	4	5
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente com base em suposições ou dados não verificados com base em medições	Dados não verificados parcialmente com base em estimativas qualificadas	Estimativas qualificadas (ex: por especialista)	Estimativas não qualificadas
Completeza	Dados que representam todos os locais relevantes para o mercado considerado, durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados que representam >50% dos locais relevantes para o mercado considerado, durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados que representam apenas alguns locais (<< 50%) relevantes para o mercado considerado ou >50% dos locais, mas de períodos mais curtos	Dados que representam apenas um local relevante para o mercado considerado ou de alguns locais, mas de períodos mais curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e de períodos mais curtos
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados	Menos de 6 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados	Menos de 10 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados	Menos de 15 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados	Idade dos dados desconhecida ou diferença de mais de 15 anos em relação ao período de tempo do conjunto de dados
Correlação Geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios de uma área maior na qual a área em estudo está incluída	Dados da área com condições de produção semelhantes	Dados da área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de área desconhecida ou distintamente diferente (ex: América do Norte em vez do Oriente Médio)
Correlação Tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo (tecnologia idêntica), mas de diferentes empresas	Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias	Dados de processos e materiais parecidos	Dados sobre processos relacionados em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias

FONTE: WEIDEMA E WESNAES (1996), tradução nossa.

Vale salientar que o uso da matriz *pedigree* envolve um julgamento subjetivo, que dependerá do conhecimento de *background* disponível ao pesquisador que está realizando a pontuação (WEIDEMA, 1998).

Na sequência, após a definição do objetivo e escopo, segue-se para a fase de inventário do ciclo de vida (ii). Os principais elementos que fazem parte da análise do ICV são descritos pela NBR ISO 14040 como:

- **Coleta de dados:** os dados para cada processo elementar dentro da fronteira do sistema de produto podem ser classificados como entradas de energia, matérias-primas, auxiliares, e outras entradas físicas; produtos, coprodutos e resíduos; emissões atmosféricas, descargas para a água e solo e; outros aspectos ambientais (ABNT, 2009a). Como a coleta desses dados demanda muitos recursos, existem diversas bases de dados que fornecem essas informações sobre inúmeros processos e produtos. Nesse caso, no escopo de uma ACV, deve-se justificar quais são os dados utilizados, sejam eles oriundos de fontes primárias ou secundárias. Os dados primários são dados que foram coletados diretamente no sistema em avaliação, enquanto os dados secundários são os dados disponíveis em bases de dados, ou seja, relacionados com o sistema em avaliação (RODRIGUES, 2015). A maior parte dos estudos de ACV são realizados majoritariamente com dados secundários;
- **Cálculos com os dados:** após a coleta de dados, os procedimentos de cálculo são realizados, incluindo a validação dos dados coletados, a correlação dos dados aos processos elementares e a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional (ABNT, 2009a). Todos os cálculos e tratamento dos dados na etapa de ICV são matriciais. Para isso, Heijungs e Suh (2002) criaram o livro "*The Computational Structure of Life Cycle Assessment*", onde explicam detalhadamente as estruturas algorítmicas e matemáticas envolvidas na realização de um estudo de ACV;
- **Alocação de fluxos e liberações:** nessa etapa, para resolver o problema de multifuncionalidade de sistemas, métodos matemáticos são utilizados, como os métodos de expansão/substituição de sistemas, particionamento, excedente, entre outros (HEIJUNGS; SUH, 2002; EC-JRC, 2010).

A condução da análise de inventário é um processo iterativo que envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo necessários para quantificar os fluxos de entradas e saídas do sistema de produto (ABNT, 2009a). Essa é uma das fases mais trabalhosas da ACV, visto que é necessário conhecer com profundidade o processo avaliado, para a coleta de dados consistentes. Nessa fase, com o sistema de produto definido, deve-se ter conhecimento dos fluxos de entrada e saída, ou seja, provindos (recursos do ar, água e solo) ou destinados ao meio ambiente (emissões atmosféricas, despejos de efluentes e deposições do solo). Além disso, à medida em que os dados são coletados, ajustes no objetivo e escopo do estudo podem ser realizados a partir da identificação de novos requisitos ou limitações dos dados.

A terceira fase (iii) tem como objetivo “estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV” (ABNT, 2009a). Na fase de AICV, os resultados do inventário do ciclo de vida são transformados em uma informação mais compreensível, capaz de fornecer uma contribuição útil e objetiva ao processo de tomada de decisão (VITALE *et al.*, 2018). Nessa fase é obrigatória a seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização para a correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (ABNT, 2009b). Uma vez que, para essa dissertação, essa fase recebe destaque, os conceitos, estrutura de análise e os principais métodos de AICV são detalhados nas subseções 2.3.2 e 2.3.3.

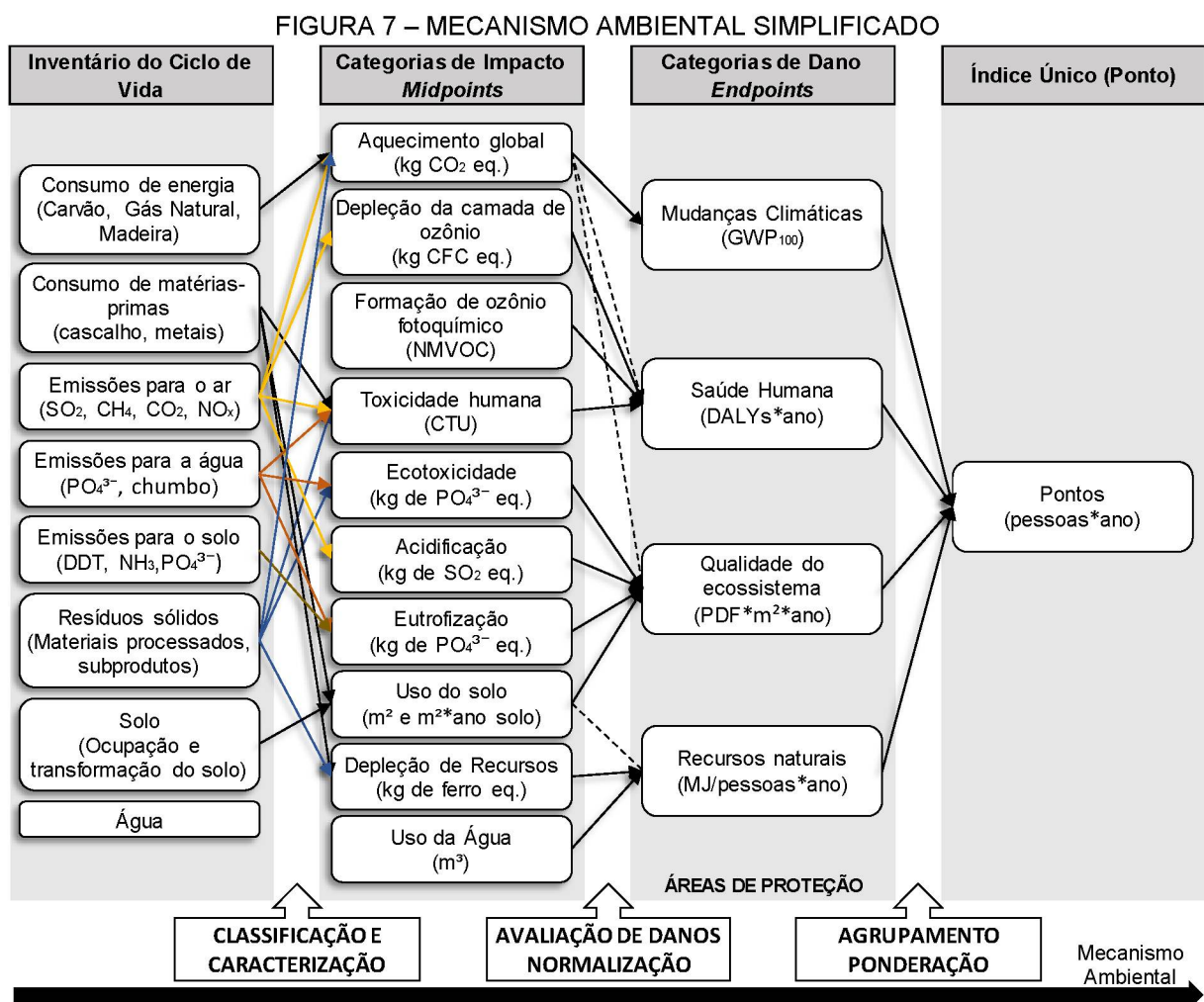
Na última fase (iv), correspondente à interpretação dos resultados da ACV, convém a reflexão de que os resultados da AICV são baseados em uma abordagem relativa, que indicam efeitos ambientais potenciais e que não preveem impactos reais (ABNT, 2009a). Nessa fase, os resultados do ICV e da AICV são confrontados com o que foi estabelecido na definição do objetivo e escopo, podendo ser realizada uma análise de sensibilidade sobre os dados do ICV. Vale ressaltar que todas as fases estão relacionadas entre si, para que ajustes sejam realizados durante a execução do projeto.

### 2.3.2 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida consiste na associação dos resultados do inventário do ciclo de vida às categorias de impacto (ex: acidificação,

aquecimento global e esgotamento de recursos) e seus respectivos indicadores de categoria (ex: kg SO<sub>2</sub>-equivalente de H<sup>+</sup> – liberação, Kg de CO<sub>2</sub>-equivalente de absorção infravermelha, RDU (*Resource Depletion Units*) de disponibilidade reduzida), para a conversão quantitativa dos impactos ambientais que um produto ocasiona (ABNT, 2009a; UGAYA, 2013).

A FIGURA 7 representa o mecanismo ambiental desta fase, incluindo os fluxos elementares da fase de ICV, as categorias de impacto de *midpoint*, as categorias de dano de *endpoint* e de pontuação única.



FONTE: DE SOUZA, TEIXEIRA e OSTERMANN (2015), tradução nossa<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> CTU (*Comparative Toxic Unit*) – Unidade Tóxica Comparada; NMVOC (*Nonmethane Volatile Organic Compound*) – Composto Orgânico Volátil Não Metano; GWP<sub>100</sub> (*Global Warming Potential: time horizon of 100 years*) – Potencial de Aquecimento Global (horizonte temporal de 100 anos); DALY (*Disability Adjusted Life Years*) – anos de vida ajustados por incapacidade; PDF (*Potentially Disappeared Fraction of Species*) – Fração de Espécies Potencialmente Desaparecidas. A unidade da pontuação final representa o impacto potencial por pessoa, por ano (DE SOUZA; TEIXEIRA; OSTERMANN, 2015).

As delimitações e escolhas realizadas nessa fase devem atender ao objetivo e escopo definido na primeira fase do estudo e ser devidamente descritas e relatadas. Entre os elementos obrigatórios para a modelagem e avaliação, inclui-se nessa fase a seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). A partir disso, nessa etapa da AICV, conhecida como caracterização, a conversão dos resultados numéricos dos indicadores em categorias de impacto é realizada. Para isso, utiliza-se um fator quantitativo de conversão, chamado de fator de caracterização, que é obtido a partir de um modelo responsável por estabelecer as relações entre a causa (fluxos elementares) e o efeito (impacto ou dano ao meio ambiente) do mecanismo ambiental (IBICT, 2019). O objetivo disso é transformar os resultados em informações mais compreensíveis sobre os impactos ambientais potenciais acarretados pelo sistema de produto.

Relativo aos elementos opcionais, os resultados da caracterização podem ser normalizados, agrupados e ponderados. A normalização consiste na avaliação da magnitude dos resultados da caracterização em relação à uma referência (UGAYA, 2013), significando que o resultado do indicador é transformado no resultado normalizado (adimensional) pela divisão deste pelo valor de referência (ex: entradas e saídas totais para uma determinada área geográfica ou área em uma base *per capita*) (ABNT, 2009b). Dessa forma, de acordo com a estrutura de cálculo apresentada por Heijungs e Suh (2011), para melhorar a compreensão da influência de cada categoria de impacto, o impacto potencial é calculado, conforme a equação (1), para então ser normalizado por meio da equação (2).

$$h = FC \cdot g \quad (1)$$

$$\tilde{h} = \frac{h}{\dot{h}} \quad (2)$$

Onde:

h: impacto potencial;

FC: fator de caracterização;

g: inventário do ciclo de vida;

$\tilde{h}$ : impacto normalizado;

$\dot{h}$ : impacto referência (h ponto).

A normalização pode ser usada para comparar os resultados com base em uma referência externa ou interna ou como preparação para a etapa de ponderação, sendo que cada uma das abordagens apresenta vantagens e desvantagens.

A normalização interna ocorre quando a referência utilizada é proveniente de dados diretamente relacionados ao estudo de caso. No entanto, essa abordagem é limitada somente aos estudos comparativos de ACV, podendo facilitar a comunicação dos resultados e ajudar a evitar erros macroscópicos, como a subestimação/superestimação dos resultados (PIZZOL *et al.*, 2017).

Por outro lado, de acordo com Pizzol *et al.* (2017), a normalização externa se baseia em referências de produção regionais/nacionais e globais, sendo as regionais as mais aplicadas em estudos de ACV (PRADO; WENDER; SEAGER, 2017). Assim, com a representação de uma determinada região, os resultados caracterizados são fornecidos com base em um contexto específico, como é o caso apresentado nos principais métodos de AICV, que possuem referências de normalização externa que representam a Europa, EUA e o resto do mundo. No entanto, mesmo com o uso de uma referência ideal, a normalização externa não avalia diferenças mútuas com relação à incerteza, podendo apresentar resultados com viés e levar a recomendações baseadas inteiramente na abordagem de normalização. Nesse contexto, a cobertura dos fluxos ambientais, o inventário de normalização e o conjunto de fatores de caracterização devem ser adequados ao objeto em estudo (PIZZOL *et al.*, 2017; PRADO; WENDER; SEAGER, 2017).

Na sequência, o agrupamento se trata de um procedimento de hierarquização dos resultados com base no agrupamento das categorias de impacto e a ponderação consiste em um processo de conversão dos resultados normalizados (ABNT, 2009b) pela multiplicação destes pelos fatores de ponderação (pesos dados para cada categoria de impacto) (HEIJUNGS; SUH, 2011). As etapas de normalização e ponderação são realizadas com o foco em regiões geográficas específicas e utilizam como base métricas econômicas ou sociais, como as emissões anuais de determinada área.

Comparada à complexidade da fase de ICV, os procedimentos matemáticos que envolvem a fase de AICV são facilitados, devido ao uso de modelos de caracterização que incorporam os aspectos técnicos de modelagem (HEIJUNGS; SUH, 2011). Por outro lado, problemas pertinentes emergem a partir da escolha dos elementos obrigatórios na avaliação de impacto. As categorias de impacto,

indicadores de categoria e modelos de caracterização selecionados podem não fornecer uma representação ambientalmente significativa dos impactos ambientais potenciais (HEIJUNGS; SUH, 2011), podendo incorporar subjetividades nessa fase (ABNT, 2009a). Diante disso, a seleção e conhecimento dos métodos de AICV são cruciais para aprimorar a confiabilidade dos resultados de impacto conforme as características intrínsecas ao sistema de produto avaliado, seja em nível de abrangência temporal e geográfica, transparência, relevância ambiental, robustez, aplicabilidade e reconhecimento internacional.

Nas últimas décadas, diversas metodologias de AICV foram desenvolvidas e disponibilizadas na literatura para facilitar a elaboração de estudos de ACV (WOLF *et al.*, 2012). Os métodos de AICV contam com diferentes abordagens e categorias que, dependendo da aplicação pretendida e do critério de escolha do pesquisador que está conduzindo o estudo de ACV, deve reunir todos os aspectos ambientais de relevância para o sistema de produto analisado. Nesses métodos, os modelos de caracterização, assim como os fatores de normalização e ponderação particulares (sendo estes últimos facultativos), são sistematizados, sendo facilmente associados aos ICVs com o auxílio de *softwares* popularmente usados para a simulação de cenários e conversão dos fluxos de saída entre as categorias de impacto.

Por outro lado, ainda existe um potencial significativo de aumento da eficiência da avaliação, a partir da harmonização das metodologias de AICV e diminuição das incertezas (ANGELAKOGLU; GAIDAJIS, 2015). De acordo com a revisão crítica sobre as principais metodologias de avaliação do desempenho ambiental, realizada pelos autores Angelakoglou e Gaidajis (2015), os métodos de AICV devem levar em consideração as características espaciais dos sistemas industriais, enfatizando claramente as premissas aplicadas para a minimização das fraquezas e limitações que surgem no desenvolvimento da ACV. Nesse sentido, um dos desafios das metodologias é de garantir atributos específicos para diversos setores da indústria, com categorias e terminologias de avaliação consistentes, respeitando as tecnologias disponíveis e características da região onde o estudo é conduzido.

Quanto aos níveis de avaliação do impacto, as categorias podem ser classificadas como categorias de *midpoint* (orientadas a problemas) ou *endpoint* (orientadas a danos). As discussões sobre as vantagens e desvantagens da modelagem de *midpoint* ou *endpoint*, assim como combinações das duas

abordagens, foram iniciadas na US EPA (*United States Environmental Protection Agency*) e UNEP (*United Nations Environment Programme*), estendendo-se no âmbito da *Life Cycle Initiative* (EC-JRC, 2010b), projeto criado entre a UNEP e SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) com o objetivo de facilitar a aplicação do conhecimento do ciclo de vida na agenda global de desenvolvimento sustentável (EC-JRC, 2010b).

As categorias de *midpoint* refletem um estágio inicial da cadeia de causa e efeito (EC-JRC, 2011), sendo caracterizadas localmente, ou seja, antes de chegar ao ponto final da análise, permitindo uma avaliação mais transparente e limitando as incertezas. Isso significa que os métodos de AICV de *midpoint* possuem modelos de caracterização que consideram um indicador entre a emissão e o ponto final do mecanismo ambiental (CAVALETT *et al.*, 2013). Alguns exemplos de categorias de impacto de *midpoint* são o aquecimento global, depleção da camada de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso do solo, depleção de recursos e uso da água.

Por outro lado, as categorias de *endpoint* refletem os danos causados em áreas amplas de proteção, as quais são mudanças climáticas, saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais, fornecendo maiores incertezas na avaliação do que os métodos de *midpoint* (MONTEIRO; FREIRE, 2012).

### 2.3.3 Metodologias de AICV

A concepção das primeiras metodologias de AICV ocorreu nas décadas de 80 e 90, com o desenvolvimento dos métodos EPS (*Environmental Priority Strategies – Endpoint*), *Swiss Ecoscarcity (Ecopoints)* e CML 1992 (diretrizes holandesas – *Midpoint*) (EC-JRC, 2010a).

Após isso, diversos esforços foram feitos para a harmonização dos métodos e para a identificação de melhores práticas nos modelos de caracterização disponíveis, assim como o desenvolvimento de novos métodos capazes de englobar análises ambientais mais robustas.

Algumas das principais metodologias de AICV, de acordo com suas categorias de impacto, abordagem e local de origem, podem ser vistas no QUADRO 2.



QUADRO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE AICV

Categorias	CML baseline	Eco-indicator 99	EDIP 2003/EDIP97	EPS 2000	IMPACT 2002+	LIME	LUCAS	MEEuP	ReCiPe	Swiss Ecotoxicity	TRACI	IPCC	CED	ILCD	BEES
Acidificação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
Aquecimento global	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Consumo de recursos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Depleção da camada de ozônio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓
Ecotoxicidade	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
Eutrofização	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓
Formação de ozônio		✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓				✓	
Orgânicos inaláveis		✓		✓	✓					✓					
Radiação ionizante				✓	✓				✓	✓				✓	
Oxidação fotoquímica (Smog)	✓		✓						✓		✓				✓
Toxicidade humana	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
Uso do solo		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
Local de origem	Holanda	Holanda	Dinamarca	Suécia	Suíça	Japão	Canadá	Holanda	Holanda	Suíça	USA	Global	Suíça	Luxemburgo	USA
Normalização	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓			✓	✓
Abordagem	M	E	M	E	M/E	M/E		M	M/E	M/E	M	E		M	M

FONTE: Adaptado de EC-JRC (2010a); FRISCHKNECHT *et al.* (2007). tradução nossa<sup>3</sup>.

Entre os principais métodos de AICV utilizados na avaliação de impacto do ciclo de vida na atualidade, destacam-se o CML *baseline* (*Centre of Environmental Science of Leiden University*), EDIP 2003/EDIP97 (*Environmental Development of Industrial Products*) (HAUSCHILD; WENZEL, 1997; HAUSCHILD; POTTING, 2005), IMPACT 2002+ (*Impact Assessment of Chemical Toxics*) (JOLLIET *et al.*, 2003), LIME (*Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling*) (ITSUBO; INABA, 2012; ITSUBO; INABA, 2015; INABA; ITSUBO, 2018), LUCAS (TOFFOLETTO *et al.*, 2007), MEEuP (*Methodology study for Ecodesign of Energy-using Products*) (KEMNA *et al.*, 2005), ReCiPe (GOEDKOOP *et al.*, 2009), Swiss Ecotoxicity (*Ecopoints*) (BRAND *et al.*, 1998), TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) (BARE, 2004; BARE;

<sup>3</sup> M: *Midpoint*; E: *Endpoint*. A nomenclatura de algumas categorias de impacto foi simplificada no QUADRO 2. Ex: a categoria eutrofização pode ser apresentada detalhadamente como eutrofização aquática, marinha, de água doce e terrestre em determinadas metodologias de AICV.

GLORIA; NORRIS, 2007), IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (ALBRITTON; MEIRA-FILHO, 2001; IPCC, 2001), CED (*Cumulative Energy Demand*) (FRISCHKNECHT; JUNGBLUTH *et al.*, 2003), ILCD (*International Life Cycle Data system*) (EC-JRC, 2012) e BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*) (LIPPIATT, 2007; GLORIA; LIPPIATT; COOPER, 2007; KNEIFEL *et al.*, 2018).

Hoje, os métodos CML 2001 (GUINÉE *et al.*, 2001a; GUINÉE *et al.*, 2001b), Eco-indicator 99 (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2000a; GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2000b), EPS 2000 (STEEN, 1999) não possuem mais suporte com atualizações periódicas. Vale destacar, também, que diversos métodos utilizam modelos de caracterização semelhantes aos existentes ou de métodos já preestabelecidos, como são os casos dos métodos TRACI, BEES e IMPACT 2002+, que usam o modelo de caracterização do método *Ecoindicator* 99, e do *Stepwise* 2006, que foi baseado nos métodos IMPACT 2002+ e EDIP 2003 (HISCHIER *et al.*, 2009; WEIDEMA, 2015). É importante destacar que o método de AICV *Eco-Indicator* 99 foi o primeiro a permitir que a maioria dos impactos de *midpoint* fossem modelados nas três iniciais área de proteção, ou seja, nas categorias de *endpoint*, as quais são os impactos ocasionados no bem-estar humano (saúde humana), na natureza (qualidade do ecossistema) e nos recursos (WEIDEMA, 2015).

Além disso, alguns métodos apresentam categorias de impacto mais detalhadas, como as variações apresentadas nas categorias de impacto de ecotoxicidade e eutrofização. Para ambas, é possível encontrar, especificamente, onde o impacto é provocado, ou seja, se a ecotoxicidade e eutrofização é aquática (não diferenciando o tipo de água), marinha, de água doce ou terrestre. Outro agrupamento realizado para simplificar a apresentação das categorias de impacto do QUADRO 2 foi feito para a categoria de “toxicidade humana”, na qual abrange as categorias de carcinogênicos, não-carcinogênicos, efeitos respiratórios e formação de materiais particulados/inaláveis inorgânicos. Essas variações são relatadas de forma particular em cada método de AICV, podendo a mesma categoria apresentar, inclusive, indicadores de categoria diferentes quando verificados em outra metodologia.

Ainda, no método IMPACT 2002+, a categoria de impacto “consumo de recursos” abrange o consumo de energia e o consumo de minerais separadamente. O mesmo ocorre nos métodos MEEuP, TRACI e BEES, nos quais a categoria de

impacto “consumo de recursos” é referente ao consumo de água (para o MEEuP e BEES), consumo de combustíveis fósseis (para o TRACI), consumo de recursos naturais (para o BEES) e consumo de energia (para o BEES).

Já o método Swiss Ecoscarcity é voltado aos efeitos ambientais do ciclo da água, tanto sobre o consumo de recursos quanto à poluição do solo, água e ar.

Outro método que possui categorias de impacto próprias é o CED, no qual representa a energia direta e indireta consumida. Por essa razão, o método possui categorias com tipos diferentes de energias renováveis e não-renováveis, como biomassa, combustíveis fósseis, energia nuclear, eólica, solar, geotérmica e hídrica (FRISCHKNECHT; JUNGBLUTH *et al.*, 2003).

Para a construção civil, o Laboratório de Engenharia do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*The Engineering Laboratory of the National Institute of Standards and Technology – NIST*) desenvolveu o método BEES com o objetivo de produzir dados e ferramentas para apoiar as decisões relacionadas à seleção sustentável de produtos de construção (KNEIFEL *et al.*, 2018). No entanto, a cobertura geográfica do método corresponde apenas às características do território norte americano.

Relativa à abrangência regional, pode-se verificar que a maior parte dos métodos foram desenvolvidos considerando o contexto europeu e norte americano, com exceção do método ReCiPe, que fornece fatores de caracterização representativos para a escala global (RIVM, 2017). Nesse contexto, apesar de existir um esforço conjunto da RAICV, com recomendações de modelos de caracterização para o Brasil (IBICT, 2019), a carência de metodologias que representem regiões além da europeia implica na pouca disponibilidade de modelos de caracterização e fatores de normalização direcionados ao contexto da América do Sul.

#### 2.3.4 Estudos correlatos de avaliações comparativas entre os métodos de AICV

Encontrar um consenso científico nas metodologias de AICV tem sido de grande importância para as pesquisas de ACV nas últimas décadas. Isso não significa que todas as incertezas dos métodos seriam eliminadas, mas que incentivos direcionados à harmonização desses métodos poderiam refinar os resultados fornecidos.

Nessa conjuntura, diversos esforços orientados ao entendimento, análise e

aprimoramento dos métodos de AICV foram feitos ao longo dos anos. O processo de consenso científico teve início com a comparação de vários modelos de toxicidade, a partir da análise da entrada de dados para a harmonização do método USEtox (HUIJBREGTS, 2014).

Apesar disso, uma das críticas feitas por Huijbregts (2014) foi sobre a não implementação, na prática, de melhorias de análise em escala global combinada, com diferenciação espacial, nas metodologias de AICV. Segundo o autor, se os resultados de duas ou mais metodologias de AICV convergem para a mesma direção, as conclusões poderiam ser mais robustas do que depender somente de um único método.

Atualmente, é possível encontrar na literatura estudos anteriores que compararam diferentes metodologias de AICV em diferentes âmbitos de avaliação, como os publicados pelos autores Allacker, Souza, e Sala (2014), Alvarenga, Da Silva Júnior e Soares (2012), Bueno *et al.* (2016), Cavalett *et al.* (2013), Dahlbo *et al.* (2013), Lasvaux *et al.* (2016), Lieberei e Gheewala (2017), Dreyer, Niemann e Hauschild (2003), Owsianiak *et al.* (2014), Pant *et al.* (2004), Pizzol *et al.* (2011) e Weidema (2015).

O estudo de Cavalett *et al.* (2013) teve como objetivo expandir a discussão sobre a influência do uso de diferentes métodos de AICV no desempenho ambiental de produtos. Para isso, os autores realizaram um estudo comparativo de ACV entre a gasolina e o etanol produzidos no Brasil, no qual utilizaram e analisaram os resultados de sete metodologias de AICV: CML 2001, IMPACT 2002+, EDIP 2003, *Eco-indicator* 99, TRACI 2, ReCiPe e *Ecological Scarcity* 2006.

Como nem todos os métodos são diretamente comparáveis, devido à modelagem em diferentes etapas do mecanismo ambiental (*midpoint* ou *endpoint*) e categorias com diferentes terminologias e indicadores, a comparação foi subdividida e os impactos potenciais harmonizados, para que os resultados da AICV fossem adequadamente analisados.

Os autores verificaram que, com o uso de diferentes métodos de AICV, o etanol apresentou impactos menores que a gasolina em categorias de impacto importantes, como o aquecimento global, esgotamento de combustíveis fósseis e depleção da camada de ozônio, enquanto o etanol apresentou maiores impactos nas categorias acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e uso do solo. Esse comportamento dos resultados fez com que os autores concluíssem que, para a

comparação das metodologias de *midpoint* que possuem categorias de impacto semelhantes, os resultados dos impactos ambientais tiveram pouca variação.

No entanto, quando a análise foi estendida para os métodos que possuem indicadores de pontuação única, os resultados da AICV levaram a conclusões diferentes. Nesse caso, o etanol apresentou melhor desempenho do que a gasolina somente no método ReCiPe *Endpoint*, enquanto os métodos IMPACT 2002+, *Eco-indicator 99* e *Ecological Scarcity 2006* apresentaram pontuações mais elevadas devido aos impactos relacionados às emissões de materiais particulados e ao uso do solo.

Com isso, foi possível concluir que embora exista um comportamento semelhante dos resultados das categorias de impacto equivalentes no nível de *midpoint*, os resultados de pontuação única acabam limitando a interpretabilidade no nível de *endpoint*, como consequência de pequenas contribuições de categorias ponderadas em um indicador de pontuação única.

Weidema (2015) reforça essa conclusão dos autores, ao comparar os métodos de *endpoint Eco-Indicator 99*, *Stepwise 2006* e ReCiPe 2008 com relação à importância relativa e absoluta da atribuição das categorias de impacto de *midpoint*. Nesse caso, ainda que os resultados tenham sido expressos em unidades monetárias, os principais motivos de divergências revelam omissões importantes no método ReCiPe 2008 e indicam, também, que o desenvolvimento dos métodos deve se concentrar na melhoria das premissas e bases de dados da modelagem de *endpoint*, principalmente nos aspectos de saúde humana, aquecimento global, mudanças de tecnologia por recursos escassos, relação causal entre o uso humano da terra, ocupação e transformação e do tempo de relaxamento para áreas naturais.

Conclusões semelhantes aos dois estudos citados também foram vistas nos estudos de Dreyer, Niemann e Hauschild (2003) e Pant *et al.* (2004). Dreyer, Niemann e Hauschild (2003) fizeram uma comparação quantitativa da caracterização e normalização, para o mesmo ICV (Laca UV, à base de água, produzida pela *Akzo Nobel Industrial Wood Coatings AIS*, na Dinamarca), entre os métodos CML 2001, EDIP 97 e *Eco-indicator 99*. Assim como no estudo de Cavalett *et al.* (2013), os autores tiveram que subdividir a análise, para que os resultados fossem comparáveis. Dessa forma, os métodos CML 2001 e EDIP 97 foram comparados quantitativamente, pois ambos são de *midpoint*, diferente do *Eco-*

*indicator 99*, no qual foi feita uma análise qualitativa, devido à modelagem ser orientada aos danos (*endpoint*).

Para a normalização, no método EDIP 97 foram utilizadas referências que refletiram o impacto global por ano (dados de emissões mundiais no ano de referência de 1990) e o impacto regional (a região é normalmente a Dinamarca ou Europa). Já no método CML 2001, as referências utilizadas refletiram o impacto local, regional e global, sendo as referências globais indicadas como padrão (baseadas em dados mundiais de emissões no ano de referência de 1995).

Os autores identificaram que um dos obstáculos da análise foi a falta de consenso das metodologias para a avaliação da ecotoxicidade e toxicidade humana. Além disso, diferenças significativas foram encontradas ao tentar comparar um método de *midpoint* (EDIP 97) com um método de *endpoint* (*Eco-indicator 99*). Ainda que as diferenças dos resultados tenham sido reduzidas após a normalização, esse fato revelou diferenças fundamentais nos resultados dos métodos e apontou a necessidade de mais análises comparativas entre os métodos de AICV.

Similar ao estudo de Dreyer, Niemann e Hauschild (2003), os autores Pant *et al.* (2004) fizeram um estudo sobre o desempenho ambiental de três tipos de detergentes. Entretanto, nesse caso específico, a análise da categoria de ecotoxicidade foi delimitada entre os métodos EDIP 97 (ecotoxicidade aquática), CML 2001 (ecotoxicidade aquática de água doce e marinha) e IMPACT 2002+ (ecotoxicidade aquática). Em contraste com outros estudos, foi identificada pouca similaridade entre os resultados da ecotoxicidade pelos métodos EDIP 97 e CML 2001. Em contrapartida, os resultados da categoria de ecotoxicidade de água marinha foram semelhantes entre os métodos IMPACT 2002+ e CML 2001.

Já no estudo de Pizzol *et al.* (2011), as incertezas na determinação do impacto das emissões de metais (foram considerados o alumínio, antimônio, arsênico, bário, berílio, cádmio, crômio, crômio VI, chumbo, mercúrio, níquel, prata, estrôncio e tálio) na saúde humana foram analisadas sob a perspectiva de nove métodos de AICV: *Stepwise* 2006, IMPACT 2002+, EDIP 2003, *Eco-indicator* 99, CML 2001, TRACI 2, ReCiPe, EPS 2000 e USEtox. Para a avaliação da toxicidade para os seres humanos e ecossistemas, o USEtox foi recomendado como o melhor modelo, mesmo que não substitua outros modelos de AICV, devido ao grande consenso científico que possui. Por outro lado, de acordo com os autores, os resultados obtidos não demonstraram correlação aparente com os resultados de

outras metodologias, fazendo com que o método USEtox ainda apresentasse muitas incertezas em relação aos metais.

Paralelo ao estudo de Pizzol *et al.* (2011), Lieberei e Gheewala (2017) enfatizam que o método ReCiPe também apresenta incertezas para alguns metais importantes, como gálio, índio e metais de terras raras, carecendo de fatores de caracterização e melhorias tecnológicas no método, para evitar resultados tendenciosos para a categoria de recursos minerais. Por outro lado, esse estudo teve como objetivo a avaliação da categoria de depleção de recursos minerais sob condições alemãs, com ênfase na produção de eletricidade renovável (eólica, fotovoltaica e biomassa) e fóssil (usina à carvão). Por meio do uso dos métodos CML, ReCiPe, *Swiss Ecotoxicity* e *Economic Resource Scarcity Potential* (ESP), os autores verificaram que os resultados combinados para a categoria depleção de recursos podem variar muito, pois os métodos possuem escopos muito diferentes. O método ESP ainda necessita de melhorias voltadas à atualização regular dos fatores de caracterização e à inclusão de fatores para os metais gálio e índio. Já os métodos CML e *Swiss Ecotoxicity* são os métodos recomendados pelos autores (somente com uma ressalva aos dados obsoletos contidos no CML), devido à alta cobertura de análise e robustez dos dados para os minerais.

Relativo ao trabalho de Alvarenga, Da Silva Júnior e Soares (2012), o objetivo foi a comparação dos métodos CML 2001 e *Environmental Footprint* (EF), aplicados em um estudo de caso de ração para frangos de corte, com quatro cenários nas regiões centro-oeste e sul do Brasil. Nesse caso, os autores consideraram a análise de multicategorias de impacto, fazendo modificações no método CML, e adicionaram a etapa de ponderação e agregação (resultados de pontuação única) para facilitar a comparação dos resultados com o método EF. De acordo com os resultados do estudo, o método CML (adaptado) apresentou maior robustez científica, por possuir maior número de categorias de impacto. Em contrapartida, o método EF acaba negligenciando categorias de impacto importantes, como eutrofização, acidificação e toxicidade. Apesar das distinções entre os modelos de caracterização de ambos os métodos, de modo geral, os resultados foram aproximados. Todavia, os autores não consideram o método EF apropriado para a avaliação de produtos agrícolas, principalmente devido à ausência das categorias de impacto mencionadas.

Por outro lado, o trabalho de Dahlbo *et al.* (2013) foi além da comparação dos resultados de diferentes métodos de AICV. Os autores tiveram como objetivo

verificar quais eram os valores de referência da normalização para a produção e consumo finlandês e as principais diferenças dos valores europeus. Para isso, os valores de referência finlandeses para normalização foram calculados com base no modelo finlandês de entrada e saída ambientalmente ampliado e no método ReCiPe. Nesse caso, a influência de diferentes resultados normalizados na interpretação da AICV foi avaliada com base em um estudo de ACV de produtos impressos (jornal e livro fotográfico). Os resultados demonstraram que a Finlândia contribui com, aproximadamente, 1% dos valores europeus em todas as categorias de impacto (mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, depleção de metais), com exceção da categoria de depleção fóssil, na qual a contribuição foi de 3%. Devido à importância dos fatores de normalização e ponderação, estes devem ser cuidadosamente selecionados e comunicados de forma transparente (ALLACKER; SOUZA; SALA, 2014), posto que os resultados normalizados fornecem informações sobre a contribuição do sistema estudado para os impactos ambientais gerais da referência, sendo viáveis na comunicação entre empresas (DAHLBO *et al.*, 2013).

Entre os estudos identificados, poucos foram direcionados à análise comparativa dos métodos de AICV para o setor da construção civil. Por exemplo, Owsianiak *et al.* (2014) analisaram as consequências da escolha dos métodos IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 e ILCD somente na caracterização, em uma abordagem de *midpoint*, em um estudo de caso de quatro opções de *design* de janelas para o uso em edifícios residenciais. Desse modo, foi relatado que as discrepâncias nas pontuações de impacto podem ser elevadas para as categorias relacionadas aos impactos tóxicos, radiação ionizante, uso do solo e depleção de recursos minerais/metals. Isso ocorreu devido às análises de contribuição que mostraram diferenças substanciais nos padrões entre as metodologias. Assim, com base nisso os autores recomendaram a utilização do método ILCD, devido à ampla gama de avaliação.

Allacker, Souza e Sala (2014) tiveram a mesma abordagem, com a diferença de que somente o uso do solo (transformação e ocupação) foi analisado entre as metodologias *Eco-Indicator* 99, ReCiPe e IMPACT 2002+, para uma edificação unifamiliar construída com uma estrutura de madeira *versus* estrutura sólida. O propósito da avaliação realizada pelos autores foi, além de analisar os resultados de diferentes metodologias, estimar qual era a importância relativa do uso do solo para



o estudo de caso proposto. Com base nisso, o uso do solo foi identificado como um fator decisivo na determinação da preferência ambiental entre as estruturas analisadas e que os modelos de AICV de uso da terra são complexos, podendo os relatórios metodológicos não ser suficientemente detalhados. Dessa forma, sugeriu-se o uso do *Eco-indicator 99* como método mais abrangente, pelo fato de que o IMPACT 2002+ não considera os impactos de transformação do solo e o ReCiPe não diferencia os impactos das transformações entre os dois tipos de uso do solo (naturais ou não naturais). Além disso, os autores destacaram algumas melhorias que podem ser feitas nas metodologias, sendo elas o estabelecimento de conexões mais claras entre os indicadores no uso do solo (como perda de carbono orgânico, redução da riqueza de espécies e perda de funções do ecossistema) e o desenvolvimento de fatores de caracterização regionais para uso na Europa e no mundo.

Já o estudo de Lasvaux *et al.* (2016) não teve como foco direto a comparação dos resultados da AICV, mas sim a aplicação de uma metodologia estatística para identificar um conjunto de indicadores ambientais simplificados, a partir da análise de componentes principais (PCA) em cinco métodos: CML, *Eco-indicator 99*, IMPACT 2002+, *Ecological Scarcity 2006* e EDIP 2003. Os autores avaliaram as correlações multidimensionais de 98 materiais de construção de um banco de dados de ACV (*Ecoinvent 2.0*), concluindo que todos os indicadores estão fortemente correlacionados, independentemente do método de AICV aplicado. Com isso, Lasvaux *et al.* (2016) defendem a simplificação da ACV dos materiais de construção, justificando que, com os resultados encontrados, além dos resultados entre os métodos se mostrarem semelhantes, apenas um número limitado de fluxos elementares seria suficiente para descrever os impactos dos materiais de construção.

Como destaque, um estudo muito similar ao proposto nessa dissertação foi realizado por Bueno *et al.* (2016). Nele, os autores propuseram a realização de uma análise de sensibilidade dos resultados, no *midpoint* e *endpoint*, com o uso de diferentes metodologias de AICV: EDIP 97/2003, CML 2001, IMPACT 2002+, ReCiPe e ILCD. Assim como nessa dissertação, o ICV foi constituído de diferentes paredes de vedação não-estruturais, com a diferença de que a aplicação dessas paredes eram para áreas externas e que cinco variações foram analisadas (alvenaria de blocos de cerâmicos, alvenaria de blocos de concreto, painéis de

concreto e sistema em *Steel Framing*). A estratégia também foi a comparação entre os métodos que possuem abordagens e categorias de impacto semelhantes, para que fosse possível a comparação quantitativa e as discussões fossem mais assertivas.

Segundo os autores, para as metodologias de AICV de *midpoint*, os resultados da caracterização foram completamente consistentes nas categorias de eutrofização, ecotoxicidade de água doce e marinha, radiação ionizante, formação de material particulado e depleção de recursos. Para as categorias de aquecimento global, ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana (exceto para a categoria de não carcinogênicos) e uso do solo, os resultados apresentaram um perfil de impacto diferente, ainda que apontassem como pior alternativa a mesma estrutura. Já as categorias de depleção da camada de ozônio e formação fotoquímica de oxidantes tiveram resultados discrepantes, com diferenças notáveis entre os métodos mais recentes e antigos. Conforme os resultados, os autores ainda destacam a necessidade de criação de um método unificado de avaliação de impacto global, como forma de harmonizar a consistência dos resultados e incluir mais regiões do mundo.

Além disso, uma vez que as características das metodologias interferem nos resultados finais da AICV, torna-se relevante a realização de estudos comparativos atuais, que considerem mais metodologias (BUENO *et al.*, 2016) e outras etapas importantes de avaliação, como a normalização. Essa etapa pode agregar diferentes e importantes conclusões nos resultados da AICV, como consequência da aplicação de diferentes referências de normalização (OWSIANIAK *et al.*, 2014; BUENO *et al.*, 2016). Os autores ainda reforçam que somente os resultados da etapa de caracterização foram analisados, sendo a análise dos impactos normalizados e ponderados recomendada para pesquisas futuras.

De modo geral, como foi exposto, a maior parte desses estudos comparativos entre as metodologias de AICV direcionaram a discussão nas possíveis inconsistências dos resultados da caracterização entre os métodos, com o foco no tomador de decisão. Portanto, um estudo abrangente considerando as principais categorias de impacto de vários métodos de AICV, para a construção civil, é extremamente importante para a verificação das possíveis inconsistências dos resultados da caracterização e normalização e para o incentivo de trabalhos focados na regionalização dos fatores de normalização.

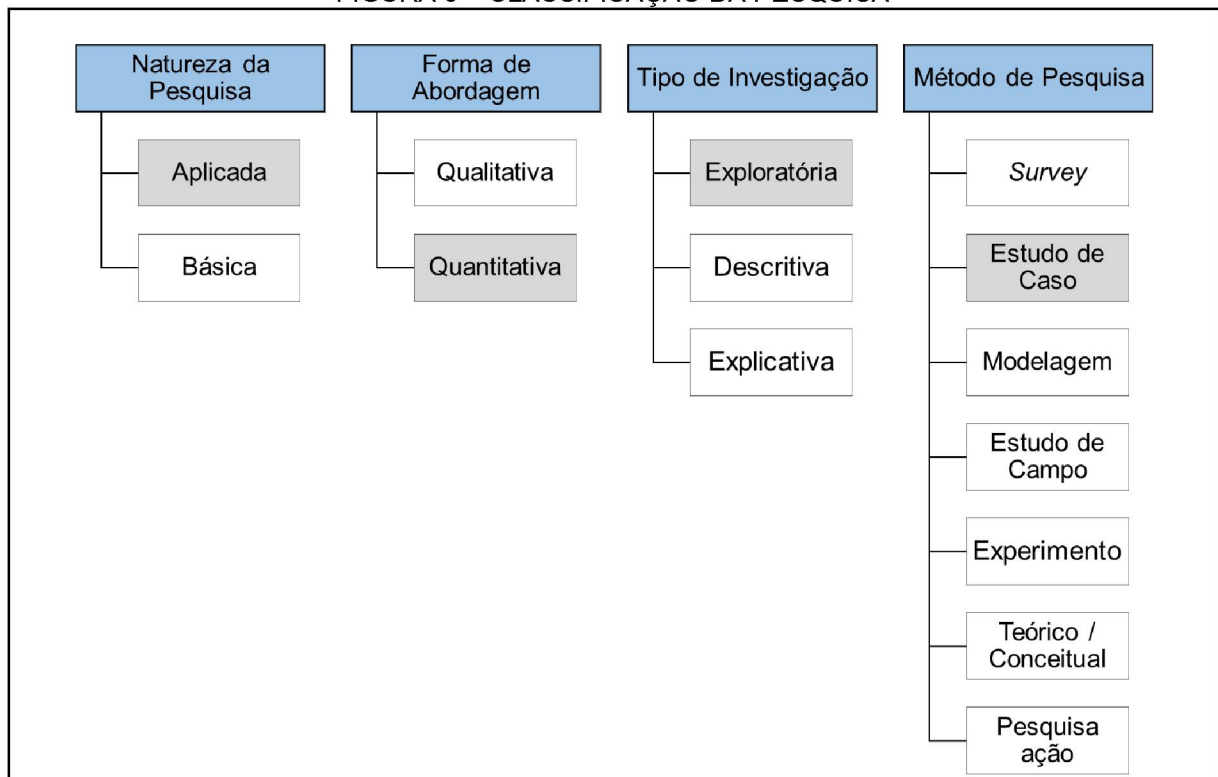
### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo aborda os aspectos metodológicos empregados nesse estudo e está dividido em duas seções: classificação da pesquisa (3.1) e protocolo de pesquisa (3.2).

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A classificação da pesquisa, conforme Miguel *et al.* (2012), é a apresentação das informações referentes à natureza da pesquisa, à forma de abordagem ao problema, ao tipo de investigação empregado e ao método adotado, como sintetizados na FIGURA 8.

FIGURA 8 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA



FONTE: Adaptado de MIGUEL *et al.* (2012).

Com relação à natureza da pesquisa, esse estudo possui características de pesquisa aplicada, uma vez que visa gerar conhecimento para a aplicação prática, orientadas à solução de problemas específicos ou oportunidades imediatas (PRODANOV; FREITAS, 2013). Diferente da pesquisa básica, que busca a geração

de novos conhecimentos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009), os resultados gerados nesse trabalho são decorrentes do uso de conceitos e métodos já consolidados no meio acadêmico.

Quanto à forma de abordagem, esse estudo é classificado como quantitativo, pois possui como característica principal o pensamento lógico com ênfase em atributos mensuráveis (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Nesse caso, recorre-se à linguagem matemática para a descrição das causas de um fenômeno ou das relações entre as variáveis de interesse ao pesquisador (FONSECA, 2002). Além disso, em pesquisas quantitativas é comum o uso de procedimentos estruturados de coleta e análise de dados, como são observados na abordagem metodológica da ACV.

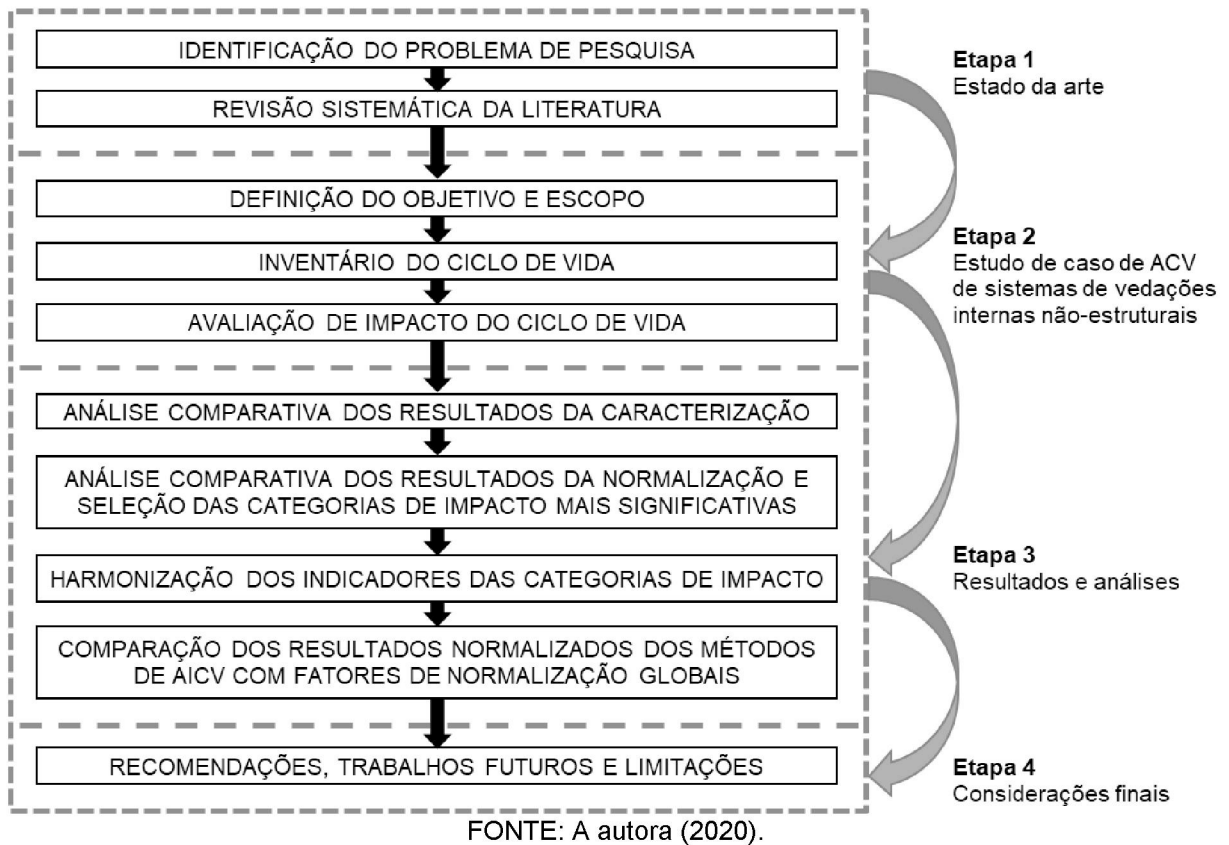
Em relação ao tipo de investigação, essa se classifica essencialmente como exploratória, pois tem como objetivo central a construção de hipóteses para o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições (GIL, 2002). Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa exploratória é caracterizada pela investigação do tema sob diversos ângulos e aspectos, para o descobrimento de novos enfoques sobre o assunto, sendo o tipo de investigação normalmente praticado em pesquisas bibliográficas e estudos de casos.

Por fim, relativo ao método empregado nesse estudo, essa pesquisa se enquadra como um estudo de caso. O estudo de caso é definido como o estudo de um objeto ou situação específica, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento (GIL, 2002), sendo encarado como o delineamento mais adequado para a investigação de um fenômeno dentro de seu contexto real (YIN, 2001). Esse método é justificado para esse projeto pelo levantamento de dados e avaliação das paredes de vedações selecionadas em escala real.

### 3.2 PROTOCOLO DE PESQUISA

Com a finalidade de atender aos objetivos específicos do estudo, a FIGURA 9 ilustra as atividades realizadas nessa pesquisa, de acordo com as 4 etapas de trabalho delimitadas.

FIGURA 9 – PROTOCOLO DE PESQUISA



Nas subseções 3.2.1 ao 3.2.4, as atividades desenvolvidas nessa pesquisa são abordadas com mais detalhes.

### 3.2.1 Etapa 1 – Estado da arte

Essa etapa de trabalho foi composta pela identificação do problema de pesquisa e revisão sistemática de estudos de ACV na construção civil com elevado grau de relevância acadêmica.

A motivação para a condução desse estudo se deu a partir da constatação de discussões acerca das incertezas dos resultados das metodologias de AÍCV, quando aplicadas em determinado setor industrial e/ou região do mundo. Alguns dos constantes questionamentos, quando se deseja efetuar um estudo de ACV, são: **quais metodologias de AÍCV e categorias de impacto devem ser priorizadas?** Além disso, outra motivação para a realização dessa ACV comparativa foi a constatação de que os resultados da AÍCV devem ser consistentes para o local onde o estudo é feito, para que as conclusões sobre os impactos ambientais potenciais

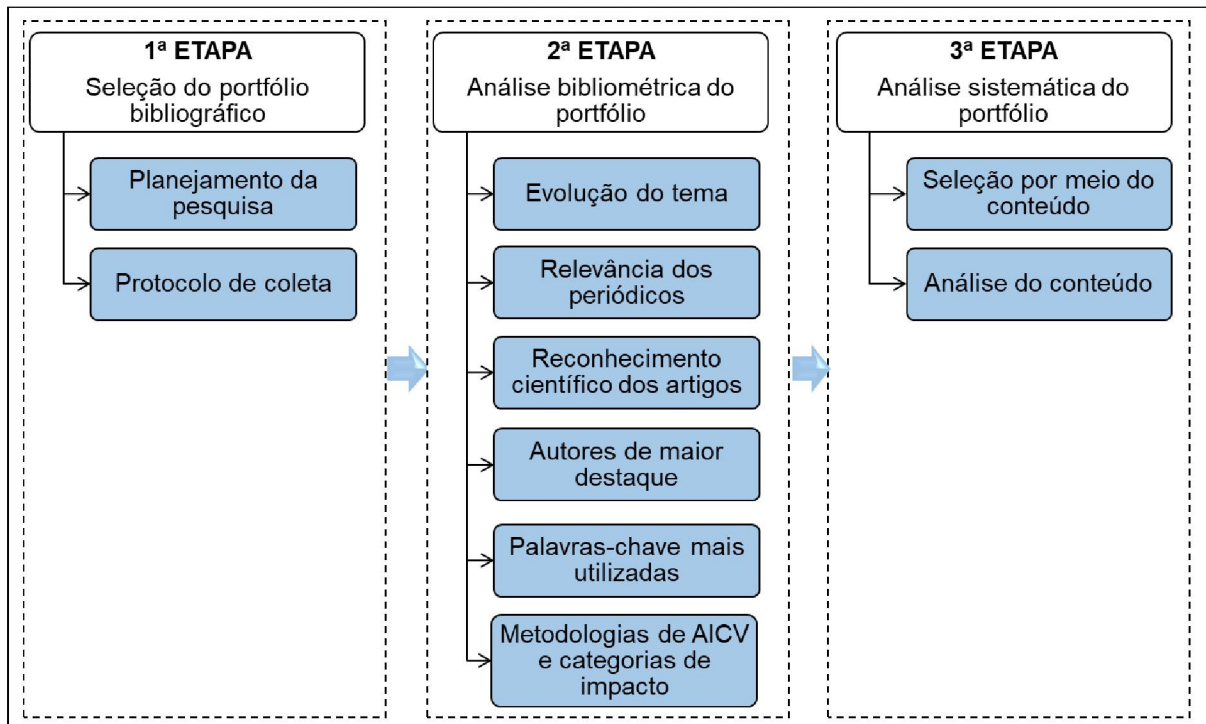
não sejam contraditórias. Deste modo, os resultados, após a normalização com o uso de fatores de normalização dos métodos de AICV, foram comparados com os resultados normalizados globalmente, com base na recomendação da Comissão Europeia (*European Commission – Joint Research Centre*), com o objetivo de gerar novas discussões e direcionamentos sobre o assunto.

Na sequência, com o problema de pesquisa delimitado, deu-se início ao processo de revisão sistemática da literatura (RSL). A RSL foi efetuada com o propósito principal de gerar conhecimento sobre o tema e de identificar os principais estudos de ACV de residências unifamiliares para, na sequência, levantar as categorias de impactos e os métodos de AICV mais utilizados nas avaliações do ciclo de vida.

Dessa forma, a RSL foi realizada com base no instrumento de intervenção *Knowledge Development Process-Constructivist (Proknow-C)*, desenvolvido no Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (ENSSLIN; ENSSLIN; PINTO, 2013; ENSSLIN *et al.*, 2014). A metodologia consiste em uma série de procedimentos sequenciais empregados para a seleção do portfólio de artigos relevantes ao tema de pesquisa (AFONSO *et al.*, 2011), apresentando-se como uma abordagem que minimiza subjetividades e aleatoriedades durante o processo de busca.

O processo é composto por quatro etapas principais, sendo elas: (i) seleção do portfólio bibliográfico (PB), (ii) análise bibliométrica do portfólio, (iii) análise sistemática do portfólio e (iv) definição da pergunta de pesquisa e objetivo da pesquisa (ENSSLIN *et al.*, 2014). Para fins dessa pesquisa, a etapa de definição das perguntas e objetivo foi realizada em conjunto com a primeira etapa do estudo, visto que o objetivo e as perguntas estavam delimitadas antes de dar início ao processo de busca. A FIGURA 10 ilustra as etapas de revisão sistemática e suas respectivas subetapas aplicadas na execução desse estudo.

FIGURA 10 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA



FONTE: Adaptado de ENSSLIN, ENSSLIN e PINTO (2013).

A primeira etapa foi composta pelo planejamento da pesquisa e definição do protocolo de coleta da amostra de artigos. Na subetapa de planejamento, o objetivo e as perguntas de pesquisa foram delimitados para que, na sequência, fosse dado início ao processo de definição das principais palavras-chave e combinações de busca nas bases de dados selecionadas. A subetapa de definição do protocolo de coleta se refere aos processos de filtragem aplicados para seleção de artigos alinhados ao tema de pesquisa. Ainda, para a reunião dos trabalhos e composição do banco de artigos, o *software Mendeley*® foi utilizado como gerenciador bibliográfico. Os artigos selecionados foram organizados em uma planilha *Excel*® e as informações foram tabuladas para a realização da etapa de análise bibliométrica do portfólio.

Na segunda etapa foi realizada a análise bibliométrica dos artigos, com o objetivo de quantificar as informações e características das publicações selecionadas. Nessa etapa, cinco aspectos foram considerados, sendo eles a evolução do tema, relevância dos periódicos, reconhecimento científico dos artigos, autores de maior destaque, palavras-chave mais utilizadas e metodologias de AICV e categorias de impacto.

Com a classificação e análise bibliométrica do portfólio bibliográfico, novos critérios de seleção foram criados para a seleção dos artigos mais pertinentes aos objetivos da pesquisa. Dessa forma, a última etapa (análise sistemática do portfólio) foi constituída pelas subetapas de seleção por meio do conteúdo e análise qualitativa do conteúdo desses artigos.

Os resultados das três etapas descritas são apresentados detalhadamente no Capítulo 4.

### 3.2.2 Etapa 2 – Estudo de caso de ACV de sistemas de vedações internas não-estruturais

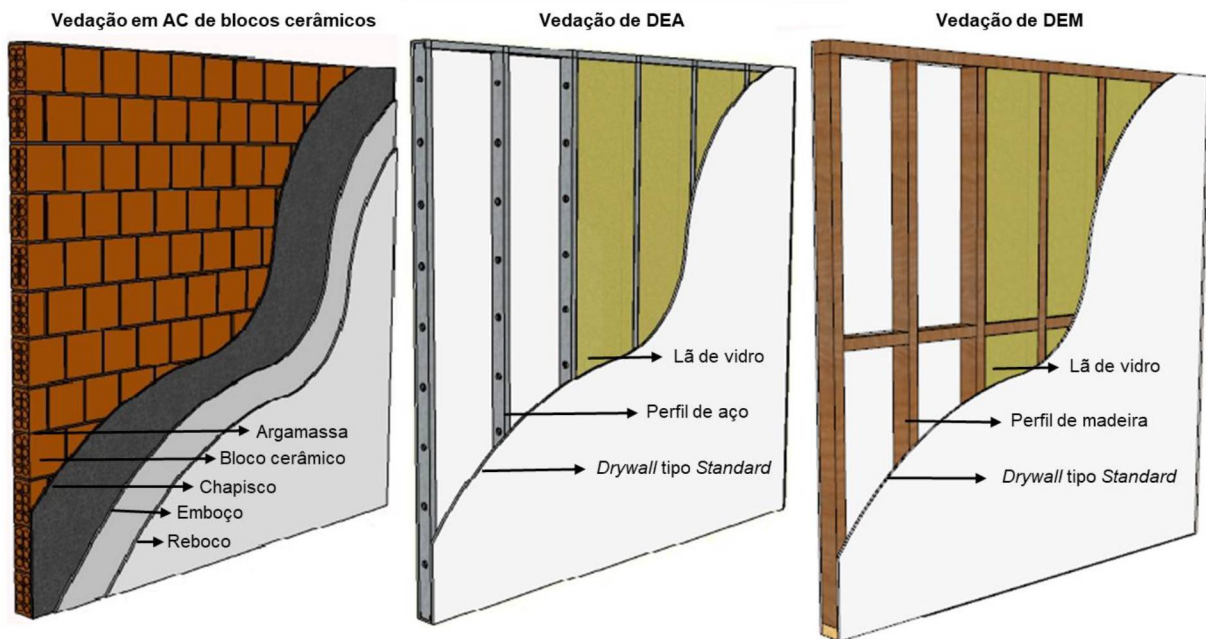
Os objetos de estudo selecionados para a avaliação nessa dissertação foram três sistemas de vedações internas não-estruturais comumente utilizados para o fechamento de ambientes em construções residenciais no Brasil: vedação em alvenaria convencional de blocos cerâmicos (AC), vedação em *drywall* com estrutura de aço (DEA) e vedação em *drywall* com estrutura de madeira (DEM).

Nesse estudo, para fins de comparação, a pintura e as tubulações elétricas embutidas na interface interna das paredes foram desconsideradas da análise, visto que a quantidade em massa desses elementos seria idêntica para todos os sistemas de vedação. Deste modo, como o volume destinado à ocupação dessas tubulações é pequeno, optou-se pelo preenchimento dos espaços com lã de vidro para as paredes internas em DEA e DEM. Para o sistema em AC, os blocos cerâmicos já possuem espaços destinados à colocação dessas tubulações, resultando somente no corte da alvenaria. Os desperdícios gerados por esse corte estão embutidos nos índices das tabelas de composições representativas consultadas para o levantamento quantitativo de materiais para o sistema. Além disso, conforme já mencionado na seção 2.1, os elementos estruturais, ou seja, fundação, pilares e laje, não foram considerados na análise, devido à função determinada para o estudo de ACV, sendo as vedações usadas unicamente para o fechamento de ambientes secos.

Os elementos construtivos dos sistemas de vedação analisados nessa dissertação estão ilustrados na FIGURA 11.



FIGURA 11 – VEDAÇÕES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS EM AC, DEA E DEM



FONTE: A autora (2020).

Como pode ser observado (FIGURA 11), diferentes insumos são utilizados em cada sistema de vedação. Para a delimitação da área da parede, levou-se em consideração os requisitos necessários para a utilização da técnica de ACV. Dessa forma, só foi possível a comparação da contribuição dos impactos ambientais potenciais entre as categorias de impactos analisadas após a padronização da unidade funcional, ou seja, da área da face, a qual totaliza uma área de 5,76 m<sup>2</sup> para cada sistema. Essa área foi calculada para se obter todas as variações de materiais, estruturas e componentes para cada sistema. Ainda, como forma de facilitar o cálculo da área, considerou-se como medida mínima o uso de duas chapas de gesso acartonado para o fechamento de cada face (de 2,4 m de comprimento e 1,2 m de largura), extrapolando-se a área para os outros sistemas. Além disso, para a padronização dessa unidade e comparação adequada das paredes, seguiu-se as recomendações das normativas vigentes quanto à espessura necessária para as vedações em *drywall* de estrutura de aço e estrutura de madeira, baseadas nas paredes internas dos sistemas em *Light Steel Framing* e *Light Wood Framing*.

Os materiais, as composições e os traços considerados para os processos de construção do sistema de vedação interna em AC foram consultados no Caderno Técnico de Composições Representativas e no banco de dados *online* de Insumos e Composições do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da

Construção Civil), disponibilizado pela Caixa Econômica Federal (CEF, 2017; CEF, 2019), e nas Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos – TCPO (PINI, 2008).

Para os sistemas em *drywall* de estrutura de aço e de madeira, levou-se em consideração a composição adaptada de materiais para a construção das paredes internas apresentadas na Diretriz SINAT (Sistema Nacional de Avaliações Técnicas) Nº 003-Revisão 2, no DATec (Documento de Avaliação Técnica) Nº 014b e no DATec Nº 020-C (BRASIL, 2016; BRASIL, 2018a; BRASIL, 2018b) .

As informações gerais sobre os sistemas de vedações internas não-estruturais em AC, DEA e DEM são descritas no QUADRO 3.

QUADRO 3 – INFORMAÇÕES GERAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM

Informações gerais	Vedação em AC de blocos cerâmicos	Vedação em DEA	Vedação em DEM
Localização do projeto	Região metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, Brasil	Região metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, Brasil	Região metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, Brasil
Sistema de vedação interna não-estrutural	Muro de blocos cerâmicos	Chapas de <i>drywall</i> fixadas em estrutura metálica	Chapas de <i>drywall</i> fixadas em estrutura de madeira
Área da face	5,76 m <sup>2</sup>	5,76 m <sup>2</sup>	5,76 m <sup>2</sup>
Parede	Bloco cerâmico com 8 furos horizontais (9x19x19cm, e = 9 cm)  Argamassa para assentamento (Traço 1:2:8 - Cimento:Cal:Areia); e junta = 12 mm	Chapa de Gesso <i>Drywall</i> tipo <i>Standard</i>  Lã de vidro  Perfil de aço zincado tipo U e Ue espaçados a cada 40 cm conformados a frio, conforme NBR 6673  Elementos de fixação dos perfis metálicos e das chapas de gesso	Chapa de Gesso <i>Drywall</i> tipo <i>Standard</i>  Lã de Vidro  Perfil de madeira maciça em <i>Pinus</i> espaçados a cada 40 cm, conforme DATec nº 020-C  Elementos de fixação dos perfis de madeira e das chapas gesso
Revestimento e acabamento	Chapisco (Traço 1:3 - Cimento:Areia) e = 5 mm  Emboço Manual (Traço 1:2:8 - Cimento:Cal:Areia); e = 20 mm  Reboco (Traço 1:2 - Cal:Areia); e = 5 mm	Massa para <i>Drywall</i>	Massa para <i>Drywall</i>

FONTE: A autora (2020).

A parede em alvenaria convencional considerada nesse estudo é constituída por blocos cerâmicos de 8 furos horizontais unidos com argamassa de assentamento; e pelos elementos de revestimento e acabamento da parede, ou seja, os processos de chapisco e emboço e reboco.

A parede em DEA é constituída por perfis guias e montantes em aço zincado conformados a frio (perfis de aço leve em conformidade com a NBR 15253) conectados entre si; chapas de gesso acartonado (*Drywall*) tipo *Standard*, em conformidade com a ABNT NBR 14715 e ABNT NBR 15758 (BRASIL, 2018b) e recomendado para o uso em áreas secas, que são fixados na estrutura metálica; lã de vidro utilizada para preenchimento interno das paredes, com a função de isolamento térmico e acústico; elementos de fixação dos perfis metálicos e das chapas de gesso, constituídos por parafusos e chumbadores; e elementos de revestimento e acabamento.

A parede em DEM é composta por soleiras e perfis de madeira maciça em *pinus*; chapas de gesso acartonado (*Drywall*) tipo *Standard*, recomendado pelo DATec Nº 020-C para o acabamento interno das áreas secas; lã de vidro para o isolamento térmico e acústico; elementos de fixação dos perfis de madeira e chapas de gesso, constituídos por parafusos e pregos; e elementos de revestimento e acabamento.

Relativo ao local considerado para a construção das paredes, foi definido a cidade de Curitiba, especificamente, o campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A escolha desse local serviu como referência para a realização dos cálculos da quantidade de materiais (em toneladas) transportada entre os fabricantes e o canteiro de obras (em quilômetros).

Os processos construtivos dos sistemas de vedações internas em AC, DEA e DEM, para a área de 5,76 m<sup>2</sup>, conforme a quantidade de material utilizado (sem perdas), quantidade adquirida (com perdas), índice de perdas e densidade são apresentados detalhadamente no APÊNDICE 1, APÊNDICE 2 e APÊNDICE 3. Ainda, os cálculos do transporte de cargas, em tonelada-quilômetro (t.km), e as distâncias dos fabricantes até o canteiro de obras podem ser vistos no APÊNDICE 4.

### 3.2.3 Etapa 3 – Resultados e análises

Nessa etapa, para que as análises propostas atendessem ao objetivo geral e aos objetivos específicos delineados nessa dissertação, realizou-se um estudo de ACV das vedações descritas na subseção 3.2.2.

Para isso, o *software* SimaPro 9.0.0.49 foi utilizado para o tratamento dos dados do inventário do ciclo de vida e caracterização e normalização dos impactos, pelo uso das metodologias de AICV identificadas na RSL. O SimaPro é um dos *softwares* mais populares para a modelagem e avaliação dos impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de produtos, além de ser o mais utilizado para estudos da construção civil, conforme apresentado nos resultados da RSL (4.1.3.2).

A partir da simulação realizada no *software*, os métodos de AICV selecionados foram aplicados para a verificação do comportamento dos resultados da caracterização, para os três sistemas de vedações, em três cenários de transporte (6.1). A partir disso, foram gerados gráficos que demonstraram a contribuição de cada sistema de vedação (por cenário), para as categorias de impacto das metodologias de AICV, e o percentual acumulado da contribuição de cada categoria de impacto por sistema de vedação e cenário. Assim, as contribuições dos sistemas em AC, DEA e DEM foram apresentadas, para a identificação do sistema de vedação com maior potencial de impacto ambiental e mais sensível às alterações dos cenários de transporte.

Na sequência, com base na média dos cenários de transporte dos sistemas em AC, DEA e DEM, foi realizada a análise comparativa dos resultados da normalização e seleção das categorias de impacto com maior significância para as paredes, em cada método de AICV (6.2). Dessa forma, como critério de inclusão, estabeleceu-se a seleção das categorias de impacto cuja contribuição cumulativa estivesse dentro da faixa de 80% dos impactos potenciais.

A partir da etapa anterior, os indicadores de cada categoria de impacto selecionada foram levantados, para a realização da conversão das unidades em uma métrica comum. Deste modo, para a comparabilidade das pontuações de impacto entre as metodologias de AICV, a sequência de cálculos apresentada por Owsianiak *et al.* (2014) foi efetuada. Assim, para a conversão das unidades, as seguintes etapas foram realizadas:

- 1) Simulação do estudo de caso no *software* SimaPro;
- 2) Transferência dos resultados das etapas de caracterização e normalização, de cada metodologia de AICV, para uma planilha no Excel®;
- 3) Definição da unidade de referência para a conversão (unidade dos fatores de normalização globais, recomendados pela EC-JRC);
- 4) Análise das substâncias contidas nos inventários das metodologias de AICV, para confirmação da possibilidade de comparação;
- 5) Busca dos fatores de caracterização das substâncias equivalentes para a conversão das unidades;
- 6) Cálculo do resultado de impacto harmonizado (Equação 3), a partir da multiplicação dos fatores de caracterização pelos resultados de impacto potencial de cada metodologia de AICV (etapa de caracterização). Logo:

$$H = h . FC \quad (3)$$

Onde:

H: impacto potencial harmonizado;

h: impacto potencial;

FC: fator de caracterização.

- 7) Cálculo do impacto normalizado globalmente (Equação 4), a partir da divisão do impacto potencial harmonizado pelas referências de normalização do relatório técnico da EC-JRC (SALAS *et al.*, 2017). Logo:

$$\tilde{h} = \frac{H}{h} \quad (4)$$

Onde:

$\tilde{h}$ : impacto normalizado;

H: impacto potencial harmonizado;

$h$ : impacto referência (h ponto), onde as referências selecionadas são os fatores de normalização globais disponíveis para cada categoria de impacto.

Os indicadores de categoria e as unidades de conversão, assim como o detalhamento dos critérios de seleção, conversão e agrupamento das categorias de impacto, são apresentados na seção 6.3.

Com os resultados normalizados, por meio dos fatores de normalização contidos nos métodos de AICV e em escala global, foi possível a realização de uma análise comparativa entre esses resultados (6.4). Deste modo, os resultados foram confrontados com o propósito de investigar as semelhanças e possíveis disparidades dos impactos potenciais para o mesmo sistema de produto.

Finalmente, a magnitude dos resultados da normalização de cada categoria de impacto foi comparada entre os métodos de AICV, para a geração de discussões e recomendações.

#### 3.2.4 Etapa 4 – Considerações finais

Por fim, todas as informações geradas com a análise e discussão dos resultados foram consolidadas. O escopo da ACV foi revisado para a verificação do atendimento ou não atendimento dos objetivos definidos, conforme os critérios estabelecidos nas fases da ACV.

Nessa etapa, as limitações do estudo, observações sobre os métodos de AICV, recomendações acerca da normalização e sugestões para trabalhos futuros foram apresentados.

## 4 ESTADO DA ARTE

A RSL foi utilizada como subsídio para o processo de escolha dos métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida e das categorias de impacto analisadas nessa dissertação. Desse modo, os resultados da seleção do portfólio bibliográfico, da análise bibliométrica do portfólio e da análise de conteúdo são apresentados nas subseções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

### 4.1.1 Seleção do portfólio bibliográfico

A seleção do portfólio bibliográfico está dividida em duas subetapas. No planejamento da pesquisa (4.1.1.1), as perguntas de pesquisa, o objetivo da RSL e os passos para a definição do conjunto de palavras-chave de busca são definidos. No protocolo de coleta (4.1.1.2), os filtros utilizados para a seleção do portfólio de artigos são explicados detalhadamente e o resultados são apresentados.

#### 4.1.1.1 Planejamento da pesquisa

O objetivo da RSL consistiu na identificação das principais pesquisas de ACV de residências unifamiliares e no levantamento das categorias de impacto e métodos de AICV apropriados, principalmente, à fase pré-operacional do ciclo de vida. Para isso, três perguntas de pesquisa foram elaboradas:

- **(PP1)** Quais são as pesquisas mais relevantes, em relação à utilização da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida, na avaliação de residências unifamiliares?
- **(PP2)** Quais são as principais categorias de impacto utilizadas na avaliação de residências unifamiliares, especificamente, na fase pré-operacional (fabricação das matérias-primas e construção)?
- **(PP3)** Quais são os métodos de AICV que abrangem as categorias de impacto levantadas?

Após a delimitação do objetivo e das perguntas de pesquisa, alguns parâmetros para a busca dos artigos nas bases de dados foram definidos. O

primeiro parâmetro foi referente às palavras-chave utilizadas para a busca (QUADRO 4).

QUADRO 4 – PARÂMETROS DE BUSCA

Áreas de pesquisa	Palavras-chave	Parâmetro de busca
Avaliação do Ciclo de Vida	<i>Environmental Impact</i> <i>Environmental Impact Analysis</i> <i>Environmental Performance</i> <i>Life Cycle Analysis</i> <i>Life Cycle Assessment</i> <i>Life Cycle Impact Assessment</i> <i>Product Life Cycle Assessment</i>	<i>("Environmental Impact" OR "Environmental Performance" OR "Life Cycle Analysis" OR "Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Impact Assessment") AND ("Single family" OR "residential building**" OR "residential home**" OR "residential house**" OR "residential housing")</i>
Residência Unifamiliar	<i>Building</i> <i>Home</i> <i>House</i> <i>Housing</i> <i>Residential building</i> <i>Residential home</i> <i>Residential house</i> <i>Residential housing</i> <i>Single-family dwelling</i> <i>Single-family home</i> <i>Single-family house</i> <i>Single-family residences</i> <i>Single-family buildings</i>	

FONTE: A autora (2020).

De acordo com o objetivo da pesquisa, duas grandes áreas foram identificadas para a busca dos artigos: avaliação do ciclo de vida e residência unifamiliar. A definição dessas áreas teve como propósito o levantamento de estudos que tratassem do uso da técnica de ACV na construção civil, especificamente, na avaliação de moradias para uma família. A partir disso, uma primeira busca foi efetuada com o objetivo de mapear as principais palavras-chave relacionadas à cada área delimitada, frequentemente utilizadas pelos autores. Cinco artigos foram escolhidos para a verificação da necessidade de se incluir novas palavras. Com isso, para as áreas “avaliação do ciclo de vida” e “residência unifamiliar”, chegou-se a um total de 7 e 13 palavras-chave, respectivamente.

Na sequência, foram selecionadas seis bases de dados para a busca, devido à abrangência e disponibilidade de diversos periódicos internacionais de alto impacto: *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*, *Springer*, *Emerald* e *EBSCO*. Em



cada base, as palavras-chave foram combinadas e testadas para a verificação do comportamento dos resultados de artigos. Foi notado, durante a busca, que algumas palavras-chave eram muito gerais, trazendo resultados que não estavam alinhados com o tema de pesquisa. Outras palavras-chave, como *single-family house*, se mostraram muito específicas e com diversas variações associadas ao termo em inglês “*house*”, optando-se assim pela utilização do termo “*single-family*”.

Com base na busca prévia, concluiu-se que cinco palavras-chave para cada área eram as mais apropriadas para seleção adequada da amostra de artigos para o tema de pesquisa. Assim, na *string* de busca, as palavras-chave foram combinadas com o uso dos operadores lógicos *booleanos AND* e *OR*, as aspas foram utilizadas para fornecer precisão ao termo pesquisado e o símbolo “\*” foi usado para a busca de palavras com diferentes terminologias.

#### 4.1.1.2 Protocolo de coleta

Com base no planejamento da pesquisa e na definição dos parâmetros de busca, a subetapa de elaboração do protocolo de coleta foi iniciada. O protocolo de coleta são os passos delimitados para os processos de filtragem e seleção da amostra de artigos para compor o portfólio bibliográfico.

Nessa subetapa, os artigos foram filtrados de acordo com os seguintes critérios: (i) filtragem nas bases de dados, (ii) exclusão por não alinhamento ao tema do título e resumo, (iii) exclusão dos artigos por duplicidade e (iv) exclusão por não atendimento dos critérios de inclusão.

Os primeiros filtros foram aplicados durante a busca nas bases de dados, com o objetivo de limitar o tipo de documento, o idioma, o período de publicação e o local de presença das palavras-chave. Dessa forma, optou-se pela seleção de artigos publicados em periódicos revisados por pares, no idioma inglês, excluindo-se artigos de congresso e outros tipos de documentos. Além disso, somente os artigos científicos publicados entre 2008 e março de 2019 foram considerados nessa pesquisa, por trazer, devido ao uso de bases de dados, métodos de AICV e *softwares* atualizados, resultados mais recentes. Por último, delimitou-se nas bases que as combinações de palavras-chave deveriam ser rastreadas nos títulos, resumos e palavras-chave definidas pelos autores. Esse filtro de busca foi realizado para evitar o aparecimento de artigos não relacionados ao tema de pesquisa na

amostra inicial. Entretanto, somente na base de dados *Springer* não foi possível limitar a busca das palavras-chave no título, resumo e palavras-chave, logo o rastreamento foi realizado em todo o texto. Essa primeira fase de filtros resultou em um total de 2491 artigos, somados entre as 6 bases de dados.

Após o processo de filtragem nas bases, os títulos dos 2491 artigos foram lidos e analisados. Os títulos que não estavam alinhados com as palavras-chave de busca foram excluídos da amostra nessa etapa. Em seguida, os resumos dos artigos selecionados foram analisados de acordo com o mesmo padrão (alinhamento das palavras-chave e do tema de pesquisa), restando somente 143 artigos que atenderam aos critérios de seleção.

Na sequência, para a exclusão dos artigos duplicados entre as bases, foi utilizado o *software Mendeley*® para o gerenciamento das referências. Os resultados encontrados nas bases foram exportados no formato de extensão *BibTeX* e adicionados ao *Mendeley*. Um total de 63 artigos foram excluídos da seleção, restando 80 artigos.

O número de artigos em cada base de dados após o uso dos filtros nas bases, seleção pelo título e resumo e exclusão por duplicidade podem ser vistos na TABELA 1.

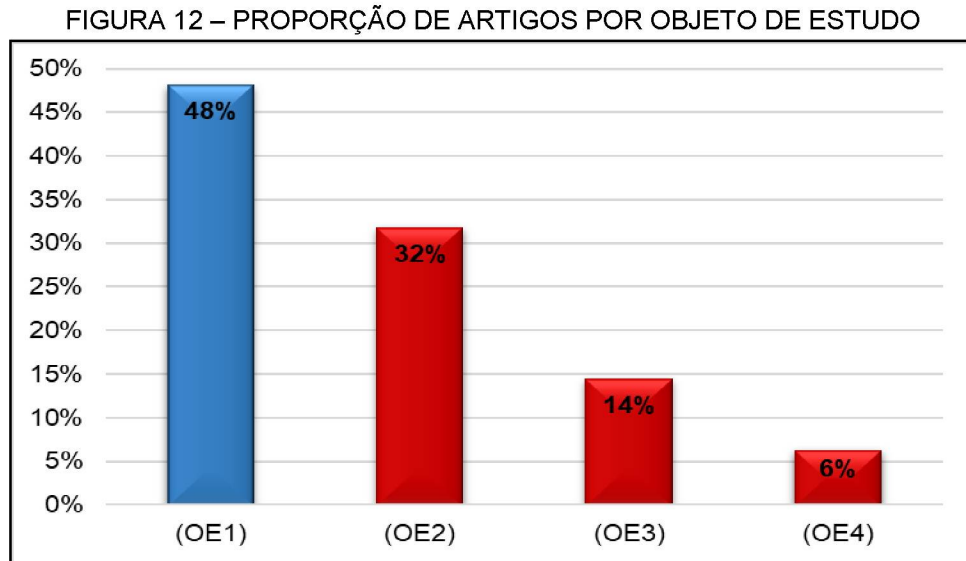
TABELA 1 – NÚMERO DE ARTIGOS SELECIONADOS NAS BASES DE DADOS

Base de dados	Número de artigos		
	Bases de dados	Seleção pelo título e resumo	Exclusão por duplicidade
<i>Scopus</i>	597	74	74
<i>Web of Science</i>	568	38	4
<i>Science Direct</i>	330	21	0
<i>Springer</i>	782	6	2
<i>Emerald</i>	113	1	0
EBSCO	101	3	0
Total	2491	143	80

FONTE: A autora (2020).

Com a exclusão dos artigos repetidos foi dado início ao processo de leitura da introdução, método e resultados. Nessa fase de seleção, os artigos foram classificados de acordo com o objeto de estudo avaliado em (OE1) residências unifamiliares, (OE2) outras edificações, (OE3) sistemas específicos e (OE4) outros

(FIGURA 12). Essa classificação foi feita para garantir que o portfólio selecionado para a análise bibliométrica fosse composto somente de estudos que realizaram a ACV de residências unifamiliares.



FONTE: A autora (2020).

Foi possível verificar com essa análise (FIGURA 12) que 48% da amostra foi composta de pesquisas que avaliaram o desempenho ambiental de residências unifamiliares de pequeno a grande porte. Os artigos restantes (52%) tratavam de pesquisas que avaliaram outros tipos de edificações, como residências multifamiliares e edifícios residenciais multiandares (32%), sistemas específicos, como sistemas de fundação, telhados ou hidráulicos (14%), e outros objetos de estudo, como artigos, métodos e construções não residenciais (4%). Salienta-se, ainda, que esses percentuais são equivalentes aos objetos analisados nos estudos, ou seja, há pesquisas que avaliaram mais de um tipo de sistema ou edificação.

Partindo disso, com o propósito de entender o cenário atual de publicações sobre o tema de pesquisa, como critério de inclusão, somente o grupo de artigos classificados como (OE1), ou seja, que realizaram a ACV de residências unifamiliares, foram selecionados para compor o portfólio bibliográfico.

#### 4.1.2 Análise bibliométrica do portfólio

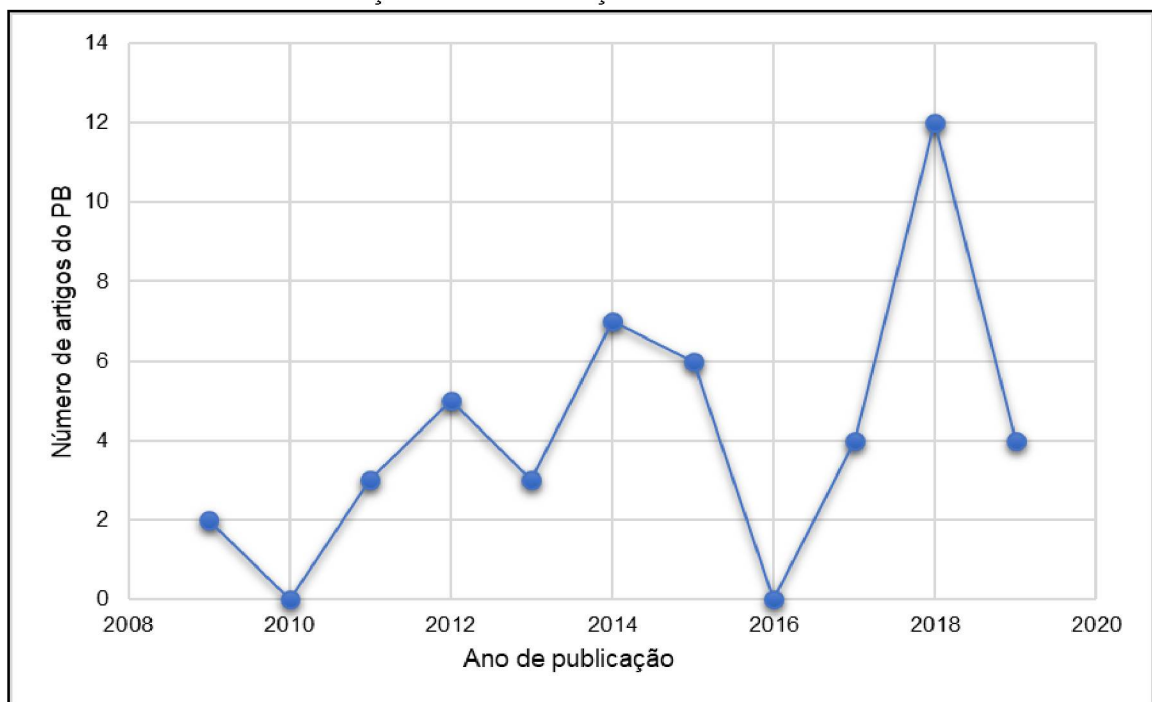
Na etapa de análise bibliométrica do portfólio, 46 artigos foram analisados quantitativamente com o objetivo de gerar conhecimento sobre o tema de pesquisa e

fornecer as principais características desses estudos. Nessa fase de análise, seis aspectos foram considerados, sendo eles a evolução do tema (4.1.2.1), relevância dos periódicos (4.1.2.2), reconhecimento científico dos artigos (4.1.2.3), autores de maior destaque (4.1.2.4), palavras-chave mais utilizadas (4.1.2.5) e metodologias de AICV e categorias de impacto (4.1.2.6). Vale ressaltar que os passos sugeridos pelos autores Ensslin, Ensslin e Pinto (2013) foram adaptados para que outros aspectos pertinentes fossem evidenciados na análise.

#### 4.1.2.1 Evolução do tema

De acordo com a FIGURA 13, os artigos relacionados ao tema de pesquisa foram publicados entre 2008 e 2019. Em 2018 foi perceptível o crescimento do número de publicações sobre o assunto, quando comparado aos anos anteriores. Ainda que a ACV seja uma técnica largamente utilizada no setor da construção civil, é possível perceber que o assunto não está obsoleto e que maiores incentivos devem ser realizados para a condução de mais pesquisas de ACV voltadas ao setor. Vale ressaltar que essa revisão foi finalizada em março de 2019, demonstrando uma possível tendência de aumento de publicações nos próximos meses.

FIGURA 13 – EVOLUÇÃO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SOBRE O TEMA



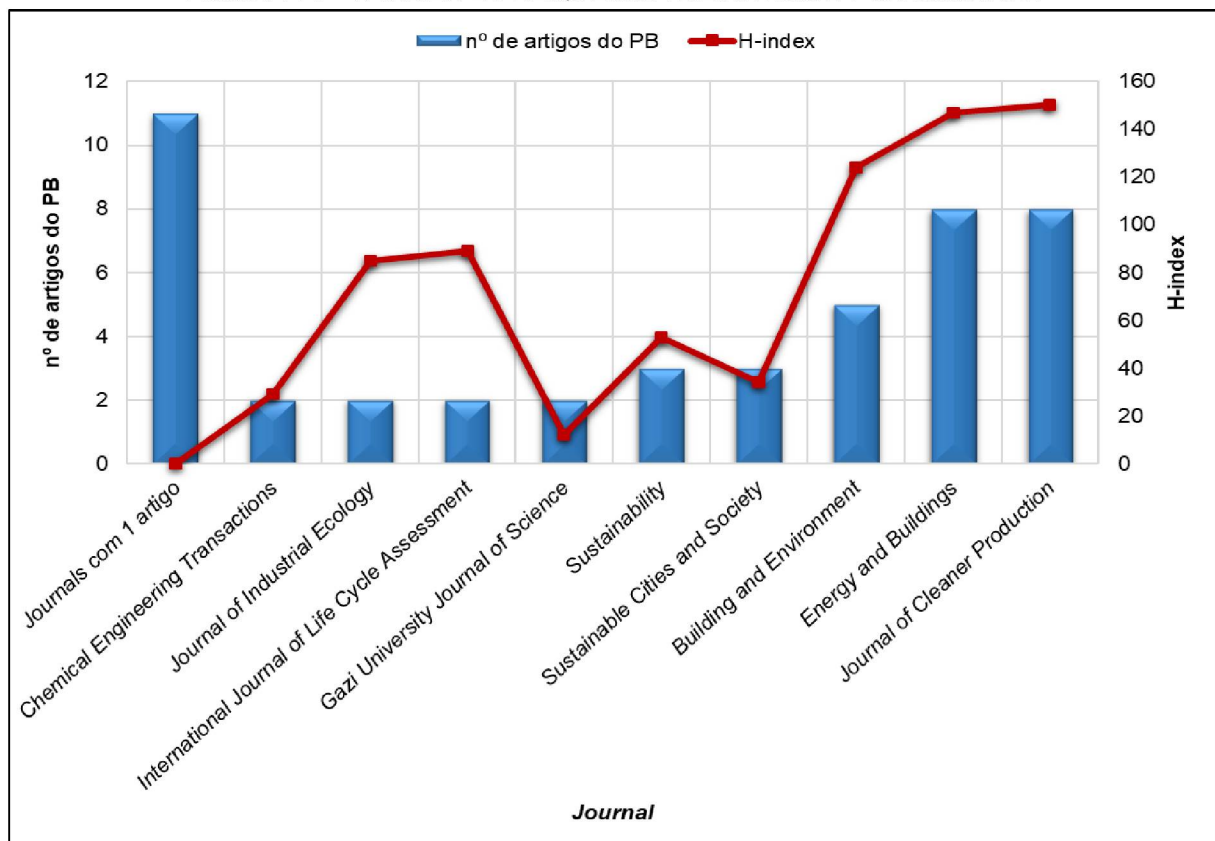
FONTE: A autora (2020).

#### 4.1.2.2 Relevância dos periódicos

Nesse tópico, duas análises foram realizadas para a identificação dos periódicos mais importantes desse estudo: (i) análise do *h-index* e da frequência de artigos em cada *journal* e (ii) análise do fator de impacto dos *journals*.

Na primeira análise foi verificado que o PB é formado por 20 *journals*, sendo os mais frequentes o *Journal of Cleaner Production* (17%), o *Energy and Buildings* (17%) e o *Building and Environment* (11%). Esses periódicos correspondem a quase 50% dos estudos selecionados, indicando quais são as tendências sobre as áreas de pesquisa desses *journals*. Os periódicos acumulados na primeira barra da FIGURA 14, classificados como “*Journals com 1 artigo*”, são compostos pelo *Building Simulation*, *Buildings*, *Construction and Building Materials*, *Construction Innovation*, *Environmental Impact Assessment Review*, *Environmental Science and Technology*, *European Journal of Wood and Wood Products*, *Journal of Architectural Engineering*, *Journal of Infrastructure Systems*, *Thermal Science* e *WSEAS Transactions on Environment and Development*.

FIGURA 14 – H-INDEX E FREQUÊNCIA DE ARTIGOS POR JOURNAL

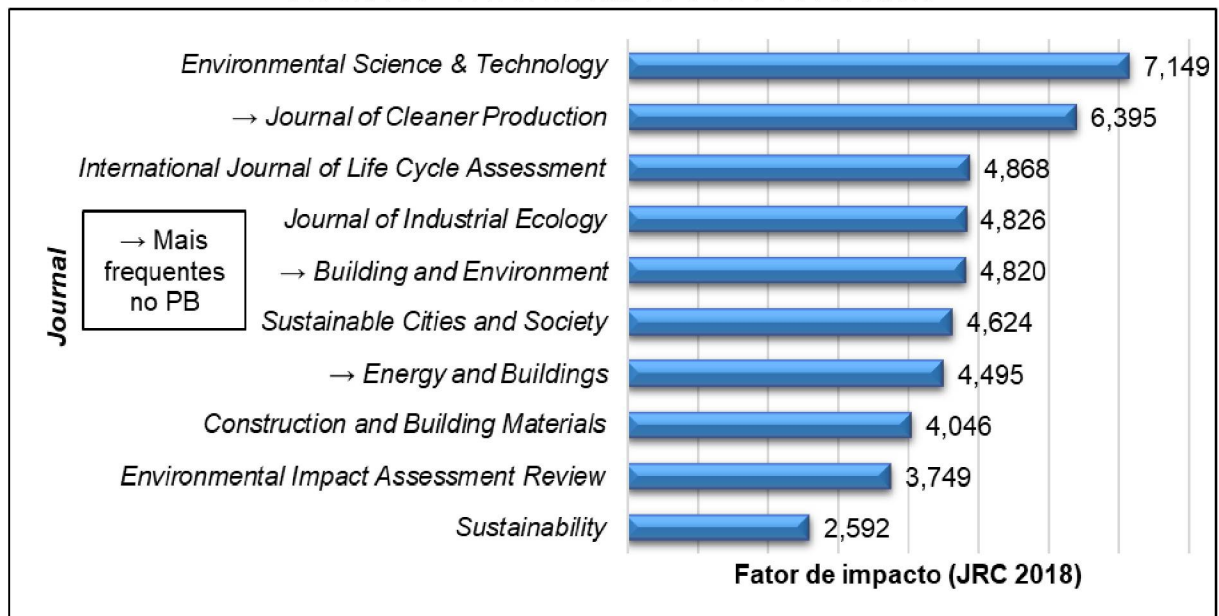


FONTE: A autora (2020).

Além disso, pode ser observado, também, o *h-index* dos periódicos mais frequentes do PB. Esse índice, proposto por Hirsch (2005), é utilizado para caracterizar a produção científica de pesquisadores e periódicos, e foi consultado no site *Scimago Journal & Country Rank*. Quanto maior o valor do *h-index*, maior a produtividade e relevância do pesquisador ou periódico no âmbito acadêmico. Nessa análise (FIGURA 14), os *journals* com o maior *h-index* foram o *Journal of Cleaner Production*, o *Energy and Buildings* e o *Building and Environment*, com os índices 150, 147 e 124, respectivamente.

Na segunda análise, o fator de impacto dos *journals*, relativo ao ano de 2018, foi consultado na base *Journal Citation Reports (JCR)*, responsável pela análise estatística e comparativa de diversos periódicos científicos indexados. Os resultados dos dez *journals* com os maiores fatores de impacto do PB são apresentados na FIGURA 15.

FIGURA 15 – FATOR DE IMPACTO DOS *JOURNALS*



FONTE: A autora (2020).

É possível observar que os *journals* mais frequentes do PB possuem, também, altos fatores de impacto em toda a amostra. Pode-se concluir que os estudos publicados entre os três *journals* citados previamente estão entre os mais relevantes para a etapa de análise de conteúdo, principalmente, por abordarem em seu escopo a análise do desempenho ambiental com o foco no setor da construção civil.

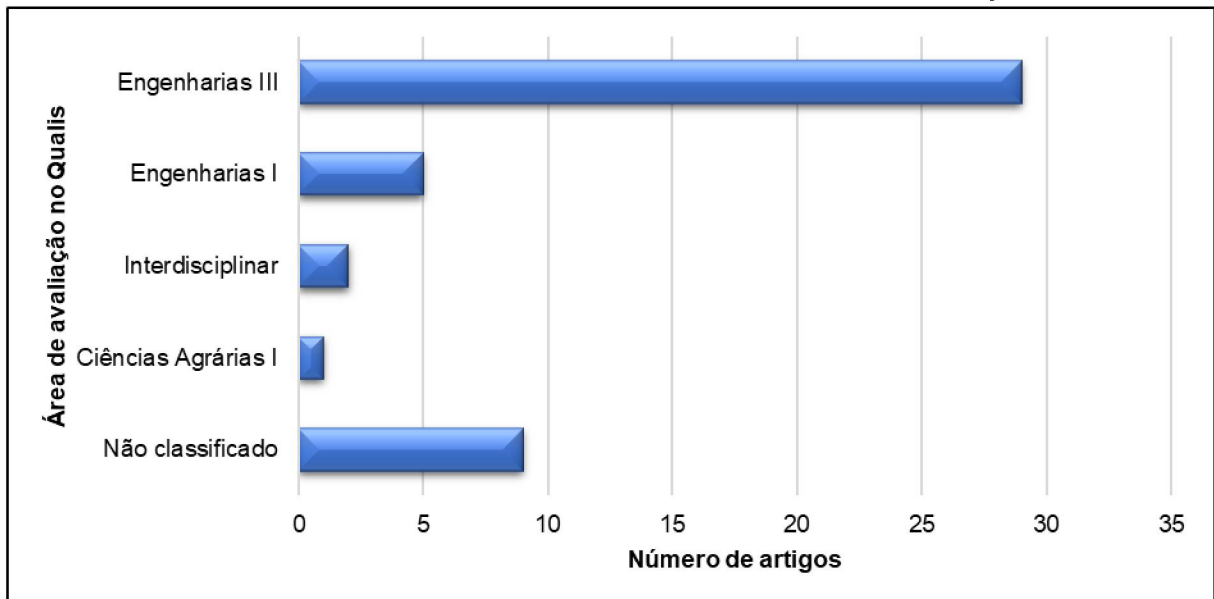


#### 4.1.2.3 Reconhecimento científico dos artigos

Referente ao reconhecimento científico dos artigos do PB, duas análises foram realizadas nesse tópico: (i) análise da frequência de artigos por área de avaliação e (ii) análise das citações dos artigos do PB ao longo dos anos.

A primeira análise se refere à frequência de artigos entre as áreas de avaliação, consultadas na plataforma Sucupira. É possível observar que a maior concentração de artigos, cerca de 62%, foram classificados na área “Engenharias III”, confirmando a grande importância de pesquisas sobre esse assunto para a área de Engenharia de Produção (FIGURA 16).

FIGURA 16 – FREQUÊNCIA DE ARTIGOS POR ÁREA DE AVALIAÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Na segunda análise, o número de citações de cada artigo foi consultado na base de dados *Scopus*. Na sequência, analisou-se o ano em que cada artigo foi citado, estabelecendo-se pesos para que o cálculo da pontuação de citações fosse realizado. Os anos e os pesos determinados foram: 2020 (1), 2019 (1), 2018 (0,9), 2017 (0,8), 2016 (0,7), 2015 (0,6), 2014 (0,5), 2013 (0,4), 2012 (0,3), 2011 (0,2) e 2010 (0,1). Dessa forma, para que a determinação dos artigos mais relevantes fosse coerente com o impacto ao longo dos anos, o número de citações em cada ano foi multiplicado pelo peso equivalente (TABELA 2).





(Continuação da TABELA 2)

nº	Artigos	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Pontuação total
34	Gámez-García <i>et al.</i> (2018)	1,0	2,0	3,6									6,6
35	Emami <i>et al.</i> (2019)	3,0	2,0										5,0
36	Achenbach, Wenker e Rüter (2018)		3,0	0,9									3,9
37	Broun <i>et al.</i> (2014)				0,8	0,7	1,8						3,3
38	Tecchio <i>et al.</i> (2019)	2,0	1,0										3,0
39	Oliveira <i>et al.</i> (2014)				1,6		0,6						2,2
40	Shirazi e Ashuri (2018)	2,0											2,0
41	Yan <i>et al.</i> (2018)		2,0										2,0
42	Balasbaneh, Bin Marsono e Kasra Kermanshahi (2018)			0,9									0,9
43	Saba, Ahmad e Majid (2018)			0,9									0,9
44	Janjua, Sarker e Biswas (2019)												0
45	Petrovski, Ivanović-Šekularac e Šekularac (2018)												0
46	Tikul e Srichandr (2011)												0

FONTE: A autora (2020).

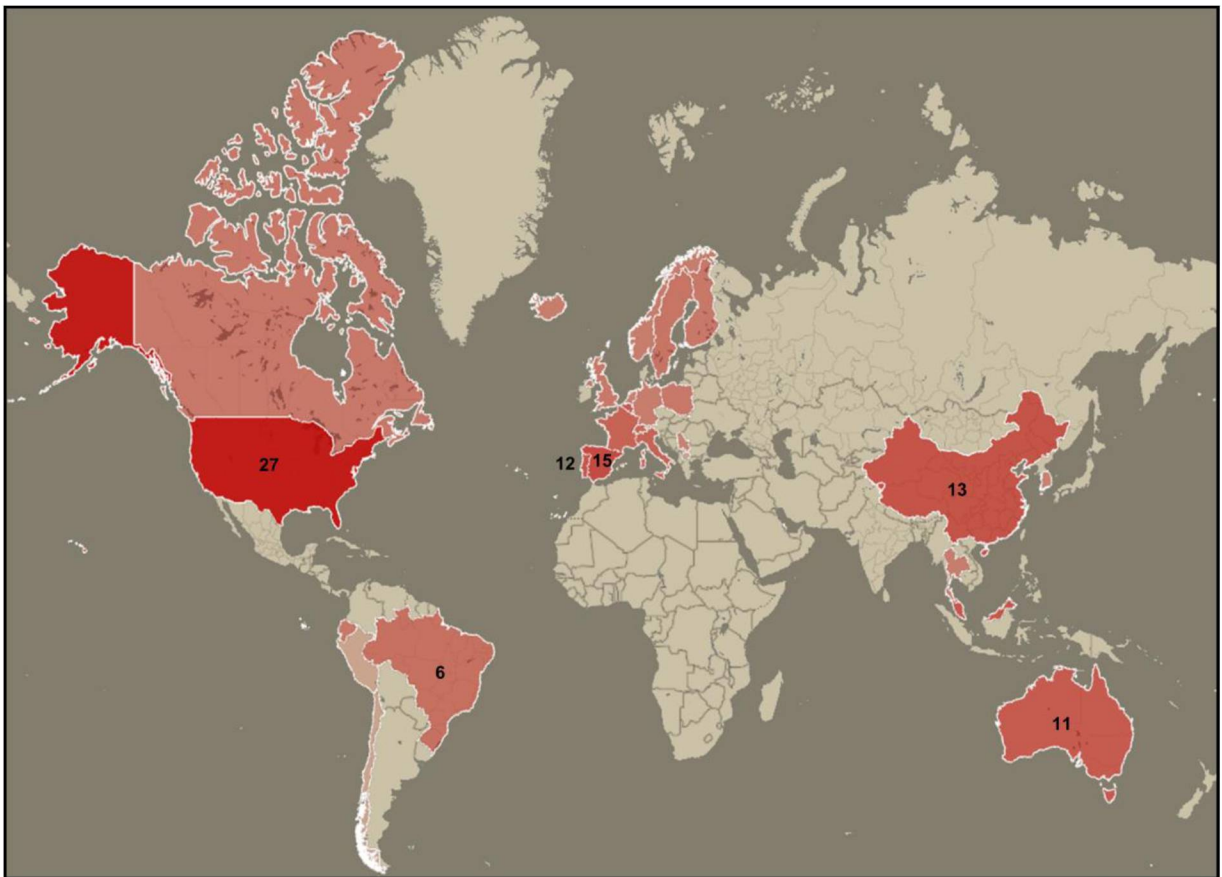
Com essa análise (TABELA 2), foi possível identificar os artigos mais relevantes ao longo dos anos. O artigo “*An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework*”, produzido pelos autores Jennifer Monahan e J. C. Powell, ainda que tenha sido publicado em 2011, apresentou a maior pontuação entre os artigos do PB e continua sendo um trabalho citado com grande frequência nos últimos anos. Além disso, foi observado que os três artigos com a maior pontuação total foram publicados no periódico *Energy and Buildings*, e estão disponíveis para consulta em um período maior do que outros artigos do PB.

#### 4.1.2.4 Autores de maior destaque

Com a análise das 46 publicações, 177 autores foram identificados e analisados de acordo com os seus centros de pesquisa no mundo, local de condução do estudo de caso e frequência no PB.

Os centros de pesquisa podem ser verificados na FIGURA 17, que ilustra de modo gradativo a localização dos pesquisadores no mundo. Quanto mais intensa a cor da região destacada no mapa, maior o número de pesquisadores presentes nessa área de acordo com a representatividade e contribuição destes nos artigos do portfólio. Foi possível verificar que as maiores concentrações de autores estão em países como os Estados Unidos (27), Espanha (15), China (13), Portugal (12), Austrália (11), Bélgica (11), Malásia (9), Itália (9), França (9) e Suíça (8), correspondendo à 70,1% dos centros de pesquisa do PB.

FIGURA 17 – CENTROS DE PESQUISA DOS AUTORES



FONTE: A autora (2020).

Além dos centros de pesquisa dos autores, verificou-se também o local onde as residências avaliadas nos estudos estão localizadas. A ACV foi realizada predominantemente em residências unifamiliares típicas da Europa, correspondendo a 51% dos estudos de caso do PB. Os casos foram localizados em países como a Alemanha (ACHENBACH; WENKER; RÜTER, 2018), Bélgica (LAVAGNA *et al.*, 2018; ROSSI *et al.*, 2012; ROSSI; MARIQUE; REITER, 2012), Espanha (GÁMEZ-

GARCÍA *et al.*, 2018; PACHECO-TORRES *et al.*, 2014), Finlândia (EMAMI *et al.*, 2019), França (HOXHA *et al.*, 2017; LASVAUX *et al.*, 2017), Itália (ASDRUBALI; BALDASSARRI; FTHENAKIS, 2013; VITALE *et al.*, 2018), Macedônia (PETROVSKI; IVANOVIĆ-ŠEKULARAC; ŠEKULARAC, 2018), Noruega (DAHLSTRØM *et al.*, 2012), Polônia (LEWANDOWSKA *et al.*, 2015), Portugal (OLIVEIRA *et al.*, 2014; MONTEIRO; FREIRE, 2012; MONTEIRO; FREIRE, 2011; TAVARES; LACERDA; FREIRE, 2019), Reino Unido (BROUN *et al.*, 2014; MONAHAN; POWELL, 2011), Suécia e Suíça (HEEREN *et al.*, 2015; MOSTEIRO-ROMERO *et al.*, 2014).

Já na América (22,6% do PB) foram identificados estudos no Canadá (ZHANG *et al.*, 2014), Chile (OYARZO; PEUPORTIER, 2014), Equador (MACIAS *et al.*, 2017), Estados Unidos (KAHHAT *et al.*, 2009; MOSTEIRO-ROMERO *et al.*, 2014; QUALE *et al.*, 2012; SALAZAR; MEIL, 2009; SHIRAZI; ASHURI, 2018; TECCHIO *et al.*, 2019) e Uruguai (SOUST-VERDAGUER *et al.*, 2018). No Brasil, somente dois estudos sobre a avaliação do ciclo de vida de residências unifamiliares foram identificados (EVANGELISTA *et al.*, 2018; PAULSEN; SPOSTO, 2013).

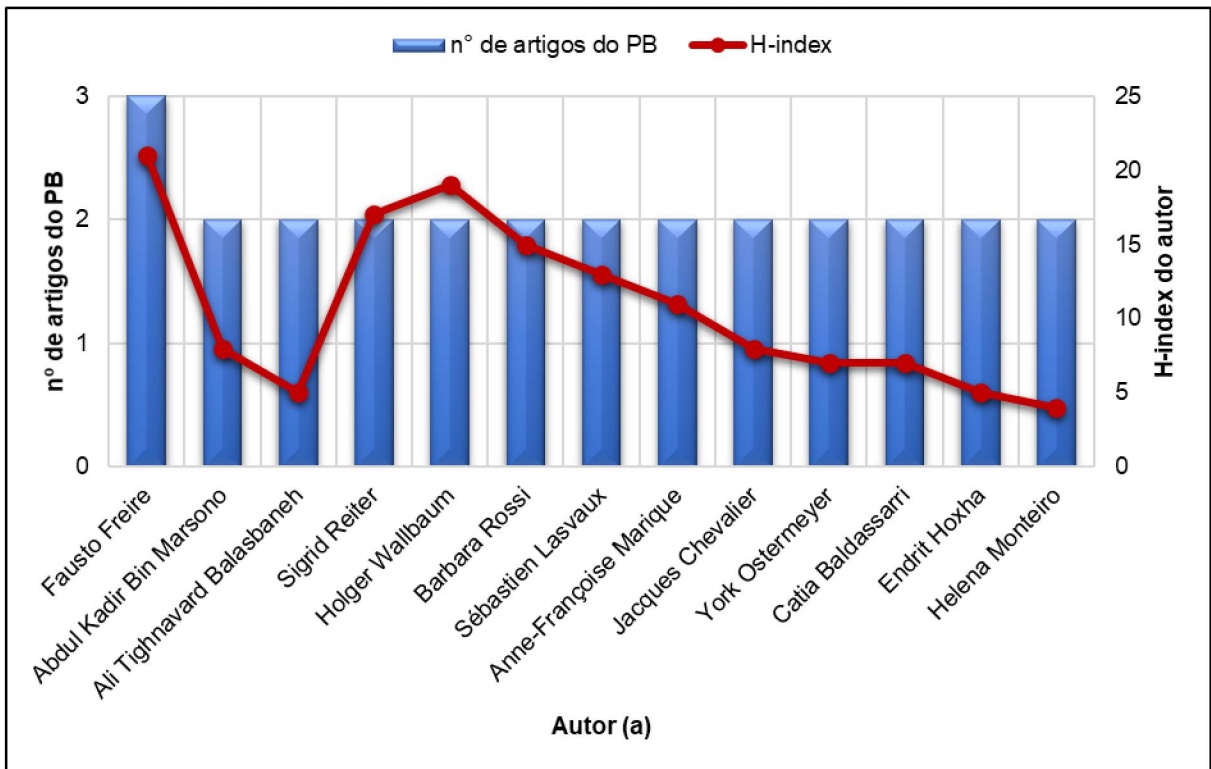
Na Ásia (20,8% do PB), as residências foram avaliadas em países como a Jordânia (HANANDEH, 2015), China (CAO *et al.*, 2015; YAN *et al.*, 2018), Coreia do Sul (SIM; SIM, 2017), Tailândia (TIKUL; SRICHANDR, 2011), Bahrein (RADHI; SHARPLES, 2013) e Malásia (BALASBANEH; BIN MARSONO; KASRA KERMANSHAHI, 2018; BIN MARSONO; BALASBANEH, 2015; WAN OMAR *et al.*, 2014).

Por fim, foram identificados, também, um estudo de caso realizado na Nigéria (SABA; AHMAD; MAJID, 2018) e dois estudos de caso na Austrália (ISLAM *et al.*, 2015; JANJUA; SARKER; BISWAS, 2019).

Esse panorama auxilia na interpretação das avaliações realizadas pelos autores, uma vez que os modelos de residência, a área avaliada, os sistemas de construção, os materiais empregados e a abrangência geográfica dos estudos interferem diretamente nos resultados das ACVs, tornando cada caso singular e não comparável.

Outra análise realizada foi referente aos autores que participaram do desenvolvimento de mais de um artigo do portfólio. Cerca de 93% dos autores publicaram somente uma vez sobre o tema, enquanto o restante contribuiu em três ou dois artigos do PB, conforme pode ser visto na FIGURA 18.

FIGURA 18 – H-INDEX E FREQUÊNCIA DOS AUTORES NOS ARTIGOS



FONTE: A autora (2020).

Sobre o *h-index*, verificou-se, também, que os autores que possuem o maior índice contribuíram somente com um artigo do PB, não sendo apresentados na FIGURA 18. Nesse sentido, os cinco autores com os maiores *h-index* da amostra foram: John C. Crittenden (50), Edgar G. Hertwich (47), Stefanie Hellweg (46), Yimin Zhu (41) e Vasilis Fthenakis (39). Com exceção dos pesquisadores Stefanie Hellweg e Yimin Zhu, que atuam, respectivamente, em um centro de pesquisa na Suíça e na China, os três cientistas com maior número de pesquisas com elevado fator de impacto atuam em centros de pesquisa nos Estados Unidos.

#### 4.1.2.5 Palavras-chave mais utilizadas

Nesse tópico, com o auxílio do *software* “*Word it out*”, os títulos, resumos e listas de palavras-chave dos 46 artigos foram analisados para a criação da nuvem de palavras (FIGURA 19).

FIGURA 19 – NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE



FONTE: A autora (2020).

De acordo com a FIGURA 19, as palavras com o maior destaque foram “*building*”, “*LCA*” e “*assessment*”. As palavras-chave utilizadas confirmam o grau de proximidade dos assuntos tratados nos artigos com o tema proposto nessa revisão. Além disso, com a nuvem de palavras foi possível notar a formação de alguns termos de pesquisa, como “*Global Warming Potential*”, “*Life Cycle Assessment*”, “*Embodied Energy*”, “*Embodied Carbon*”, “*Single-family house*” e “*CO<sub>2</sub> emissions*”. Os termos indicam o direcionamento de pesquisa da maior parte dos estudos do PB.

Ainda, termos como “*heating system*”, que significa “sistema de aquecimento” e “*operational*”, que reflete a fase de uso das edificações, apareceram na nuvem devido ao foco energético das ACVs. Como grande parte dos estudos de caso estão localizados na Europa ou em regiões frias, tipologias construtivas adaptadas às condições climáticas de cada local foram, portanto, avaliadas.

#### 4.1.2.6 Metodologias de AICV e categorias de impacto

Por fim, a última análise realizada foi referente às categorias de impacto avaliadas nos estudos do PB (QUADRO 5) e aos métodos de AICV (FIGURA 20).





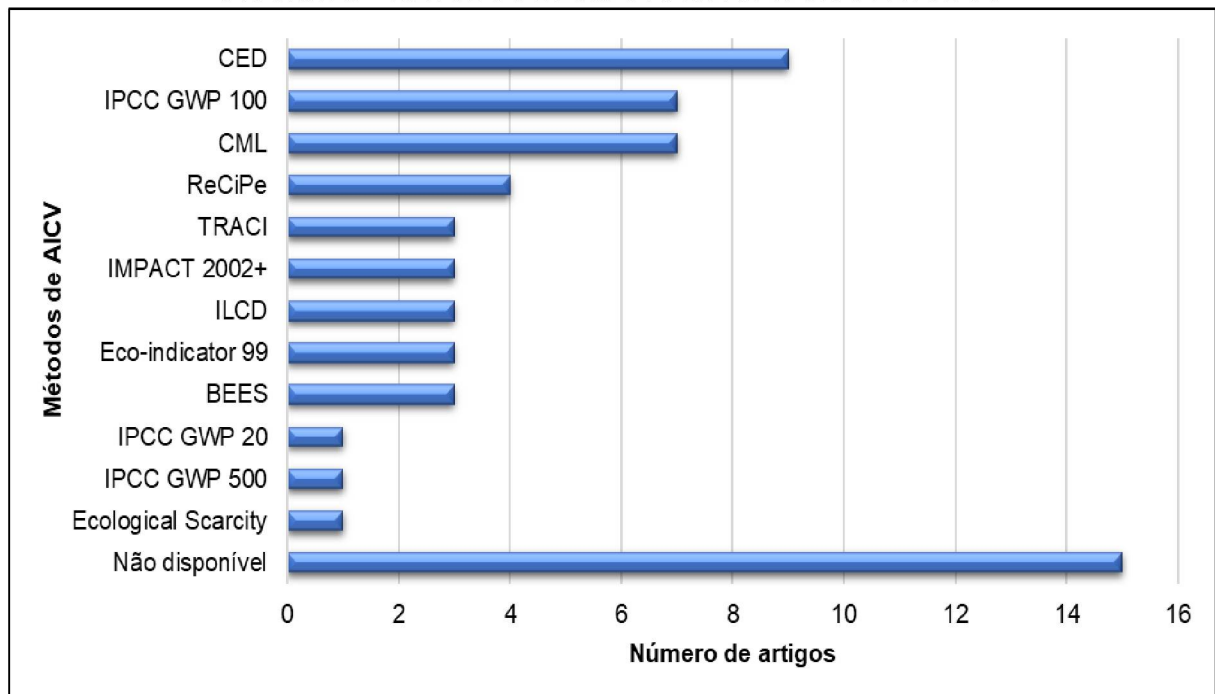
(Continuação do QUADRO 5)

nº	AQ	AC	ACT	EC	ECA	ECAD	ECM	ECT	ET	ETA	ETAD	ETM	ETT	OF	RI	DCO	CR	CE	TH	CG	N-CG	ER	US	SH	QE	R
44	✓																✓	✓								
45	✓	✓							✓					✓		✓	✓	✓								
46	✓																									
TT	43	17	4	4	1	6	4	5	11	1	2	3	2	13	8	12	19	29	7	6	4	12	6	6	5	5

FONTE: A autora (2020) <sup>4</sup>.

As categorias de impacto mais analisadas nos estudos foram o Aquecimento Global/Mudanças Climáticas, Consumo de Energia e Consumo de Recursos. O comportamento desses resultados se deve à busca pela melhoria da eficiência energética dos edifícios habitacionais, principalmente, na fase de uso da edificação. Como consequência do direcionamento das avaliações, as metodologias de AICV mais utilizadas foram o CED, IPCC GWP 100, CML e ReCiPe.

FIGURA 20 – MÉTODOS DE AICV APLICADOS NOS ESTUDOS



FONTE: A autora (2020).

<sup>4</sup> AQ: Aquecimento Global (carbono direto e indireto, GEE); AC: Acidificação; ACT: Acidificação terrestre; EC: Ecotoxicidade; ECA: Ecotoxicidade Aquática; ECAD: Ecotoxicidade de Água Doce; ECM: Ecotoxicidade Marinha; ECT: Ecotoxicidade Terrestre; ET: Eutrofização; ETA: Eutrofização Aquática; ETAD: Eutrofização de Água Doce; ETM: Eutrofização Marinha; ETT: Eutrofização Terrestre; OF: Oxidação Fotoquímica (Smog); RI: Radiação Ionizante; DCO: Depleção da Camada de Ozônio; CR: Consumo de Recursos (bióticos e abióticos); CE: Consumo de Energia (renovável e não-renovável); TH: Toxicidade Humana; CG: Carcinogênicos; N-CG: Não-carcinogênicos; ER: Efeitos respiratórios (material particulados/inaláveis inorgânicos ou orgânicos); US: Uso do Solo; SH: Saúde Humana; QE: Qualidade do Ecossistema; R: Resíduos; TT: TOTAL.

O método CED, que inclui como categorias de impacto diferentes tipos de energias renováveis e não renováveis (HISCHIER *et al.*, 2010), foi utilizado nos estudos para se obter uma visão geral dos impactos ambientais relacionados à energia consumida durante o ciclo de vida das residências.

Sobre outra perspectiva, o método IPCC avalia o indicador GWP, possuindo versões com três indicações de períodos: 20, 100 e 500 anos. Enquanto as perspectivas de 20 e 100 anos capturam, parcialmente, o impacto de substâncias com um longo período de vida útil, a perspectiva de 500 anos serve para avaliar a maior parte dos efeitos causados pelas substâncias que possuem longo tempo de permanência na atmosfera (EC-JRC, 2011).

O uso dos dois métodos citados reflete o foco principal das ACVs, que avaliaram, preferencialmente, o consumo de energia (energia incorporada e operacional) e as emissões (carbono incorporado e emissões durante a fase operacional) das residências. No entanto, somente a avaliação da energia ou das emissões de CO<sub>2</sub> pode restringir a interpretação dos resultados, uma vez que as edificações são, também, responsáveis pelo consumo de outros recursos (como terra, água, minerais e metais) e por outras emissões (causando, por exemplo, acidificação, eutrofização e ecotoxicidade) (LAVAGNA *et al.*, 2018).

Além disso, quinze estudos não especificaram a metodologia de AICV utilizada e outros estudos tiveram como abordagem a avaliação de multicategorias de impacto e a utilização de mais de uma metodologia de AICV. Essa estratégia foi estabelecida tanto para que os impactos ambientais fossem verificados em categorias que determinado método não abrange, como para a verificação da consistência dos resultados entre as metodologias de AICV.

Por outro lado, entre os artigos do PB que utilizaram mais de uma metodologia para a confirmação dos resultados da caracterização, as discussões com relação a esse ponto não foram expandidas, devido à pouca alteração dos impactos entre as categorias para o objeto em análise.

#### 4.1.3 Análise sistemática do portfólio

A etapa de análise sistemática do portfólio consistiu na análise qualitativa para a seleção dos artigos por meio do conteúdo (4.1.3.1) e na análise detalhada dos artigos selecionados (4.1.3.2).



#### 4.1.3.1 Seleção por meio do conteúdo

Nesse tópico, o primeiro critério de seleção foi determinado com base na classificação do prestígio dos periódicos nos quais os artigos foram publicados. Essa classificação chama-se *Journal Impact Factor Quartile* e se trata de um indicador de influência que varia de Q1 a Q4. Os periódicos categorizados como Q1 são reconhecidos pelo seu elevado grau de influência para a comunidade acadêmica. Deste modo, a partir da consulta do *quartile* no site *Scimago Journal & Country Rank*, foram identificados dez artigos do PB publicados em *journals* classificados em Q2, Q3 e Q4. Como critério de inclusão, delimitou-se somente a seleção de artigos classificados em Q1, restando um total de 36 artigos.

Na sequência, os 36 artigos foram lidos integralmente e classificados de acordo com a relevância do conteúdo para o objetivo dessa revisão. Visto que, para que as perguntas de pesquisa previamente delimitadas fossem respondidas, as avaliações precisariam ter enfoque na fase pré-operacional (produto e construção), com prioridade na avaliação de multicategorias de impacto.

Dessa forma, os estudos que analisaram somente o carbono e/ou energia (direta ou indireta), sem especificar o modelo de caracterização utilizado para a conversão do ICV em impactos, não foram selecionados para a amostra final de artigos (HEEREN *et al.*, 2015; MONAHAN; POWELL, 2011; PACHECO-TORRES *et al.*, 2014; PAULSEN; SPOSTO, 2013; RADHI; SHARPLES, 2013; ROSSI; MARIQUE; REITER, 2012; SALAZAR; MEIL, 2009; SIM; SIM, 2017; WAN OMAR *et al.*, 2014).

Outro ponto observado foi relativo ao objetivo dos estudos. Alguns fizeram a utilização de modelos híbridos de ACV (CAO *et al.*, 2015; ROSSI *et al.*, 2012), como a proposta de integração da ACV na ferramenta BIM (YANG *et al.*, 2018), e argumentaram sobre os aspectos de custos do ciclo de vida (ISLAM *et al.*, 2015). Nesse caso, o foco dos estudos não foi a análise do desempenho ambiental, sendo, por essa razão, não selecionados para a análise de conteúdo.

Essas delimitações foram realizadas com o objetivo de selecionar os métodos multicategorias mais apropriados para a avaliação do ciclo de vida de produtos da construção civil. Além disso, a partir dessa seleção, os métodos mais utilizados foram aplicados no estudo de caso proposto nessa dissertação. Deste

modo, 22 artigos atenderam aos critérios de inclusão e foram selecionados para a análise de conteúdo, como pode ser verificado no QUADRO 6.

QUADRO 6 – ARTIGOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DE CONTEÚDO

nº	Autores / ano	Título	Journal
1	Asdrubali, Baldassarri e Fthenakis (2013)	<i>Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings</i>	<i>Energy and Buildings</i>
2	Monteiro e Freire (2012)	<i>Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods</i>	<i>Energy and Buildings</i>
3	Dahlstrøm et al. (2012)	<i>Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional- or passive house standard</i>	<i>Energy and Buildings</i>
4	Quale et al. (2012)	<i>Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States</i>	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
5	Hoxha et al. (2017)	<i>Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>
6	Mosteiro-Romero et al. (2014)	<i>Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts</i>	<i>Energy and Buildings</i>
7	Bin Marsono e Balasbaneh (2015)	<i>Combinations of building construction material for residential building for the global warming mitigation for Malaysia</i>	<i>Construction and Building Materials</i>
8	Evangelista et al. (2018)	<i>Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>
9	Lewandowska et al. (2015)	<i>Between full LCA and energy certification methodology — a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment</i>	<i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>
10	Lavagna et al. (2018)	<i>Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock</i>	<i>Building and Environment</i>
11	Oyarzo e Peuportier (2014)	<i>Life cycle assessment model applied to housing in Chile</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>
12	Lasvaux et al. (2017)	<i>Towards guidance values for the environmental performance of buildings: application to the statistical analysis of 40 low-energy single family houses' LCA in France</i>	<i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>
13	Zhang et al. (2014)	<i>Life cycle assessment of a single-family residential building in Canada: A case study</i>	<i>Building Simulation</i>

(Continuação do QUADRO 6)

nº	Autores / ano	Título	Journal
14	Macias <i>et al.</i> (2017)	<i>Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador</i>	<i>Energy and Buildings</i>
15	El Hanandeh (2015)	<i>Environmental assessment of popular single-family house construction alternatives in Jordan</i>	<i>Building and Environment</i>
16	Soust-Verdaguer <i>et al.</i> (2018)	<i>BIM-Based LCA Method to Analyze Envelope Alternatives of Single-Family Houses: Case Study in Uruguay</i>	<i>Journal of Architectural Engineering</i>
17	Vitale <i>et al.</i> (2018)	<i>Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>
18	Emami <i>et al.</i> (2019)	<i>A life cycle assessment of two residential buildings using two different LCA database-software combinations: Recognizing uniformities and inconsistencies</i>	<i>Buildings</i>
19	Achenbach, Wenker e Rüter (2018)	<i>Life cycle assessment of product- and construction stage of prefabricated timber houses: a sector representative approach for Germany according to EN 15804, EN 15978 and EN 16485</i>	<i>European Journal of Wood and Wood Products</i>
20	Tecchio <i>et al.</i> (2019)	<i>Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage</i>	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
21	Shirazi e Ashuri (2018)	<i>Embodied life cycle assessment comparison of single family residential houses considering the 1970s transition in construction industry: Atlanta case study</i>	<i>Building and Environment</i>
22	Balasbaneh, Bin Marsono e Kasra Kermanshahi (2018)	<i>Balancing of life cycle carbon and cost appraisal on alternative wall and roof design verification for residential building</i>	<i>Construction Innovation</i>

FONTE: A autora (2020).

#### 4.1.3.2 Análise de conteúdo

Nessa subetapa, os conteúdos dos 22 artigos foram analisados integralmente, para que os principais aspectos fossem apresentados nessa seção. A primeira análise realizada foi referente à abordagem da ACV dos artigos. A fronteira dos sistemas foi analisada com base nas fases do ciclo de vida de edificações propostas pela Norma Europeia EN 15978 (2011). Conforme já salientado na subseção 2.6.4.1, foram priorizados os estudos que consideraram na ACV a fase pré-operacional, ou seja, que abrange as subfases relativas aos processos de produção e transporte das matérias-primas e construção das residências (A1 – A5).

Pode-se verificar, também, que a maior parte dos estudos delimitaram a abordagem da ACV do “berço ao túmulo”, com algumas ressalvas nas subetapas avaliadas nas fases operacional e pós-operacional. As fases e respectivas subfases avaliadas nas ACVs de residências unifamiliares dos estudos podem ser observadas no QUADRO 7.

QUADRO 7 – FRONTEIRA DE AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS DE ACV

Ciclo de vida	SF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
<b>I. Fase pré-operacional</b>																								
Produto	A1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	A2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Construção	A3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	A4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	A5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
<b>II. Fase operacional</b>																								
Uso	B1																							
	B2		✓						✓		✓			✓	✓		✓					✓	✓	
	B3									✓					✓		✓							
	B4	✓				✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓				✓	✓		
	B5									✓					✓									
	B6	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓				✓		
	B7			✓					✓	✓	✓	✓			✓	✓								
<b>III. Fase pós-operacional</b>																								
Fim de vida	C1	✓				✓		✓	✓	✓	✓			✓		✓					✓	✓	✓	
	C2	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓					✓	✓		
	C3	✓				✓		✓		✓			✓					✓			✓			
	C4	✓				✓			✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓			✓		✓	
Extensão do ciclo de vida	D	✓								✓								✓		✓	✓	✓	✓	

FONTE: A autora (2020).<sup>5</sup>

Na sequência, as principais categorias de impacto e de dano avaliadas foram levantadas e agrupadas (FIGURA 21).

<sup>5</sup> SF: Subfase; A1: Fornecimento de matérias-primas; A2: Transporte de matérias-primas; A3: Produção dos materiais de construção; A4: Transporte ao local de construção; A5: Processo de construção; B1: Uso; B2: Manutenção; B3: Reparos; B4: Reposição; B5: Reformas; B6: Uso de energia; B7: Uso de água; C1: Demolição; C2: Transporte dos resíduos; C3: Processamento dos resíduos; C4: Disposição final; D: Reúso, recuperação e potencial de reciclagem.

FIGURA 21 – PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO

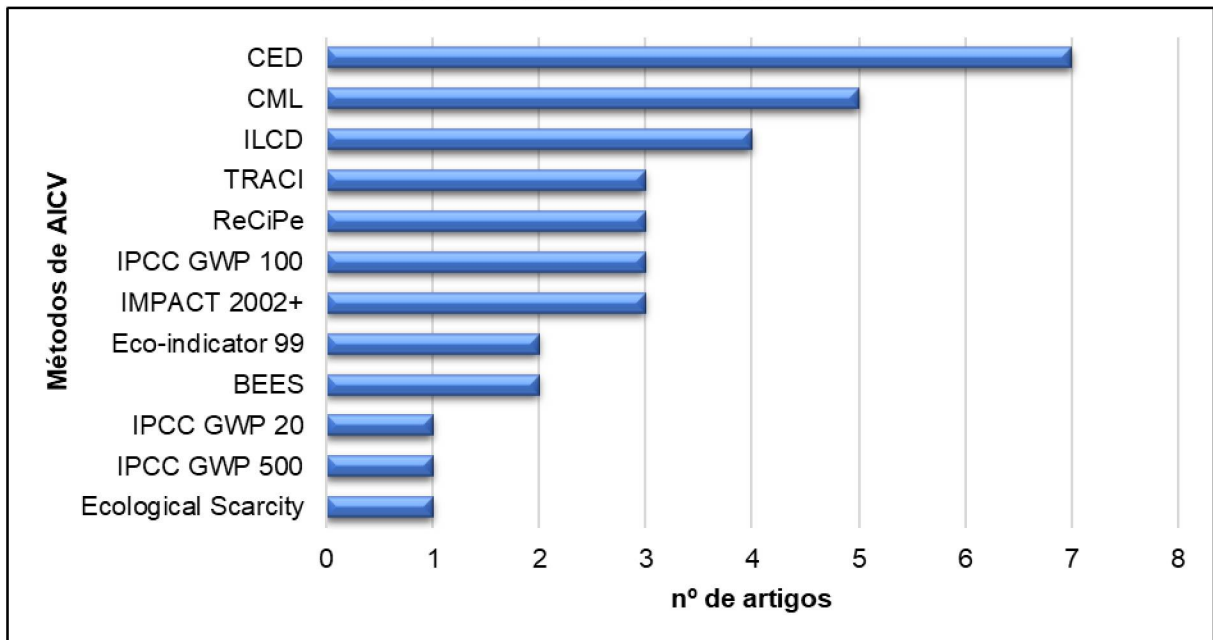


FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 21, as categorias de impacto similares, ou seja, com variações nos métodos de AICV, foram agrupadas nas categorias de acidificação, eutrofização e ecotoxicidade. A grande variação da terminologia é consequência das particularidades dos métodos de AICV aplicados nos estudos. Enquanto alguns métodos, como o TRACI, apresentam os resultados da caracterização em termos do potencial de eutrofização, por exemplo, métodos como o ILCD especificam os resultados para essa categoria em relação ao potencial de eutrofização terrestre, de água doce e marinha.

Na sequência, observou-se que entre de AICV utilizados pelos autores, os métodos CED, CML, ILCD, TRACI, ReCiPe, IPCC e IMPACT 2002+ foram os mais aplicados nos estudos (FIGURA 22).

FIGURA 22 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE AICV



FONTE: A autora (2020).

Sobre os métodos de multicategorias, com exceção dos métodos ReCiPe, IMPACT 2002+, *Eco-indicator 99* e *Ecological Scarcity*, que avaliam, também, os impactos causados ao fim do mecanismo ambiental (*endpoint*), o nível de avaliação do impacto da maior parte dos métodos é de *midpoint*.

Em outra análise, foi notada a utilização de alguns *softwares* para a realização dos cálculos dos impactos ambientais, como o Elodie, EnergyPlus, GaBi, Athena Impact Estimator e SimaPro. O SimaPro, em diferentes versões, se mostrou o *software* mais frequente entre os estudos (12 dos 22 estudos).

Além disso, verificou-se que não há um consenso sobre o melhor método para a análise do ciclo de vida de residências, ainda que os métodos possuam diversas categorias de impacto iguais ou similares. Cada método engloba uma série de categorias de impacto, que são delimitadas conforme o objetivo e escopo dos estudos de ACV. Os modelos de caracterização das metodologias também apresentam variações e semelhanças, como os métodos criados com base em modelos de caracterização de métodos mais antigos.

Até o momento, a seleção das metodologias de AICV ainda é uma das grandes dificuldades entre os pesquisadores de ACV. Os modelos de caracterização (e fatores de normalização e ponderação) apresentam diversos aspectos particulares, que devem ser ponderados durante a escolha de uma metodologia. Por exemplo, o Brasil é um país que possui uma vasta extensão territorial, com variadas

condições climáticas, tipos de solo e bacias hidrográficas. Além disso, o setor industrial brasileiro é muito diversificado, produzindo desde produtos agrícolas até tecnologias com elevado valor agregado. Essas indústrias estão localizadas em regiões com condições e características específicas. Dessa forma, ao analisar um produto manufaturado em uma empresa localizada em uma região com elevada densidade demográfica e clima semiárido, a utilização de água pode resultar em um impacto de escassez hídrica em uma escala muito maior do que em outras regiões. Além disso, observar quais são os impactos que determinado setor industrial ocasiona no meio ambiente e compreender como a sociedade percebe esses impactos é fundamental ao definir o que deve ser priorizado nas avaliações ambientais.

Conforme já evidenciado anteriormente, o setor da construção civil é determinante nas emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia e recursos naturais, além de provocar grande modificação do meio ambiente e produzir vários materiais de construção com potencial tóxico. Por essa razão, as categorias mais avaliadas nos estudos de ACV foram o potencial de aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, toxicidade humana (com e sem efeitos cancerígenos), eutrofização e consumo de energia (renovável e/ou não-renovável, dependendo da fonte de energia adotada nos países do estudo).

Deste modo, com base na falta de consenso sobre a metodologia mais adequada de AICV para o uso na construção civil, um dos *gaps* de pesquisa bastante evidente nos estudos de ACV foi relativo à consistência dos resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida, de acordo com o modelo de caracterização e categorias de impacto avaliadas. Em vista disso, como conclusão dessa revisão sistemática, as três perguntas de pesquisa foram respondidas, servindo como apoio para a realização do estudo de caso de ACV proposto nessa dissertação e para as discussões apresentadas no Capítulo 6.

## 5 ESTUDO DE CASO DE ACV DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES INTERNAS NÃO-ESTRUTURAIS

A metodologia de ACV foi conduzida conforme a estrutura, princípios, requisitos e diretrizes presentes nas normas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Nesse contexto, o detalhamento das fases de definição do objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida e avaliação do impacto do ciclo de vida são apresentados nas subseções 5.1, 5.2 e 5.3.

### 5.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Do ponto de vista do objetivo, esse estudo visa comparar, com o uso de diferentes métodos de AICV e fatores de normalização, os resultados da caracterização e normalização de três sistemas de vedações internas não-estruturais: vedação em alvenaria convencional de blocos cerâmicos, vedação em *drywall* com estrutura de aço e vedação em *drywall* com estrutura de madeira.

Com a análise dos resultados da normalização, foi possível identificar as categorias de impacto com maiores contribuições nos resultados para os três sistemas de vedação. A partir disso, com as categorias de impacto de maior significância definidas, efetuou-se a harmonização dos indicadores de categorias para os resultados caracterizados das categorias de impacto selecionadas.

Na sequência, os resultados foram normalizados por meio dos fatores de normalização dos métodos de AICV e com o uso de referências de normalização globais, fazendo-se, assim, uma análise comparativa para a geração de discussões, recomendações e conclusões acerca dos resultados.

Essa avaliação teve o foco na identificação das possíveis inconsistências dos resultados de cada categoria de impacto entre os métodos de AICV, para que os resultados alcançados sejam divulgados à comunidade acadêmica e aos setores públicos e privados.

#### 5.1.1 Função, unidade funcional e fluxo de referência

Conforme a perspectiva do escopo, a escolha da unidade funcional, de acordo com a função do produto selecionado para a avaliação, é um dos elementos



mais importantes dessa fase (HEIJUNGS; SUH, 2011). Isso porque os resultados finais da ACV são diretamente afetados se a unidade funcional for definida de forma equivocada.

Vale ressaltar, também, que a unidade funcional deve ser claramente definida e mensurável, e que comparações entre sistemas de produtos devem ser feitas com base nas mesmas funções, unidades funcionais e fluxos de referência (ABNT, 2009b). Com base nisso, algumas considerações referentes ao escopo dos sistemas de vedação avaliados nessa dissertação foram realizadas (QUADRO 8).

QUADRO 8 – ESCOPO DA ACV PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM

Produto	Função	Unidade Funcional	Fluxo de Referência
Paredes de vedação interna não-estruturais	Constituir área de vedação interna não-estrutural	Constituir área de vedação interna não estrutural de 5,76 m <sup>2</sup> durante 20 anos	Parede de 5,76 m <sup>2</sup>

FONTE: A autora (2019).

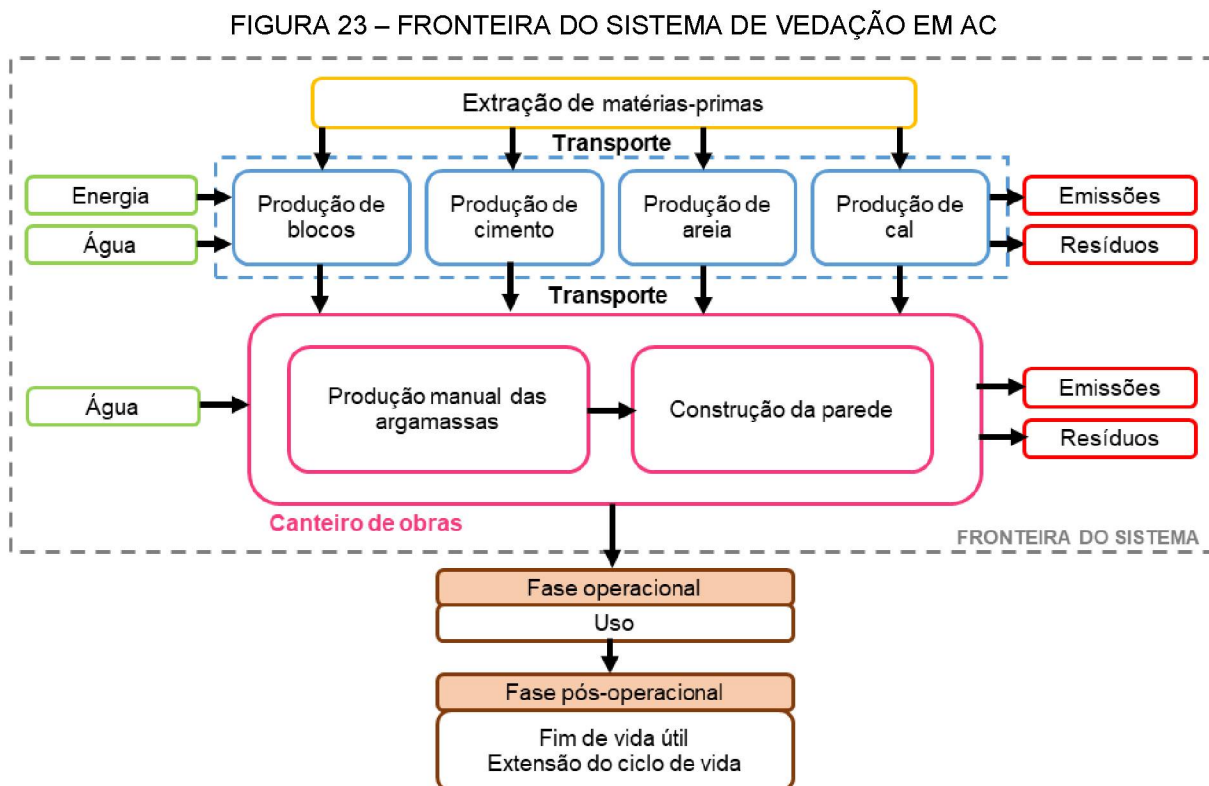
De acordo com o escopo definido, salienta-se que a função, a unidade funcional e o fluxo de referência são os mesmos para os três sistemas de vedação. A função das paredes é unicamente destinada para a separação de ambientes localizados em áreas secas. O tempo de vida útil de 20 anos foi estabelecido de acordo a norma de “Desempenho de edificações habitacionais – NBR 15575”, que determina um tempo de vida útil mínimo de 20 anos para vedações verticais internas (ABNT, 2003; ABNT, 2013a; ABNT, 2013b).

#### 5.1.2 Sistema de produto, fronteira de sistema, alocação e critérios de corte

O sistema de produto desse estudo de ACV, conforme a norma europeia EN 15978 (2011), foi composto pela fase pré-operacional do ciclo de vida de edificações, formado pelas etapas de produto (A1, A2 e A3) e construção (A4 e A5).

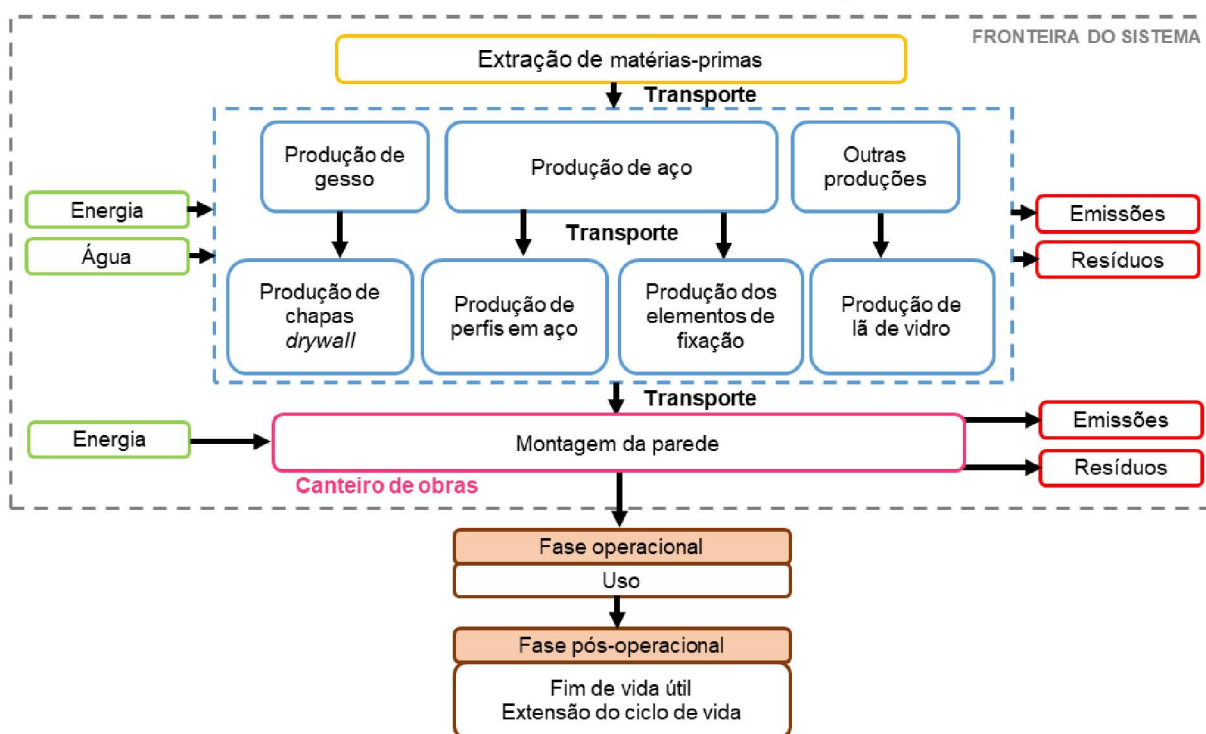
Essa fase é constituída pelos processos de extração e beneficiamento das matérias-primas (A1), produção dos materiais de construção (A3), construção das paredes (A5) e transporte dos produtos da fábrica até o e local de construção (A2 e A4). Desse modo, a abordagem da ACV dessa dissertação é definida como uma abordagem do “berço ao portão” (*cradle to gate*).

Com relação à fronteira do sistema, os processos elementares e os principais processos de produção dos insumos para o sistema em AC de blocos cerâmicos, em *drywall* com estrutura de aço e em *drywall* com estrutura de madeira estão representados na FIGURA 23, FIGURA 24 e FIGURA 25, respectivamente.



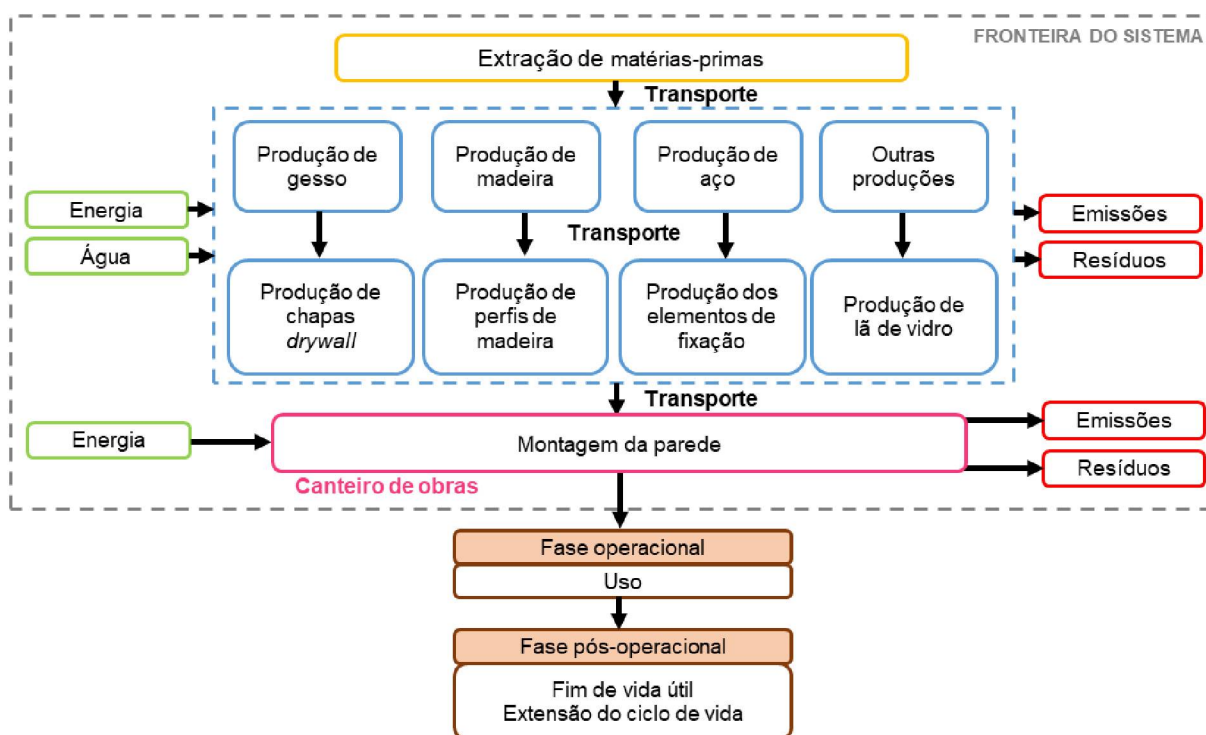
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 24 – FRONTEIRA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO EM DEA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 25 – FRONTEIRA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO EM DEM



FONTE: A autora (2020).

Vale salientar que a representação dos fluxogramas dos sistemas de produto apresentados nas FIGURAS 23, 24 e 25 foram simplificados, omitindo-se das figuras diversos processos elementares e intermediários de menor significância, porém considerados nas análises.

Relativa à determinação da fronteira dos sistemas, estudos anteriores constataram a importância da fase pré-operacional nos impactos potenciais, sendo a fabricação dos insumos responsável por 7% a 51% dos impactos totais de uma residência unifamiliar (considerando todos os elementos estruturais) (ZHANG *et al.*, 2014) e a alvenaria responsável por até 23% das emissões (PACHECO-TORRES *et al.*, 2014).

Monahan e Powell (2011) ainda reforçam que o carbono total incorporado está presente em maior escala nos materiais de construção (82%), devido ao grau de importância dos minerais como cimento, cascalho e areia, sendo o restante associado às atividades de construção e transporte.

Quale *et al.* (2012) destacam, também, que as emissões associadas à ocupação das edificações diminuem à medida em que as construções se tornam mais eficientes, fazendo com que a fase pré-operacional tenha maior peso nos impactos causados ao meio ambiente.

Nesse contexto, as fases operacional e pós-operacional, referentes ao uso das paredes, fim de vida e extensão do ciclo de vida, foram desconsideradas da avaliação, uma vez que o foco da comparação foi a análise dos resultados com o uso de diferentes materiais e métodos de AICV.

Quanto aos procedimentos de alocação, a norma recomenda que o uso seja evitado por meio da divisão de processos elementares em dois ou mais subsistemas ou por meio da expansão do sistema de produto (ABNT, 2009b). Sobre os produtos avaliados, não foi identificada a necessidade de alocação, dado que cada sistema de produto é monofuncional, ou seja, há a saída de apenas um produto ao fim de cada cadeia produtiva. Dessa forma, a alocação foi evitada conforme as recomendações da norma, ainda que tais procedimentos possam ter sido aplicados nos processos extraídos da base de dados utilizada nesse estudo.

Por fim, sobre os critérios de corte, no processo de revestimento e acabamento das paredes em *drywall* com estrutura de aço e madeira, a tabela de composições SINAPI indica a aplicação de fita de papel micro perfurado para tratamento de juntas em *drywall*, além de massa para *drywall*. No entanto, devido ao

tipo de material, ausência de um processo semelhante na base de dados *Ecoinvent* 3.5, baixa significância ambiental, baixa massa específica e massa utilizada para a aplicação ser muito baixa (< 5% da massa total), como critério de corte para o ICV, esse material não foi adicionado na análise.

### 5.1.3 Pressupostos e considerações do estudo

Com relação aos pressupostos e considerações realizadas nesse estudo de ACV, inicialmente, foi efetuada a busca por processos idênticos ou semelhantes na base de dados *Ecoinvent* 3.5, para que todos os materiais fossem cadastrados em conformidade com as tecnologias e processos necessários para as suas produções, respeitando a fronteira estabelecida no escopo (berço ao portão).

A estrutura de aço zincado foi composta pelos processos de produção do aço de baixa liga, processo de laminação de chapas de aço para a formação dos perfis usados no sistema DEA e pelo processo de revestimento dos perfis para proteção contra os agentes corrosivos. Os processos foram selecionados separadamente e agrupados, devido à inexistência de um processo único de produção de perfis conformados à frio e já tratados.

Por outro lado, o processo de produção do aço utilizado para os parafusos e pregos foi por laminação a quente, passando, em seguida, pelo processo de forjamento para a sua transformação. O processo de forjamento selecionado na base de dados não inclui a produção do aço (iniciado com a entrega de materiais e energia no local), sendo voltado ao tratamento térmico, usinagem (incluindo corte, fresagem e torneamento) e inspeção final, com a saída do aço usinado. Por isso, para o processo de produção desses itens, a produção do aço e o processo de transformação do aço foram agrupados no cadastro no SimaPro.

Para a madeira utilizada na estrutura do sistema em *drywall*, o processo relativo ao tratamento químico foi selecionado na base de dados e embutido no processo de produção de madeira serrada aplainada. Os principais processos são apresentados no QUADRO 9.

QUADRO 9 – PROCESSOS CONSIDERADOS NO ESTUDO

Material	Processos do Ecoinvent 3.5	Disposição final
<b>Vedação em AC</b>		
Bloco cerâmico	<i>Clay brick {RoW}  production   Cut-off, U</i>	<i>Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U</i>
Cimento Portland	<i>Cement, Portland {RoW}  production   Cut-off, U</i>	
Cal hidratada	<i>Lime, packed {RoW}  lime production, milled, packed   Cut-off, U</i>	
Areia média	<i>Sand {RoW}  gravel and quarry operation   Cut-off, U</i>	
Água	<i>Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U</i>	-
<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura em LSF</b>		
Estrutura de aço zincado	<i>Sheet rolling, steel {RoW}  processing   Cut-off, U</i>	<i>Waste reinforcement steel {RoW}  treatment of waste reinforcement steel, recycling   Cut-off, U</i>
	<i>Steel, low-alloyed {RoW}  steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U</i>	
	<i>Zinc coat, coils {RoW}  zinc coating, coils   Cut-off, U</i>	
Parafusos e pregos em aço	<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW}  production   Cut-off</i>	
	<i>Forging, steel {RoW}  forging, steel, large open die   Cut-off, U</i>	
Chapa de gesso acartonado	<i>Gypsum plasterboard {RoW}  production   Cut-off, U</i>	
Lã de vidro	<i>Glass wool mat {RoW}  production   Cut-off, U</i>	
Massa para <i>Drywall</i>	<i>Acrylic filler {RoW}  production   Cut-off, U</i>	
<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura em LWF</b>		
Estrutura de madeira autoclavada de pinus maciço	<i>Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {RoW}  production   Cut-off, U</i>	<i>Biowaste {RoW}  treatment of biowaste, industrial composting   Cut-off, U</i>
	<i>Wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact {RoW}  wood preservation, vacuum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   Cut-off, U</i>	
Parafusos e pregos em aço	<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW}  production   Cut-off</i>	<i>Waste reinforcement steel {RoW}  treatment of waste reinforcement steel, recycling   Cut-off, U</i>
	<i>Forging, steel {RoW}  forging, steel, large open die   Cut-off, U</i>	
Cantoneiras em aço zincado	<i>Sheet rolling, steel {RoW}  processing   Cut-off, U</i>	
	<i>Steel, low-alloyed {RoW}  steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U</i>	
	<i>Zinc coat, coils {RoW}  zinc coating, coils   Cut-off, U</i>	
Chapa de gesso acartonado	<i>Gypsum plasterboard {RoW}  production   Cut-off, U</i>	<i>Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U</i>
Lã de vidro	<i>Glass wool mat {RoW}  production   Cut-off, U</i>	
Massa para <i>Drywall</i>	<i>Acrylic filler {RoW}  production   Cut-off, U</i>	

FONTE: A autora (2020).

Além disso, salienta-se que o tratamento superficial do aço e o tratamento químico da madeira foram adicionados aos processos de produção do aço e da madeira adquiridos para utilização nos sistemas (considerando os desperdícios). Assim, as perdas provenientes do corte do aço e da madeira incluem, também, perdas associadas ao tratamento químico e superficial desses materiais, uma vez que eles chegam tratados ao canteiro de obras.

Em seguida, foi feita a busca por processos que representassem a disposição final adequada para os resíduos gerados na construção e montagem dos sistemas de vedação em AC, DEA e DEM.

Relativo aos desperdícios acarretados pelos processos de construção e montagem dos sistemas, para que essa perda fosse inserida na avaliação das estruturas, foram criados processos para cada tipo de material, cadastrando-se, assim, a quantidade de materiais com perdas e sem perdas. A massa de materiais desperdiçados, também foi adicionada na análise, com o destino apropriado para cada material.

Dessa forma, materiais com baixo potencial de reutilização e reciclagem, como o caso do bloco cerâmico, cimento, cal, areia, restos de chapa de gesso, lã de vidro e massa para *drywall*, foram destinados aos aterros de inertes, em consequência da contaminação e mistura durante a construção. Por fim, os restos de materiais com potencial de reuso e reciclagem, como o aço e a madeira, foram destinados à reciclagem e compostagem, respectivamente.

#### 5.1.4 Qualidade dos dados

Conforme a norma ISO 14040 (ABNT, 2009a), os requisitos de qualidade dos dados devem ser especificados para que o objetivo e escopo da ACV possam ser alcançados. Devido à dificuldade e complexidade de levantar os fluxos elementares e intermediários, a consulta dos processos de produção mapeados em bases de dados se apresentou como uma alternativa para a redução do tempo de elaboração da ACV. Sem o uso de dados secundários, a coleta integral de dados em campo poderia se tornar um obstáculo, visto que para cada insumo há o envolvimento de uma vasta cadeia de fornecedores com inúmeros processos.

Em virtude disso, uma solução cientificamente aceita e praticável é a adaptação dos bancos de dados existentes (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Por

consequente, os principais processos foram consultados na base de dados *Ecoinvent* 3.5, por ser uma das mais usadas para a realização de estudos de ACV em construções (SOUST-VERDAGUER; LLATAS; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2016) e uma das mais completas em termos de atualização de inventário do ciclo de vida. Além disso, o banco de dados *ecoinvent* compreende uma estrutura de dados internacionais, que cobrem a produção global média, possuindo uma cobertura internacional confiável para o uso em estudos fora da Europa, devido ao rigoroso sistema de validação e revisão (WEIDEMA *et al.*, 2013).

Por outro lado, a qualidade dos dados garantidas pela base *ecoinvent* não indica que os dados originalmente coletados são representativos para países em desenvolvimento, como o Brasil. Além disso, as extrapolações realizadas para quantificar os dados fornecidos em escala global apresentam incertezas, que devem ser consideradas nos estudos de ACV (WEIDEMA *et al.*, 2013).

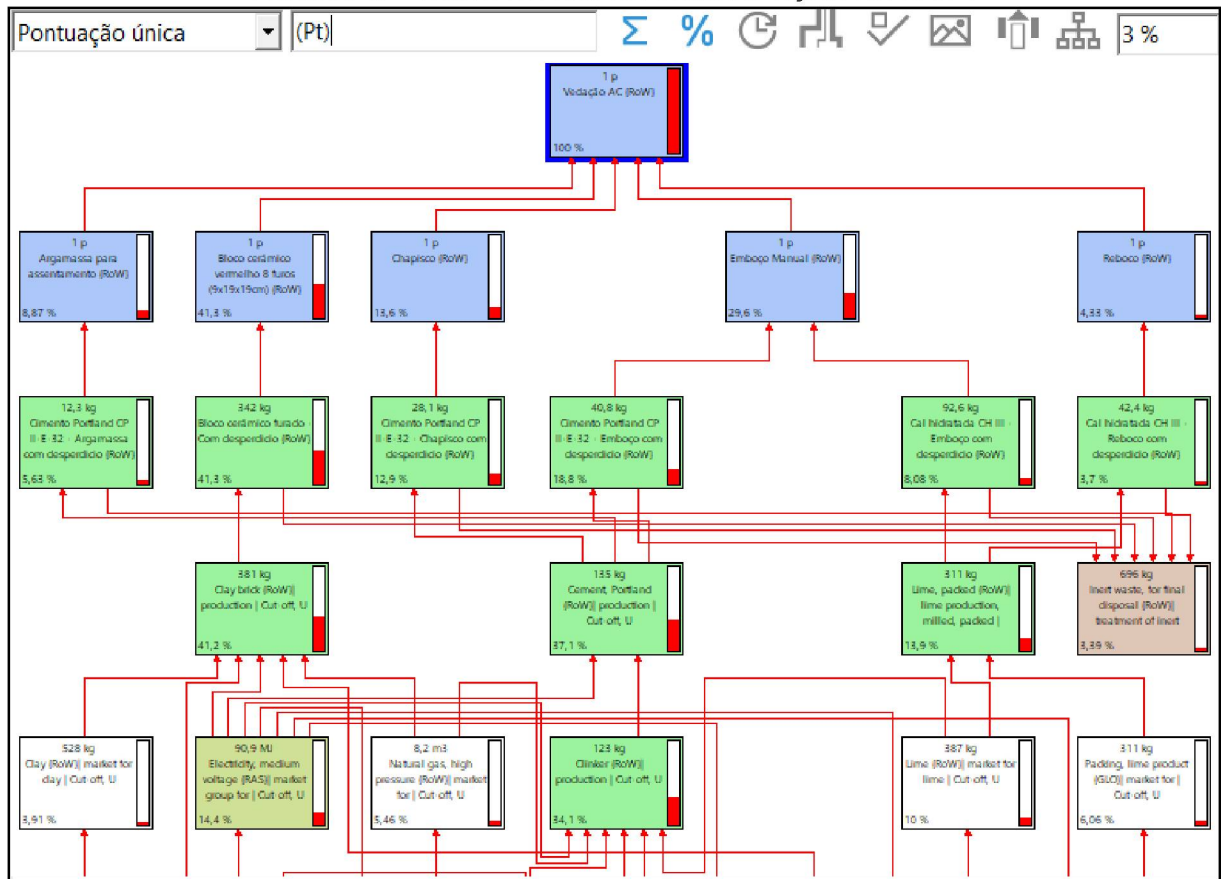
Nesse sentido, foi necessário revisar os critérios de qualidade com relação à completeza, cobertura temporal, geográfica, tecnológica e de fonte dos dados. Com base nesses critérios, como todos os dados utilizados no estudo foram provenientes de fontes secundárias, a pontuação equivalente à cobertura geográfica na matriz *pedigree* foi baixa (5), necessitando de ajustes para que a incerteza fosse minimizada (APÊNDICE 5).

Dessa forma, para a regionalização dos processos da base de dados, utilizou-se como referência os critérios de corte indicados na ISO 14044. Esses critérios de corte servem para especificar os fluxos de materiais (< 5% de entrada de massa acumulada), energia (< 5% de energia acumulada) ou significância ambiental (< 5% dos resultados das categorias de impacto selecionadas) que influenciam pouco nos resultados de impacto para os sistemas de produtos (ABNT, 2009b; ZAMPORI, 2016).

Portanto, com base na rede gerada no *software* SimaPro, com o uso do método IMPACT 2002+, considerou-se a adaptação de todos os processos ambientalmente significativos, a partir de um corte de 3% na visualização da rede dos três sistemas de vedação (FIGURA 26).



FIGURA 26 – CORTE DE 3% NA VISUALIZAÇÃO DA REDE



FONTE: A autora (2020).

Para que os resultados refletissem a realidade brasileira, a água e a energia dos processos extraídos da base foram alteradas para a água nacional e para a matriz energética brasileira, a qual é predominantemente formada por usinas hidrelétricas.

As adaptações foram feitas de acordo com os fluxos de produção de materiais apresentados na rede. Assim, os principais processos de produção destacados na cor verde, conforme a FIGURA 26, foram adaptados enquanto os produtos gerados fossem ambientalmente significativos para o corte determinado e conhecidamente de produção nacional, como cimentos, agregados, cal, bloco cerâmico, madeira, embalagens e derivados do petróleo.

Com a regionalização dos principais processos, houve mudança na pontuação da matriz *pedigree*, indicando que os resultados apresentados com as adaptações foram consistentes para a região do estudo, tecnologias adotadas, fonte de dados, completude e idade dos dados. Os processos considerados nesse estudo

de ACV, que foram adaptados para corresponder ao cenário de produção brasileiro, podem ser vistos no APÊNDICE 6.

## 5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Nessa fase, para a elaboração do ICV, foi conduzida a consulta às bibliografias técnicas para estimar as faixas de consumo dos principais insumos.

Com relação ao levantamento quantitativo dos materiais dos sistemas de vedação, a contabilização foi efetuada com base no Caderno Técnico de Composições Representativas do SINAPI, no banco de dados *online* de Insumos e Composições do SINAPI (CEF, 2017; CEF, 2019), nas Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (PINI, 2008), na Diretriz SINAT N° 003-Revisão 2 e nos DATecs N° 014b e N° 020-C (BRASIL, 2016; BRASIL, 2018a; BRASIL, 2018b), conforme já descritos na subseção 3.2.2.

Ainda, é importante destacar que os relatórios técnicos utilizados para a coleta de dados estão dentro do prazo de vigência e os sistemas de vedações internas atendem às normas brasileiras regulamentadoras. Além disso, para garantir a assertividade das quantidades de materiais utilizados, os cálculos efetuados foram revisados por profissionais da engenharia civil e a conversão da quantidade de alguns materiais para quilograma (kg) foi efetuada conforme as especificações técnicas dos fabricantes.

Para os materiais com processos equivalentes, foi adotada a estratégia de agrupamento destes, ou seja, as massas foram somadas para a inserção da quantidade de materiais com perdas e sem perdas no SimaPro. Os materiais agrupados foram: pregos e parafusos (em aço inoxidável) e perfis e cantoneiras (em aço conformados a frio, com tratamento superficial por meio do processo de zincagem).

A quantidade de materiais cadastrados no SimaPro, incluindo a quantidade com perdas, quantidade sem perdas e os desperdícios gerados na obra, conforme os processos padronizados dos sistemas de vedação em AC, vedação em *drywall* com estrutura de aço e vedação em *drywall* com estrutura de madeira, é apresentada na TABELA 3.

TABELA 3 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM

Material/Processo	Quantidade com perdas	Quantidade sem perdas	Desperdício	Un.
<b>Vedação em AC</b>				
Bloco cerâmico	342,14	307,93	34,21	kg
<i>Argamassa para assentamento</i>				
Cimento Portland	12,25	7,35	4,90	kg
Cal hidratada	27,77	15,00	12,78	kg
Areia média	76,16	38,08	38,08	kg
Água	3,13	3,13	-	kg
<i>Chapisco</i>				
Cimento Portland	28,08	16,85	11,23	kg
Areia média	65,45	32,72	32,72	kg
Água	7,18	7,18	-	kg
<i>Emboço Manual</i>				
Cimento Portland	40,84	24,51	16,34	kg
Cal hidratada	92,58	49,99	42,59	kg
Areia média	253,86	126,93	126,93	kg
Água	10,44	10,44	-	kg
<i>Reboco</i>				
Cal hidratada	42,43	22,91	19,52	kg
Areia média	58,18	29,09	29,09	kg
Água	9,57	9,57	-	kg
<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura de aço</b>				
Chapa de gesso acartonado	147,69	96,00	51,69	kg
Estrutura de aço	34,31	27,45	6,86	kg
Tratamento superficial do aço por zincagem	2,20	1,76	0,44	m <sup>2</sup>
Parafusos e pregos em aço	0,54	0,54	-	kg
Lã de vidro	3,00	2,88	0,12	kg
Massa para <i>Drywall</i>	5,95	5,18	0,77	kg
<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura de madeira</b>				
Chapa de gesso acartonado	147,69	96,00	51,69	kg
Estrutura de madeira de <i>pinus</i> maciço	103,50	88,17	15,33	kg
Tratamento químico da madeira	1,04	0,89	0,15	kg
Parafusos e pregos em aço	0,90	0,90	-	kg
Lã de vidro	3,00	2,88	0,12	kg
Cantoneiras em aço	2,04	1,63	0,41	kg
Tratamento superficial do aço por zincagem	0,13	0,10	0,03	m <sup>2</sup>
Massa para <i>Drywall</i>	5,95	5,18	0,77	kg

FONTE: A autora (2020).

Para o sistema em AC de blocos cerâmicos, os cálculos da quantidade de argamassa de assentamento, chapisco, emboço e reboco foram efetuados com base nos traços (em volume) recomendados nas tabelas e relatórios técnicos. Dessa forma, o volume de cada insumo foi calculado e transformado para medidas em massa (kg), de acordo com as respectivas massas específicas. Os processos de produção de argamassa para assentamento, chapisco, emboço e reboco foram

feitos manualmente, não sendo utilizada a energia de betoneiras para a mistura nesse sistema.

Com relação ao sistema em *drywall* com estrutura de aço, a Diretriz SINAT Nº 003-Revisão 2 foi consultada, majoritariamente, para o levantamento quantitativo de materiais. Em paredes internas sem função estrutural, as faces das paredes foram compostas por chapas de gesso *drywall* tipo *Standard*, que são fixadas nos quadros estruturais em aço. A estrutura da parede foi constituída por perfis leves em aço zincado, espaçados de acordo com as tolerâncias dimensionais estabelecidas na ABNT NBR 15253 (BRASIL, 2016). A conformação a frio foi considerada, nesse caso, como uma recomendação da diretriz SINAT Nº 003 – Revisão 2 – “Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Steel Framing*”)” (BRASIL, 2016), por aumentar a resistência mecânica do material. Os vãos internos das paredes foram totalmente preenchidos com lã de vidro (rolo de 1,20 m x 12,5 m), para que os requisitos de conforto térmico e acústico fossem atendidos, e as juntas foram tratadas com a aplicação de massa para *drywall*, conforme as composições SINAPI.

No sistema em *drywall* com estrutura de madeira, considerou-se as especificações dos materiais destinados às paredes internas para áreas secas contidas no DATec Nº 020-C. Para a estrutura, a madeira *pinus* foi escolhida por ser facilmente encontrada e muito utilizada para esse fim na região Sul do Brasil (RAMOS, 2019), local previamente determinado para a realização do estudo de caso. Ainda, a madeira foi submetida a um tratamento químico com arseniato de cobre cromatado do tipo C (CCA-C), apresentando retenção de 7,0 kg de i.a/m<sup>3</sup> (BRASIL, 2018b). Assim, adicionou-se para cada m<sup>3</sup> de madeira, 7 kg de CCA. O DATec ainda indica que cada face da parede interna pode ser constituída por uma camada de chapa OSB (9,5 mm de espessura e tratadas contra cupins, de acordo com a ABNT NBR 16143) e duas camadas de chapas de gesso para *drywall* tipo *Standard* (12,5 mm de espessura). No entanto, como o sistema indicado no DATec é destinado para paredes com função estrutural para *Light Wood Framing*, para que a ACV fosse coerente com a função determinada no escopo, foi adicionada somente uma camada de chapa de gesso para *drywall*. Deste modo, assim como foi determinado para o sistema em DEA, os vãos internos do sistema em DEM foram

totalmente preenchidos com lã de vidro (rolo de 1,20 m x 12,5 m) e as juntas foram tratadas com a aplicação de massa para *drywall*, conforme as composições SINAPI.

Além disso, o desperdício de materiais durante a construção/montagem dos três sistemas de vedações foi calculado com base nos índices de perdas para a construção civil, disponíveis na literatura, e de acordo com os cálculos efetuados em projeto (APÊNDICES 1, 2 e 3).

Para os cálculos de desperdícios efetuados em projeto, a quantidade de perdas foi calculada a partir da diferença entre a quantidade de cada material adquirido para o projeto das paredes e a quantidade de material realmente utilizado. Assim, para considerar o desperdício da chapa de gesso, foi utilizado um índice de desperdício recomendado na literatura e realizado o cálculo de perdas com base na massa específica da chapa de gesso acartonado, calculada em projeto a partir das especificações técnicas do fabricante, para a soma na quantidade utilizada. Ainda que não tenha sido necessário o corte das chapas para a área de 5,76 m<sup>2</sup>, os desperdícios equivalentes das chapas de gesso acartonados foram considerados na análise, devido à significância ambiental desse material. Além disso, para projetos com áreas maiores, não são todos os retalhos que podem ser reaproveitados, gerando, como consequência, um índice de perda desse material durante a montagem das paredes.

Já a quantidade adquirida e utilizada de aço e madeira foi calculada conforme as especificações técnicas dos fabricantes. Assim, para o aço conformado a frio e para a madeira maciça em *pinus*, considerou-se a massa e as dimensões de cada elemento construtivo (perfis, montantes, soleiras, etc.) para o cálculo do volume (adquirido e utilizado) e densidade.

O desperdício de pregos e parafusos não foi considerado nos sistemas, uma vez que o cálculo foi realizado em conformidade com a proporção exata para a construção das paredes com a área delimitada.

Outra consideração realizada nesse estudo foi relativa ao transporte dos materiais entre os fabricantes e o canteiro de obras. Materiais com maior massa específica influenciam na carga transportada e no consumo de combustível, podendo acarretar maiores níveis de emissões de gases do efeito estufa. Esse fator pode influenciar diretamente nos impactos ambientais potenciais dos sistemas de vedação, uma vez que o peso transportado e o modal de transporte adotado são triviais nos resultados da avaliação.

Ainda, diferente de outros autores que desconsideraram a etapa de transporte em suas ACVs, Sposto, Caldas e Nabut Neto (2016) destacam a importância dessa etapa nos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> e de consumo de energia, e reforçam a necessidade de considerar o transporte em estudos brasileiros, devido às extensas faixas territoriais, regiões muito distintas e características da cadeia de suprimentos.

Nesse sentido, as distâncias entre os fabricantes e o canteiro de obras foram levantadas com base na localização de diferentes fornecedores da região sul e sudeste do Brasil, sendo a consulta efetuada no *Google Maps*. Assumiu-se, assim, três cenários de análise com três variações de distâncias para cada insumo, optando-se pela seleção de fabricantes que realizam a distribuição dos materiais de construção para a região metropolitana de Curitiba.

Para os três cenários, foram consideradas distâncias mais próximas (Cenário 1), distâncias um pouco afastadas (Cenário 2) e distâncias muito afastadas do canteiro de obras (Cenário 3). Essa análise, com variação de cenários, foi delimitada para a verificação da influência dos impactos ocasionados pelo transporte nos resultados da avaliação de impacto para cada sistema de vedação, entre as metodologias de AICV.

O total de carga transportada em toneladas-quilômetros (t.km), por sistema de vedação e por cenário, é apresentado na TABELA 4.

TABELA 4 – CENÁRIOS DE TRANSPORTE PARA OS SISTEMAS EM AC, DEA E DEM

<b>Sistema de Vedação</b>	<b>Cenários</b>	<b>Total (t.km)</b>
Alvenaria Convencional de Blocos Cerâmicos	Cenário 1	40,51
	Cenário 2	188,02
	Cenário 3	320,62
<i>Drywall</i> com estrutura de aço	Cenário 1	86,83
	Cenário 2	140,68
	Cenário 3	161,71
<i>Drywall</i> com estrutura de madeira	Cenário 1	89,14
	Cenário 2	143,98
	Cenário 3	152,61

FONTE: A autora (2020).

O veículo usado para o transporte dos materiais de construção foi modelado como um caminhão de porte variado, que atende às regulamentações da norma EURO 5. A norma EURO 6 está em vigência na Europa e ainda não é obrigatória no

Brasil, devido às limitações tecnológicas e diferenças do diesel consumido. Atualmente, o diesel de referência é o padrão produzido na Europa, o que dificulta a sua disponibilização no Brasil, devido à necessidade de importação e ao elevado preço de comercialização (AEA, 2015). Além disso, essa escolha foi feita com base na instrução normativa IBAMA nº 127/2006 e Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018, que estabelecem os limites mínimos de emissões de fumaça e ruídos para veículos automotores (IBAMA, 2006; CONAMA, 2018).

Além da quantidade transportada, a análise também considerou a manutenção do caminhão e o consumo de combustível. Para os três tipos de vedações, os materiais foram transportados da fábrica até o local fictício determinado para a construção e montagem das paredes, o qual foi o Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). As informações detalhadas sobre o transporte dos materiais de construção são apresentadas no APÊNDICE 4.

#### 5.2.1 Cadastro no *software* SimaPro

O cadastramento dos dados no SimaPro levou em consideração todos os processos envolvendo a fabricação das matérias-primas e construção/montagem das vedações em AC, DEA e DEM.

A única diferenciação realizada no cadastro no *software* foi relativa aos cenários de transporte delimitados. Assim, as mesmas quantidades de materiais cadastrados foram mantidas e somente a carga transportada foi alterada para a etapa de transporte de matéria-prima das vedações.

Sobre as unidades e processos da base de dados *Ecoinvent* 3.5, considerou-se a biblioteca “*Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification - unit*”. Essa biblioteca indica que o sistema de alocação (*allocation*) ou corte (*cut-off*) é baseado na abordagem de que a produção primária é sempre alocada ao usuário principal de uma matéria-prima (MORENO *et al.*, 2013). Assim, a reciclagem de materiais não é contabilizada como alternativa para a redução dos impactos do produtor primário, não sendo considerados, também, os impactos positivos resultantes da reutilização dos resíduos após o tratamento.

Relativo aos dados selecionados na base de dados, foram considerados os processos com a designação “Resto do Mundo” (RoW – *Rest of World*), definido

como a diferença entre o conjunto de dados de referência global e os conjuntos de dados com geografias definidas (WEIDEMA *et al.*, 2013).

### 5.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Para a avaliação da significância ambiental dos resultados do ICV e análise comparativa da normalização entre várias metodologias de AICV, delimitou-se para esse estudo a utilização dos métodos BEES+, CML-IA *baseline*, ILCD 2011 *Midpoint+*, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 *Midpoint* (E) e TRACI 2.1.

Os métodos de AICV foram selecionados com base nos resultados da análise de conteúdo da RSL. Todos os métodos apresentam a etapa de normalização e os resultados dos impactos são modelados no ponto médio do mecanismo ambiental (*midpoint*). Além disso, apesar do método IMPACT 2002+ ter a possibilidade de modelar os resultados dos impactos potenciais voltados aos danos, ou seja, no ponto final do mecanismo ambiental (*endpoint*), as categorias de danos não foram analisadas. Sobre o *Eco-indicator* 99, ainda que tenha sido um método muito utilizado nos estudos da RSL, de acordo com o SimaPro, o método não possui mais suporte com atualizações, não sendo, portanto, considerado para a análise.

Os resultados da caracterização foram apresentados e discutidos para todas as categorias de impacto dos métodos de AICV selecionados e, a partir dos resultados da normalização, as categorias de impacto de maior significância ambiental foram escolhidas para a realização da análise comparativa com os fatores de normalização globais, para a geração de discussões sobre os impactos potenciais fornecidos pelas metodologias de AICV e em escala global.



## 6 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo são apresentados os resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida dos sistemas de vedação, de acordo com os cenários delimitados para o transporte. Nesse sentido, o capítulo foi subdividido em análise dos resultados da caracterização pelas metodologias de AICV (6.1), análise dos resultados normalizados com as metodologias de AICV e seleção das categorias de impacto de maior significância para o estudo de caso (6.2), harmonização dos indicadores das categorias de impacto (6.3) e análise comparativa dos resultados normalizados com os fatores de normalização dos métodos de AICV e globais (6.4).

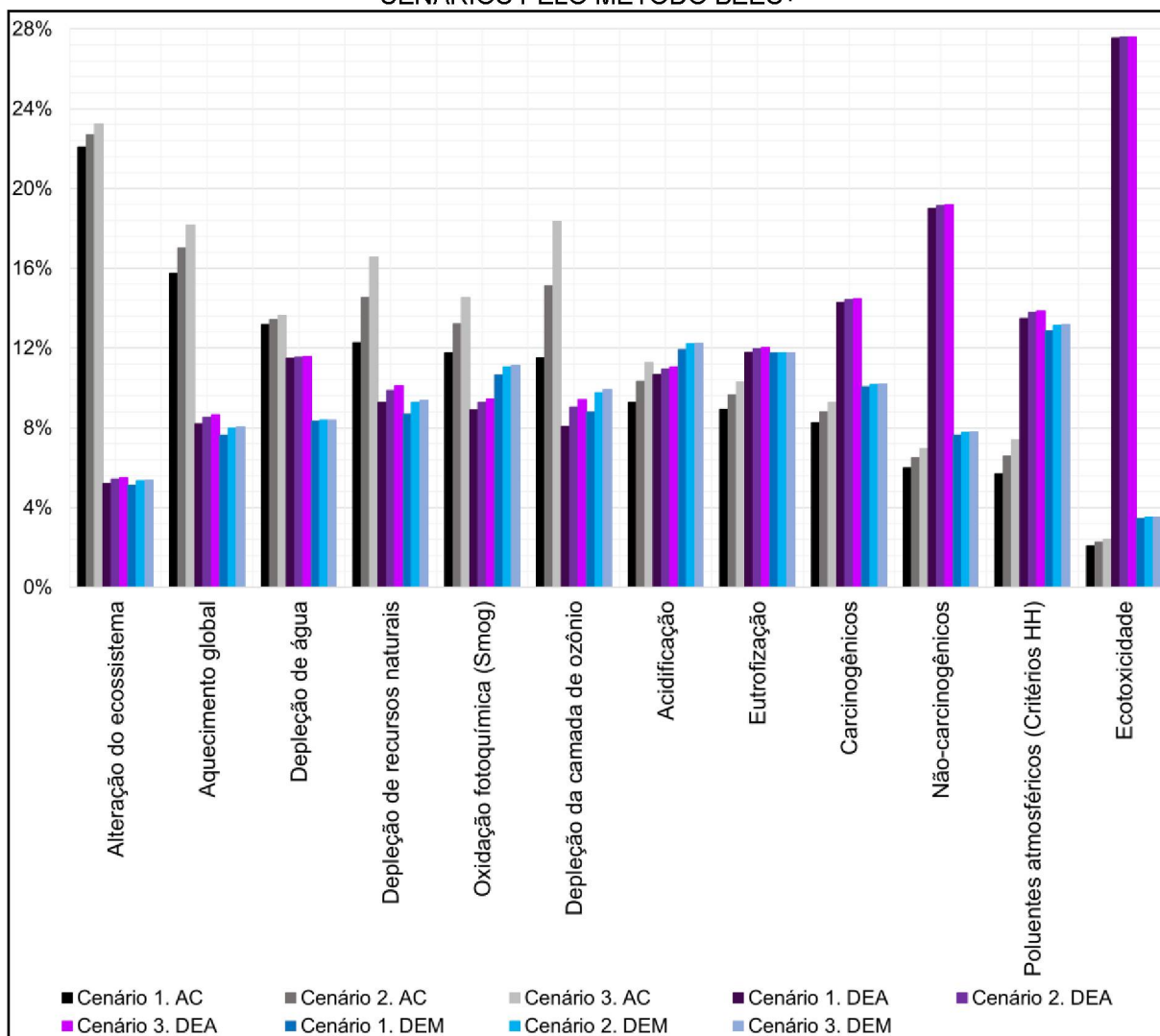
Todos os resultados comparativos da contribuição das categorias de impacto caracterizadas e normalizadas, dos sistemas em alvenaria convencional de blocos cerâmicos, *drywall* com estrutura de aço e *drywall* com estrutura de madeira, para cada método de AICV e cada cenário de transporte, são apresentados no APÊNDICE 7, APÊNDICE 8, APÊNDICE 9, APÊNDICE 10, APÊNDICE 11 e APÊNDICE 12.

O APÊNDICE 13 traz, também, os resultados detalhados da média entre os cenários para cada sistema e categoria de impacto e o desvio padrão com a alteração das cargas transportadas.

### 6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

O GRÁFICO 1 apresenta a contribuição dos sistemas de vedações em alvenaria convencional de blocos cerâmicos, *drywall* com estrutura de aço e *drywall* com estrutura de madeira, por cenário de transporte, em relação às categorias de impacto presentes no método BEES+ versão 4.08 (USA per cap '97-EPA *Weighting*). Além disso, a partir da distribuição percentual acumulada dos impactos ambientais potenciais, o GRÁFICO 2 foi criado como forma de facilitar a visualização da contribuição das categorias de impacto entre os sistemas de vedações e cenários.

GRÁFICO 1 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO BEES+



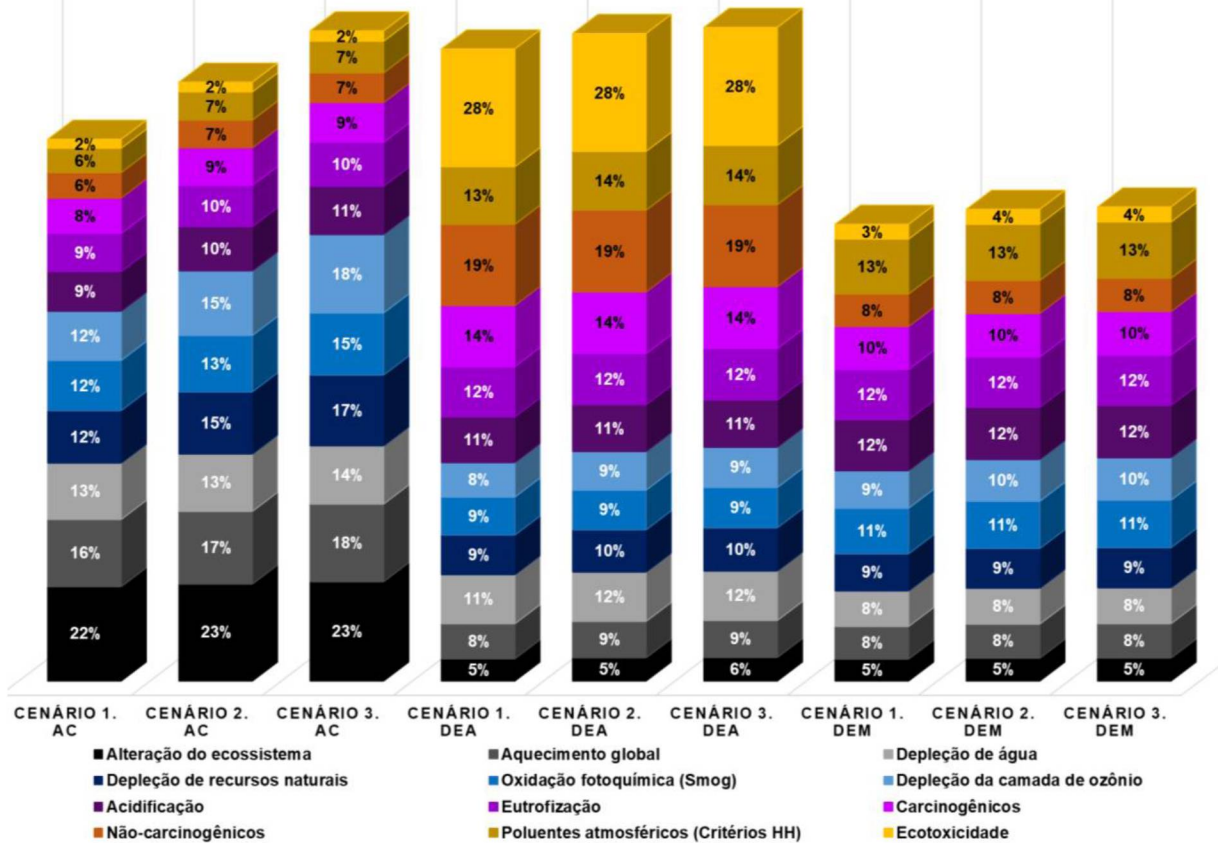
FONTE: A autora (2020).

Sobre a contribuição dos processos de produção na categoria de impacto de aquecimento global, assim como os estudos de Zhang *et al.* (2014) e Pacheco-Torres *et al.* (2014) já apontaram, para o sistema em AC, a produção de clínquer, principal matéria-prima presente na composição do cimento, e a produção de blocos cerâmicos corresponderam a cerca de 42,0% e 28,0% das emissões de grama (g) de CO<sub>2</sub> equivalentes, respectivamente. Os 30,0% restantes para essa categoria foram subdivididos em outros processos, como o uso de máquinas de construção (queima de diesel), transporte e geração de energia elétrica e térmica (por hidrelétricas e gás natural).

Para a categoria de alteração do ecossistema, o impacto potencial visto para o sistema em AC ocorreu devido a grande geração de desperdícios em obra, sendo

os processos relacionados ao aterro de inertes os principais responsáveis pela elevada contribuição nessa categoria (96,0%). Já para os sistemas em DEA e DEM, esse impacto diminuiu significativamente, com uma contribuição média de 59,2% para o DEA e 65,3% para o DEM.

GRÁFICO 2 – PERCENTUAL ACUMULADO DA CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO BEES+



FONTE: A autora (2020).

Para a categoria de depleção de recursos naturais, somente a produção de petróleo e gás natural tiveram participação em cerca de 89,5% para o sistema em AC, 75,9% para o DEA e 76,3% para o DEM. Analisando-se os sistemas comparativamente, a AC demanda de materiais com alta energia incorporada, ou seja, que requerem grandes intensidades energéticas para a extração, transporte e produção, como é o caso do cimento Portland e dos blocos cerâmicos. Dessa forma, os resultados para essas categorias foram coerentes para os sistemas em análise.

Paralelo ao aquecimento global e depleção de recursos naturais, a depleção da camada de ozônio foi, também, uma das categorias mais importantes para o

sistema em AC. Novamente, esse fato é explicado devido aos processos de fabricação de petróleo e gás natural.

Já para o sistema em *drywall* com estrutura de aço, foi notável a alta contribuição nas categorias de carcinogênicos, não-carcinogênicos, poluentes atmosféricos e ecotoxicidade. A grande variação dos impactos entre o sistema em DEA e o sistema em DEM está relacionada com a produção do aço utilizado na estrutura interna da parede. Por essa razão, devido aos componentes necessários para a produção do aço (minério de ferro, carvão e cal) e aos processos que requerem altas demandas de energia e geram resíduos perigosos, há uma tendência no aumento dos impactos para esse sistema, principalmente, pela abordagem dessa ACV não considerar cenários de reciclagem do aço utilizado na estrutura.

Na categoria de carcinogênicos, a produção de aço de baixa liga se destacou, com contribuição de 32,0%, seguido pelo processo de tratamento dos resíduos sólidos gerados durante a fabricação do aço em forno elétrico a arco (12,2%). O resíduo gerado durante a fundição dos metais no forno, chamado de pó de aciaria elétrica (PAE), é classificado como um resíduo classe I – resíduo perigoso (ABNT, 2004; GRILLO; TENÓRIO; DE OLIVEIRA, 2013), representando diversas dificuldades nas usinas siderúrgicas associadas ao seu gerenciamento e tratamento. Para as categorias de impacto de não-carcinogênicos e ecotoxicidade, a produção de aço em forno elétrico também foi o processo mais representativo para o DEA, com um resultado médio de 60,7% e 90,5% em cada categoria.

Já a categoria de poluentes atmosféricos teve elevada contribuição para os sistemas de vedação em DEA e DEM, devido à fabricação das chapas de gesso acartonado, correspondendo a 44,6% e 46,8% de contribuição, respectivamente.

No sistema em DEM, a contribuição entre as categorias de impacto não apresentou picos, com pouca variação em poluentes atmosféricos, eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica. De modo geral, os processos relacionados à produção do aço (das cantoneiras, parafusos e pregos), produção de energia, geração e queima de diesel, transporte e tratamento de resíduos tiveram as maiores participações nos impactos potenciais do DEM.

Relativo aos impactos ocasionados com a variação dos cenários de transporte determinados, devido ao aumento da carga transportada, foi possível notar para a vedação em AC de blocos cerâmicos uma maior participação na

contribuição das categorias de impacto, principalmente, em aquecimento global, depleção de recursos naturais, oxidação fotoquímica (*smog*) e depleção da camada de ozônio.

Esse comportamento ocorre como consequência do elevado peso específico dos materiais de construção utilizados no sistema em AC, quando comparados aos materiais aplicados nos sistemas em DEA e DEM. Além disso, o processo correspondente ao transporte por caminhão dos materiais de construção teve, do Cenário 1 para o Cenário 3, um aumento das emissões de CO<sub>2</sub> (em gramas) em, aproximadamente, 7,9 vezes mais para o sistema em AC, 1,9 vezes mais para o sistema em DEA e 1,7 vezes mais vezes para o sistema em DEM. Esses resultados indicam que, a medida em que se aumenta a carga transportada, o uso do veículo e consumo de combustível sofrem uma taxa de aumento, a qual provoca maior necessidade de manutenção e eleva as emissões de gases do efeito estufa.

Já para os sistemas em DEA e DEM, os impactos potenciais com o aumento da distância transportada foram sutis para os cenários determinados.

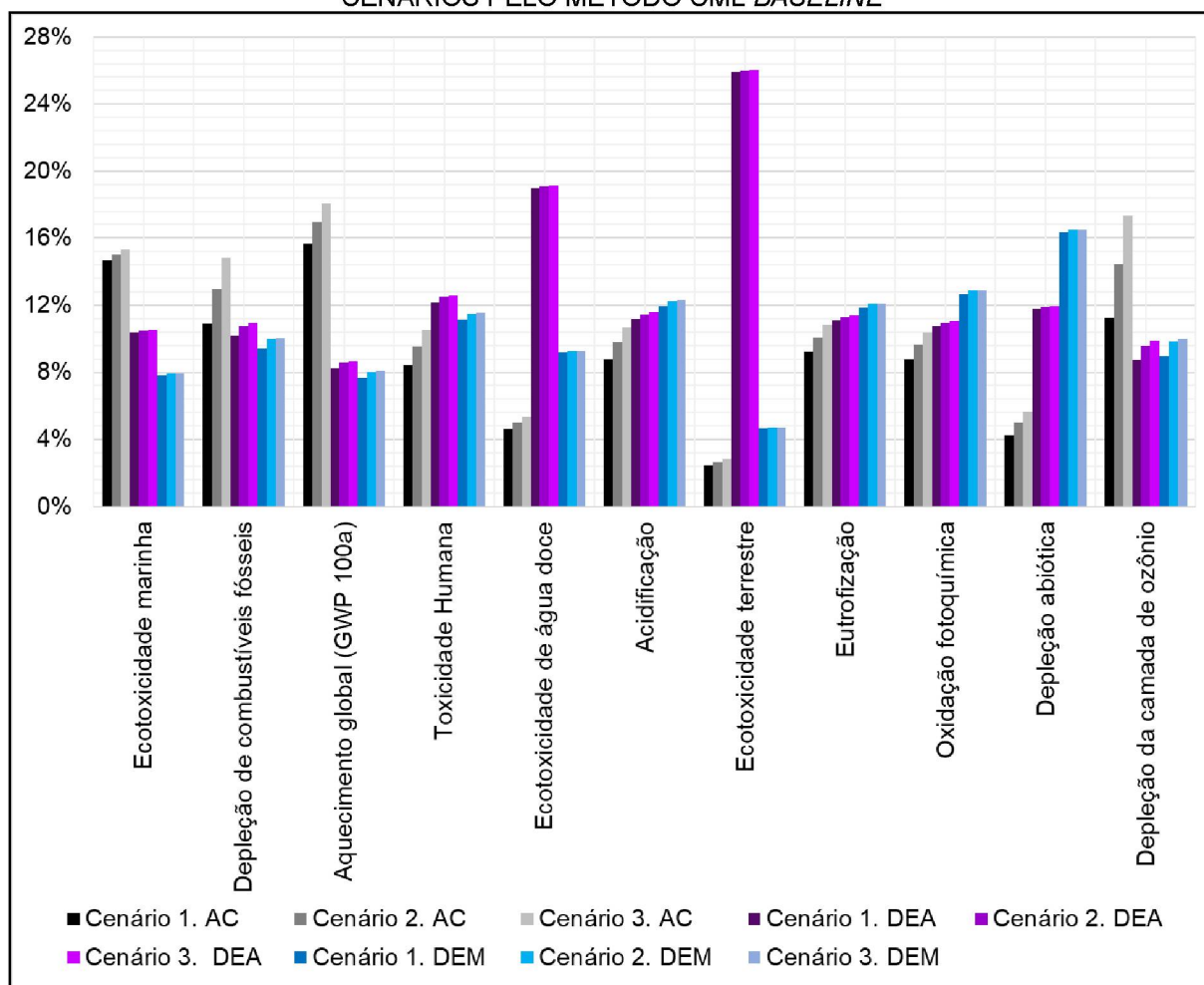
Como conclusão da interpretação dos resultados por meio do método BEES+, foi perceptível a maior contribuição dos sistemas em DEA e AC nos impactos potenciais. Nesse caso, com os resultados da caracterização, o método aponta que o *drywall* com estrutura de aço foi o sistema mais impactante, seguido pela alvenaria convencional de blocos cerâmicos e pelo *drywall* com estrutura de madeira.

Na sequência, o mesmo procedimento de análise foi realizado para a verificação dos impactos potenciais pelo método CML-IA *Baseline*, versão 3.05 (EU25). Dessa forma, gerou-se, também, o GRÁFICO 3 e GRÁFICO 4, que ilustram os impactos potenciais de cada categoria entre os cenários de transporte e o percentual de participação das categorias de impacto nos sistemas de vedação.

Os resultados apresentados pelo CML *baseline* indicam semelhanças aos resultados previamente discutidos pelo método BEES+. As principais diferenças estão na nomenclatura e nas considerações das categorias de impacto avaliadas no método. Notavelmente, a vedação em AC se destacou nas categorias de ecotoxicidade marinha, depleção de combustíveis fósseis, aquecimento global e depleção da camada de ozônio. Assim como no método BEES+, o CML *baseline* apontou que a produção dos blocos cerâmicos teve média de participação de 74,5% para a ecotoxicidade marinha e 27,7% para o aquecimento global e a produção de

clínquer foi a mais relevante para o aquecimento global (41,4%). Além disso, a produção de energia, queima de combustíveis e os processos relacionados aos resíduos de construção, foram os processos mais relevantes para a contribuição nas categorias de impacto dos três sistemas de vedações.

GRÁFICO 3 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO CML *BASELINE*

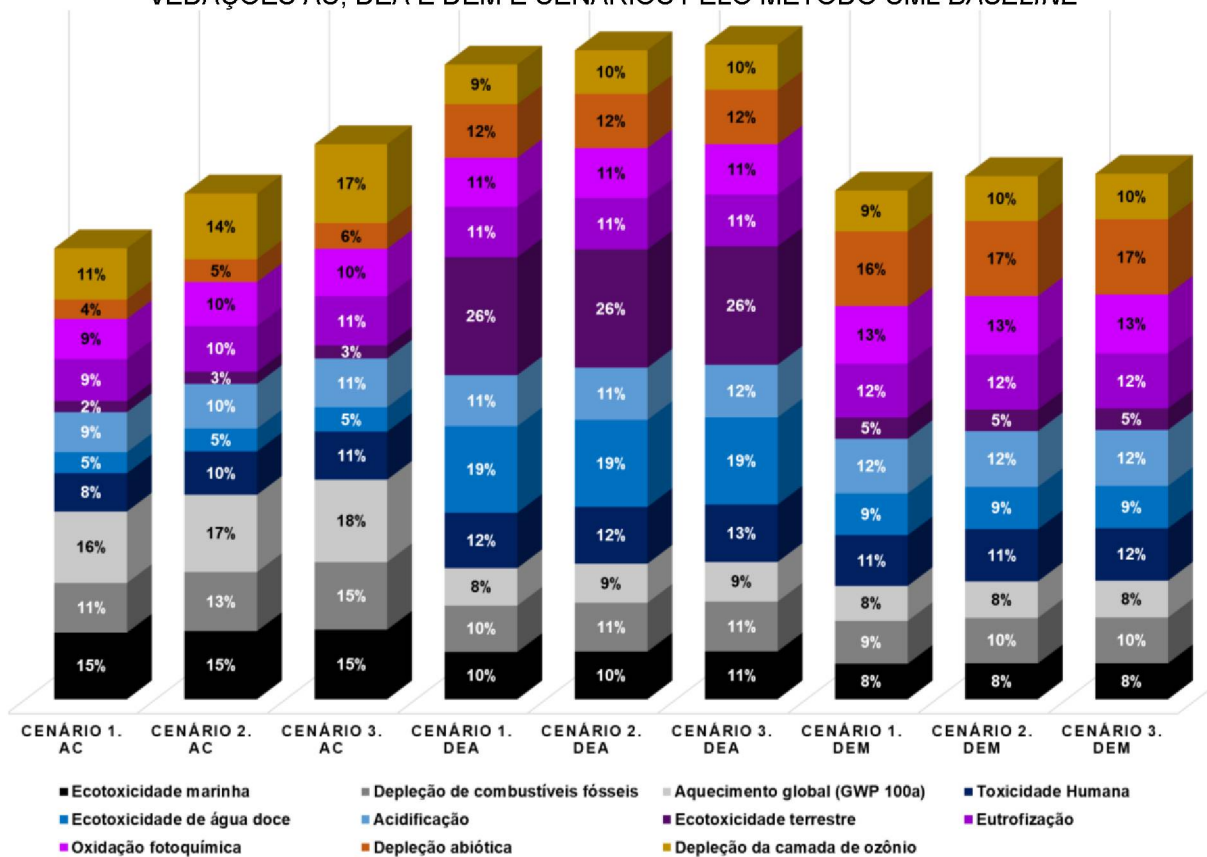


FONTE: A autora (2020).

Por outro lado, diferente do método BEES+, que apresenta a categoria de ecotoxicidade como a união da ecotoxicidade aquática e terrestre, o CML *baseline* aborda essa categoria separadamente, com a divisão em ecotoxicidade de água doce, marinha e terrestre. A partir disso, é possível verificar que a alta contribuição nas categorias de ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade terrestre são resultantes, predominantemente, da produção do aço, extração de carvão mineral, tratamento dos resíduos gerados durante a fabricação de aço-liga (escória e poeiras) e incineração de carvão mineral.



GRÁFICO 4 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO CML *BASELINE*



FONTE: A autora (2020).

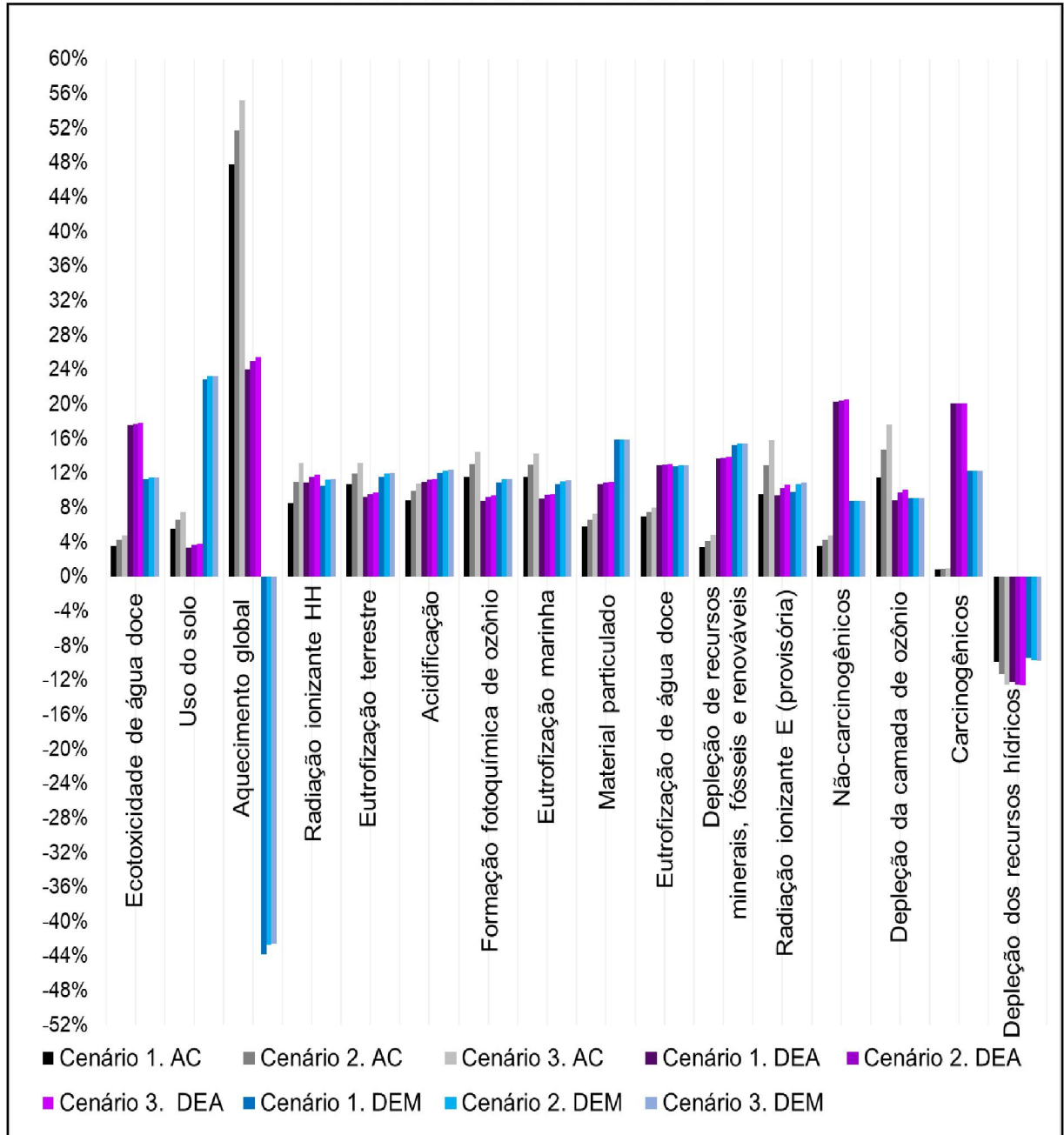
Para o sistema em DEM, foi possível verificar uma maior variação na contribuição da categoria de depleção abiótica, na qual o processo de operação de minas de zinco-chumbo, para a produção de zinco concentrado, e a produção de concentrado de cromita, tiveram média de participação de 61,7% e 12,5% na categoria. Dessa forma, pode-se afirmar que o tratamento do aço e da madeira foram relevantes para os impactos do sistema em DEM. Do mesmo modo, o tratamento superficial do aço utilizado nos perfis metálicos, foram, também, importantes para o sistema em DEA.

Sobre os cenários estabelecidos para as vedações em AC, DEA e DEM, foi possível verificar um comportamento similar relativo ao transporte. Além disso, a contribuição total do sistema em *drywall* com estrutura de madeira apresentou maior magnitude com o uso desse método.

Relativo aos impactos potenciais apresentados pelo método ILCD 2011 *Midpoint+* (EC-JRC Global, *equal weighting*), foi possível constatar variações perceptíveis nos resultados de algumas categorias de impacto (GRÁFICO 5 e

GRÁFICO 6). Entre elas, destacam-se as categorias de ecotoxicidade de água doce, uso do solo, aquecimento global, material particulado, não-carcinogênicos, carcinogênicos e depleção de recursos hídricos.

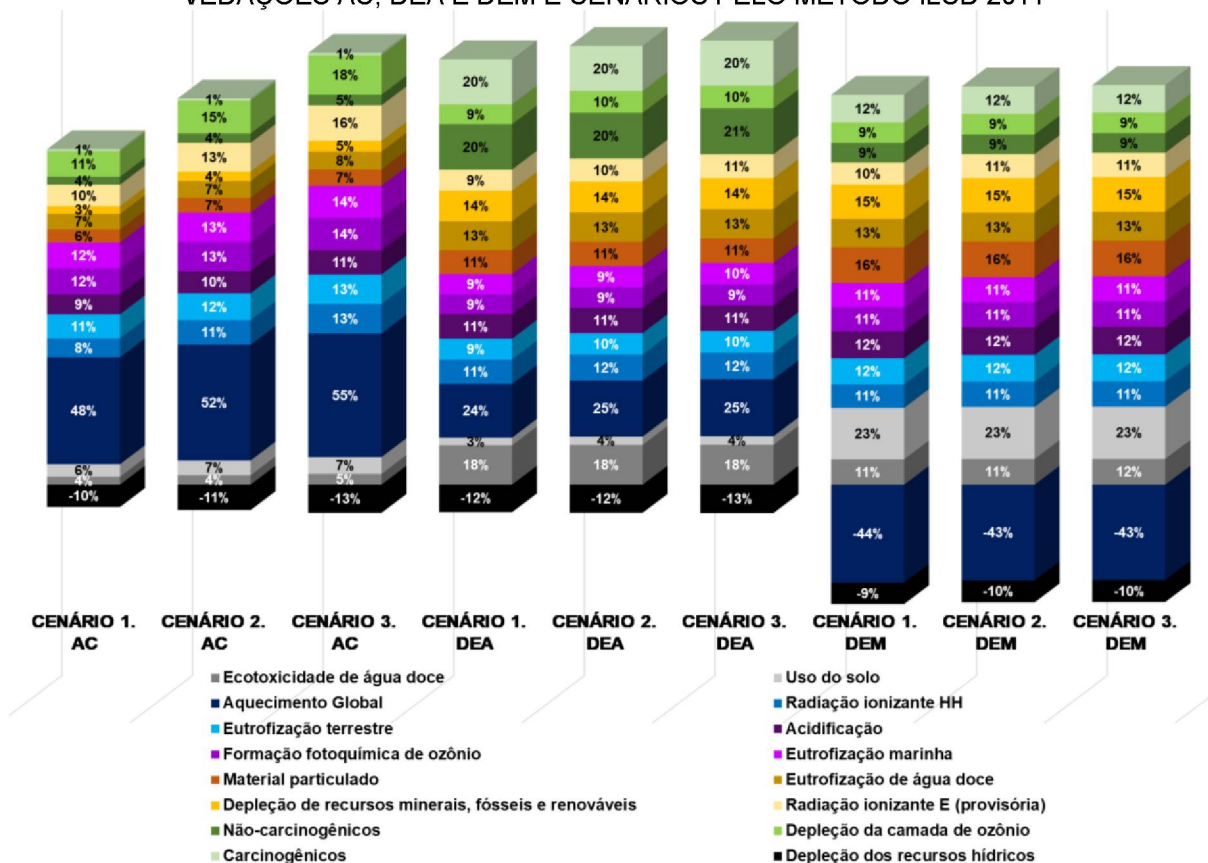
GRÁFICO 5 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO ILCD 2011



FONTE: A autora (2020).



GRÁFICO 6 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO ILCD 2011



FONTE: A autora (2020).

Destas categorias, as que estão incluídas nos métodos BEES+ e CML *baseline*, como o aquecimento global, não-carcinogênicos, carcinogênicos e ecotoxicidade de água doce apontaram que a maior participação dos impactos potenciais foram os mesmos processos dos sistemas em AC e DEA.

Na categoria de aquecimento global, a produção de clínquer (43,1%) e de blocos cerâmicos (28,2%), para o sistema em AC, e a geração de calor – além do gás natural (29,3%), transporte (6,8%) e eletricidade (9,5%), para o sistema em DEA, foram os processos com maior relevância. Ainda, os impactos positivos observados nessa categoria para o AC e DEA, foram rastreados em processos muito distantes da cadeia produtiva dos principais insumos da construção civil, porém que, mesmo em um nível muito baixo, fazem parte do sistema de produto definido no objetivo e escopo.

No entanto, para o sistema em DEM, há uma mudança significativa nos impactos para essa categoria. Nesse caso, os impactos foram negativos, significando que, em termos de magnitude, a silvicultura da madeira para o manejo

florestal sustentável, ou seja, regeneração de espécies florestais após colheita de reflorestamento, absorveu os impactos negativos ocasionados no meio ambiente (absorção de aproximadamente 158,3% dos impactos negativos). Assim, os processos de geração de calor – além do gás natural (15,3%), de serragem, corte e secagem da madeira em estufa (13,6%) e relacionados com o tratamento de resíduos biológicos (compostagem) (2,2%) foram menores do que a silvicultura.

Para as categorias de não-carcinogênicos, carcinogênicos e ecotoxicidade de água doce, os mesmos resultados foram mantidos, apontando como os processos mais impactantes o tratamento dos rejeitos sulfídricos (rejeitos de mineração) (AC), a produção de clínquer (AC) e os processos de tratamento da escória e poeira gerada durante a produção de aço em forno elétrico (AC, DEA e DEM).

Sobre outra perspectiva, a categoria de carcinogênicos e ecotoxicidade de água doce apontaram que o processo mais significativo para o sistema em *drywall* com estrutura de madeira foi o processo associado ao tratamento de resíduos provenientes da produção de dicromato de sódio (Na), composto químico aplicado para conservação da madeira. Somente esse processo teve participação média de 79,6% dos impactos para a toxicidade humana – com efeitos cancerígenos – e 35,5% dos impactos para a ecotoxicidade de água doce. Nessa ACV, a quantidade de produto químico utilizada para o tratamento da madeira foi muito inferior à massa total do sistema de vedação em DEM. Dessa forma, esse resultado apresentado com o uso do método ILCD 2011 indica o elevado grau de significância ambiental desse composto químico para sistemas construtivos com base na aplicação da madeira.

Referente às categorias ainda não apresentadas pelos métodos descritos anteriormente, o uso do solo, material particulado e depleção de recursos hídricos tiveram grande destaque, principalmente, para o sistema em DEM. Para o uso do solo, a silvicultura de madeira e a operação em poço terrestre de petróleo tiveram contribuição média de 77,13% e 5,75%, enquanto outros processos de menor contribuição, como operação de pedreiras de gesso e construção de estradas, participaram com o percentual restante. Ainda nessa categoria, tiveram destaque a produção de areias e pedras, para o sistema em AC, e a operação do poço terrestre de petróleo e produção em pedreira de gesso, para o sistema em DEA.

Na categoria de material particulado, os processos mais significativos para os três sistemas foram a geração de energia elétrica, geração de calor e queima de diesel, com exceção do sistema em DEM que apresentou como processo relevante para a formação de materiais particulados, também, a secagem da madeira em estufa.

Já na depleção de recursos hídricos, os resultados de impacto demonstraram que todos os sistemas apresentaram impactos positivos para essa categoria, ou seja, os impactos positivos foram mais expressivos do que os impactos negativos causados pelos processos produtivos. Nesse caso, o método indica que a produção de alumínio primário líquido absorveu todos os impactos causados por outros processos, como a operação para a produção de areia e cascalho, produção de energia elétrica e tratamento de água.

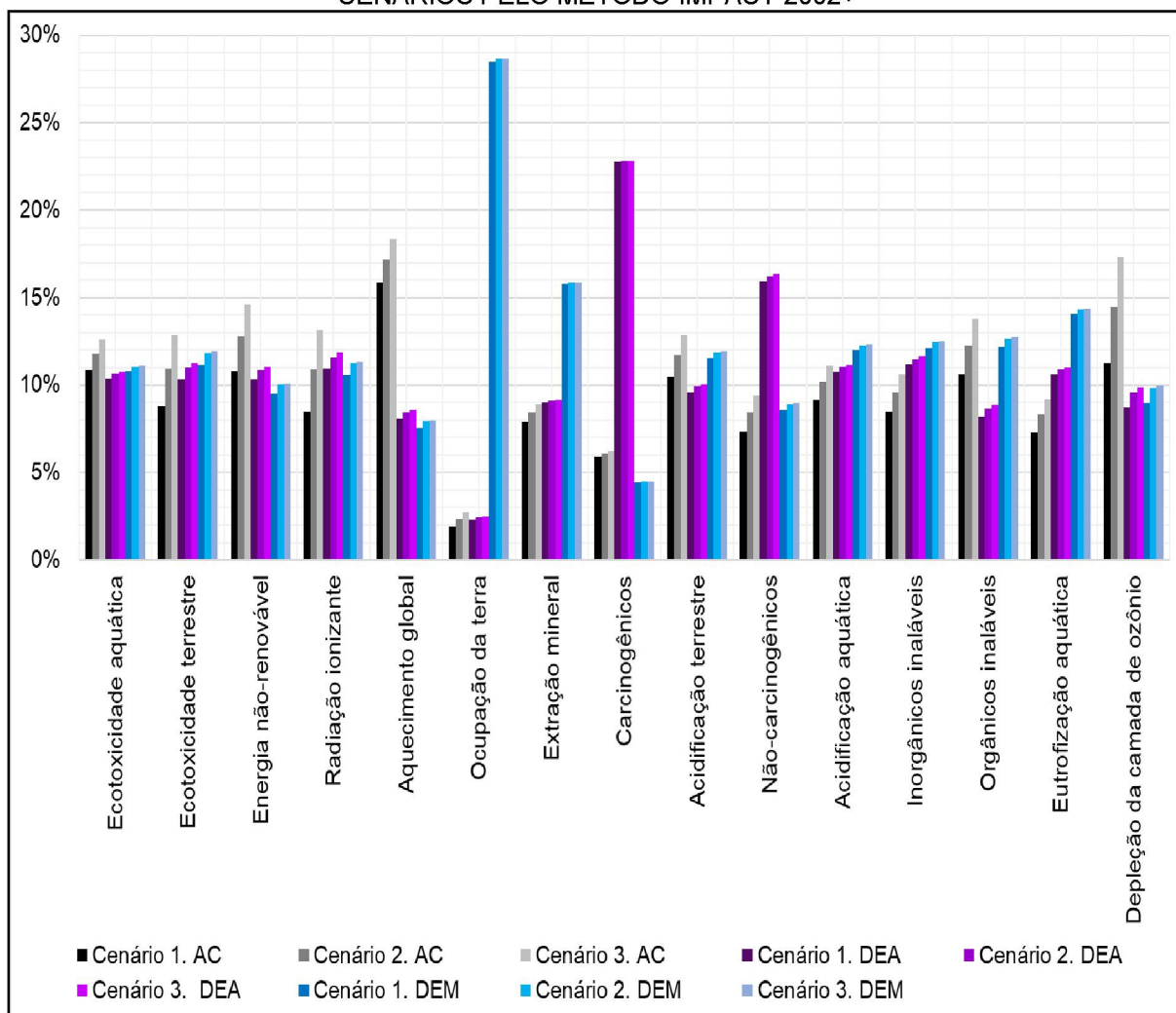
Sobre a alteração de cenários de transporte, o sistema em AC apresentou maior variação, quando comparado aos sistemas em DEA e DEM. Ainda, o método ILCD 2011 indica que o sistema em DEA e AC apresentaram maior magnitude de impactos potenciais, com resultados semelhantes aos resultados dos métodos já descritos.

Com relação ao uso do método IMPACT 2002+ versão 2.15, os impactos potenciais das vedações são apresentados no GRÁFICO 7 e GRÁFICO 8.

Analisando-se as contribuições das categorias de impacto para cada sistema de vedação e cenário, os sistemas em AC, DEA e DEM tiveram impactos próximos. Os processos com maiores contribuições para os sistemas em AC e DEA convergiram para os mesmos resultados apresentados nos métodos BEES+, CML *Baseline* e ILCD 2011, nas categorias de aquecimento global, acidificação aquática, energia não-renovável, não-carcinogênicos, inorgânicos inaláveis (ou material particulado) e depleção da camada de ozônio.

Algumas diferenciações foram observadas nas categorias de ocupação da terra, ecotoxicidade aquática e carcinogênicos. Para a categoria de ocupação da terra, a vedação em DEM teve grande impacto potencial, devido ao processo de silvicultura da madeira, com contribuição média de 88,53% para a categoria. Ainda, nota-se que o resultado desse processo apresentado pelo método IMPACT 2002+ possui maior magnitude do que o resultado já apresentado pelo método ILDC 2011, devido aos aspectos específicos dos modelos de caracterização adotados nos métodos.

GRÁFICO 7 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO IMPACT 2002+

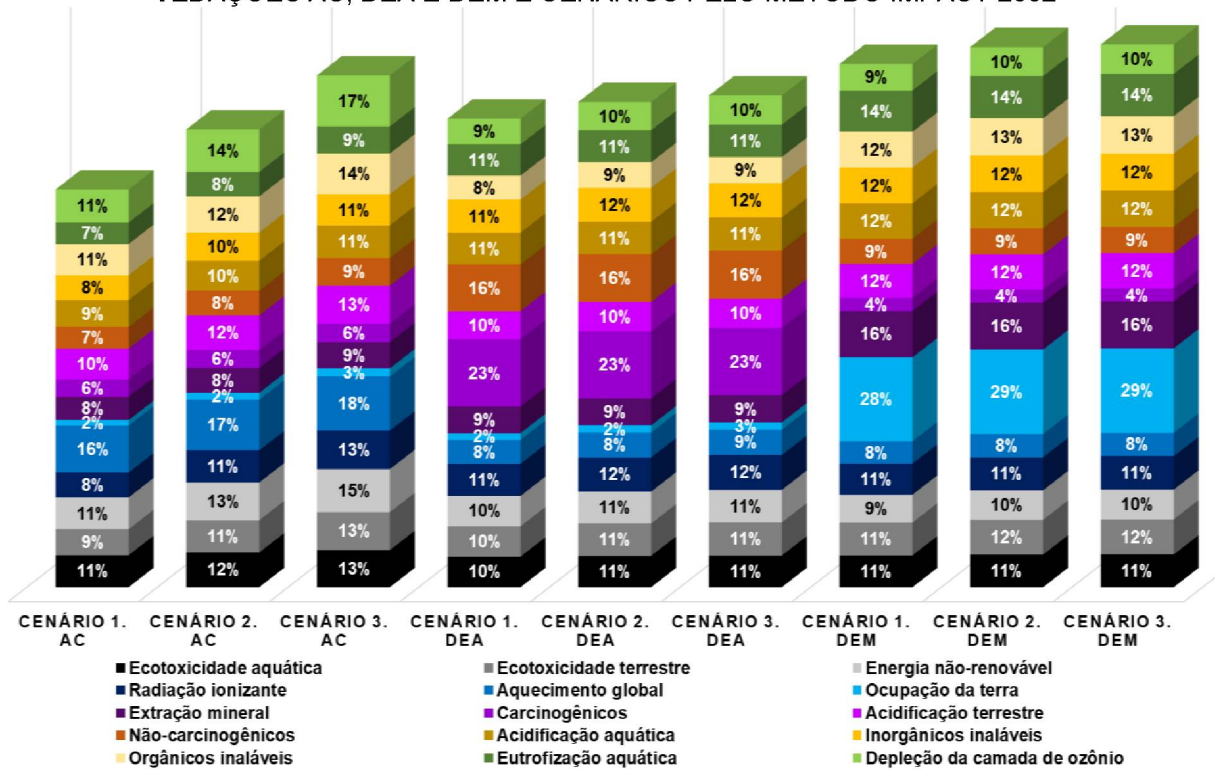


FONTE: A autora (2020).

Na categoria de ecotoxicidade aquática, o processo de tratamento e queima de resíduos de papel gráfico contribuiu com, aproximadamente, 30,5% para a vedação em AC. Esse resultado pode ser justificado pela contaminação das embalagens utilizadas pelos principais insumos, dificultando a possibilidade de reciclagem. Já para a vedação em DEA, as operações de minas de carvão e preparação do carvão tiveram destaque, enquanto que, para a vedação em DEM, o tratamento de mistura de cinzas de madeira foi o processo mais significativo.

Para a categoria de carcinogênicos, o sistema em DEA obteve resultados parecidos aos de outros métodos, com participação média de 80,7% do processo de produção de aço de baixa liga em forno elétrico e 8,40% da produção de gás natural em alta pressão.

GRÁFICO 8 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO IMPACT 2002+



FONTE: A autora (2020).

Além disso, o método IMPACT 2002+ apresenta a categoria de extração mineral com base em fatores de caracterização do método *Eco-indicator 99*, incluindo como resultados as contribuições de diversos processos produtivos de extração e beneficiamento de minérios, como os de operação de minas de ouro, prata, zinco, cobre, chumbo, estanho, entre outros.

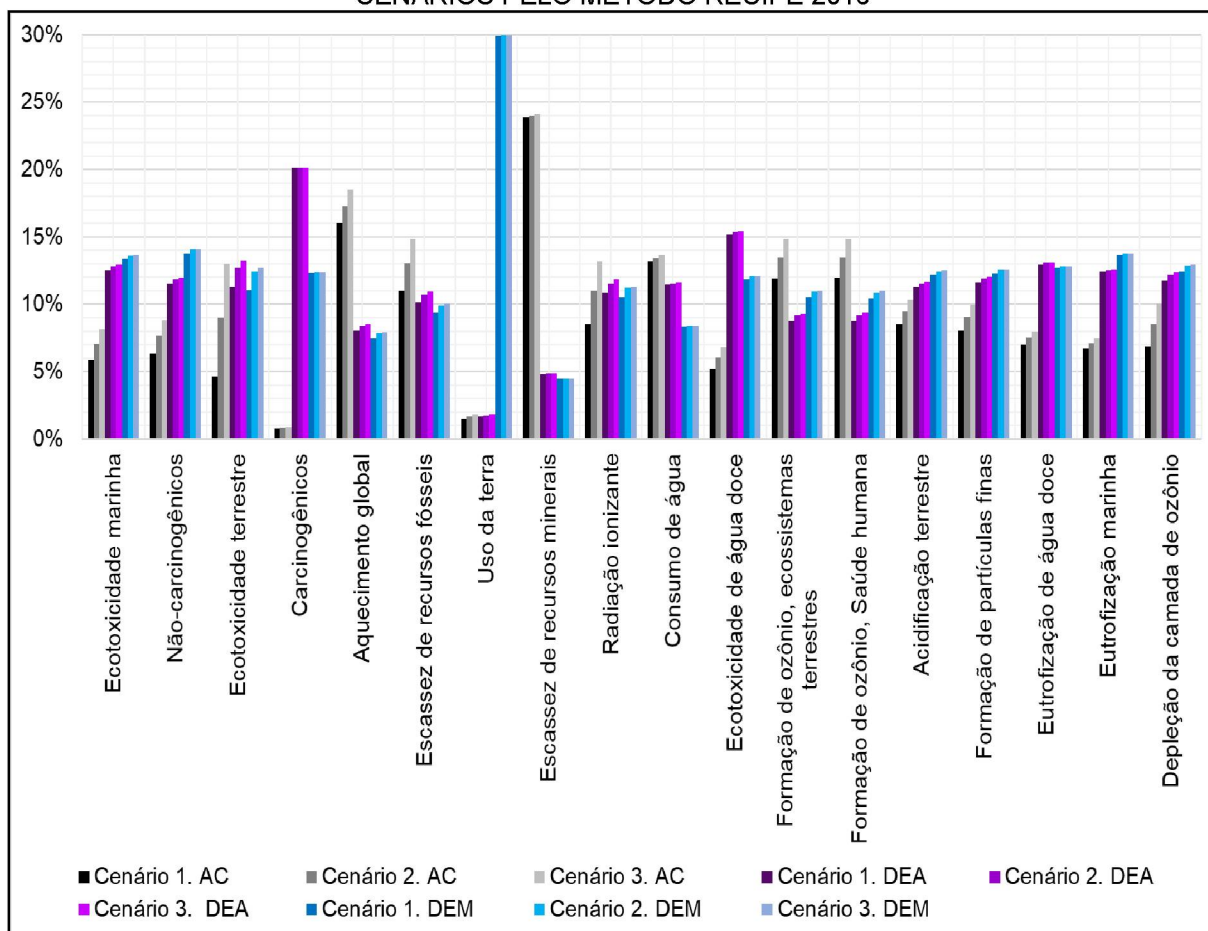
Em relação ao transporte de cada cenário, desvio padrão e sistema de vedação com maior significância ambiental, o método IMPACT 2002+ apresentou resultados da caracterização divergentes das outras metodologias.

No método IMPACT 2002+, a variação dos resultados entre cenários do sistema em AC, DEA e DEM foi semelhante à variação com o uso de outras abordagens metodológicas. No entanto, nesse caso, os resultados apontaram que a vedação em DEM apresentou os maiores impactos potenciais, seguido pela vedação em DEA e AC.

Na sequência, o GRÁFICO 9 e GRÁFICO 10, representam os impactos potenciais das vedações obtidos por meio do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (E) versão 1.03 / *World* (2010) E.



GRÁFICO 9 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

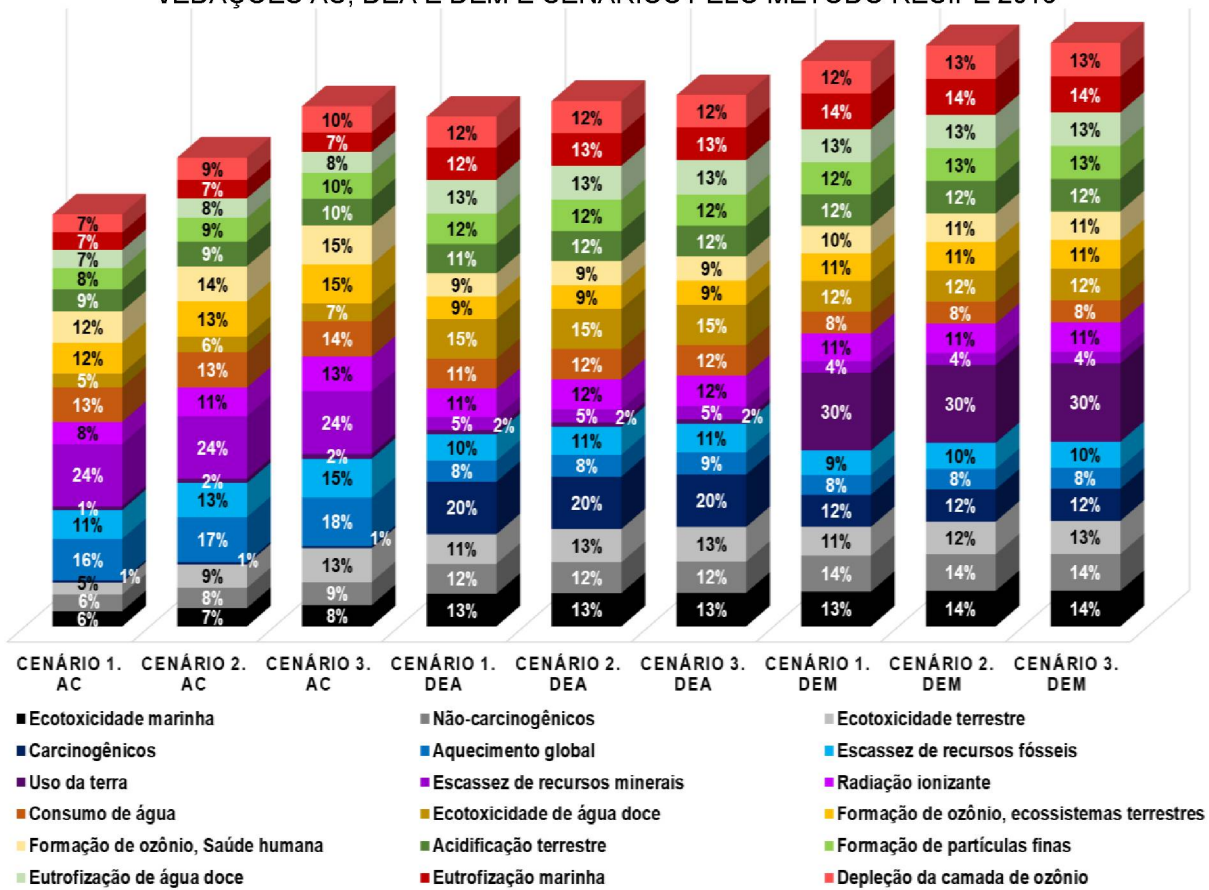
Assim como os resultados apresentados com o uso das outras metodologias, o sistema em AC teve destaque nas categorias de aquecimento global (produção de clínquer e blocos cerâmicos), escassez de recursos fósseis (produção de petróleo e gás natural), escassez de recursos minerais (extração e preparação da argila para a fabricação de blocos cerâmicos) e formação de ozônio – impactando em ecossistemas terrestres e na saúde humana (produção de clínquer, blocos cerâmicos e queima de diesel).

O sistema em DEA também apresentou maior significância nas categorias já detalhadas anteriormente, que foram a ecotoxicidade marinha, carcinogênicos e ecotoxicidade de água doce, como consequência dos processos de tratamento de rejeitos sulfídricos e tratamento de escória, poeiras e lodo, resultantes do processo de produção de aço em forno elétrico.

Já o sistema DEM apresentou impactos potenciais equivalentes aos apresentados pelo método IMPACT 2002+, com grande contribuição na categoria de

uso da terra. Diferente do método ILCD 2011, que considera, além do uso da terra, os impactos positivos oriundos do plantio, os métodos IMPACT 2002+ e ReCiPe 2016 consideram que o processo de silvicultura ocasiona impactos negativos no meio ambiente, aumentando de modo significativo a magnitude dos impactos potenciais do sistema em DEM.

GRÁFICO 10 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO RECIPE 2016



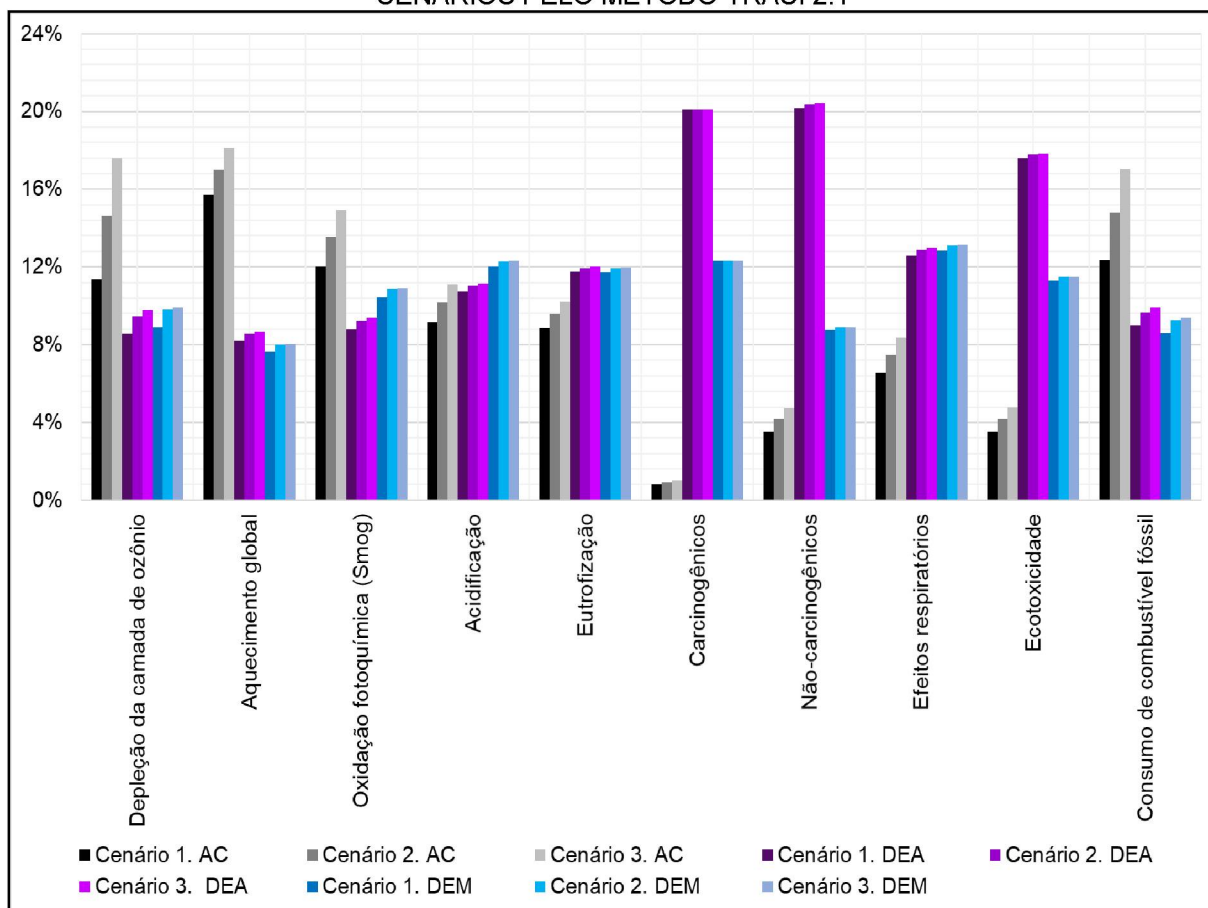
FONTE: A autora (2020).

Dessa forma, a vedação em DEM apresentou os maiores impactos com base nos resultados da caracterização, seguido pelas vedações em DEA e AC.

Por fim, na última análise, os resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida foram simulados a partir da metodologia TRACI 2.1 versão 1.05 (US 2008). Com base no GRÁFICO 11 e GRÁFICO 12, foi possível constatar, novamente, semelhanças entre os resultados para os cenários e sistemas de vedações.

Quanto às categorias de impacto de maior contribuição para o sistema em AC, ressaltam-se as categorias de depleção da camada de ozônio, aquecimento global, oxidação fotoquímica (*smog*) e consumo de combustíveis fósseis.

GRÁFICO 11 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS DAS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM ENTRE CENÁRIOS PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

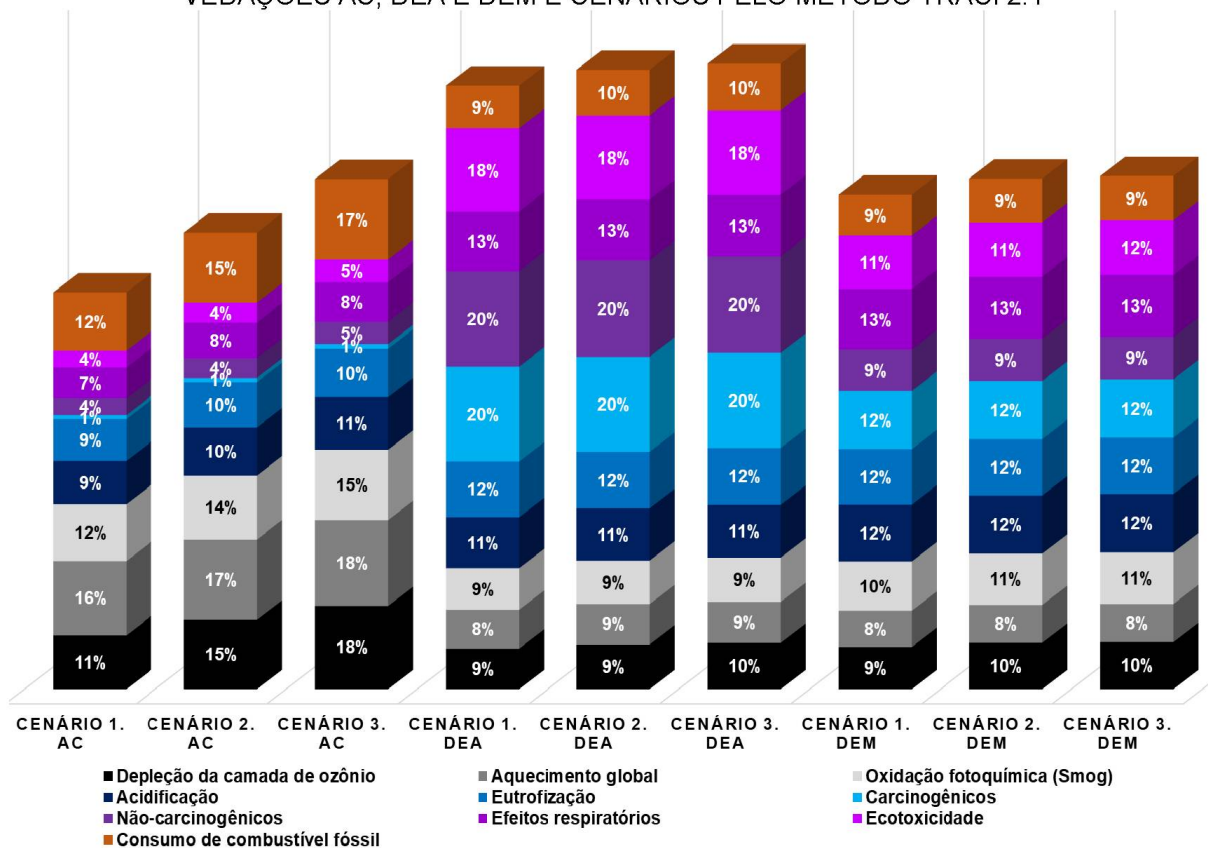
Para o sistema em DEA, os resultados também foram compatíveis com as análises anteriores, evidenciando-se as categorias de carcinogênicos, não-carcinogênicos, efeitos respiratórios e ecotoxicidade.

Em relação ao sistema em DEM, nesse método não há categorias de impacto relacionadas ao uso do solo, as quais influenciam diretamente nos impactos potenciais. Deste modo, o sistema em DEM apresentou uma distribuição uniforme da contribuição das categorias abordadas.

Além disso, foi possível observar que o sistema em DEM apresentou desempenho ambiental semelhante ao desempenho apresentado por metodologias que não abrangem o uso e/ou ocupação do solo. Por conseguinte, o sistema de vedação com maior significância ambiental pelo método TRACI 2.1 foi, outra vez, o *drywall* com estrutura em aço.



GRÁFICO 12 – PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE AS VEDAÇÕES AC, DEA E DEM E CENÁRIOS PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

Em síntese, várias metodologias de AICV aplicam, essencialmente, os mesmos princípios ou pequenas variações para determinadas categorias de impacto, resultando em diversas semelhanças entre os métodos (EC-JRC, 2010a). É importante destacar, também, que os mecanismos ambientais no *midpoint* foram desenvolvidos em regiões específicas para cada método de AICV, como os métodos BEES+ e TRACI, que englobam a aplicação para o contexto norte americano.

De modo geral, os resultados das principais categorias de impacto, entre as metodologias de AICV, para os sistemas de vedações internas foram similares e apresentaram poucas variações. O grande consenso, especialmente para a categoria de aquecimento global/mudanças climáticas, reflete a aplicação de fatores de caracterização baseados no Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), devido ao seu elevado reconhecimento e consenso científico (CAVALETT *et al.*, 2013). Além disso, o estudo de caso realizado por Bueno *et al.* (2016), também demonstrou resultados consistentes para essa categoria.

Por outro lado, as variações identificadas nos resultados podem inserir diferentes interpretações e incertezas aos tomadores de decisão, além da possibilidade de uso indevido para *marketing* de produto. A partir disso, práticas de *greenwashing* podem ser favorecidas com a escolha da metodologia que minimize os impactos potenciais do produto em estudo. Dessa forma, é extremamente importante que os estudos de ACV sejam devidamente detalhados e transparentes e que as metodologias de AICV apresentem resultados cientificamente consistentes para a região em análise. Além disso, analisar os impactos potenciais sob a ótica de diferentes metodologias oferece maior garantia sobre a integridade das avaliações aos tomadores de decisões, à sociedade e aos setores públicos e privados.

Com relação à compatibilidade dos resultados dos cenários de transporte para todos os métodos de AICV, estudos realizados anteriormente já indicavam que sistemas construtivos, como o *Light Steel Framing*, quando comparados aos sistemas convencionais, apresentavam menor energia incorporada e menor taxa de emissões para a etapa de transporte (SPOSTO; CALDAS; NABUT NETO, 2016). Isso ocorre em virtude do peso específico do aço leve que, devido às suas características físicas, tem o seu transporte e movimentação na obra facilitados, sem a necessidade de equipamentos e máquinas complexas (OLIVIERI *et al.*, 2017).

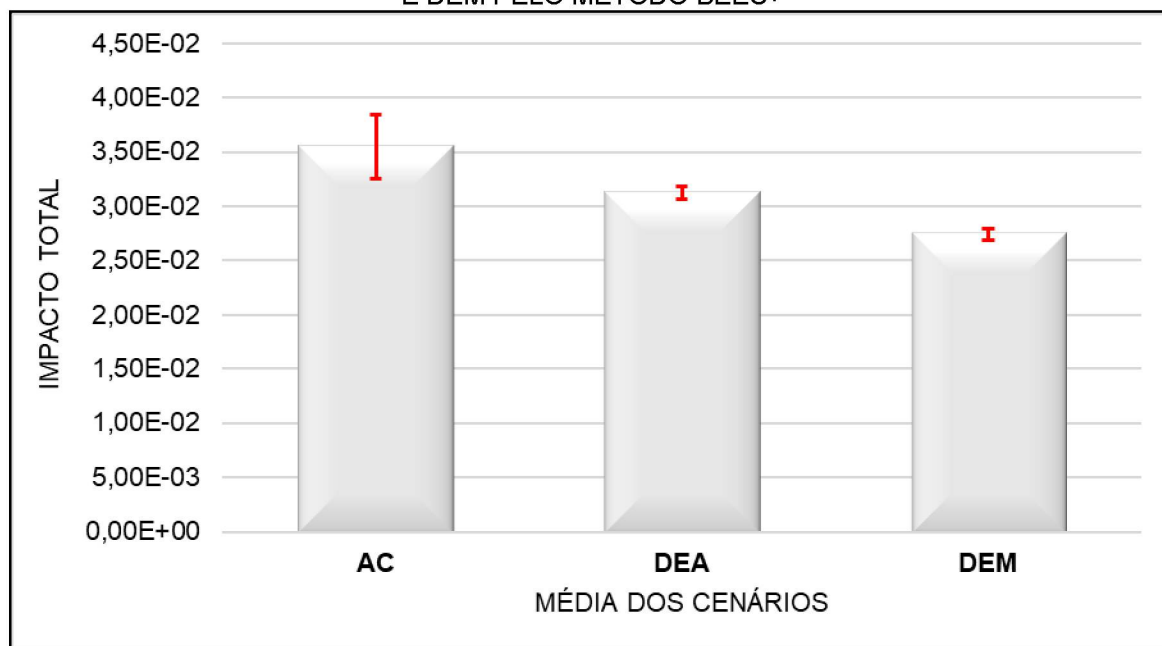
Com os resultados da caracterização apresentados e discutidos, segue-se para a etapa de análise comparativa dos resultados da normalização. Assim, na subseção 6.3, são apresentados os resultados das análises e realizada a seleção das categorias de impacto mais significativas para o estudo de caso.

## 6.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO E SELEÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO MAIS SIGNIFICATIVAS

Nessa seção, os resultados da etapa de normalização das metodologias de AICV são apresentados, para se avaliar quais categorias de impacto apresentam maior significância absoluta para o estudo de caso.

Nesse contexto, o GRÁFICO 13 ilustra os impactos potenciais das médias dos cenários de transporte, para os sistemas de vedações analisados, com o uso da metodologia BEES+. Nesse caso, os resultados de cada categoria de impacto, após o cálculo de normalização, foram somados apenas para a simplificação da visualização comparativa da magnitude de impacto entre as vedações.

GRÁFICO 13 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO BEES+



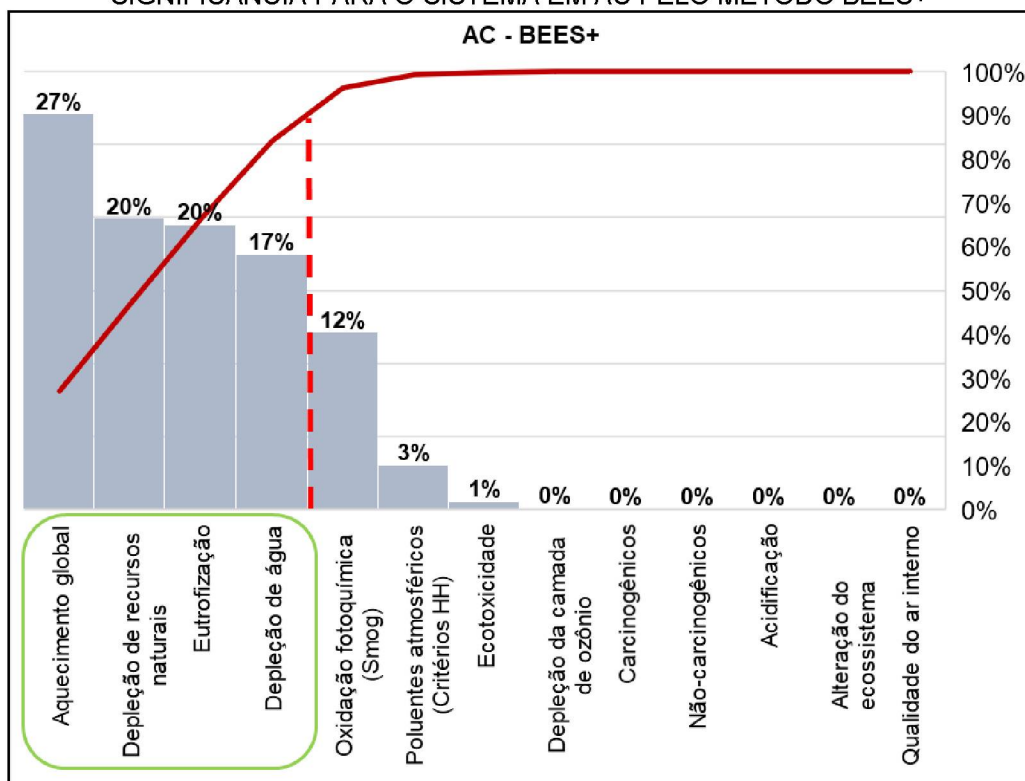
FONTE: A autora (2020).

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que, diferente dos resultados da caracterização, os quais indicam o sistema de vedação em *drywall* com estrutura de aço como a alternativa mais impactante, o sistema em alvenaria convencional de blocos cerâmicos apresentou maior contribuição absoluta nos impactos potenciais, após a normalização externa.

Além disso, a carga transportada (massa x distância) nesse sistema pode alterar consideravelmente os resultados da análise. Com base nisso, é fundamental que a etapa de transporte seja considerada e detalhada em estudos de ACV, para que sejam identificadas oportunidades de melhorias factíveis para a gestão sustentável da cadeia de suprimentos, com a finalidade de mitigar impactos ambientais pertencentes ao processo de transporte dos produtos. Além disso, para a realização de análises comparativas, recomenda-se que as considerações realizadas nessa etapa sejam cuidadosamente ponderadas e justas entre os produtos, evitando-se a adição de incertezas e modificações que favoreçam o desempenho ambiental de determinado produto.

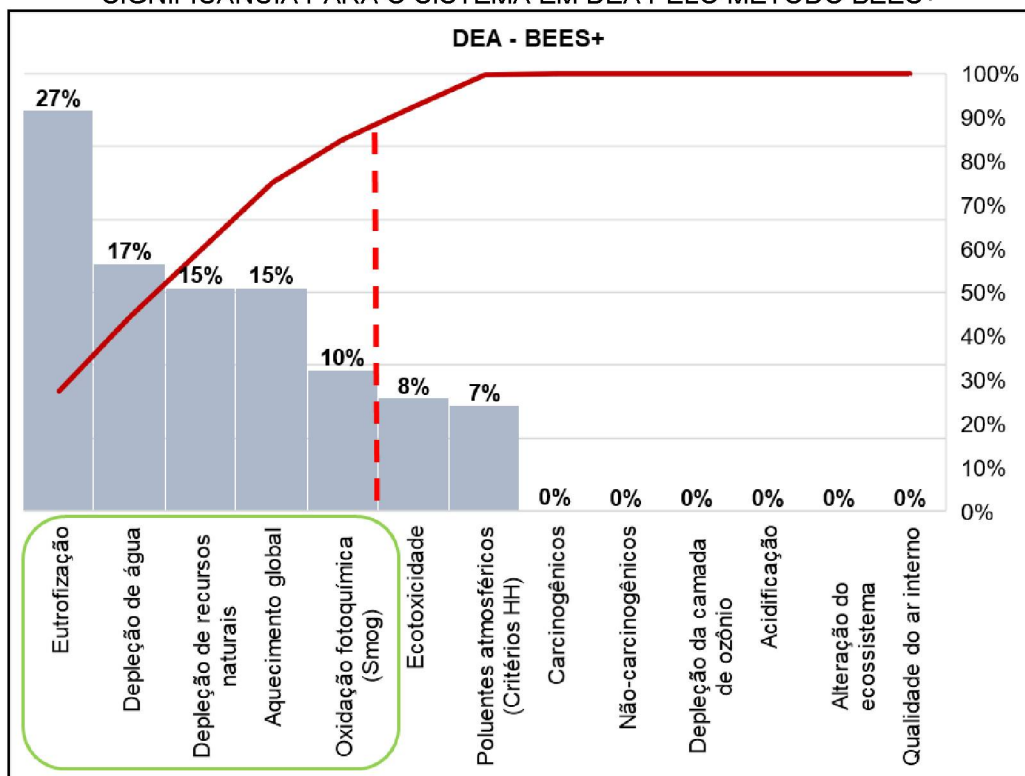
Em relação às categorias de impacto de maior significância para os sistemas de vedações, pelo método BEES+, os GRÁFICOS 14, 15 e 16 foram criados para ilustrar a seleção das categorias cuja contribuição cumulativa estivessem dentro da faixa de 80% dos impactos potenciais para cada sistema.

GRÁFICO 14 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO BEES+



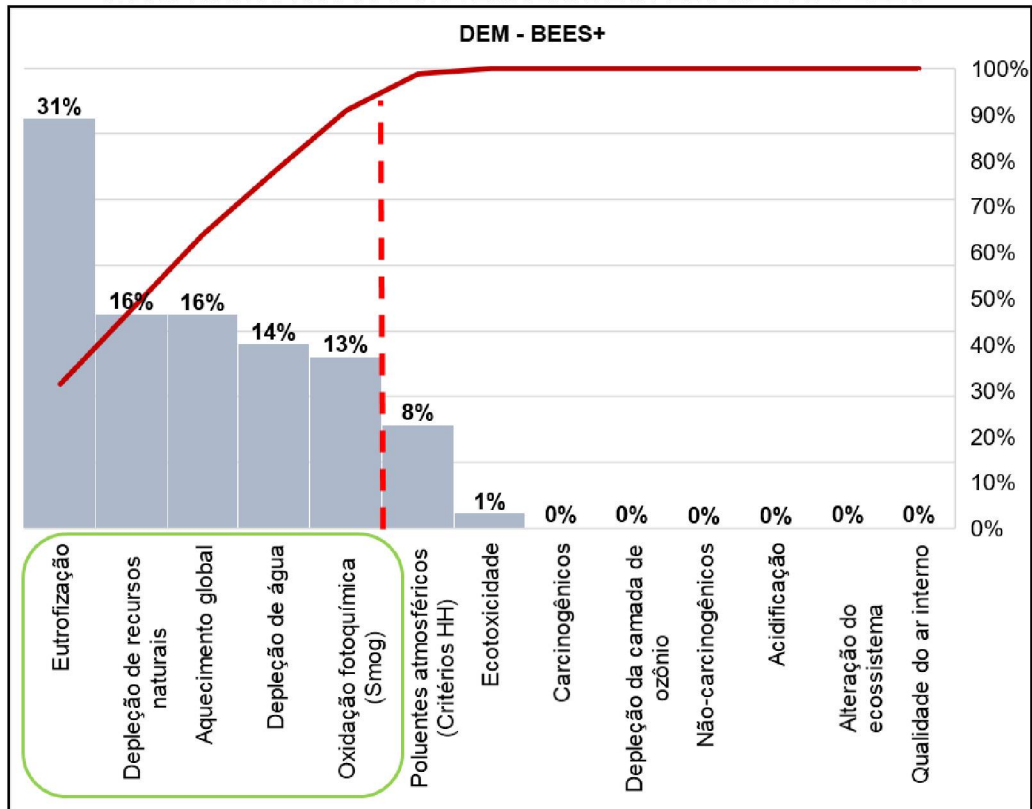
FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 15 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO BEES+



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 16 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO BEES+



FONTE: A autora (2020).

Diante dos resultados apresentados, as categorias de impacto com maior contribuição para o sistema de vedação em AC foram, em ordem decrescente de importância, o aquecimento global, depleção de recursos naturais, eutrofização e depleção de água.

Com relação às paredes em *drywall* com estrutura de aço, as categorias de impacto selecionadas foram relativamente as mesmas, alterando-se somente a ordem de importância e havendo a inclusão de uma categoria a mais: eutrofização, depleção de água, depleção de recursos naturais, aquecimento global e oxidação fotoquímica (*smog*).

O mesmo comportamento ocorre para o sistema de vedação em DEM, no qual as categorias mais relevantes foram, também, a eutrofização, depleção de recursos naturais, aquecimento global, depleção de água e oxidação fotoquímica (*smog*).

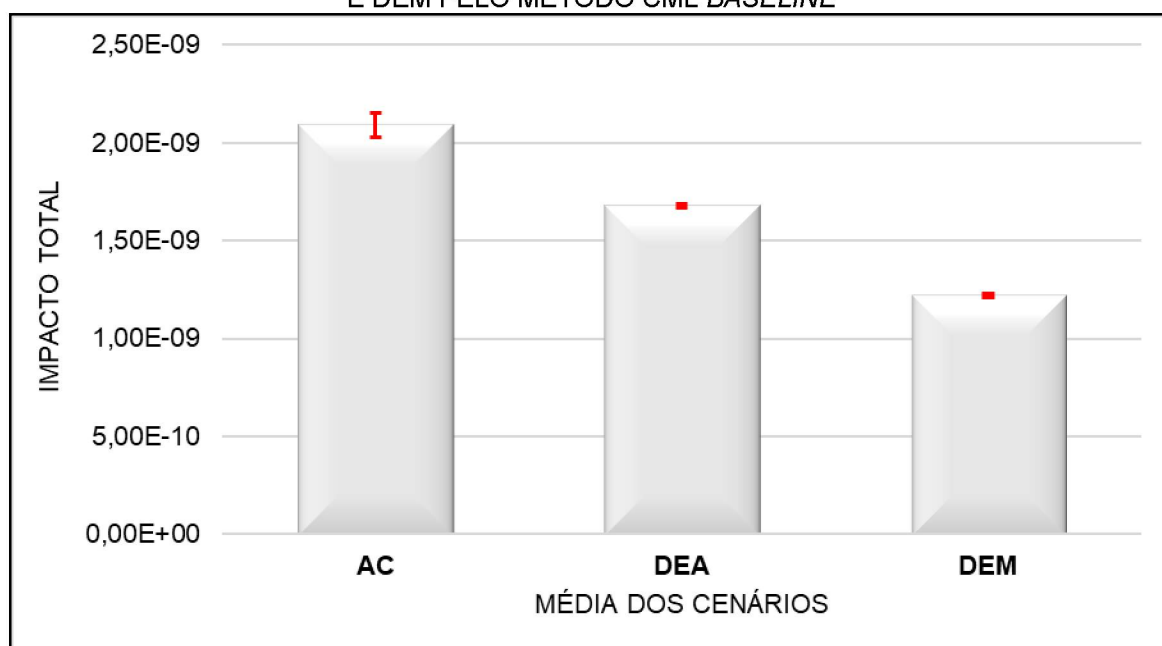
Com base nesses resultados, um aspecto importante pode ser evidenciado, a partir da verificação comparativa das categorias com maior destaque na etapa de caracterização. Enquanto os sistemas em *drywall* (DEA e DEM) revelaram grande



participação das categorias de carcinogênicos, não-carcinogênicos, poluentes atmosféricos e ecotoxicidade, após a normalização, independente do sistema de vedação analisado, os fatores de normalização utilizados pelo método BEES+ direcionaram os impactos potenciais para as mesmas categorias, alterando-se, somente, a ordem de magnitude entre elas.

Quanto aos resultados observados pelo método CML *Baseline*, o desempenho ambiental de cada vedação, após a normalização, apresentou o mesmo comportamento dos resultados observados pela metodologia BEES+ (para pontuação única).

GRÁFICO 17 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO CML *BASILINE*

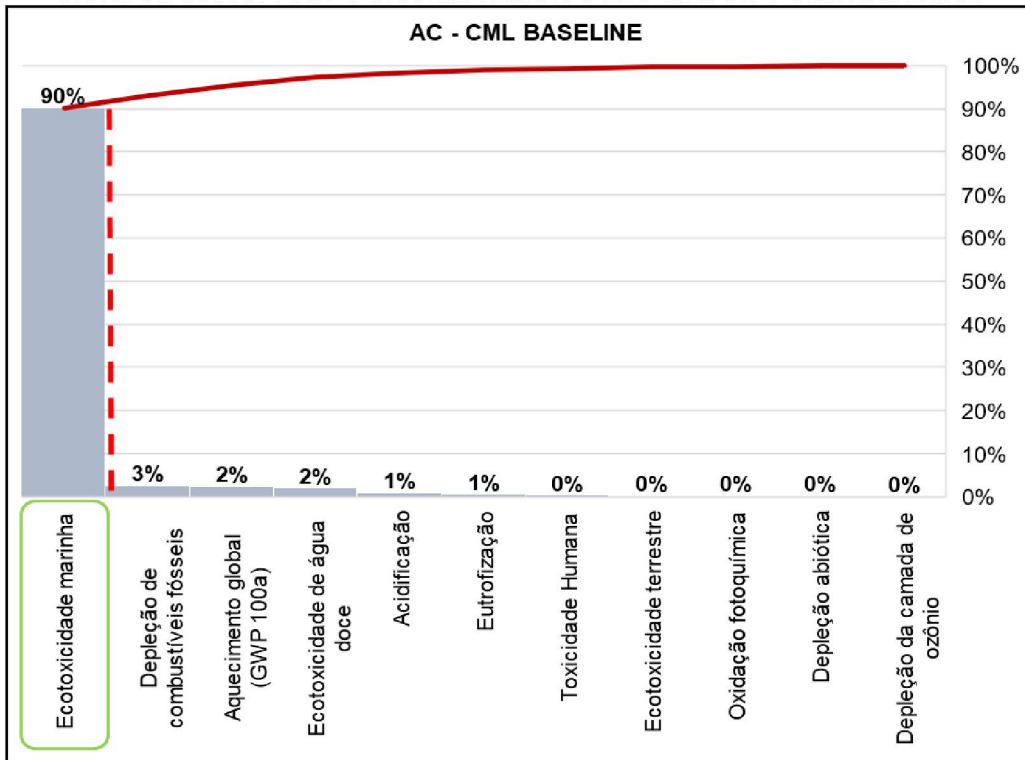


FONTE: A autora (2020).

Dessa forma, a vedação em DEA, que na caracterização se apresentou como a pior alternativa entre os cenários, teve redução dos impactos absolutos com a normalização. Assim, o sistema em AC se tornou a opção com maior potencial de impacto no meio ambiente.

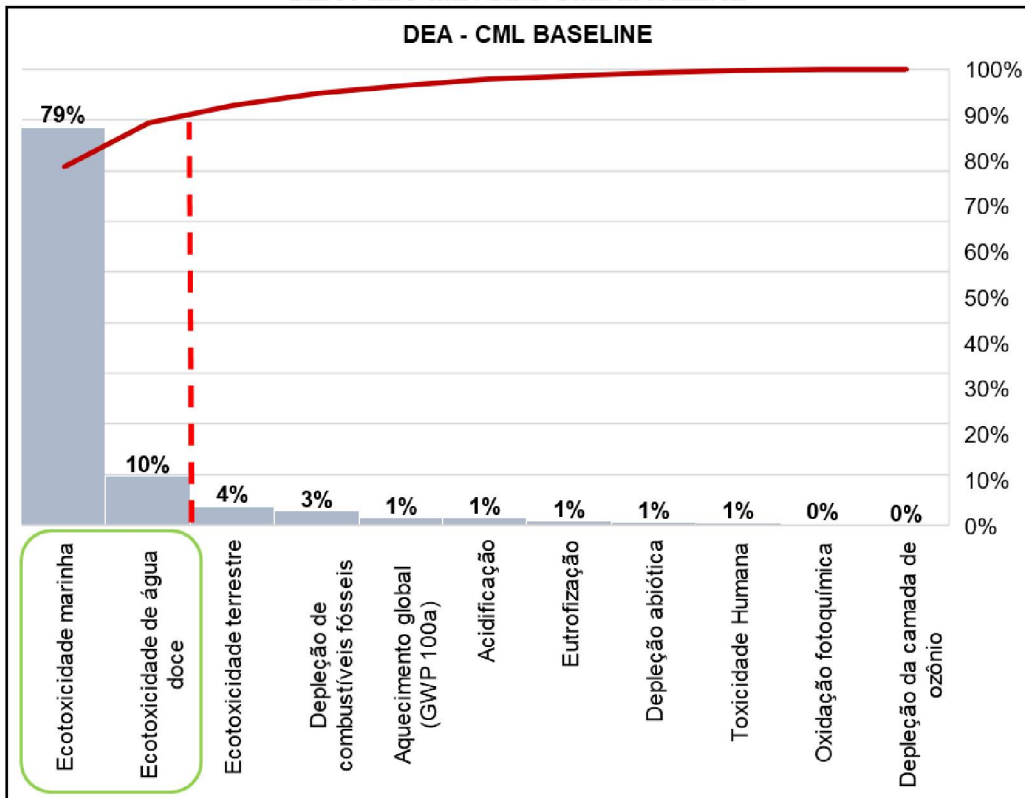
Por outro lado, devido aos fatores de normalização considerados no método CML *Baseline*, as categorias de impacto de maior importância tiveram grandes alterações, quando comparadas com os resultados da caracterização do próprio método e resultados da normalização da metodologia BEES+ (GRÁFICO 18, GRÁFICO 19 e GRÁFICO 20).

GRÁFICO 18 – RESULTADOS NORMALIZADOS E CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO CML *BASELINE*

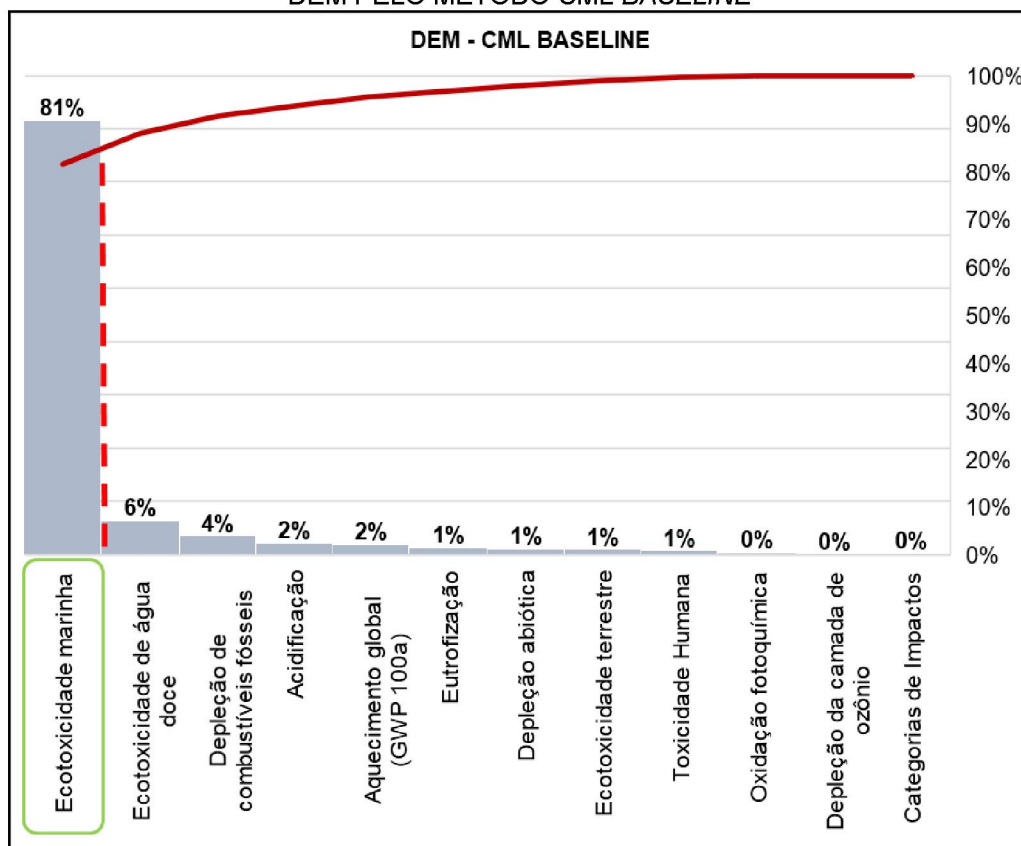


FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 19 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO CML *BASELINE*



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 20 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO CML *BASELINE*

FONTE: A autora (2020).

De acordo com gráficos apresentados, torna-se evidente a influência dos fatores de normalização nos resultados das categorias de ecotoxicidade. Assim, nos sistemas em AC e DEM, somente a categoria de ecotoxicidade marinha apresentou contribuição de 90% e 81%, respectivamente, dos impactos potenciais normalizados. Já no sistema DEA, além da categoria de ecotoxicidade marinha (79%), incluiu-se, também, a ecotoxicidade de água doce (10%).

Dessa forma, as categorias mais relevantes para o estudo de caso, de acordo com a metodologia de AICV CML *Baseline*, foram as categorias de ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade de água doce.

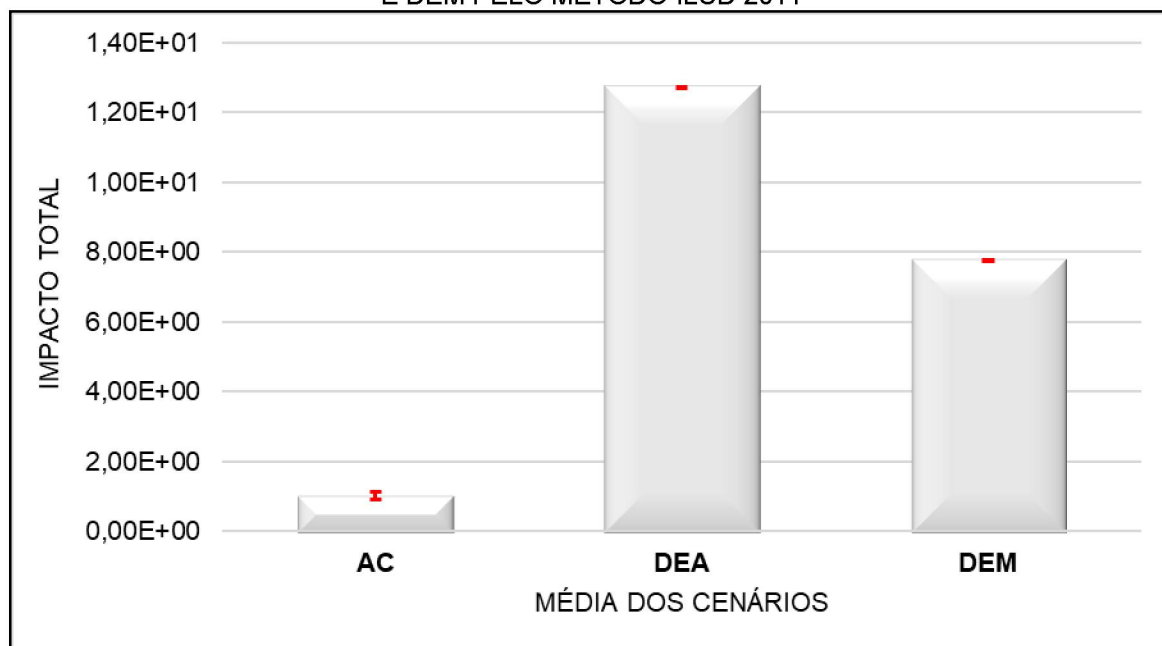
Na sequência, relativo ao impacto absoluto dos sistemas de vedação com o uso do método ILCD 2011, pode-se observar resultados normalizados bastante diferentes dos apresentados previamente (GRÁFICO 21).

Nesse caso, os impactos potenciais dos sistemas em DEA e DEM foram evidenciados pela perspectiva de pontuação única, enquanto o sistema em AC teve queda expressiva de contribuição. Comparado aos resultados da caracterização, os



impactos destacados com valores negativos para o sistema em DEM, apresentaram pouca influência nos resultados normalizados.

GRÁFICO 21 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO ILCD 2011

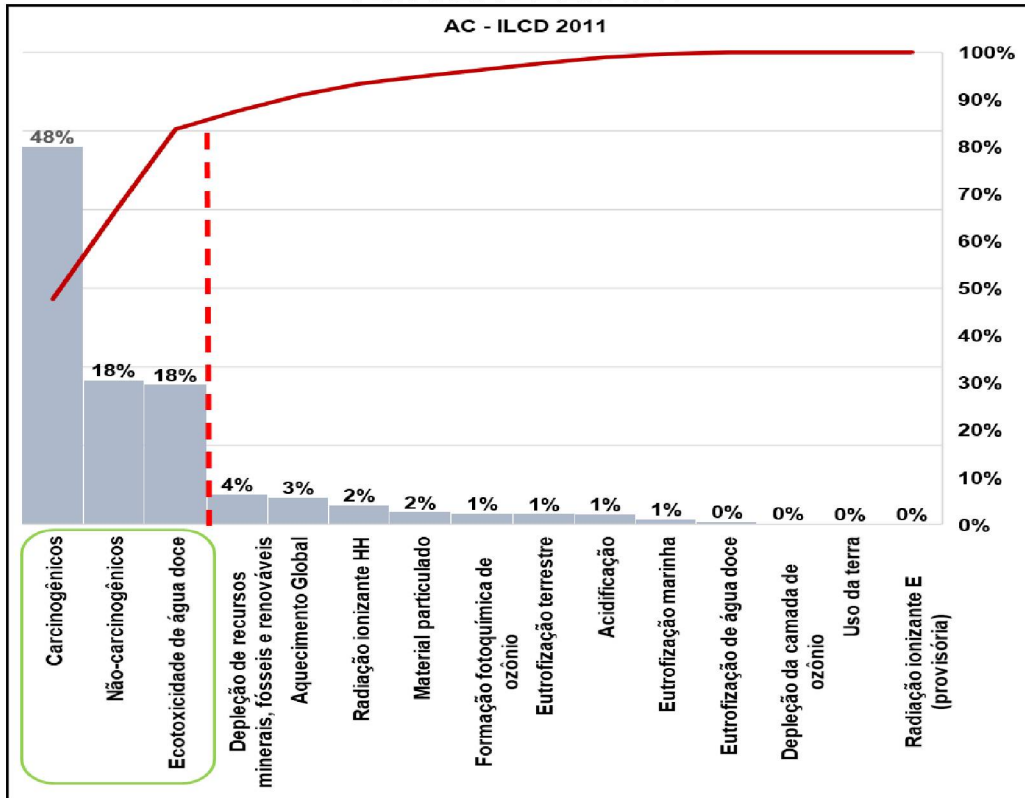


FONTE: A autora (2020).

Por outro lado, a redução do potencial de impacto visto no sistema em AC, pode ser justificado pelo elevado nível de importância que o método ILCD 2011 atribui à categoria de carcinogênicos, ou seja, relativo ao potencial de toxicidade humana com efeitos cancerígenos. Dessa forma, tanto os processos de tratamento dos resíduos resultantes da produção de aço em forno elétrico (escória, poeira e lodo), quanto os processos de tratamento de resíduos provenientes da fabricação de compostos químicos para o tratamento químico da madeira (dicromato de sódio) e superficial do aço (cloreto de zinco), apresentaram alta contribuição na pontuação final de impacto, principalmente, por afetar a área de proteção relativa à saúde humana.

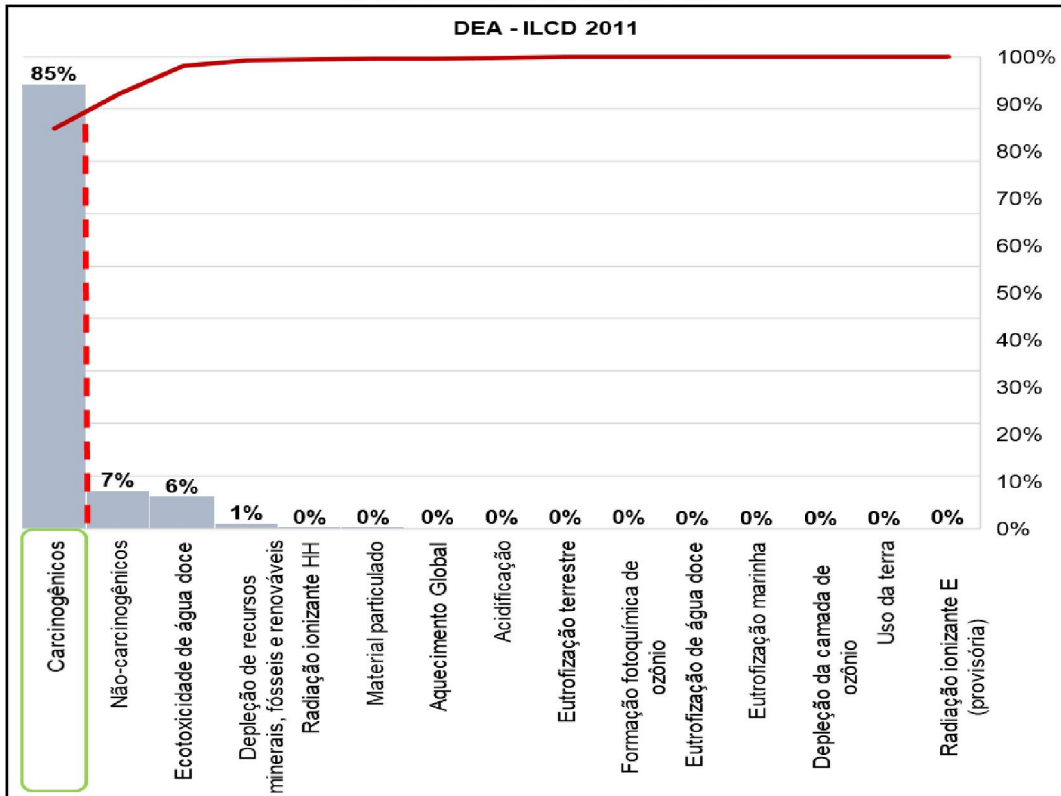
Em função disso, conforme apresentado nos GRÁFICOS 22, 23 e 24, as categorias de impacto mais relevantes pelo método ILCD 2011 foram as categorias de carcinogênicos, não-carcinogênicos e ecotoxicidade de água doce, para as paredes em alvenaria convencional de blocos cerâmicos, e apenas a categoria de carcinogênicos, para as vedações em *drywall* com estrutura de aço e em *drywall* com estrutura de madeira.

GRÁFICO 22 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO ILCD 2011



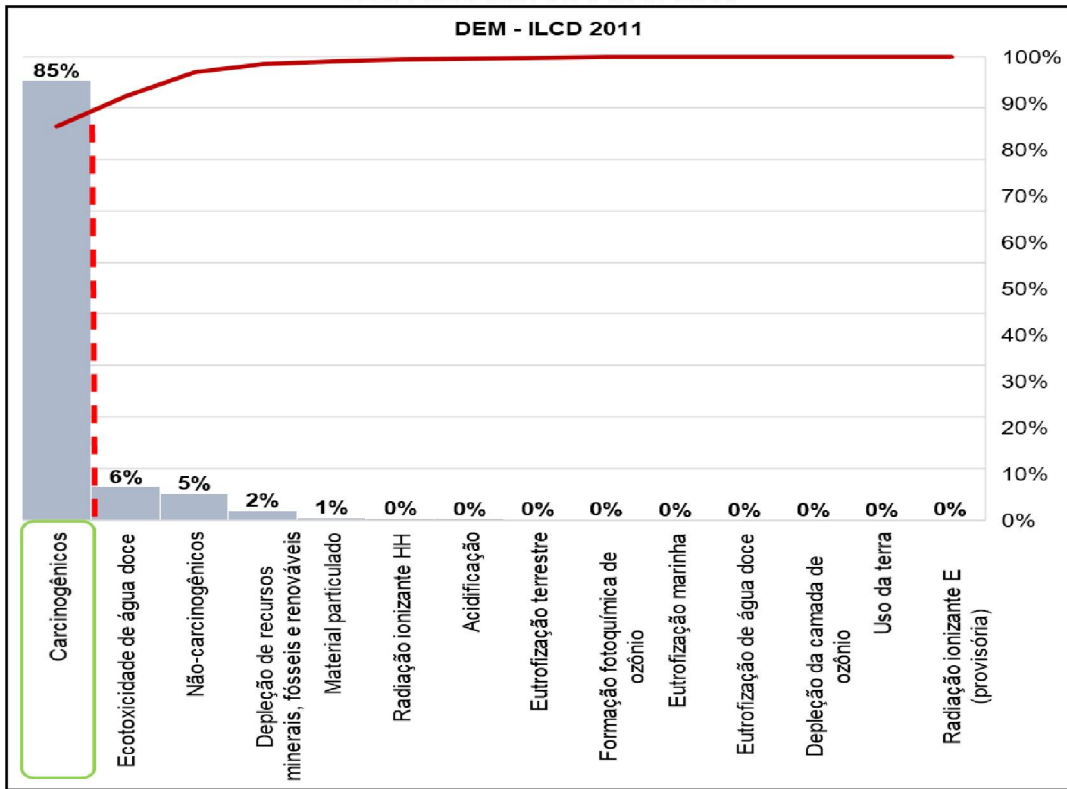
FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 23 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO ILCD 2011



FONTE: A autora (2020).

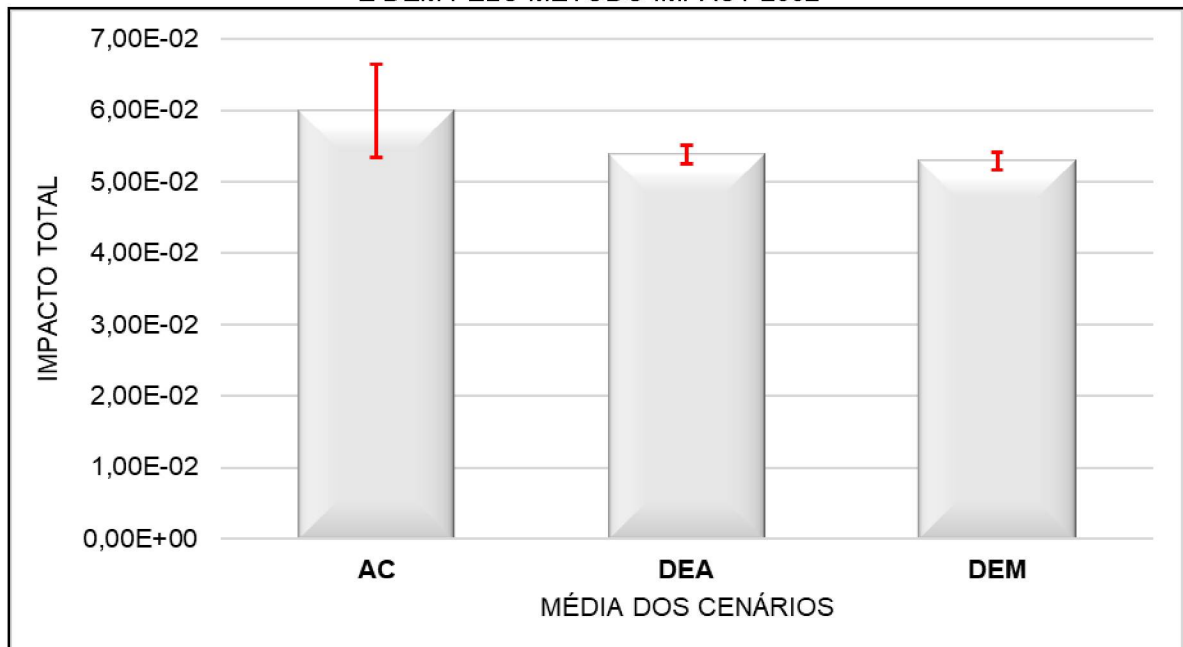
GRÁFICO 24 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO ILCD 2011



FONTE: A autora (2020).

Para a metodologia IMPACT 2002+, com base no GRÁFICO 25, destaca-se certa uniformidade dos impactos potenciais após a normalização.

GRÁFICO 25 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+

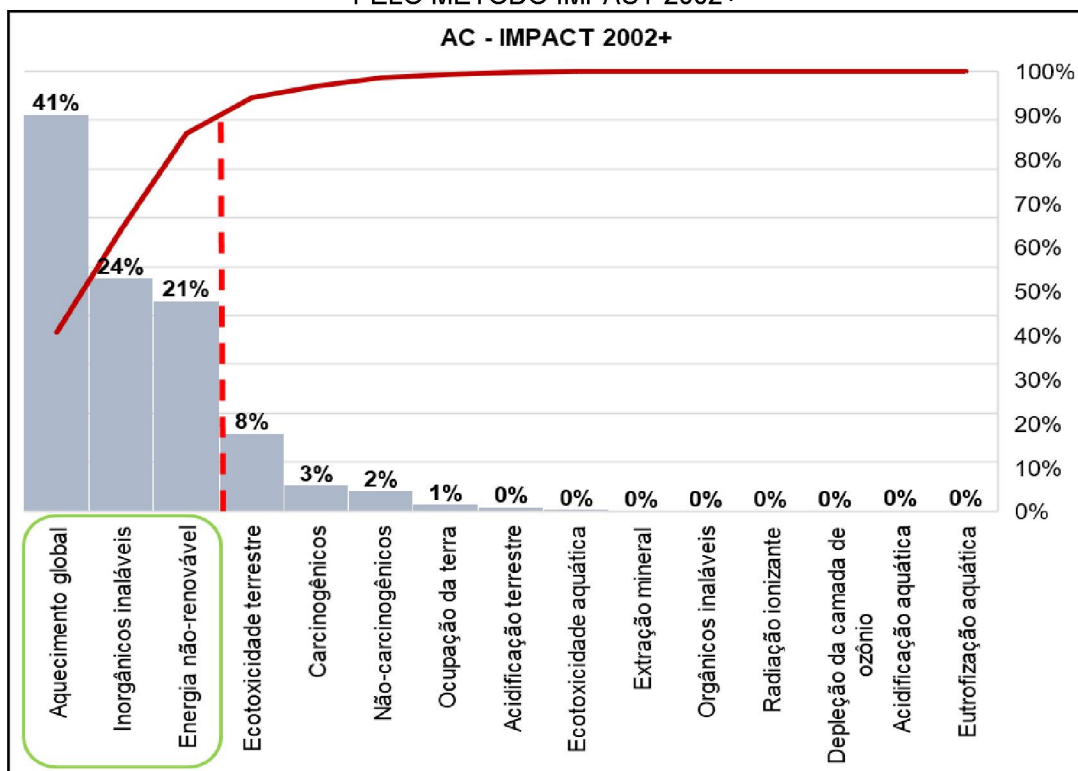


FONTE: A autora (2020).

Contudo, o desvio padrão pertinente às variações de distâncias entre os fornecedores e o canteiro de obras para a vedação em AC, apresentou um nível um pouco maior de sensibilidade, especialmente, quando comparado aos sistemas em DEA e DEM. Nessa situação, a distância considerada para os fornecedores de materiais de construção de cada parede pode alterar o comportamento dos resultados normalizados, implicando em diferentes conclusões sobre o sistema com maior potencial de impacto ao meio ambiente.

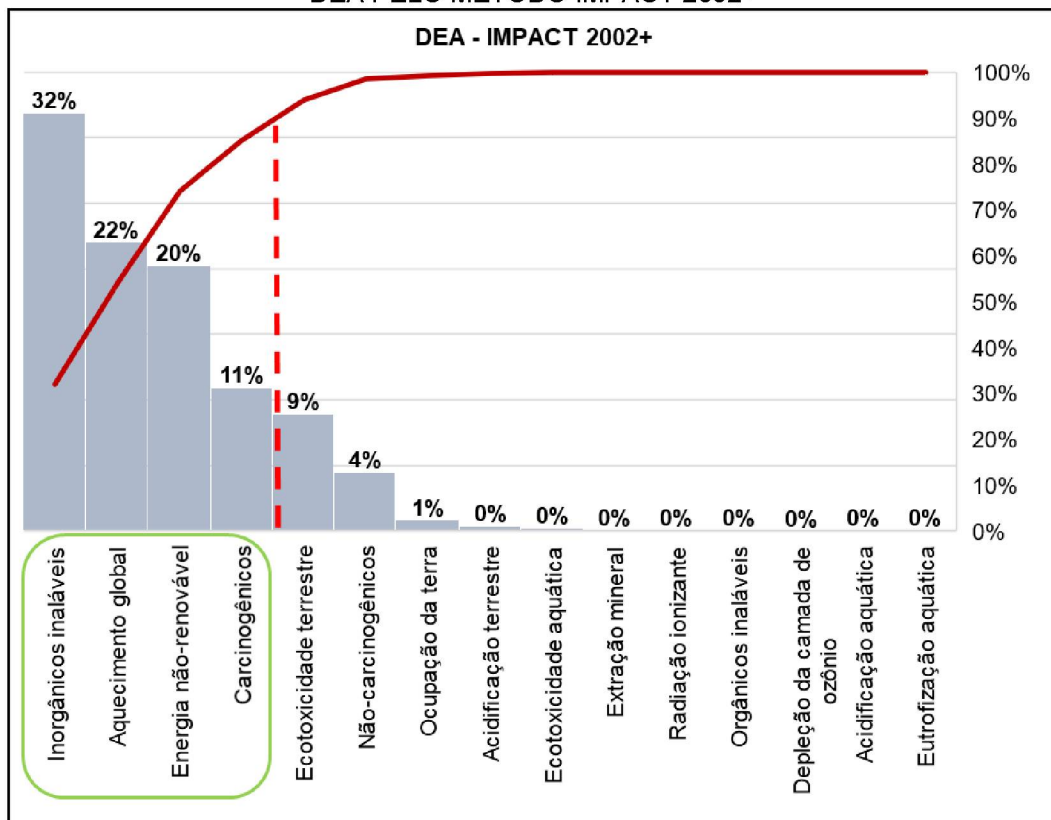
Referente às categorias de impactos de maior contribuição para as paredes avaliadas, é possível observar nos GRÁFICOS 26, 27 e 28, que ainda que a distribuição de impactos entre os sistemas de vedação tenha sido consistente, o método IMPACT 2002+ também apresentou resultados de categorias semelhantes entre as paredes com diferentes materiais. Para a vedação em AC, as categorias de aquecimento global, inorgânicos inaláveis e energia não-renovável foram as mais relevantes. Já para o DEA e DEM, o material utilizado na estrutura teve pouca interferência no resultado, sendo as categorias de inorgânicos inaláveis (ou material particulado), aquecimento global e energia não-renovável, as mais impactantes em ambos os sistemas, com a adição da categoria ocupação da terra para o DEM.

GRÁFICO 26 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO IMPACT 2002+



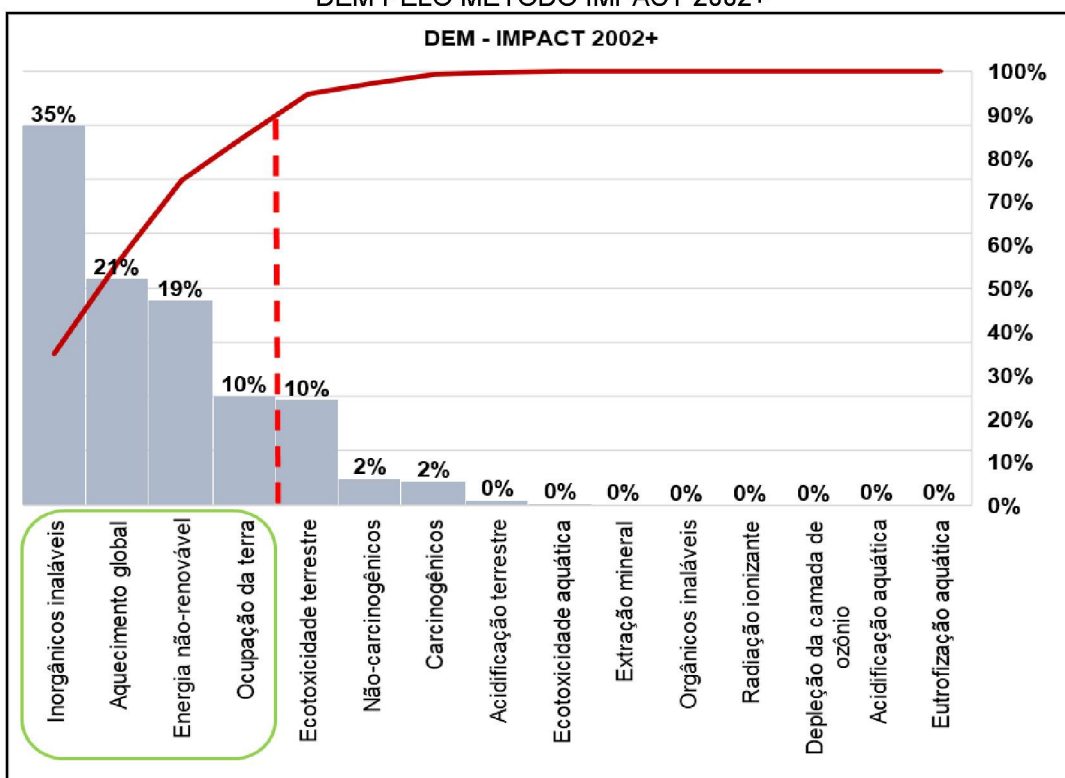
FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 27 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO IMPACT 2002+



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 28 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+

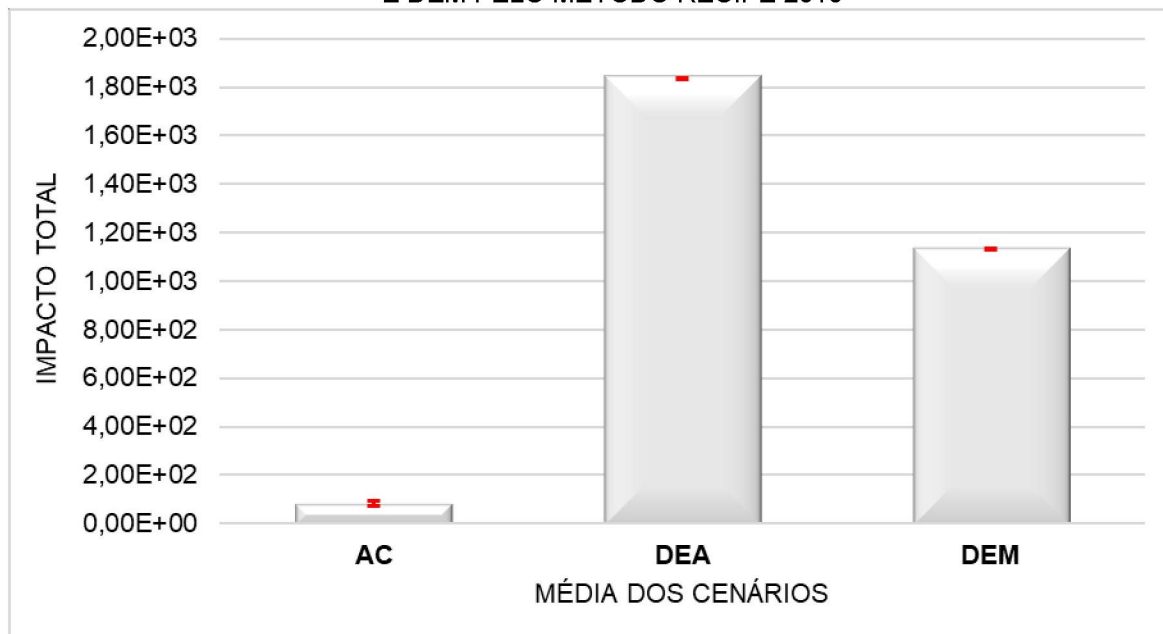


FONTE: A autora (2020).



Com relação à metodologia de AICV ReCiPe 2016, pode-se observar um comportamento dos resultados de impactos em pontuação única similar aos resultados apresentados com o uso da metodologia ILCD 2011 (GRÁFICO 29).

GRÁFICO 29 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

Novamente, o sistema em AC teve redução significativa de magnitude de impacto, comparado à vedação em DEA e DEM. Tanto o método ILCD 2011 quanto o método ReCiPe 2016, são métodos que apresentam uma abordagem de danos globais, atribuindo elevada relevância aos impactos causados à saúde humana.

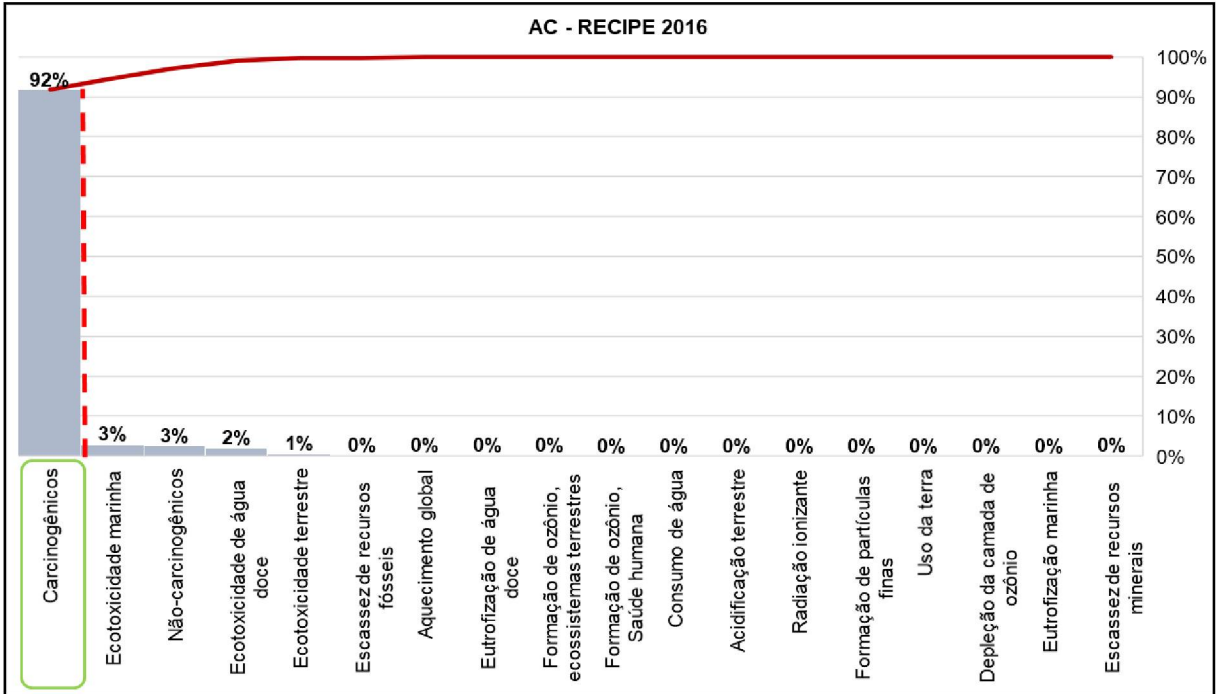
Dessa forma, semelhante aos resultados fornecidos com o uso do método ILCD 2011, a categoria de impacto de maior importância para os três sistemas de vedações em análise foi referente à categoria de carcinogênicos (GRÁFICO 30, GRÁFICO 31 e GRÁFICO 32).

Para as três alternativas de vedações, notou-se que os processos de tratamento de diversos resíduos, principalmente associados à fabricação do aço e de compostos químicos (tratamento químico da madeira e superficial do aço), apresentaram maior pontuação entre os processos da categoria de carcinogênicos.

Desse modo, os resultados obtidos por essa metodologia indicam a necessidade de avanços direcionados à redução de resíduos gerados nos

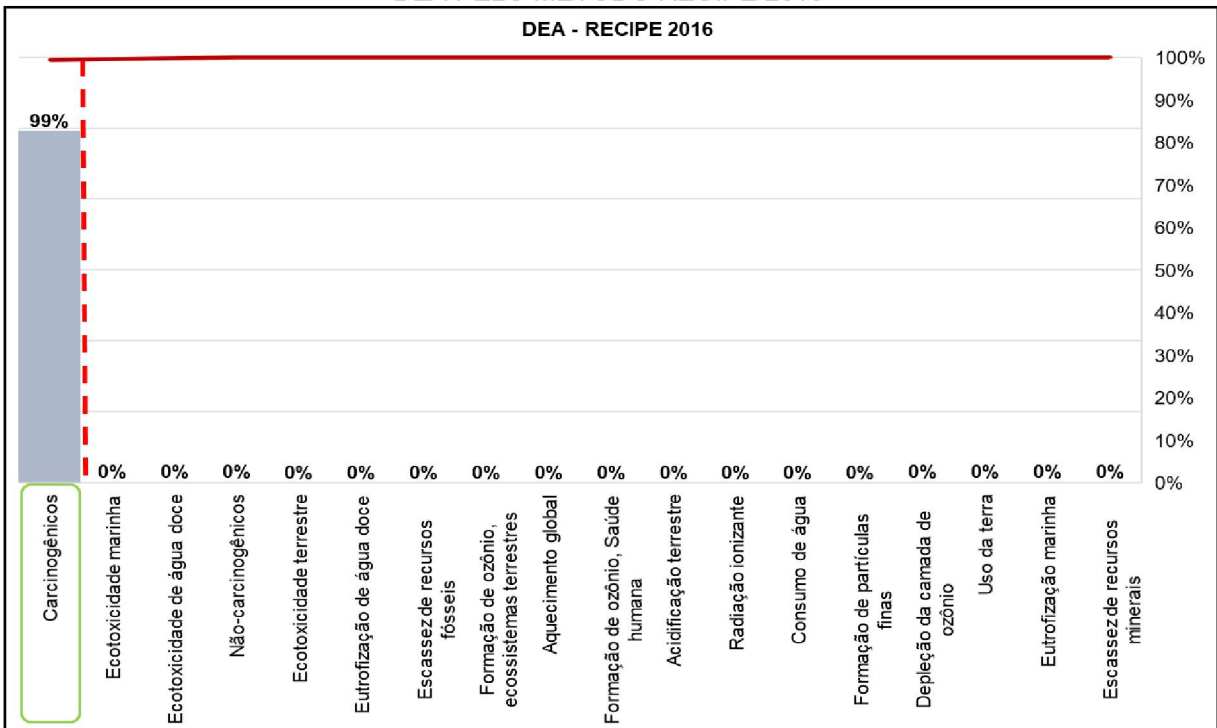
processos produtivos, principalmente, resíduos com elevado nível de significância ambiental.

GRÁFICO 30 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO RECIPE 2016



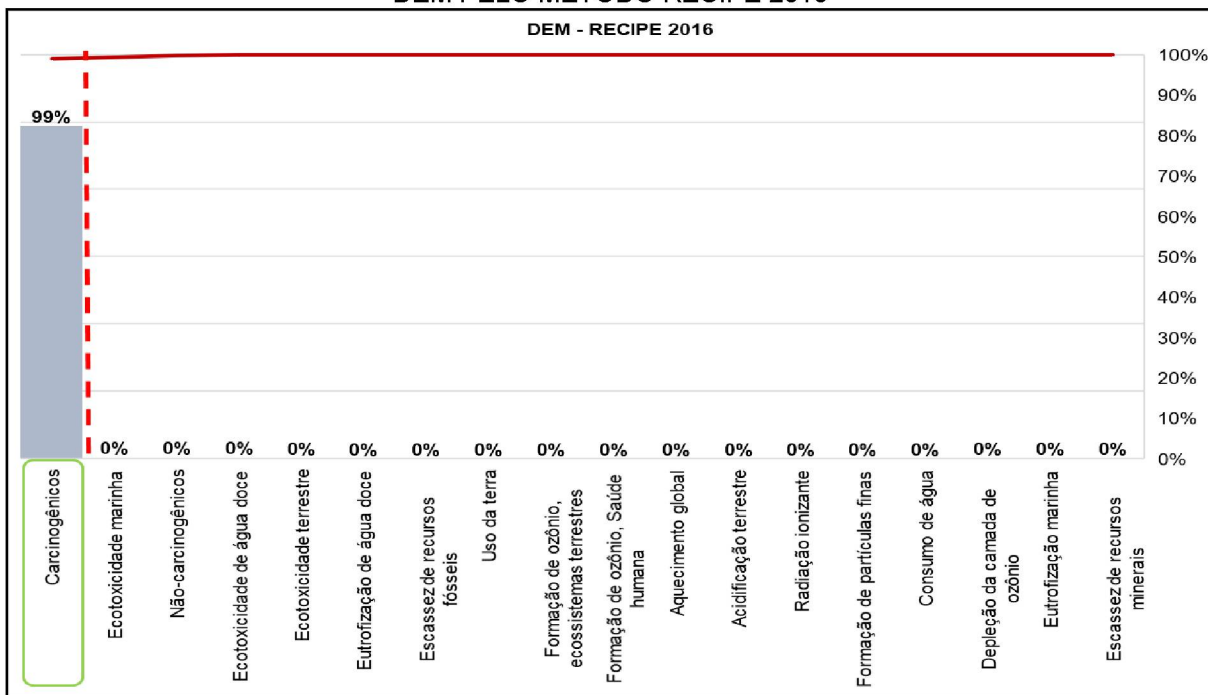
FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 31 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

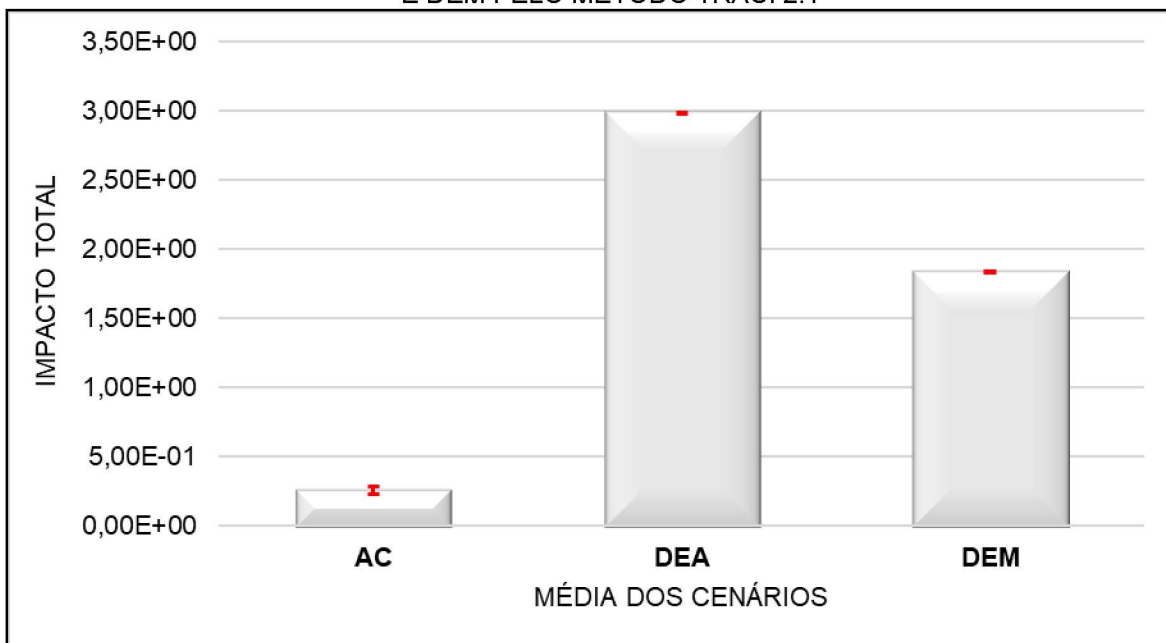
GRÁFICO 32 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

Finalmente, a última análise realizada nessa seção foi referente aos resultados de impactos normalizados fornecidos por meio do uso da metodologia TRACI 2.1 (GRÁFICO 33).

GRÁFICO 33 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1



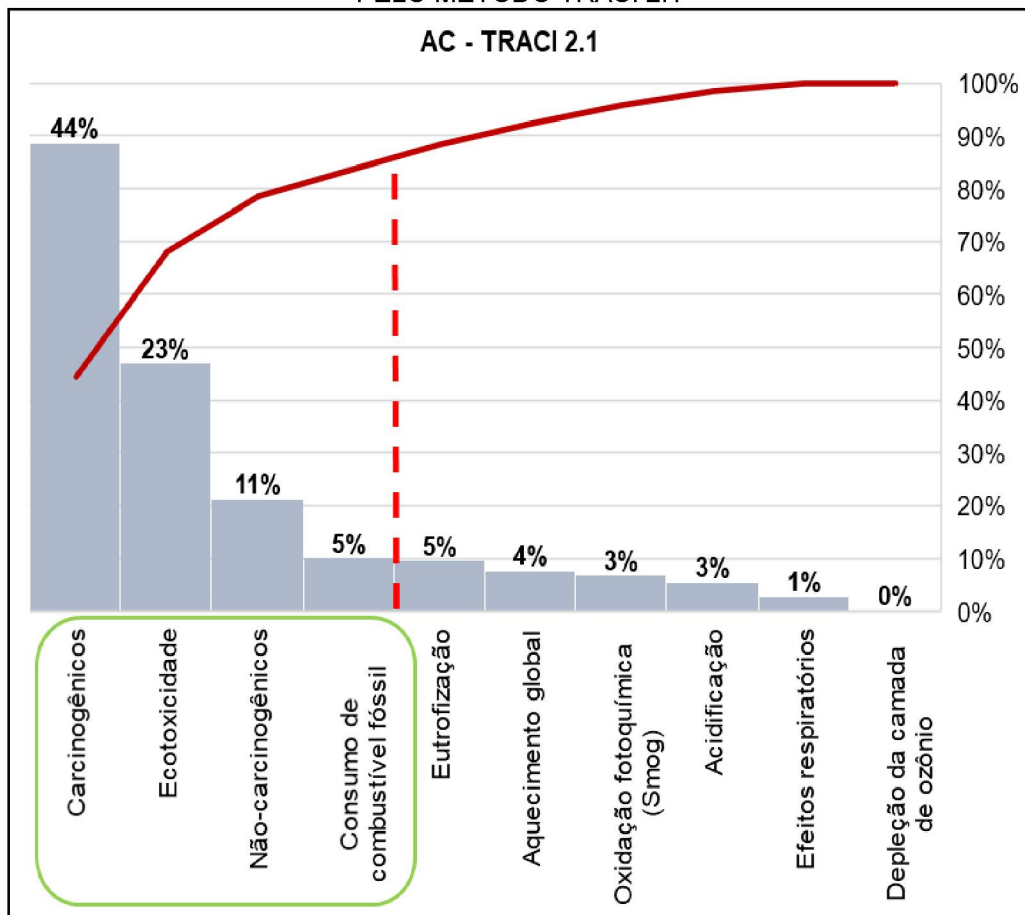
FONTE: A autora (2020).



Diante dos resultados de pontuação única, foi evidente a diminuição da magnitude do sistema em AC. Nesse caso, o método TRACI 2.1 apresentou a mesma variação de impactos dos métodos ILCD 2011 e ReCiPe 2016, apontando como pior alternativa a vedação em *drywall* com estrutura de aço.

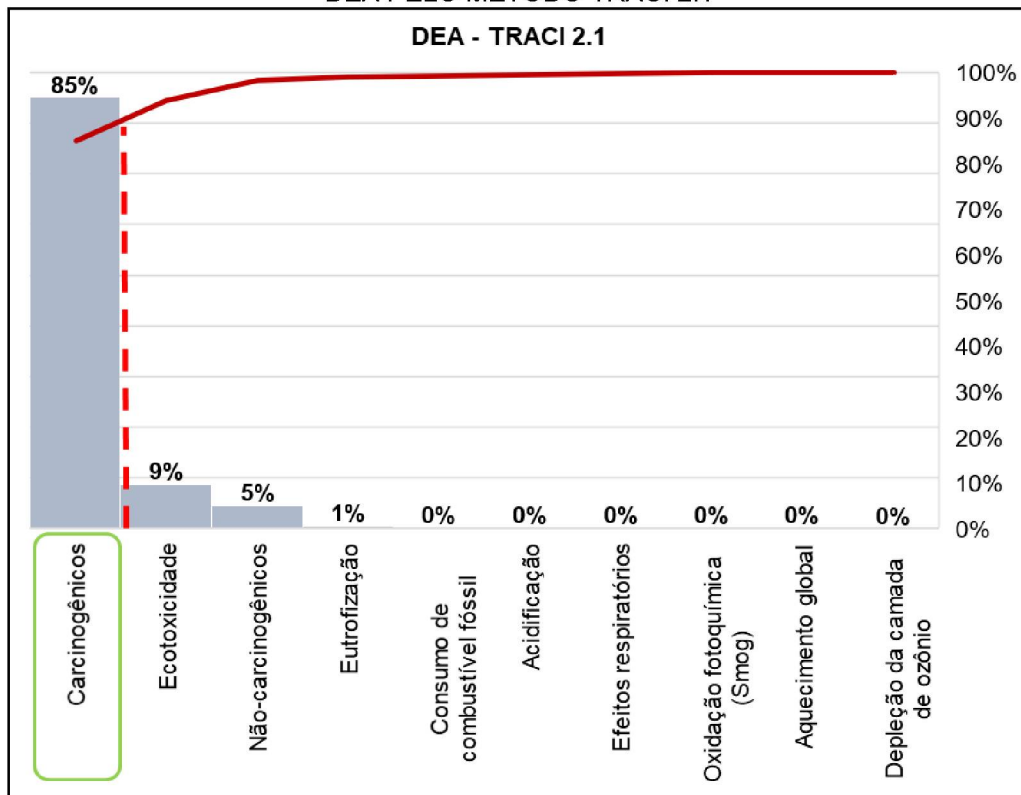
Quanto às categorias de impacto de maior significância para os sistemas de vedação, salienta-se, novamente, a notoriedade da categoria de impacto de carcinogênicos. Conforme apresentado no GRÁFICO 34, 80% dos impactos causados pela vedação em alvenaria convencional foram relativos às categorias de carcinogênicos, ecotoxicidade, não-carcinogênicos e consumo de combustíveis fósseis. Já as vedações em DEA e DEM (GRÁFICO 35 e GRÁFICO 36) apresentaram desempenhos muito semelhantes, tendo a categoria de carcinogênicos como a mais importante para essas tipologias construtivas.

GRÁFICO 34 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM AC PELO MÉTODO TRACI 2.1



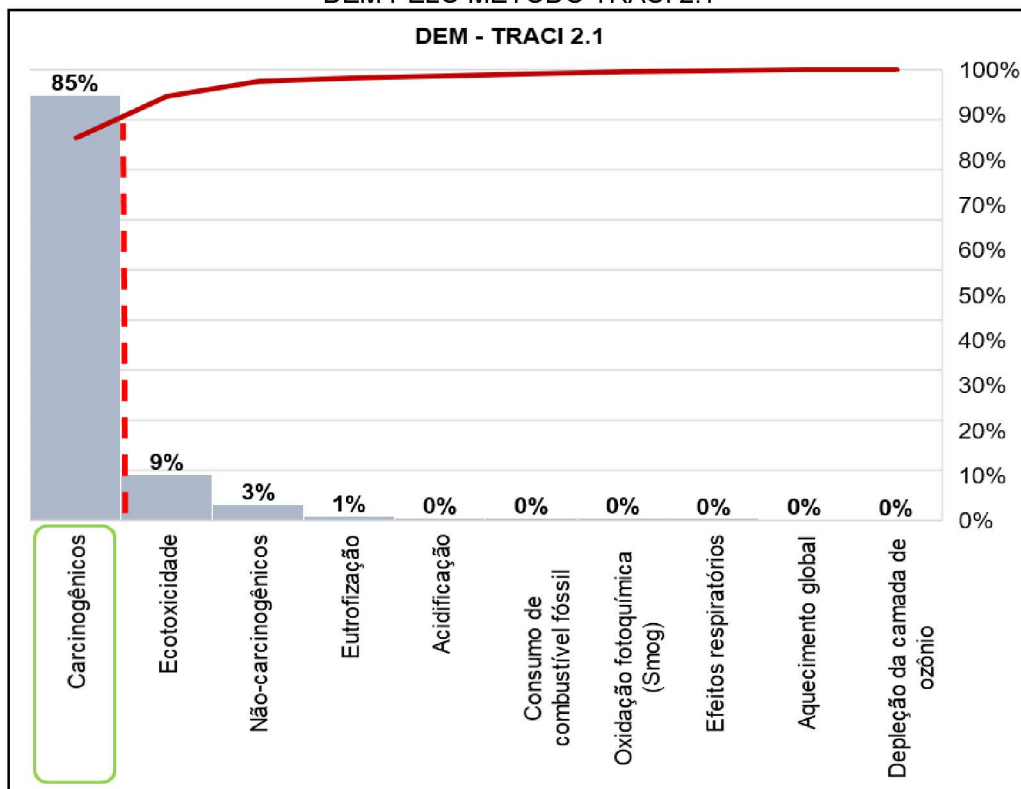
FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 35 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEA PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 36 – CATEGORIAS DE IMPACTO DE MAIOR SIGNIFICÂNCIA PARA O SISTEMA EM DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

Por outro lado, conforme pode ser observado no QUADRO 10, esperava-se que, na prática, o sistema em AC fosse o sistema que apresentasse mais problemas de ordem ambiental, devido à natureza das atividades produtivas dos principais insumos e grande geração de desperdícios durante a construção. Contudo, com base nas análises realizadas com as seis metodologias de AICV, a magnitude de impacto, sobretudo do sistema em AC, sofreu grandes alterações com o uso de diferentes métodos.

QUADRO 10 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS POTENCIAIS TOTAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM ENTRE OS MÉTODOS DE AICV

MÉTODOS DE AICV	POTENCIAL DE IMPACTO AMBIENTAL TOTAL (PONTUAÇÃO ÚNICA)		
	Maior magnitude	Média magnitude	Menor magnitude
BEES+	AC	DEA	DEM
CML Baseline	AC	DEA	DEM
ILCD 2011	DEA	DEM	AC
IMPACT 2002+	AC	DEA	DEM
ReCiPe 2016	DEA	DEM	AC
TRACI 2.1	DEA	DEM	AC

FONTE: A autora (2020).

Em síntese, a produção de aço teve mais destaque nas análises do que a produção de cimento ou bloco cerâmico, por exemplo, ainda que a massa considerada desse material fosse muito inferior quando comparada à massa de outros materiais usados na alvenaria convencional.

Além disso, diante dos resultados obtidos a partir da avaliação do ciclo de vida das vedações internas não-estruturais, pôde-se observar que, de fato, as categorias de impacto mais significativas para as vedações foram as categorias mais avaliadas nos estudos de ACV mencionados na RSL (Capítulo 4). Apesar disso, o uso da água comprovou ser de grande relevância para a construção civil, mesmo que os estudos selecionados para a análise de conteúdo não tenham evidenciado essa categoria.

Com base nos resultados apresentados, as categorias de impacto selecionadas foram: aquecimento global, eutrofização, oxidação fotoquímica,

ecotoxicidade, carcinogênicos, não-carcinogênicos, inaláveis inorgânicos (ou material particulado), uso de água, energia não-renovável, uso de recursos naturais e uso/ocupação do solo. Dessa forma, devido às diferenças de resultados de impactos, essas categorias foram utilizadas nesse estudo de caso para a realização de uma análise comparativa com o uso de fatores de normalização globais.

Na sequência, nas seções 6.3 e 6.4, os fatores de conversão, para a harmonização dos resultados da caracterização e normalização com fatores globais, e a análise comparativa dos resultados com o uso desses fatores são apresentados e discutidos.

### 6.3 HARMONIZAÇÃO DOS INDICADORES DAS CATEGORIAS DE IMPACTO

Uma vez selecionadas as categorias de impacto, torna-se essencial a padronização das unidades entre as metodologias de AICV. Essa etapa, antes da análise comparativa, é necessária para que os resultados caracterizados sejam comparáveis entre os métodos, visto que cada metodologia de AICV apresenta uma variedade de categorias de impacto com nomenclaturas, substâncias e indicadores de categorias (unidades) diferentes.

Para a realização da conversão, utilizou-se como referência as unidades dos fatores de normalização globais recomendados no relatório técnico da Comissão Europeia – *European Commission - Joint Research Centre (EC-JRC)* (SALA *et al.*, 2017). O relatório caracteriza quantitativamente os impactos ambientais de 16 categorias de impacto da Pegada Ambiental (*Environmental Footprint – EF*), recomendando o seu uso como fatores de normalização para avaliar a relevância dos impactos ambientais em escala global (SALA *et al.*, 2017). De acordo com Sala *et al.* (2017), a EF abrange um conjunto de dados sobre as emissões e recursos extraídos no mundo, com base no ano de referência de 2010.

Dessa forma, as unidades das categorias de impacto com maior relevância para o estudo de caso foram levantadas (QUADRO 11), para que, posteriormente, os resultados da caracterização das metodologias de AICV fossem harmonizados com base nas unidades dos fatores de normalização da referência (TABELA 5).

Relativa à categoria de impacto uso do solo, devido à variação das considerações do inventário e indicadores entre as metodologias, não foi possível a

comparação, uma vez que a análise poderia resultar em interpretações inconsistentes.

QUADRO 11 – UNIDADES DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ENTRE OS MÉTODOS DE AICV

Categorias de Impacto	Indicadores de categoria por método						
	BEES+	CML Baseline	ILCD 2011	IMPACT 2002+	ReCiPe 2016	TRACI 2.1	Global
Aquecimento global	g CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CO <sub>2</sub> eq.
Eutrofização terrestre			molc N eq.				mol N eq.
Eutrofização marinha	g N eq.		kg N eq.		kg N eq.	kg N eq.	kg N eq.
Eutrofização de água doce		kg PO <sub>4</sub> eq.	kg P eq.	kg PO <sub>4</sub> P-lim	kg P eq.		kg P eq.
Oxidação fotoquímica	g NO <sub>x</sub> eq.	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	kg NMVOC eq.		kg NO <sub>x</sub> eq.	kg O <sub>3</sub> eq.	kg NMVOC eq.
Ecotoxicidade de água doce	g 2,4-D eq.	kg 1,4-DB eq.	CTUe	kg TEG water	kg 1,4-DCB	CTUe	CTUe
Carcinogênicos	g C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> eq.		CTUh	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq.	kg 1,4-DCB	CTUh	CTUh
Não-carcinogênicos	g C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> eq.		CTUh	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq.	kg 1,4-DCB	CTUh	CTUh
Toxicidade Humana		kg 1,4-DB eq.					
Inorgânicos inaláveis			kg PM 2.5 eq.	kg PM 2.5 eq.	kg PM 2.5 eq.	kg PM 2.5 eq.	disease incidences
Depleção de água	liters		m <sup>3</sup> water eq.		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup> water eq.
Energia não-renovável (combustível fóssil)	MJ surplus	MJ		MJ primary	kg oil eq.	MJ surplus	MJ
Depleção de recursos naturais (minerais)		kg Sb eq.		MJ surplus	kg Cu eq.		kg Sb eq.
Depleção de recursos naturais (minerais e energia)			kg Sb eq.				kg Sb eq.

FONTE: A autora (2020).

Diante das unidades das categorias de impacto (QUADRO 11), foi possível observar que a categoria de aquecimento global possui o mesmo indicador, embora o método BEES+ apresente diferença de grandeza, com resultados em gramas de CO<sub>2</sub> equivalentes, em vez de quilograma. Assim, essa foi a única transformação realizada para essa categoria.



Para a categoria de eutrofização, os métodos apresentam algumas variações de nomenclatura e considerações de substâncias no inventário. No caso do método BEES+, a eutrofização é um conjunto de substâncias associadas à eutrofização marinha e de água doce. Uma vez que a unidade da eutrofização dessa metodologia é proporcional à unidade definida para a eutrofização marinha do fator de normalização global, nesse caso, foi considerada a conversão da unidade grama de nitrogênio equivalente (g N eq.) em kg de N equivalente. Assim, o impacto foi associado à categoria de impacto eutrofização marinha. Ressalta-se que essa consideração pode implicar na alteração da magnitude dos impactos para o método BEES+, sendo descrita com mais detalhes na seção 6.4.1.

TABELA 5 – FATORES DE CONVERSÃO DAS UNIDADES ENTRE OS MÉTODOS DE AICV

Categorias de Impacto (Unidade de Referência)	Fatores de conversão das unidades						
	BEES+	CML Baseline	ILCD 2011	IMPACT 2002+	ReCiPe 2016	TRACI 2.1	Global
Aquecimento global (kg CO <sub>2</sub> eq.)	1,00E-03	1	1	1	1	1	1
Eutrofização terrestre (mol N eq.)			1				1
Eutrofização marinha (kg N eq.)	1,00E-03		1		1	1	1
Eutrofização de água doce (kg P eq.)		0,33	1	0,33	1		1
Oxidação fotoquímica (kg NMVOC eq.)	1,00E-03	1,69	1		1	N/C	1
Ecotoxicidade de água doce (CTUe)	861	983	1	0,387	983	1	1
Carcinogênicos (CTUh)	2,61E-07	1,81E-07	1	2,67E-06	1,81E-07	1	1
Não-carcinogênicos (CTUh)	5,13E-08	5,42E-08	1	9,26E-07	5,42E-08	1	1
Toxicidade Humana (CTUh)		2,35E-07					
Inorgânicos inaláveis (kg PM 2.5 eq.)			1	1	1	1	1
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	1		1		1		1
Energia não-renovável (combustível fóssil) (MJ)	6,94	1		1	42	6,94	1
Depleção de recursos naturais (minerais) (kg Sb eq.)		1		4,76E-02	2,50E-03		1
Depleção de recursos naturais (minerais e energia)			1				1

FONTE: A autora (2020).

Além disso, o método IMPACT 2002+ aborda a eutrofização como eutrofização aquática. No entanto, para essa metodologia, a conversão da unidade

foi realizada para a eutrofização de água doce, conforme o fator de caracterização definido para a conversão de kg PO<sub>4</sub> P-lim em kg P equivalentes.

Na categoria de oxidação fotoquímica, as unidades foram convertidas para kg NMVOC (*Non-methane volatile organic compound*) equivalentes, com exceção da unidade apresentada no método TRACI 2.1. O método utiliza valores equivalentes de ozônio (O<sub>3</sub>), limitando a comparação com as outras metodologias, devido à discrepância das substâncias consideradas no inventário e do valor absoluto de impacto (N/C – não comparável).

Já para a ecotoxicidade, considerou-se unicamente os impactos ocasionados em água doce. Assim, diferente da maior parte das metodologias analisadas nesse estudo, os métodos BEES+ e TRACI 2.1 não diferenciam a categoria de ecotoxicidade, trazendo como abordagem a união da ecotoxicidade aquática e terrestre. Devido a isso, para padronização do fator de conversão, considerou-se a conversão da ecotoxicidade desses métodos de g 2,4-D e CTUe, somente para a unidade padrão de ecotoxicidade de água doce (CTUe). Por essa razão, ainda que a conversão tenha sido executada, é importante destacar que a magnitude dos impactos pode ser expressiva quando comparada à magnitude dos impactos das outras metodologias para essa categoria.

Quanto às categorias de carcinogênicos e não-carcinogênicos, a única metodologia que aborda esses impactos de forma divergente é o CML *baseline*. O método apresenta os resultados a partir da união das duas categorias (com e sem efeitos cancerígenos) na categoria de “toxicidade humana”. Assim, não foi possível realizar a comparação do método CML para as categorias separadas, visto que a fração de carcinogênicos e não-carcinogênicos contidos no inventário não foi identificada. Dessa maneira, para que todas as metodologias fossem comparadas quanto ao potencial de toxicidade humana, somou-se os valores dos fatores de normalização globais das duas categorias de impacto para a conversão dos resultados obtidos pelo método CML.

Sobre a categoria associada ao consumo de recursos, esta foi dividida em duas categorias de impacto: energia não-renovável (combustível fóssil) e depleção de recursos naturais (minerais). Uma das observações realizadas foi relativa à nomenclatura do método BEES+. Ainda que a categoria de impacto seja nomeada como “consumo de recursos naturais”, o inventário de substâncias está inteiramente associado ao consumo de energia não-renovável.

Relativa à categoria apresentada pelo método ILCD 2011, o inventário de substâncias é a união de diversos minerais e energias, sendo necessária a adaptação do fator de normalização para tornar os resultados de impacto desse método comparáveis. Assim, o fator de normalização foi calculado com base na multiplicação do fator de caracterização da “energia não especificada” (contida no inventário de substâncias do método ILCD) pelo fator de normalização global de energia não-renovável. Após isso, esse valor foi somado ao valor do fator de normalização indicado para recursos naturais (minerais).

Nesse caso particular, a categoria de impacto para o ILCD foi denominada como “depleção de recursos naturais (minerais e energia), porém o fator de normalização utilizado foi o resultado do cálculo efetuado, referente ao valor  $6,41 \times 10^{-2}$  kg Sb equivalentes.

Finalmente, tanto a categoria de inaláveis inorgânicos quanto a depleção de água não tiveram variações de unidade entre as metodologias, estabelecendo-se dessa forma um fator de conversão igual a um.

Com base nas delimitações realizadas nessa seção e após a conversão das unidades dos impactos potenciais para uma métrica comum, foi possível a análise comparativa dos resultados normalizados entre os métodos, apresentada na seção 6.4.

#### 6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NORMALIZADOS DOS MÉTODOS DE AICV COM FATORES DE NORMALIZAÇÃO GLOBAIS

Essa seção está dividida em duas subseções: análise comparativa dos resultados da normalização externa (6.4.1) e análise comparativa da contribuição das categorias de impacto por método de AICV (6.4.2).

Na primeira subseção, os resultados da normalização externa, com base no uso dos fatores de normalização globais, recomendados pela EC-JRC, são apresentados e confrontados com os resultados da normalização das metodologias de AICV, previamente apresentados.

Para facilitar a visualização comparativa do perfil dos impactos normalizados pelos métodos e em escala global, foi efetuado o cálculo do percentual de participação de cada categoria de impacto entre cada sistema de vedação. Dessa forma, para cada método de AICV, foi criado um gráfico que representa a magnitude



total de impacto entre as categorias e outro gráfico que representa o percentual de participação das categorias nos sistemas de vedações. Além disso, os resultados da normalização pelos métodos de AICV foram apresentados com a variação da cor roxa, enquanto os resultados da normalização global com a variação da cor azul.

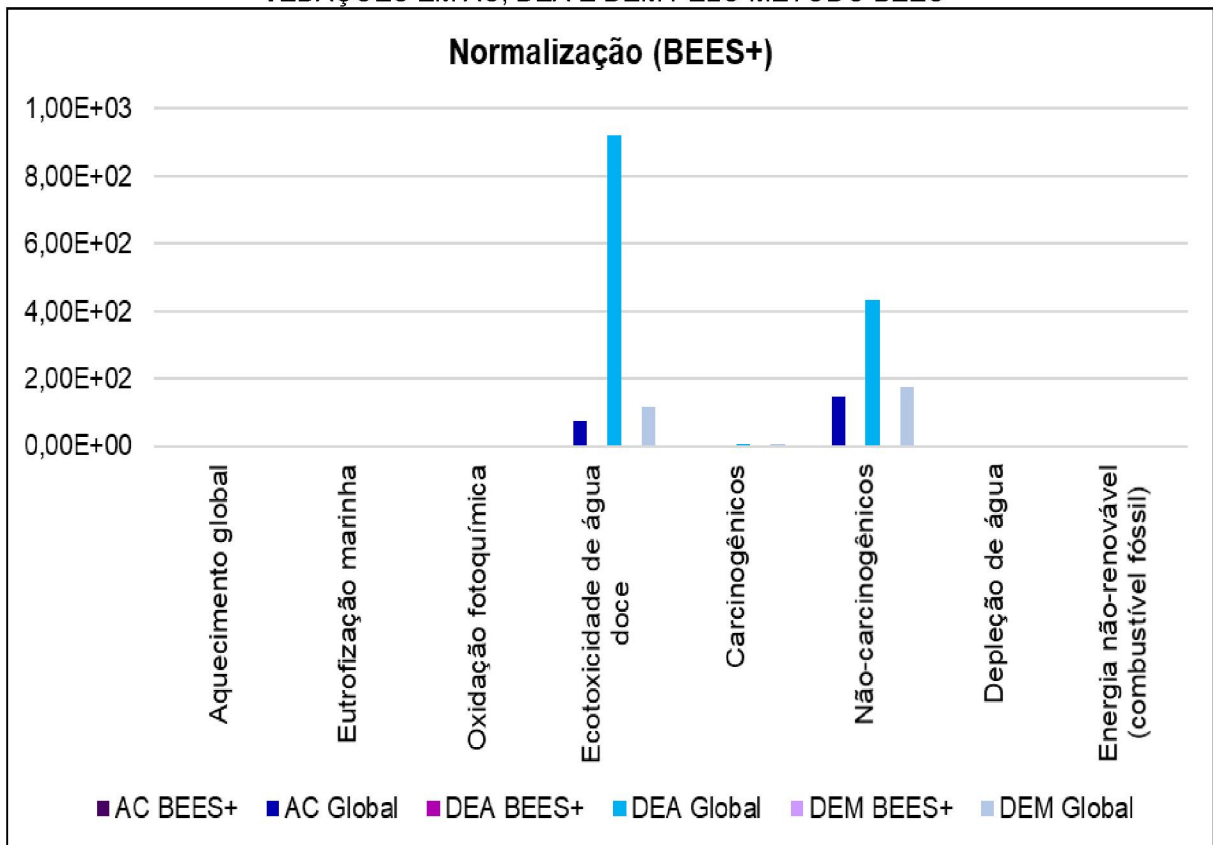
Por fim, na segunda subseção, os resultados de cada categoria de impacto foram agrupados e analisados comparativamente, para a verificação do nível de contribuição das categorias e sensibilidade dos resultados, por método de AICV.

Todos os resultados dos cálculos efetuados para geração dos gráficos apresentados nessa seção estão disponíveis no APÊNDICE 14.

#### 6.4.1 Análise comparativa dos resultados da normalização

A primeira análise realizada nessa subseção foi referente à magnitude dos impactos potenciais normalizados pelos fatores globais e pelo método BEES+ (GRÁFICO 37).

GRÁFICO 37 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO BEES+



FONTE: A autora (2020).

Diante dos resultados apresentados, pode-se observar o elevado grau de importância das categorias de ecotoxicidade de água doce e não-carcinogênicos, principalmente, para as paredes em *drywall* com estrutura de aço. Isso significa que no sistema em AC e nos sistemas em DEA e DEM, a produção de clínquer e a produção de aço em forno elétrico, respectivamente, foram os processos que mais contribuíram para a ecotoxicidade de água doce e não-carcinogênicos em escala global.

Ainda, é relevante destacar que, à vista desse resultado, os materiais utilizados nas vedações influenciaram pouco no comportamento da normalização, ou seja, os resultados de impacto apresentaram a mesma tendência para os três sistemas em análise. A baixa contribuição nas categorias restantes, somente evidencia o grau de importância definido aos impactos em escala global.

Além disso, salienta-se que os inventários da metodologia BEES+ foram construídos com base nas substâncias e áreas de impactos mais sensíveis para o contexto norte americano. Dessa forma, ainda que os resultados tenham sido harmonizados para permitir a comparação coerente entre as categorias de impacto, as intervenções que antecedem a etapa de caracterização não foram alteradas, para que os resultados da metodologia não fossem descaracterizados.

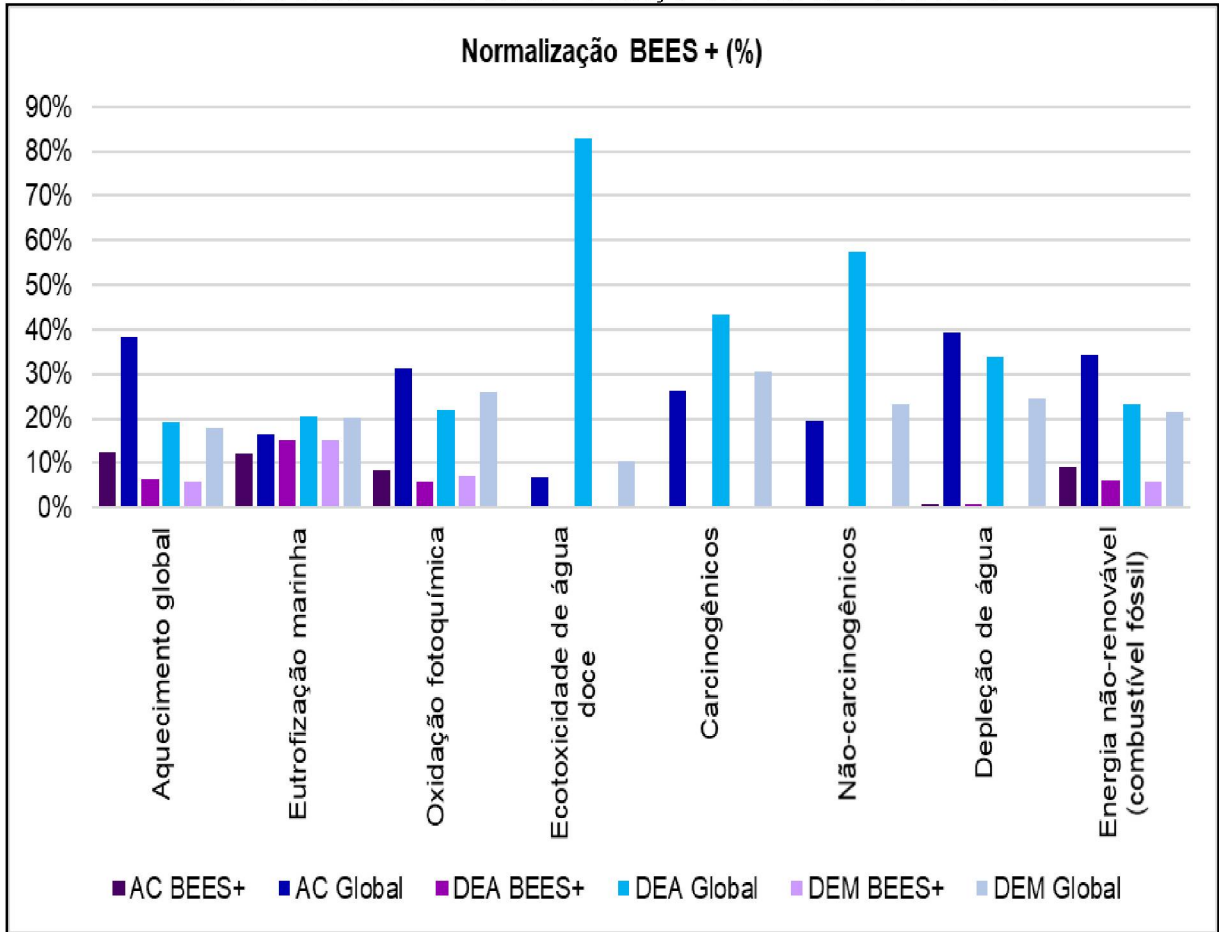
Comparando os resultados fornecidos com o uso dos fatores de normalização globais e os resultados normalizados dessa metodologia, foi perceptível a mudança de prioridade das categorias de impacto. As categorias de maior significância para os sistemas em AC, DEA e DEM, as quais eram o aquecimento global, eutrofização, depleção de recursos naturais, depleção de água e oxidação fotoquímica, foram categorias com contribuições muito baixas para a normalização externa global.

Além disso, o GRÁFICO 38 foi criado para facilitar a visualização das alterações relativas ao potencial de impacto de cada categoria, representando, portanto, o percentual de contribuição das categorias entre os sistemas de vedações.

Pode-se observar que, com exceção das categorias de aquecimento global, eutrofização marinha, oxidação fotoquímica e energia não-renovável (combustíveis fósseis), a normalização global evidenciou uma proporção de impacto superior nos três sistemas de vedações analisados. Vale salientar que o comportamento dos

resultados apresentados nesse gráfico são estimativas de contribuição de cada categoria de impacto. Assim, o valor absoluto de uma determinada categoria, comparada a outra, não está indicado nessa análise.

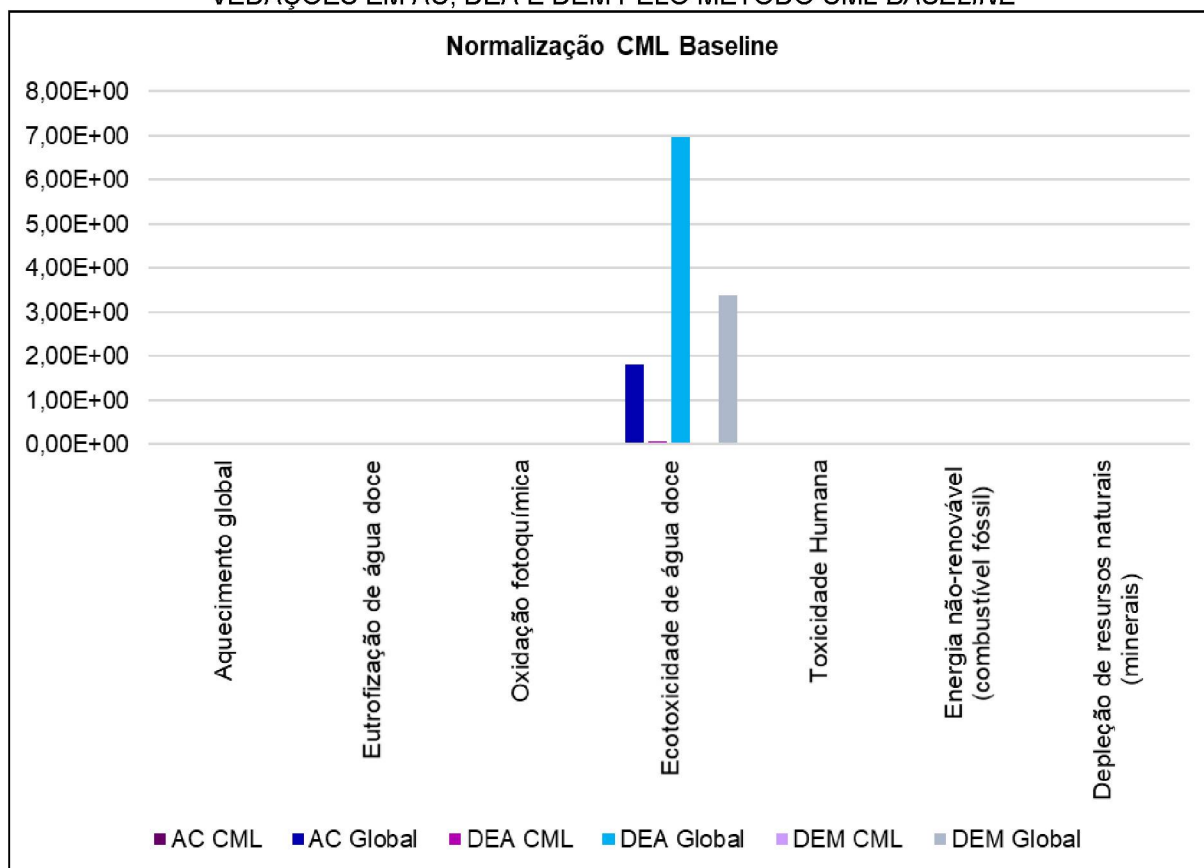
GRÁFICO 38 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO BEES+



FONTE: A autora (2020).

Em relação aos resultados da normalização global com o método CML *Baseline* (GRÁFICO 39), foi possível observar a mesma tendência da normalização global da metodologia BEES+.

GRÁFICO 39 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO CML *BASELINE*



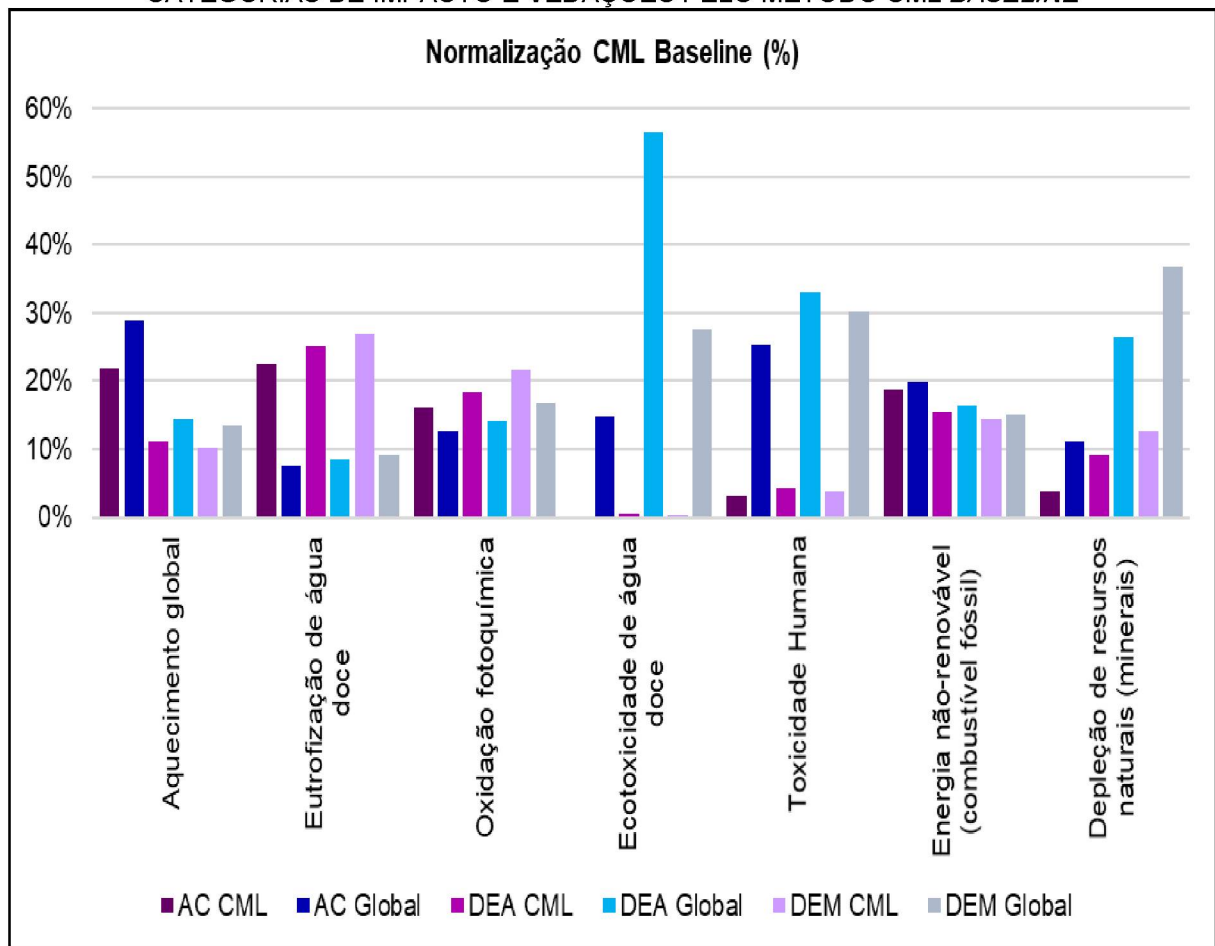
FONTE: A autora (2020).

A ecotoxicidade de água doce, também, teve destaque com o uso do método CML *Baseline*, embora os processos de maior significância apontados tenham sido processos associados ao tratamento de resíduos de mineração, produção de aço, produção de carvão mineral e produção de compostos químicos (tratamento da madeira e do aço) para as três paredes.

Em comparação com os resultados da normalização pelo próprio CML, verificou-se que a categoria com maior magnitude era a ecotoxicidade de água marinha. Entretanto, como essa categoria não foi selecionada para a análise comparativa, devido à ausência de um fator de normalização global, pode-se alegar que essa alteração indica que a ecotoxicidade aquática, ou seja, sem diferenciação do tipo de água, apresenta grande magnitude tanto em escala global quanto pela metodologia CML. Esse resultado pode ser justificado em razão do método CML possuir um escopo de aplicação global, com exceção para as categorias acidificação e oxidação fotoquímica, que são apresentadas com base no contexto europeu (EC-JRC, 2010a).

Além disso, de acordo com o GRÁFICO 40, com a análise da participação percentual das categorias de impacto em cada sistema de vedação, os resultados normalizados globalmente apresentaram magnitude superior à magnitude da normalização por meio do método CML *Baseline*, com exceção para as categorias de eutrofização de água doce, oxidação fotoquímica e energia não-renovável (combustíveis fósseis).

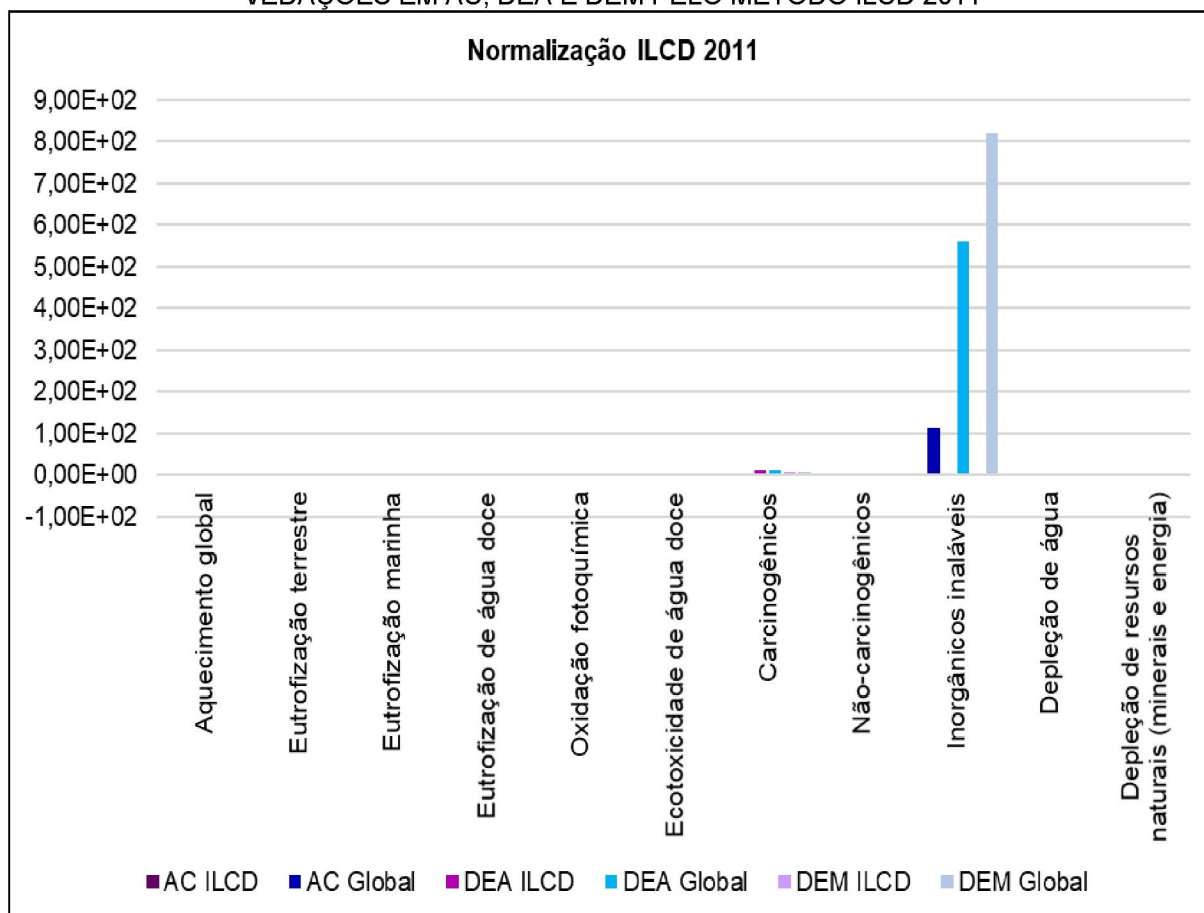
GRÁFICO 40 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO CML *BASELINE*



FONTE: A autora (2020).

Na sequência, o GRÁFICO 41 indica a contribuição comparativa das categorias normalizadas globalmente e por meio do método ILCD 2011.

GRÁFICO 41 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO ILCD 2011



FONTE: A autora (2020).

Nesse caso, a normalização indicou que a categoria de inorgânicos inaláveis (ou material particulado) apresentou maior contribuição para os três sistemas de vedações, com destaque para o sistema em *drywall* com estrutura de madeira. O resultado indica que, em escala global, a produção de calor e o processo de secagem da madeira em estufa foram os mais significativos para a formação de materiais particulados.

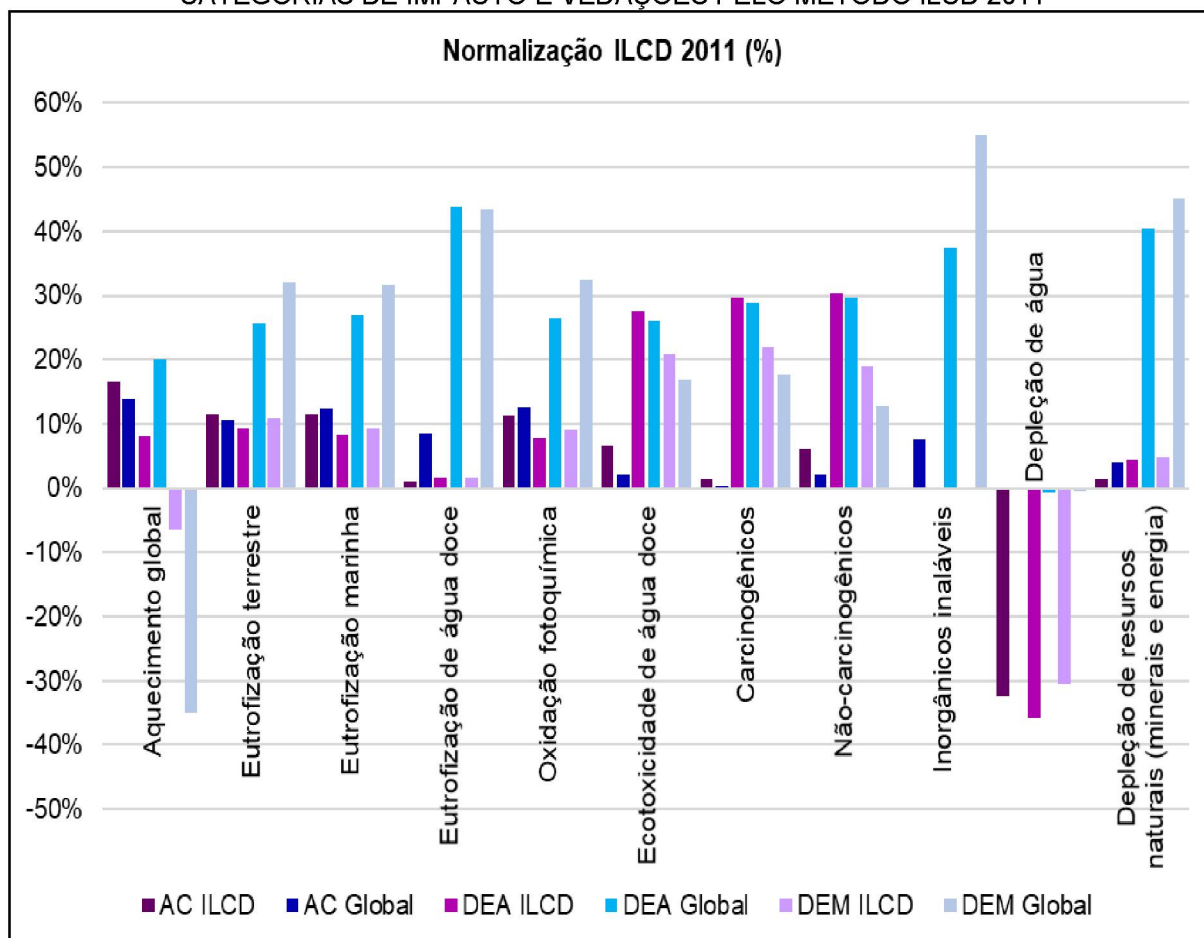
Em comparação com o resultado normalizado fornecido pelo método ILCD 2011, a toxicidade humana com efeitos cancerígenos não foi a categoria mais crítica. Essa alteração de magnitude pode ser justificada pelo comportamento dos materiais particulados, que ficam suspensos no ar. Enquanto isso, para que as substâncias com efeitos cancerígenos ocasionem impactos na saúde humana, estas podem necessitar de um nível mais elevado de exposição. Em outras palavras, a dimensão da área considerada pode influenciar menos ou mais nessa categoria.

Ainda, no GRÁFICO 42, é possível observar o comportamento dos



resultados da normalização global e pela metodologia ILCD em cada categoria de impacto.

GRÁFICO 42 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO ILCD 2011

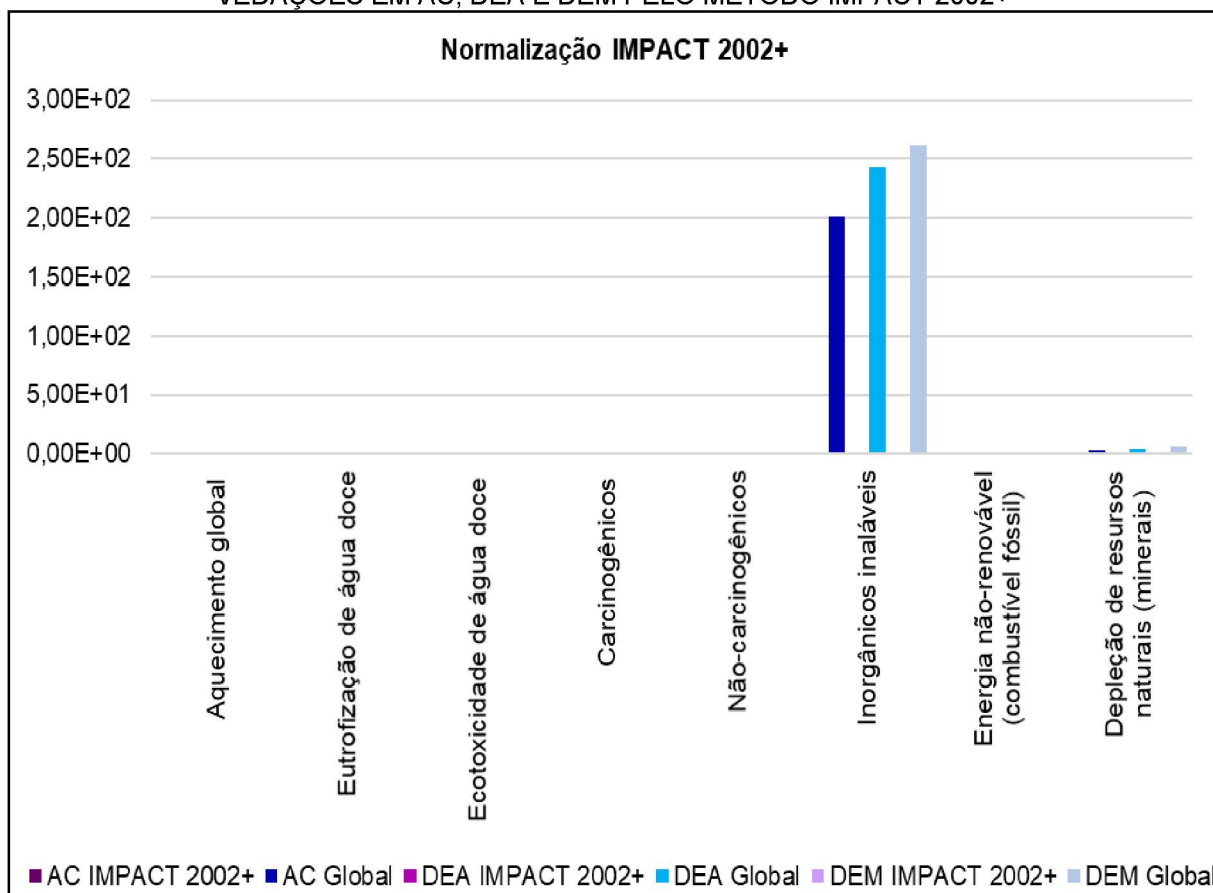


FONTE: A autora (2020).

Diferente da escala de contribuição apresentada pelos métodos BEES+ e CML *Baseline*, não houve tanta discrepância da magnitude das categorias de impacto normalizadas globalmente para o método ILCD, as quais foram o aquecimento global, eutrofização terrestre, eutrofização marinha, ecotoxicidade de água doce, carcinogênicos e não-carcinogênicos. Por outro lado, nota-se um aumento significativo do nível de participação dos sistemas em DEA e DEM, enquanto os resultados para o sistema em AC sofreram poucas alterações.

Sobre a magnitude dos impactos normalizados distribuídos entre as categorias de impacto analisadas para a metodologia IMPACT 2002+ (GRÁFICO 43), esta foi semelhante aos resultados do método ILCD 2011.

GRÁFICO 43 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO IMPACT 2002+



FONTE: A autora (2020).

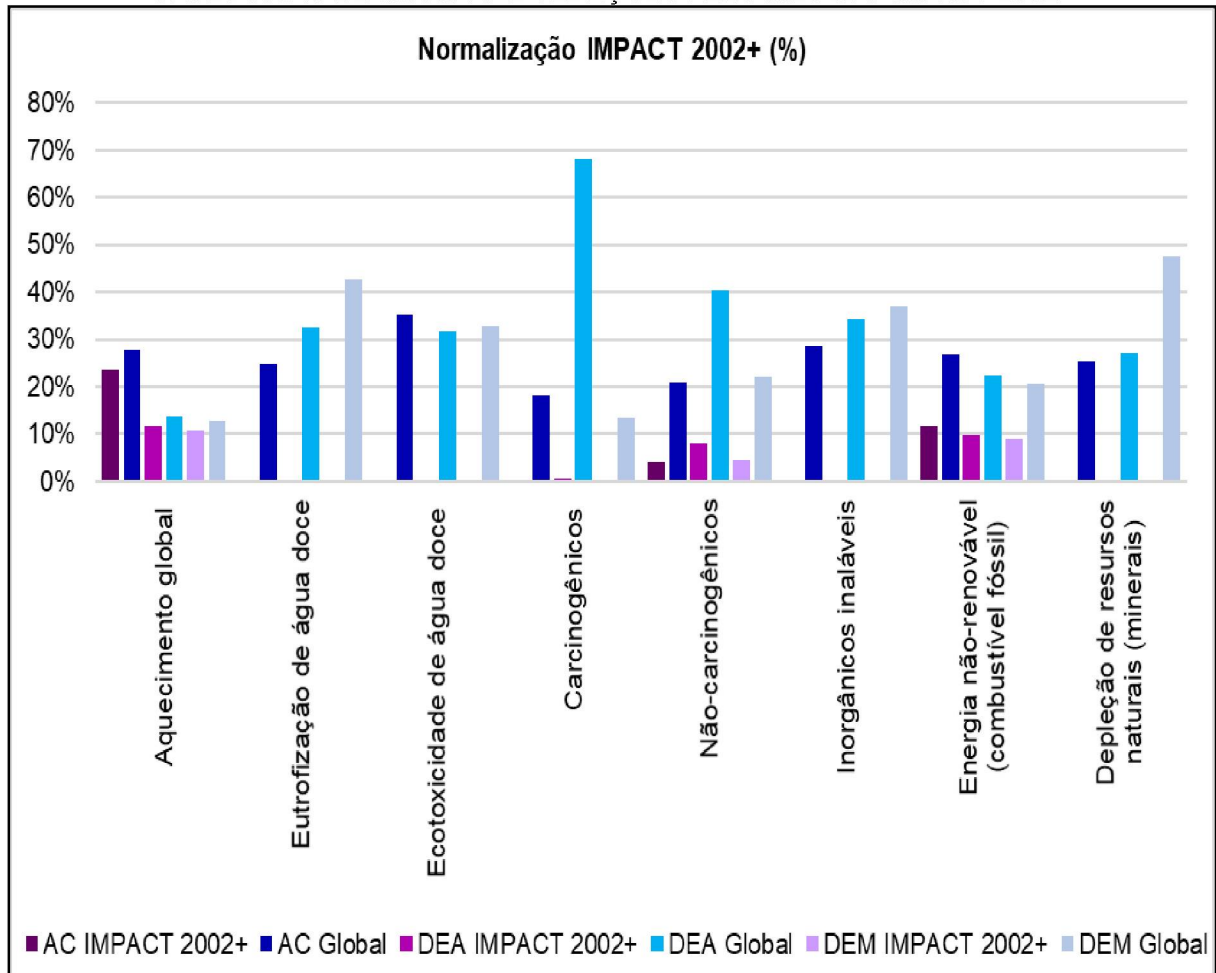
Por outro lado, a categoria de inorgânicos inaláveis apresentou uma distribuição mais equilibrada entre as vedações analisadas. Além disso, os processos mais contribuintes para essa categoria foram diferentes dos evidenciados pelo método ILCD 2011, destacando-se a produção de clínquer, blocos cerâmicos, calor e gesso.

Comparativamente, as categorias com maior magnitude para os sistemas de vedação, pela normalização da metodologia IMPACT 2002+ (que considera o escopo europeu), eram o aquecimento global, inorgânicos inaláveis e energia não-renovável. Assim, com exceção da categoria inorgânicos inaláveis, as outras categorias tiveram queda expressiva de contribuição para a escala global.

Além disso, sobre outra perspectiva, é possível observar no GRÁFICO 44 que somente o aquecimento global apresentou um maior nível de contribuição para a normalização da própria metodologia. Para as outras categorias, com exceção da energia não-renovável (combustíveis fósseis) e não-carcinogénicos, a contribuição do resultado normalizado globalmente foi superestimada para as vedações.



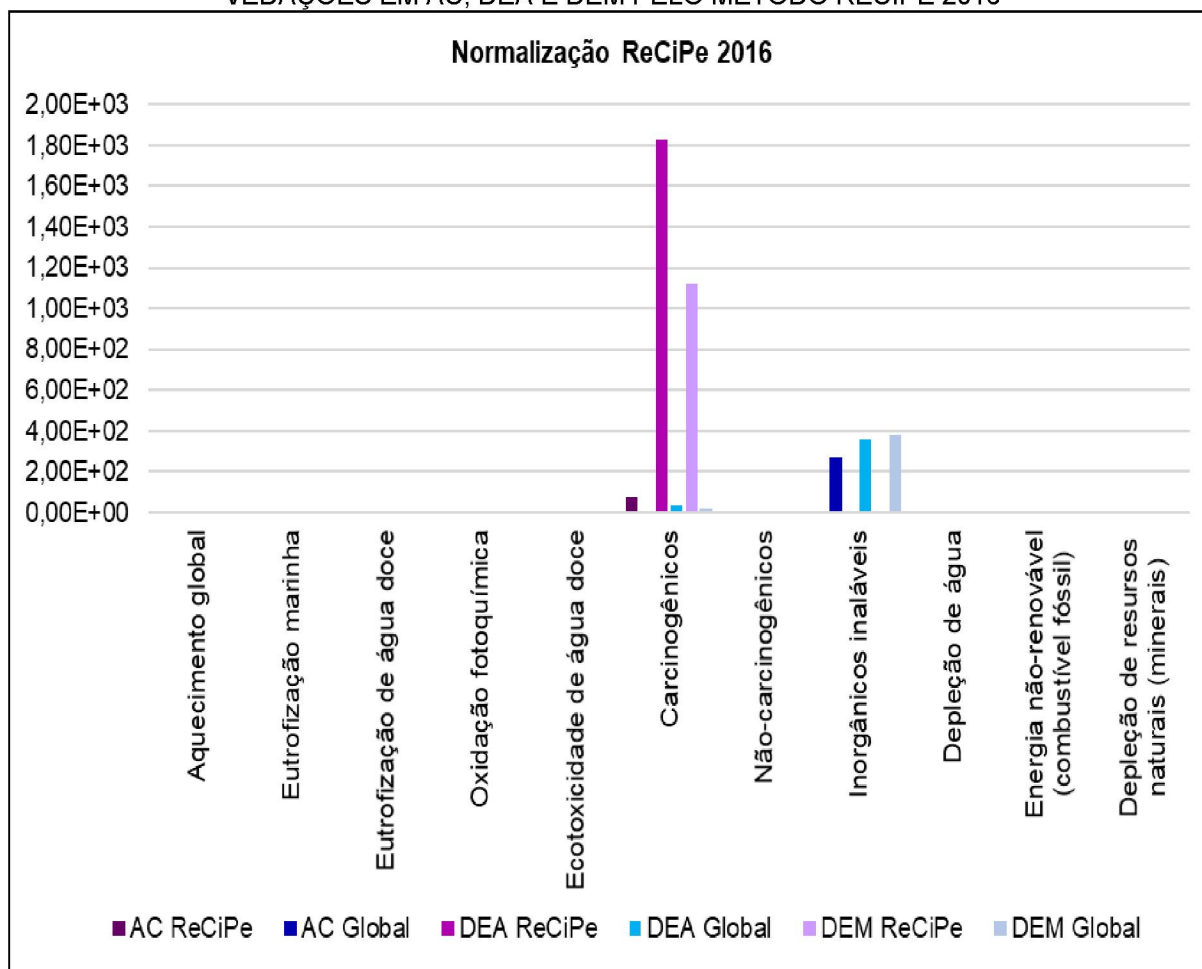
GRÁFICO 44 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO IMPACT 2002+



FONTE: A autora (2020).

Para o método ReCiPe 2016, os resultados demonstraram algumas variações quando comparados aos resultados previamente apresentados (GRÁFICO 45). Diferente do ILCD, os processos mais significativos em escala global para a formação de materiais particulados foram os mesmos apresentados pelo método IMPACT 2002+, ou seja, a produção de clínquer, blocos cerâmicos, calor e gesso. De modo comparativo aos resultados normalizados pelo ReCiPe 2016, o mesmo padrão foi visto para o ILCD 2011, no qual a categoria de carcinogênicos apresentou maior contribuição normalizada. Por outro lado, mesmo com a aplicação dos fatores de normalização globais, a categoria de carcinogênicos evidenciada na normalização do método ReCiPe 2016 ainda foi a categoria mais significativa em termos de magnitude.

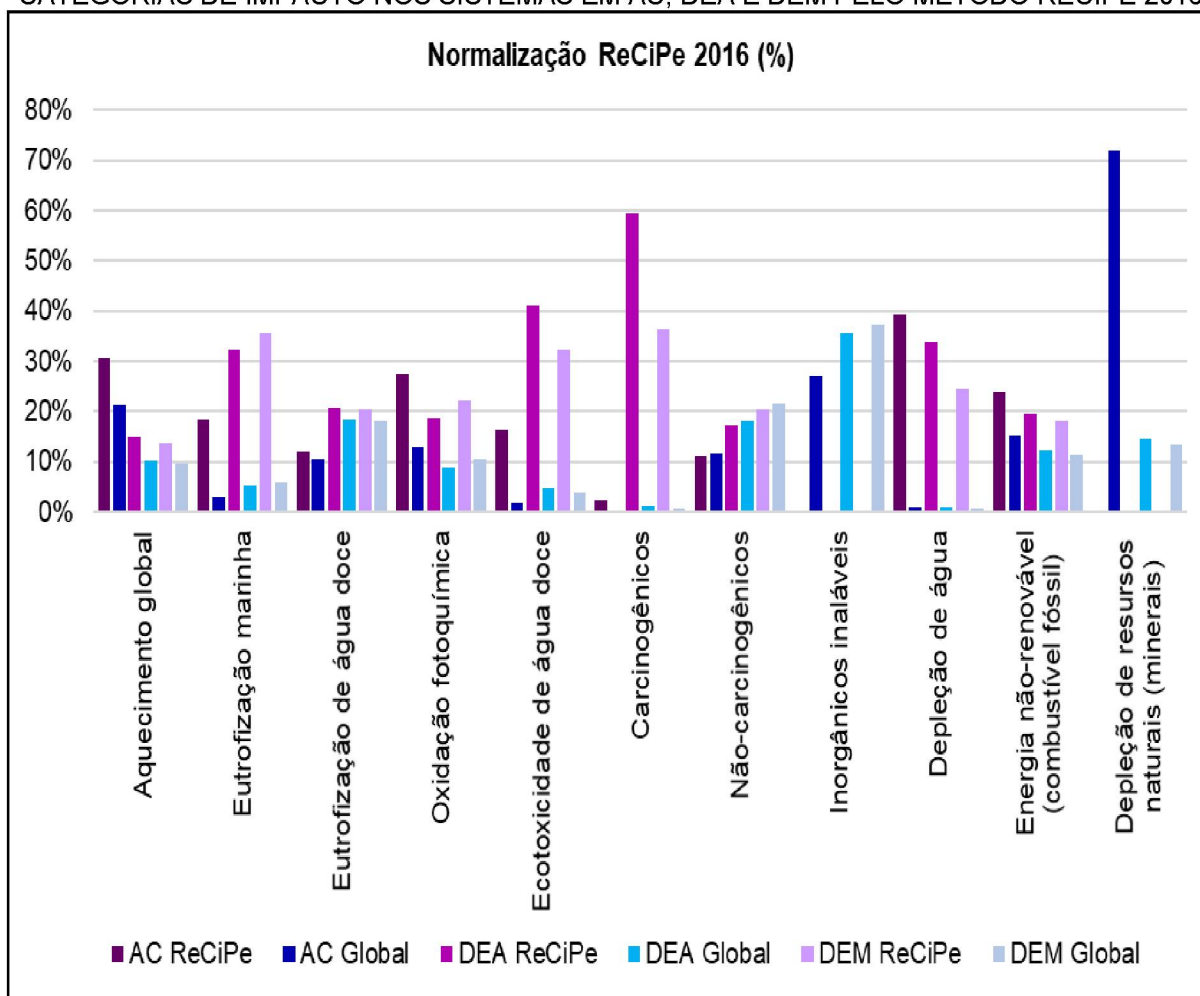
GRÁFICO 45 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

Além disso, o GRÁFICO 46 revela resultados semelhantes da normalização do método ReCiPe 2016 e global. Somente as categorias de inorgânicos inaláveis e depleção de recursos naturais (minerais) apresentaram altos valores em escala global.

GRÁFICO 46 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO NOS SISTEMAS EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO RECIPE 2016



FONTE: A autora (2020).

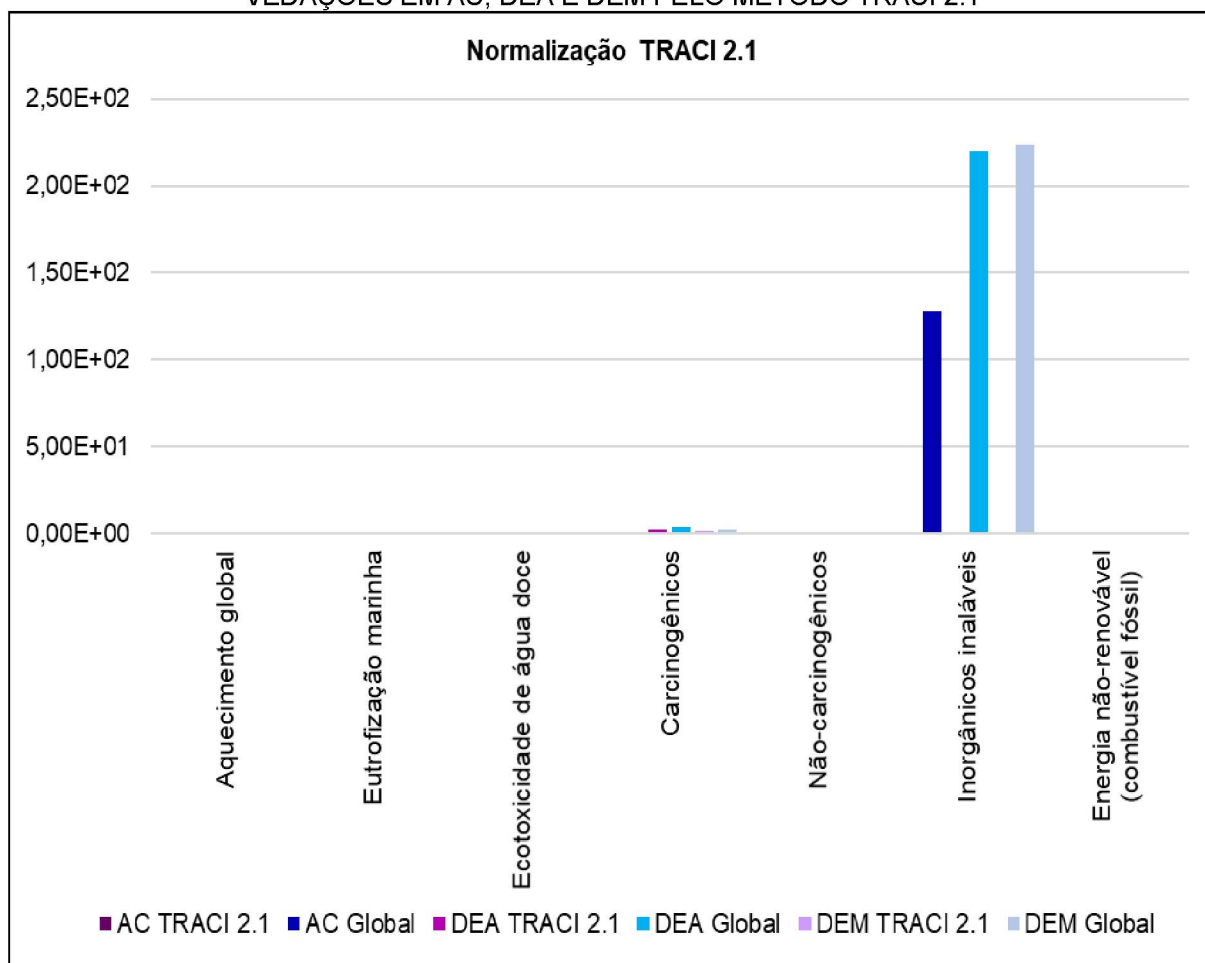
Finalmente, os resultados normalizados do método TRACI 2.1 e em escala global foram apresentados e comparados, conforme ilustrado no GRÁFICO 47.

Novamente, a categoria de inorgânicos inaláveis mostrou-se muito significativa em relação às demais categorias de impacto. Nesse caso, os processos que mais contribuíram para o aumento desses valores foram relativos à produção de gesso e de calor, tanto para os sistemas de vedações em DEA quanto para em DEM. Já para o sistema em AC, a queima de diesel, seguido da produção de bloco cerâmico e clínquer, foram os processos que mais influenciaram na magnitude absoluta dessa categoria.

Comparando esse resultado com o resultado da normalização do método TRACI 2.1, a categoria de carcinogênicos tinha sido mais significativa, principalmente, para as paredes com estrutura de aço. Por outro lado, pelos fatores de normalização globais, a categoria de carcinogênicos se mostrou quase

imperceptível no gráfico, enquanto a categoria de inorgânicos inaláveis foi evidenciada.

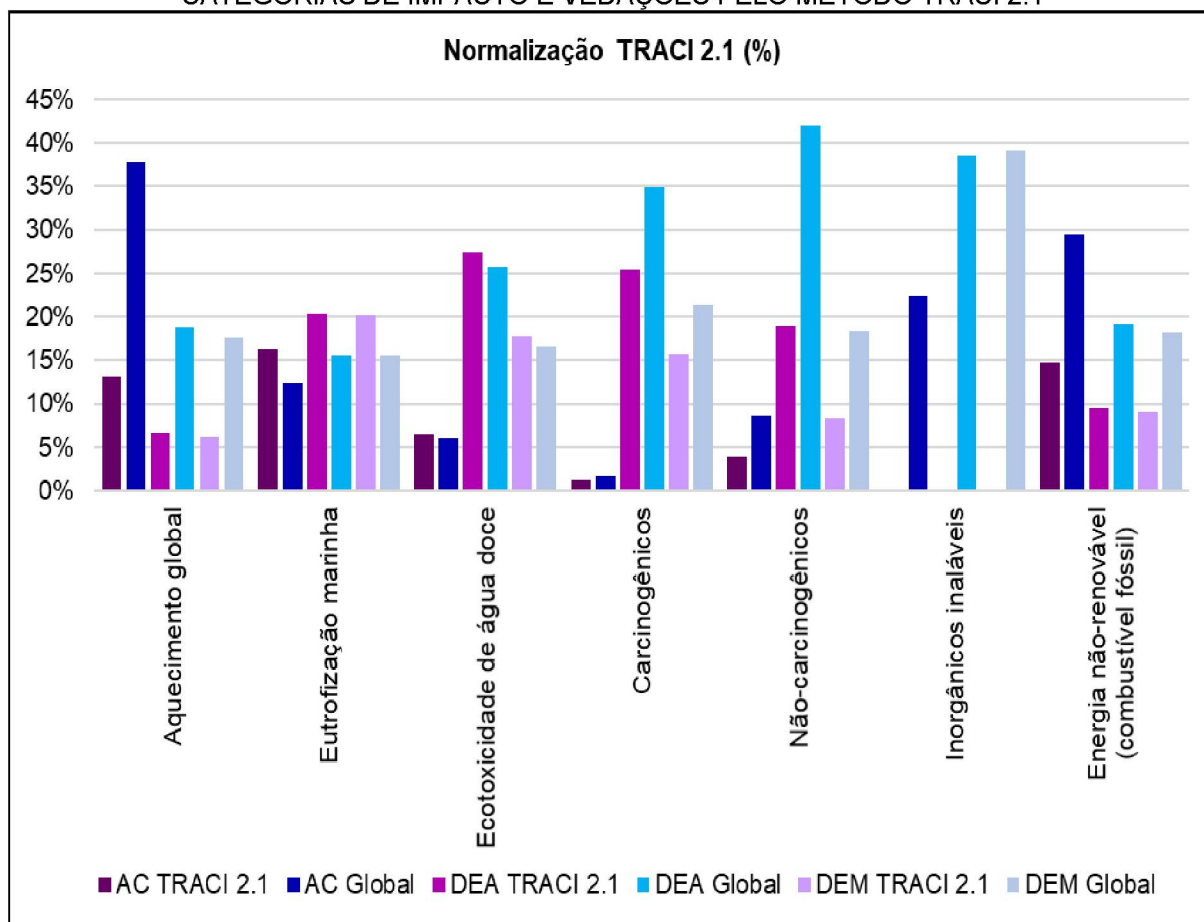
GRÁFICO 47 – COMPARATIVO DA MAGNITUDE TOTAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

Relativo ao percentual de participação de cada categoria de impacto entre as vedações (GRÁFICO 48), é possível constatar um comportamento similar dos resultados normalizados pelo método e em escala global. Por outro lado, a magnitude da categoria de inorgânicos inaláveis sofreu uma extrapolação superior para os resultados da normalização global, indicando o elevado grau de importância atribuído a esta categoria.

GRÁFICO 48 – COMPARATIVO PERCENTUAL DOS IMPACTOS NORMALIZADOS ENTRE AS CATEGORIAS DE IMPACTO E VEDAÇÕES PELO MÉTODO TRACI 2.1



FONTE: A autora (2020).

Em síntese, com o uso dos fatores de normalização globais, os resultados foram tendenciosos, sobretudo, para as categorias de impacto de inorgânicos inaláveis e ecotoxicidade de água doce. Além de que, apesar dos diferentes materiais empregados nas vedações, esses resultados revelaram o mesmo desempenho nas mesmas categorias para os três tipos de paredes.

Além disso, ao somar a contribuição das categorias de impacto analisadas nessa seção, por método de AICV, foi possível verificar que, para esse estudo de caso específico e categorias analisadas, o sistema em AC apresentou menor potencial de impacto em escala global (QUADRO 12).

Dessa forma, o aquecimento global foi significativamente reduzido, indicando que a produção de aço e o tratamento de resíduos foram os mais impactantes entre os sistemas.

QUADRO 12 – COMPARATIVO DOS IMPACTOS POTENCIAIS TOTAIS GLOBAIS DAS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM ENTRE OS MÉTODOS DE AICV

MÉTODOS DE AICV	POTENCIAL DE IMPACTO AMBIENTAL TOTAL GLOBAL (PONTUAÇÃO ÚNICA)		
	Maior magnitude	Média magnitude	Menor magnitude
BEES+	DEA	DEM	AC
CML Baseline	DEA	DEM	AC
ILCD 2011	DEM	DEA	AC
IMPACT 2002+	DEM	DEA	AC
ReCiPe 2016	DEM	DEA	AC
TRACI 2.1	DEM	DEA	AC

FONTE: A autora (2020).

#### 6.4.2 Análise comparativa da contribuição das categorias de impacto por método de AICV

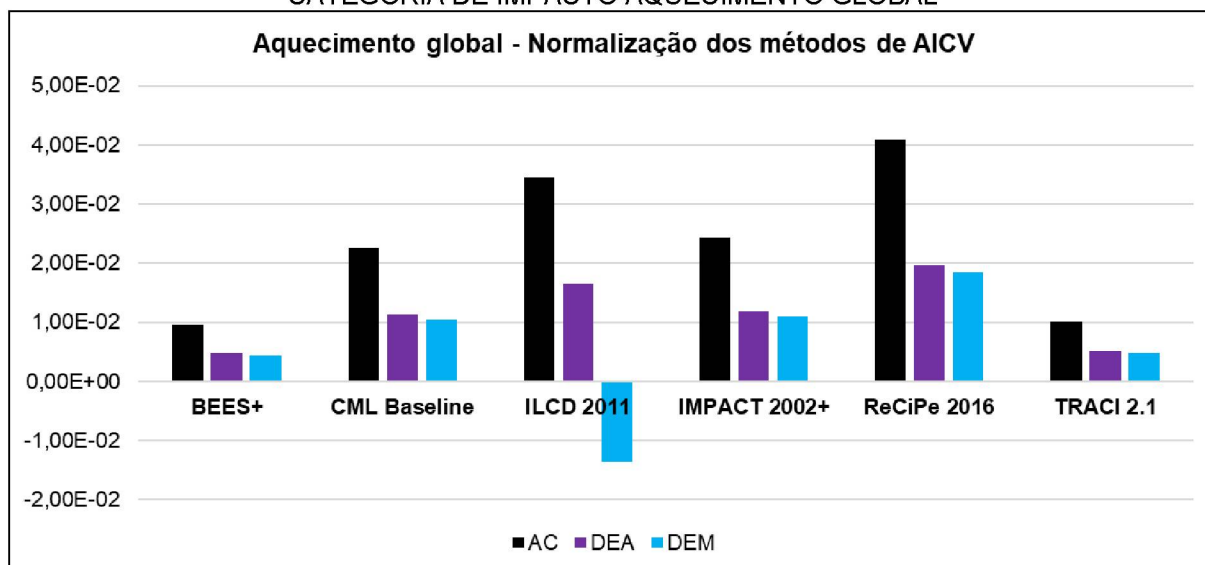
A presente seção foi definida para a análise das possíveis implicações da escolha do método de AICV nos resultados da normalização e para a verificação comparativa do padrão de impacto resultante da normalização global.

Com base nisso, os GRÁFICOS 49 e 50 enfatizam os resultados normalizados da contribuição da categoria de aquecimento global (ou mudanças climáticas), com o uso dos fatores de normalização dos métodos de AICV e globais, respectivamente.

É notável pelo GRÁFICO 49 que, em escala de grandeza, as metodologias ILCD 2011, IMPACT 2002+ e ReCiPe 2016 apresentaram os maiores valores absolutos para essa categoria de impacto, principalmente, para o sistema em AC.

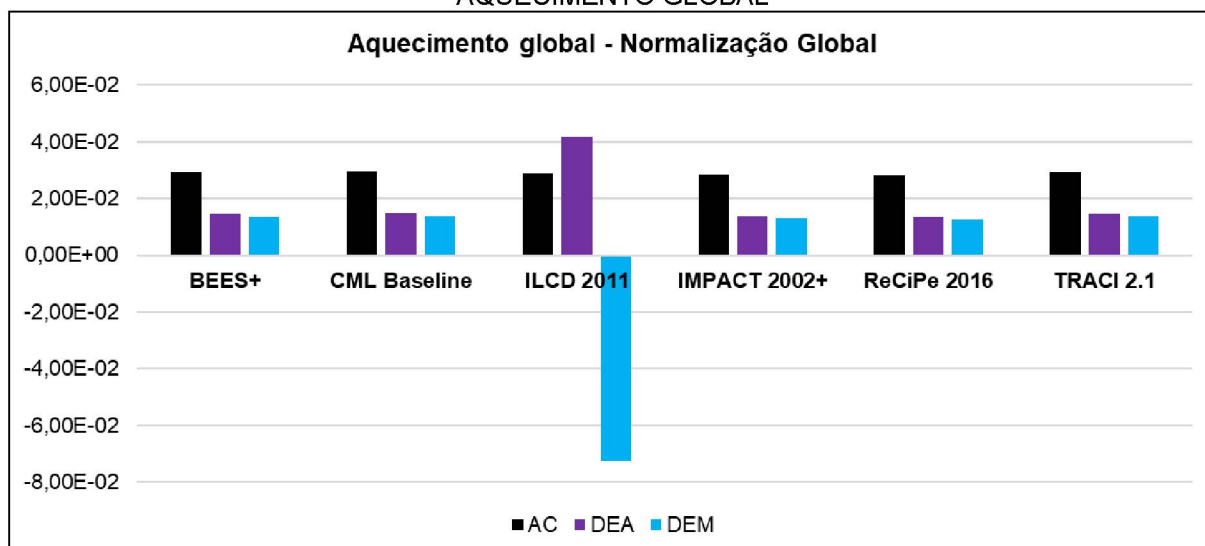


GRÁFICO 49 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 50 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL



FONTE: A autora (2020).

As metodologias BEES+, CML *Baseline*, ILCD 2011, IMPACT 2002+ e TRACI 2.1 expressam os resultados das emissões de kg de CO<sub>2</sub> equivalentes para o aquecimento global, com base em um horizonte de tempo de 100 anos (GWP 100a). Uma ressalva é feita para o método ReCiPe 2016, que considera para a perspectiva igualitária (E) um horizonte de tempo de 1000 anos (RIVM, 2017). A perspectiva igualitária do método ReCiPe foi escolhida por levar em consideração todos os possíveis impactos para os dados disponíveis à longo prazo. Por essa razão,

ressalta-se essa diferenciação apresentada nessa versão avaliada da metodologia durante a interpretação dos resultados comparativos.

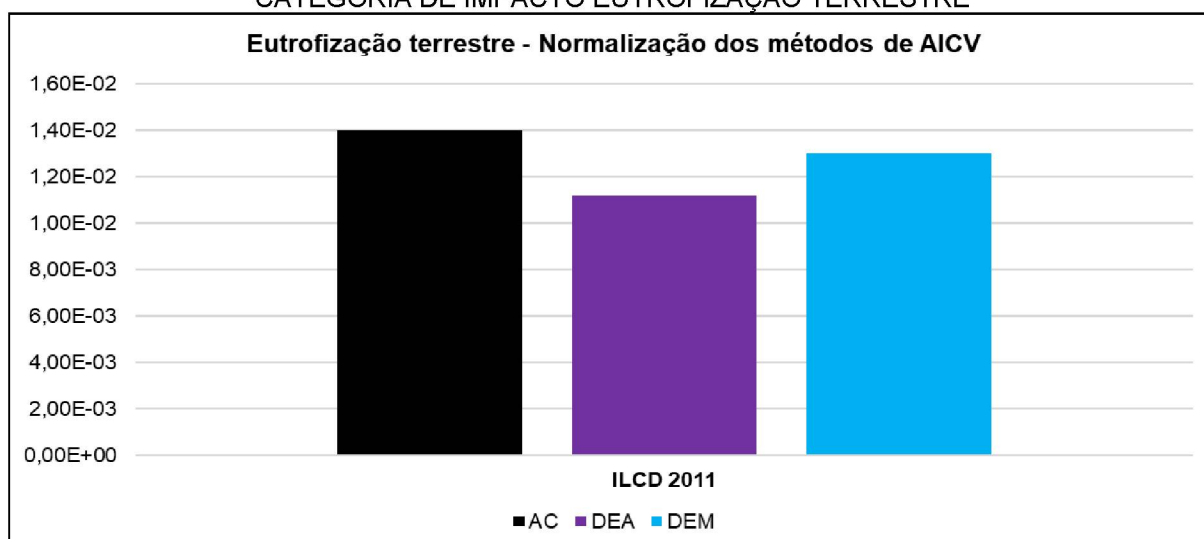
Além disso, o método IMPACT 2002+, possui a categoria de aquecimento global com a abordagem de *midpoint* e *endpoint*. No caso da avaliação de danos, o horizonte de tempo considerado para o aquecimento global, denominado nesse caso de mudanças climáticas, é de 500 anos. Entretanto, os resultados das categorias de *endpoint* não foram analisadas nesse estudo.

Contudo, a partir da harmonização dos resultados da caracterização e normalização global (GRÁFICO 50), ocorreu uma pequena variação da magnitude do aquecimento global para as vedações. Vale ressaltar, também, que os resultados se demonstraram consistentes entre as metodologias, embora tenha ocorrido diferenças de magnitude.

Além disso, somente o método ILCD apresentou maior alteração para a normalização global, indicando que o sistema em DEA se tornou mais significativo do que o sistema em AC. Em síntese, ocorreu uma modificação dos processos com os maiores valores absolutos de contribuição, sinalizando que, neste caso particular, a produção de aço influenciou mais do que a produção de cimento Portland.

Na sequência, os resultados relativos à eutrofização terrestre foram apresentados nos GRÁFICOS 51 e 52. Nesse caso, somente foi possível a conversão e comparação dessa categoria, para o resultado normalizado pelo método e globalmente, com o uso do método ILCD.

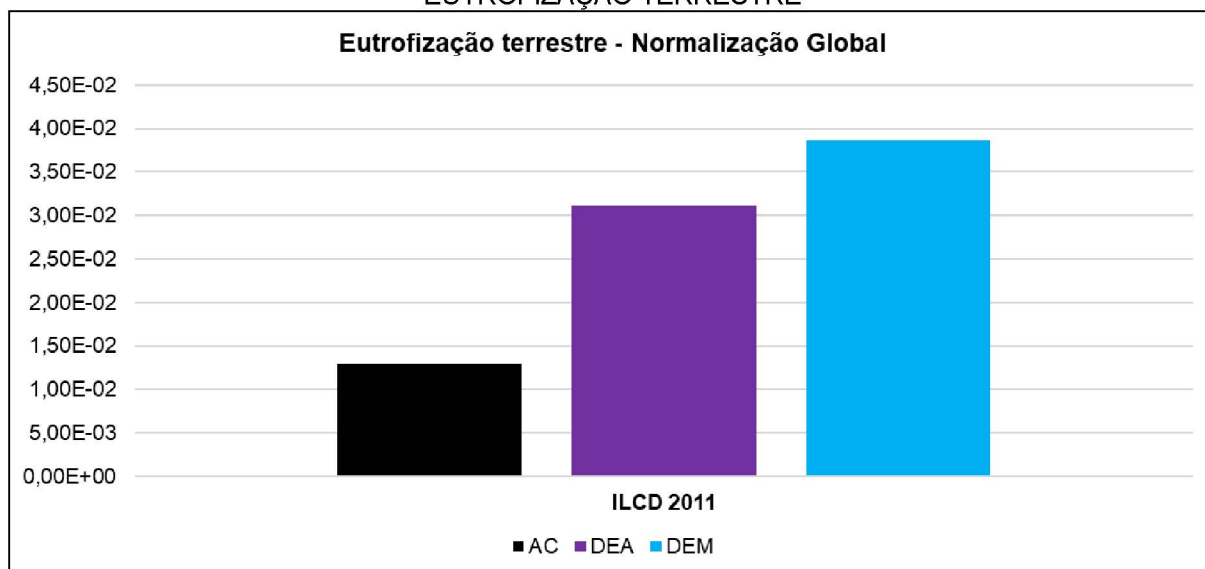
GRÁFICO 51 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO TERRESTRE



FONTE: A autora (2020).



GRÁFICO 52 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO TERRESTRE

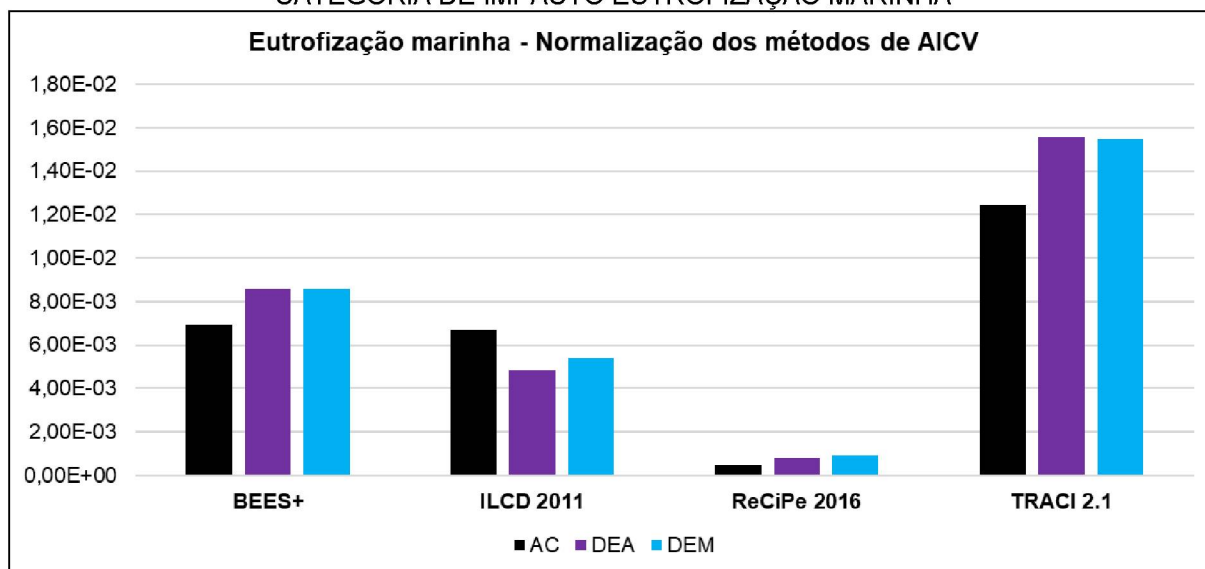


FONTE: A autora (2020).

Diante dos resultados, é evidente a alteração da magnitude dos impactos dessa categoria entre os sistemas de vedações. A vedação em AC teve queda significativa nessa categoria para a normalização global, enquanto o sistema em DEM foi evidenciado. Com base nisso, os processos mais significativos para o sistema em AC, apontados pelo ILCD, foram a produção de clínquer, blocos cerâmicos e queima de diesel, enquanto os mais significativos para o DEM, apontados pela normalização global, foram a produção de calor (diferente do gás natural), o processo de galvanização (zincagem) das peças metálicas e o tratamento de resíduos biológicos (compostagem da madeira). Assim, de acordo com a normalização global, os processos mais relevantes para a eutrofização terrestre foram os destacados por aqueles que envolveram os materiais do sistema em DEM.

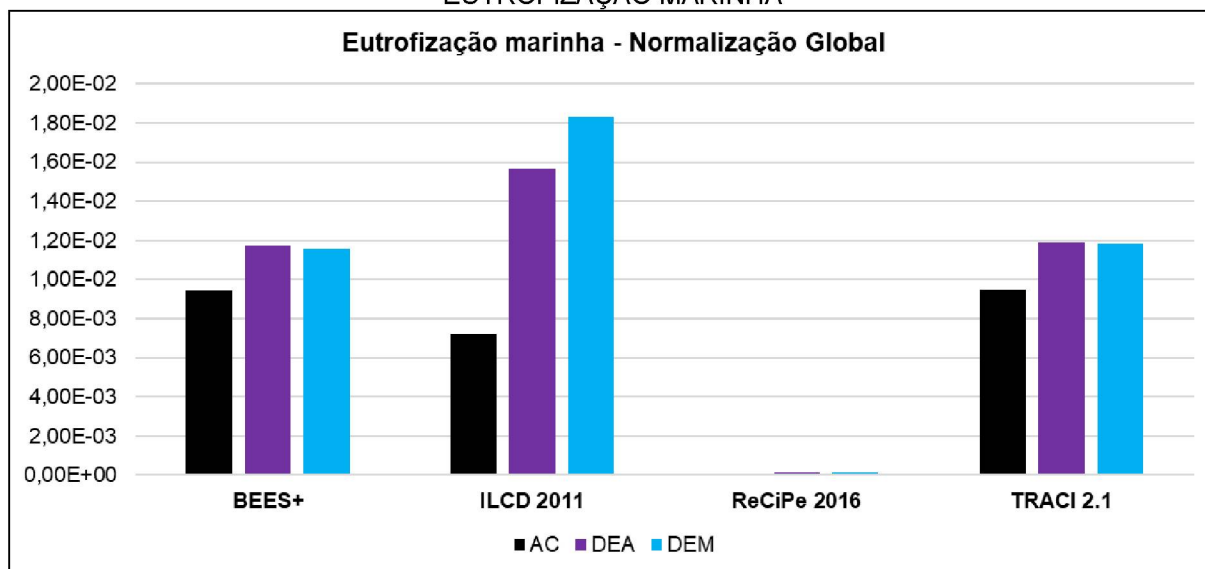
Com relação à categoria eutrofização marinha, os resultados da normalização dos métodos e global são apresentados no GRÁFICO 53 e GRÁFICO 54, nessa ordem. Salienta-se que a eutrofização adotada nas metodologias BEES+ e TRACI 2.1 foi analisada, especificamente, nessa categoria, em virtude da unidade apresentada originalmente nas metodologias ser compatível com a unidade de referência (do fator de normalização global).

GRÁFICO 53 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO MARINHA



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 54 - RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO MARINHA



FONTE: A autora (2020).

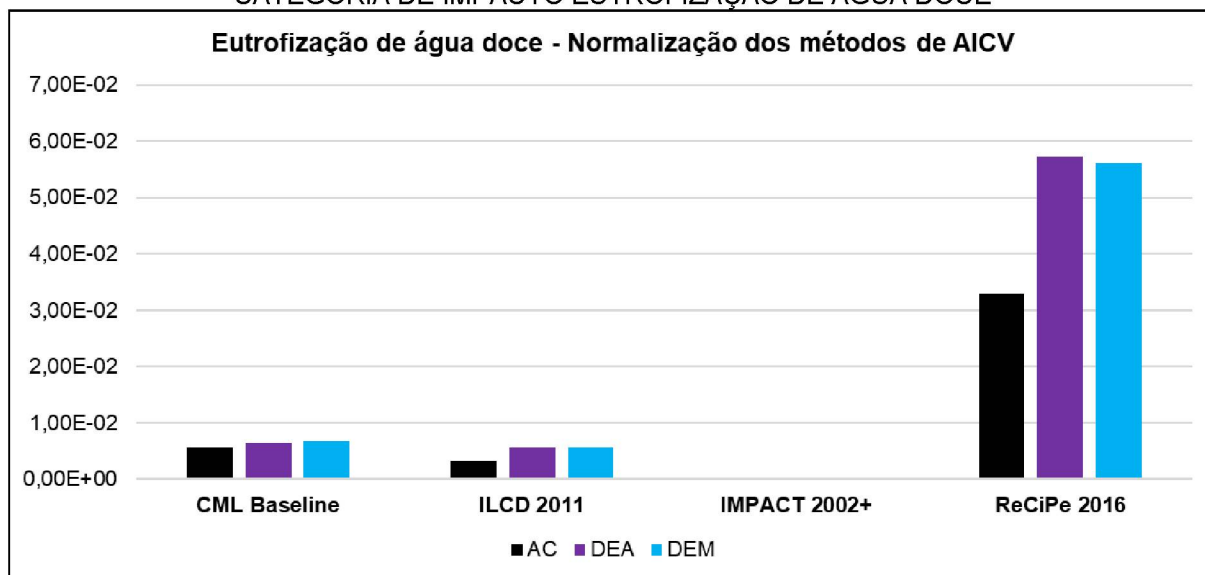
Os resultados dessa categoria, mostraram-se consistentes entre as metodologias, apesar de apresentarem diferenças de magnitude. A única exceção evidente foi relativa ao método ReCiPe, que independentemente do fator de normalização utilizado, apresentou pouca variação dos resultados, principalmente, referente à magnitude entre as paredes analisadas e metodologias de AICV.

No entanto, novamente, ocorreu alteração da vedação mais contribuinte nesse categoria, a partir da normalização global com o uso do método ILCD. Neste

caso, o sistema em DEM passou a ter maior potencial de impacto do que os sistemas em AC e DEA.

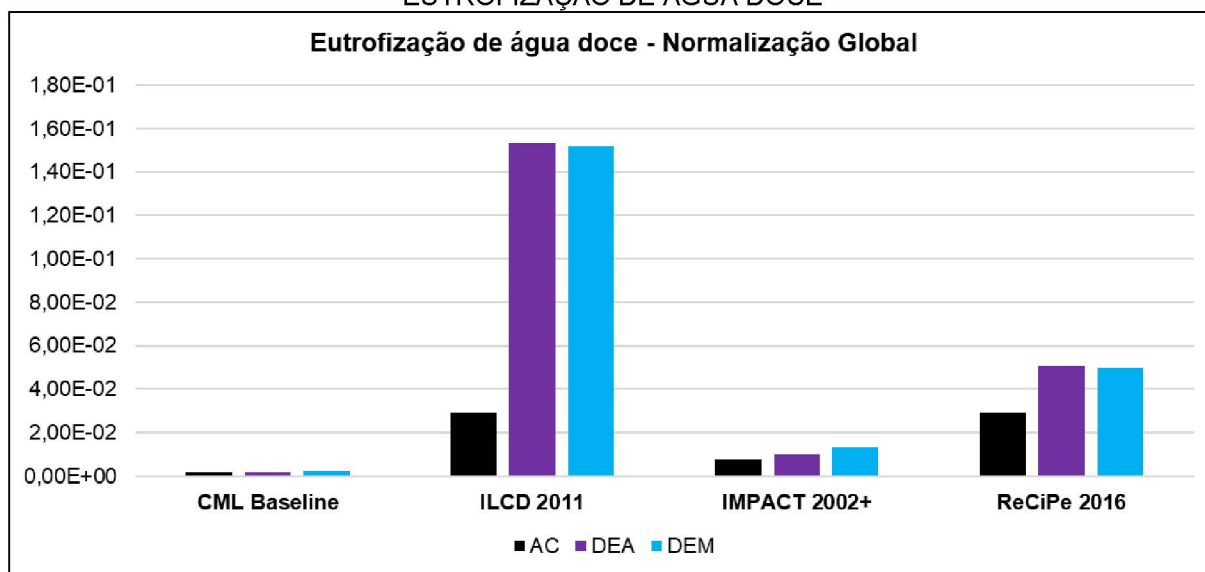
Para a eutrofização de água doce, as contribuições são apresentadas no GRÁFICO 55 e GRÁFICO 56.

GRÁFICO 55 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 56 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE



FONTE: A autora (2020).

Os resultados para essa categoria revelaram grande variação de magnitude entre as metodologias de AICV. Para o método IMPACT 2002+, a contribuição está,

visualmente, imperceptível no gráfico, evidenciando a diferença de escala adotada para entre os métodos.

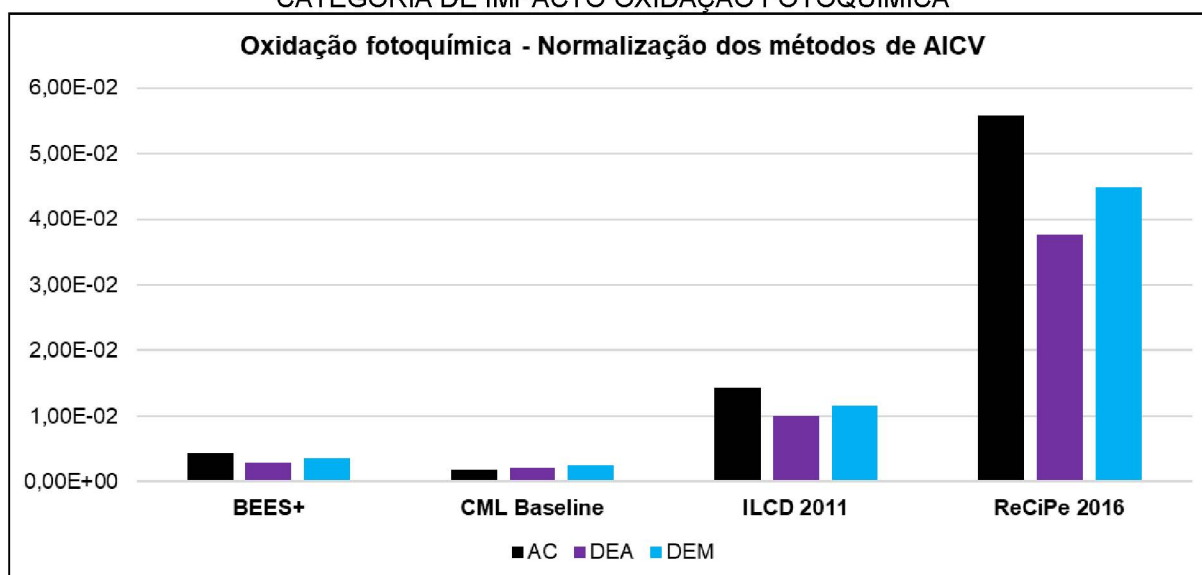
Além disso, o método ReCiPe 2016 apresentou valores muito discrepantes dos apresentados pelos outros métodos.

De modo comparativo, após a harmonização das unidades e normalização global, o perfil de impacto foi alterado. Neste caso, a magnitude dos resultados do método ILCD teve destaque comparada à magnitude das demais metodologias.

Em contrapartida, ainda que os métodos tenham apresentado magnitudes distintas, o mesmo padrão de desempenho entre as vedações foi mantido, indicando que o DEA e DEM foram os mais relevantes para essa categoria.

Sobre o comportamento dos impactos da oxidação fotoquímica, percebidos no GRÁFICO 57, é notável a divergência da magnitude dos impactos entre as metodologias de AICV.

GRÁFICO 57 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA



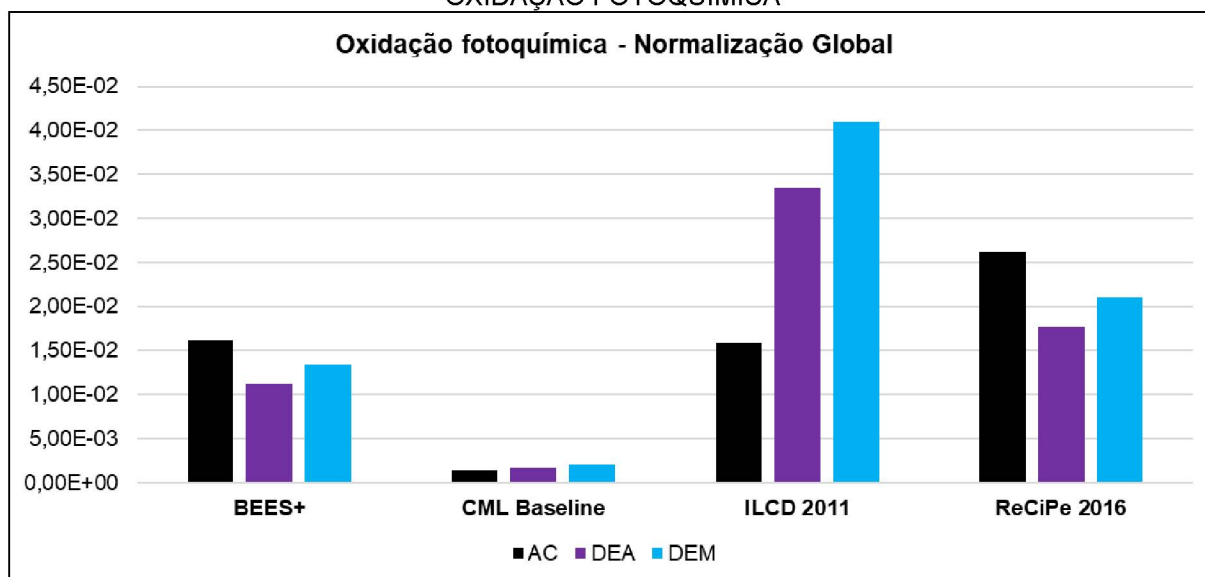
FONTE: A autora (2020).

Os métodos BEES+, ILCD 2011 e ReCiPe 2016 apresentaram resultados semelhantes em relação ao sistema de vedação com maior contribuição. Dessa forma, as três metodologias indicaram que os sistemas mais impactantes foram, em ordem decrescente, a AC, DEM e DEA. Por outro lado, ainda que a metodologia CML *Baseline* tenha apresentado o mesmo padrão de desempenho, quando comparada às outras metodologias, foi verificado incompatibilidade do resultado

desse método, indicando que os sistemas mais impactantes, em ordem decrescente, foram o DEM, DEA e AC.

De modo comparativo aos resultados da normalização global (GRÁFICO 58), a magnitude dos resultados para o método BEES+, CML *Baseline* e ReCiPe 2016 foi alterada, apesar de apresentar o mesmo padrão de desempenho.

GRÁFICO 58 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA



FONTE: A autora (2020).

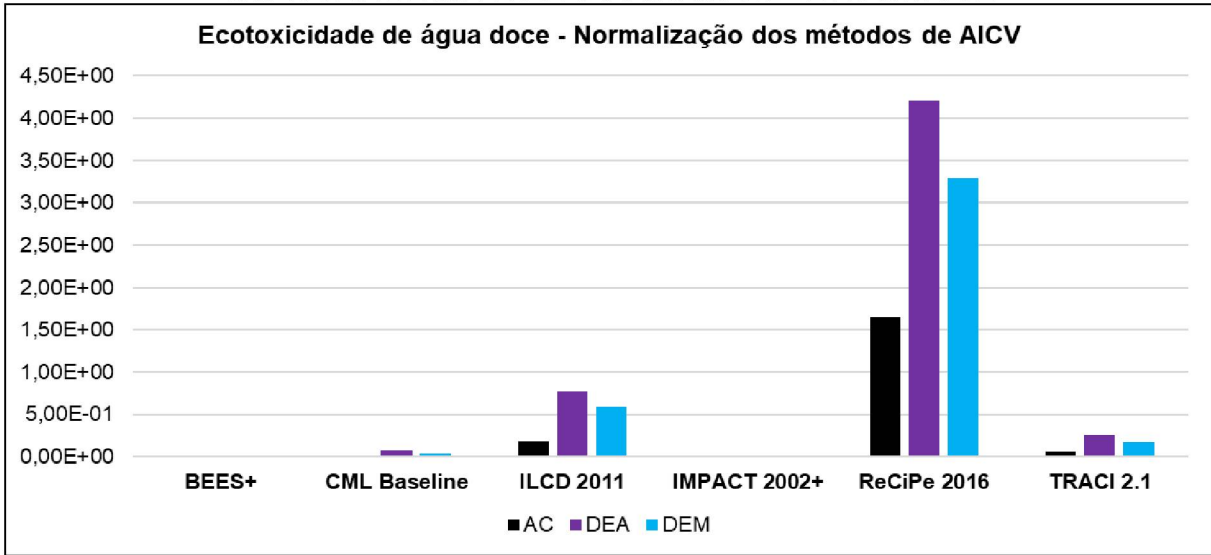
Em compensação, os resultados normalizados globalmente, com o uso da metodologia ILCD 2011, sofreram alterações na ordem significância ambiental para as vedações. Neste caso, o sistema em DEM apresentou maior contribuição do que o sistema em AC.

Quanto aos resultados acerca da ecotoxicidade de água doce (GRÁFICO 59 e GRÁFICO 60), inicialmente, salienta-se que as substâncias consideradas nos inventários das metodologias BEES+ e TRACI 2.1 apresentam algumas distinções, podendo apresentar magnitudes destoantes entre os métodos.

A ecotoxicidade desses métodos é apresentada com base na união da ecotoxicidade terrestre e aquática. Deste modo, optou-se pela conversão dos impactos potenciais apresentados por essas metodologias relativa, unicamente, à ecotoxicidade de água doce. Em contrapartida, embora essas considerações para as duas metodologias tenham sido feitas, os resultados apresentados no GRÁFICO 59 demonstraram que este fato não interferiu na magnitude do resultados.



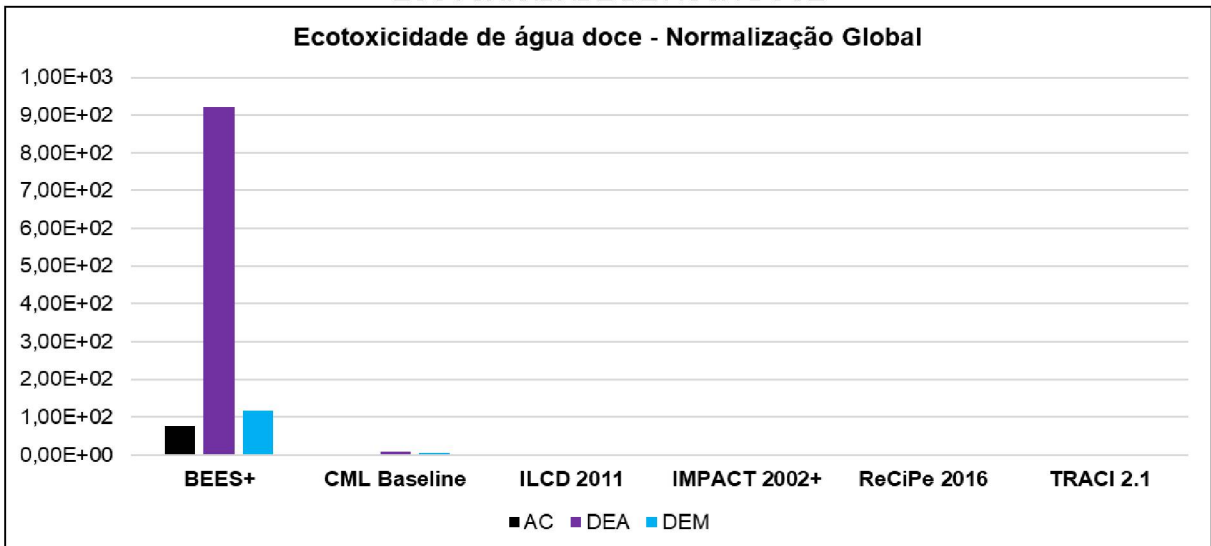
GRÁFICO 59 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE



FONTE: A autora (2020).

Por outro lado, o método ReCiPe 2016, apresentou maior magnitude para essa categoria de impacto, fazendo com que as contribuições das metodologias fossem imperceptíveis no gráfico. Além disso, embora a magnitude tenha sido diferente entre os métodos, o desempenho ambiental apontado para cada parede foi semelhante em cinco, das seis metodologias analisadas. Assim, o sistema em DEA apresentou maior contribuição, seguido pelo DEM e AC, com exceção do método IMPACT 2002+, que indicou que o sistema AC, seguido do DEM e DEA, como o mais impactante.

GRÁFICO 60 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE

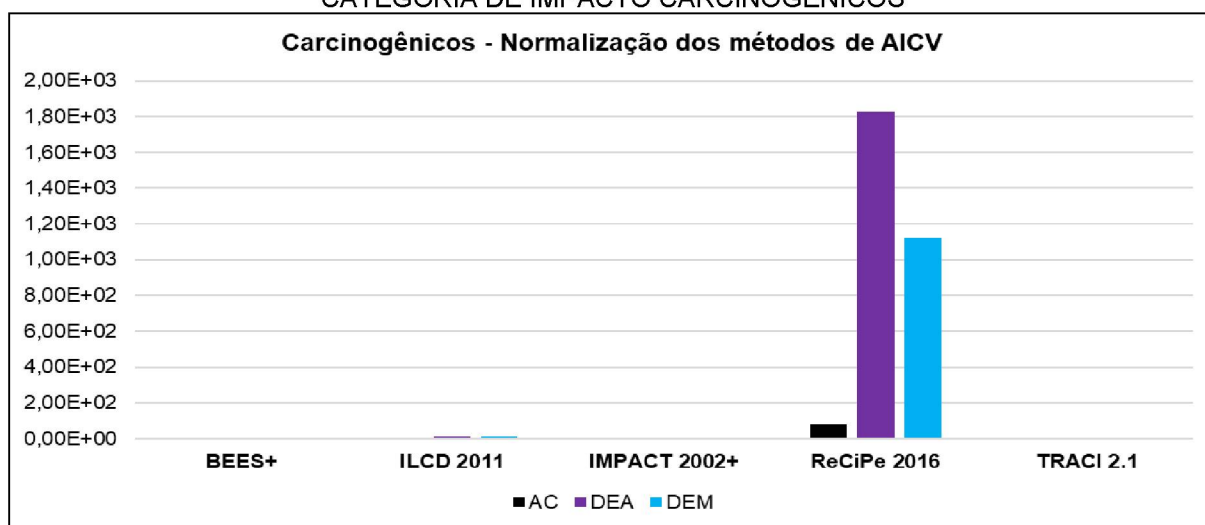


FONTE: A autora (2020).

Relativa à normalização global, a magnitude de impacto do método BEES+ sofreu alteração significativa entre as metodologias analisadas (GRÁFICO 60). Em contrapartida, aprofundando-se na análise das contribuições de cada método para essa categoria, foi possível verificar que o desempenho ambiental das vedações foi mantido e coerente com os resultados dos próprios métodos para as seis metodologias (ainda que este resultado não esteja visível no gráfico).

Na sequência, é possível observar os resultados comparativos da normalização dos métodos de AICV (GRÁFICO 61) e global (GRÁFICO 62), relativos à categoria de impacto carcinogênicos.

GRÁFICO 61 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO CARCINOGENÉTICOS



FONTE: A autora (2020).

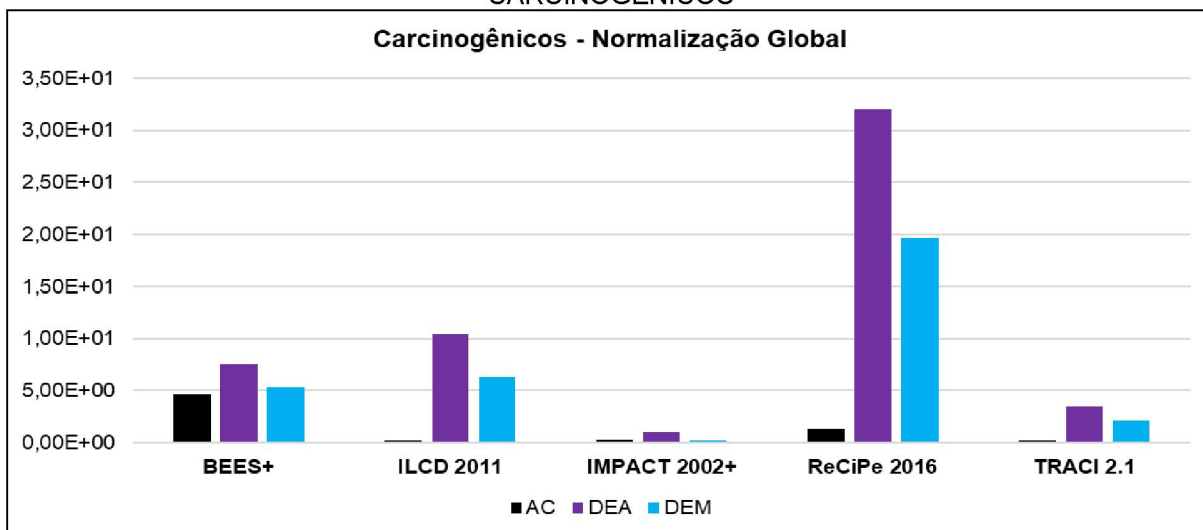
Outra vez, pode-se constatar grande diferença de magnitude dos resultados pela metodologia ReCiPe 2016. Analisando-se mais profundamente esse comportamento, todos os métodos apresentaram magnitudes distintas quando comparados entre si. Sendo assim, da maior para a menor magnitude, os métodos ficaram ordenados na seguinte ordem: ReCiPe 2016, ILCD 2011, TRACI 2.1, IMPACT 2002+ e BEES+. Além disso, os resultados dos métodos apresentaram o mesmo padrão de desempenho ambiental, indicando como sistema ambientalmente inferior, o DEA, seguido pelo DEM e AC. Somente o método IMPACT 2002+ teve uma diferença sutil entre os sistemas, indicando como pior alternativa o DEA, seguido pelo sistema em AC e DEM. Dessa forma, de acordo com essa metodologia, nessa categoria de impacto o sistema em AC apresentou melhor



desempenho do que o sistema em DEM.

Relativa à normalização global, percebe-se uma alteração da magnitude dos impactos comparados (GRÁFICO 62). Por outro lado, o desempenho ambiental dos sistemas de vedações, indicados por cada metodologia, foi mantido.

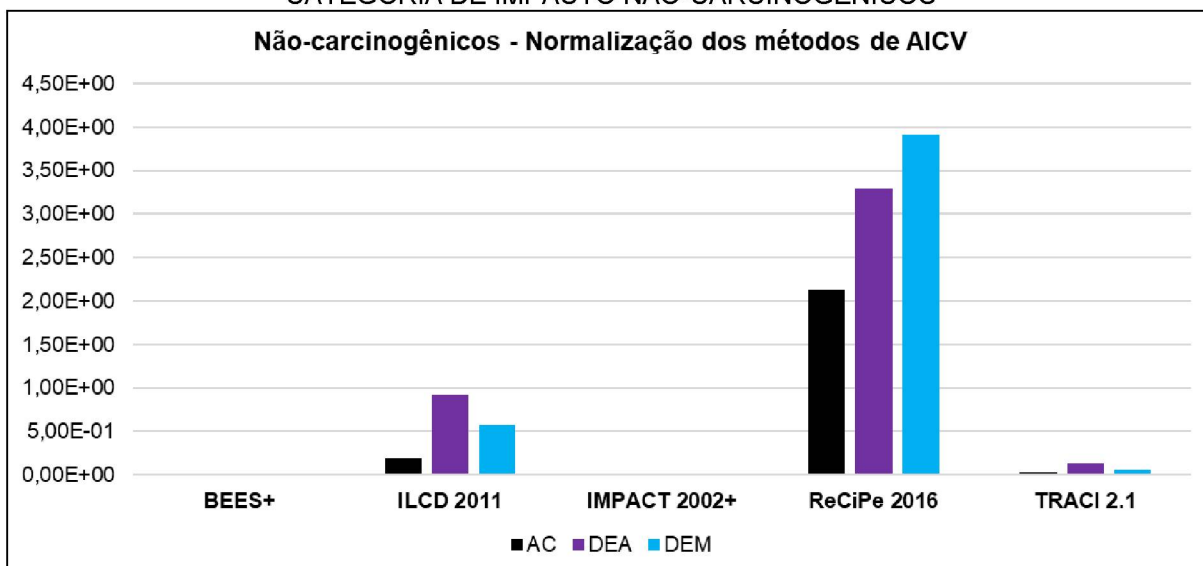
GRÁFICO 62 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO CARCINOGENÉTICOS



FONTE: A autora (2020).

Sobre a categoria de impacto não-carcinogênicos, a magnitude dos impactos apresentados foi semelhante da categoria de carcinogênicos, com exceção da metodologia ILCD que apresentou uma maior contribuição (GRÁFICO 63).

GRÁFICO 63 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO NÃO-CARCINOGENÉTICOS

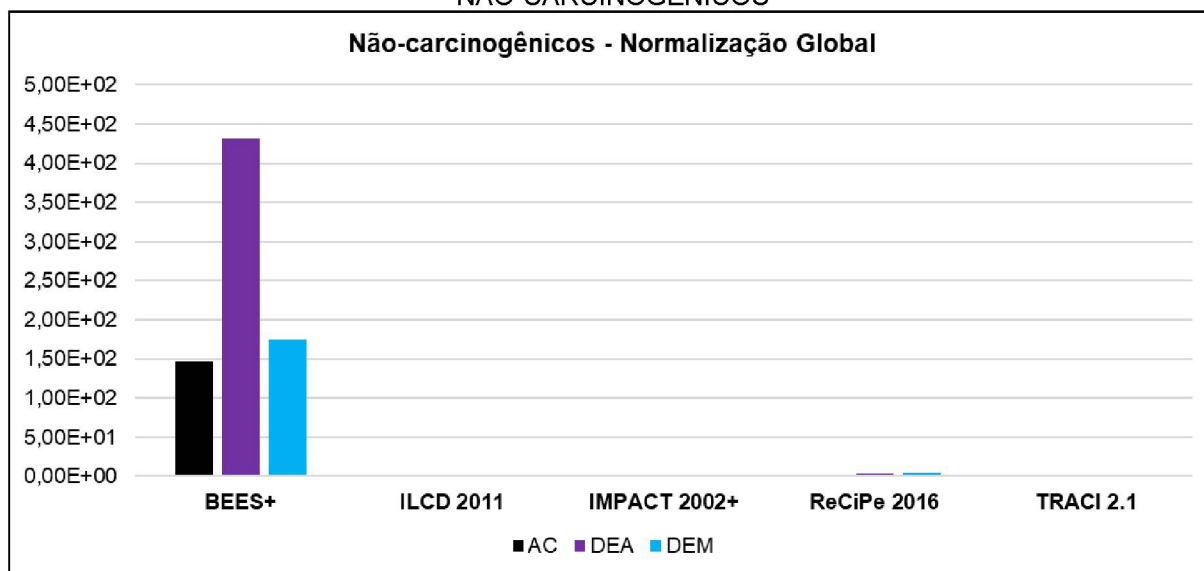


FONTE: A autora (2020).

Entretanto, foi possível observar que o desempenho ambiental de cada sistema de vedação não foi consistente, apresentando divergências na ordem de importância entre os métodos. Enquanto os métodos BEES+, ILCD 2011, IMPACT 2002+ e TRACI 2.1 apresentaram como resultado de pior alternativa, em ordem decrescente, as vedações em DEA, DEM, AC, o método ReCiPe 2016 indicou que o sistema em DEM foi pior do que o DEA e AC. Salienta-se, também, que, no caso do método IMPACT 2002+, os resultados dos sistemas em AC e DEM ficaram muito próximos, referente à magnitude de impacto.

Quanto à normalização global para a categoria de não-carcinogênicos, o método BEES+ apresentou maior magnitude de impacto (GRÁFICO 64), seguido pelo método ReCiPe 2016, ILCD 2011, TRACI 2.1 e IMPACT 2002+. Além disso, o desempenho ambiental das vedações, também, permaneceu o mesmo da normalização das metodologias para a escala global.

GRÁFICO 64 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO NÃO-CARCINOGENÉTICOS

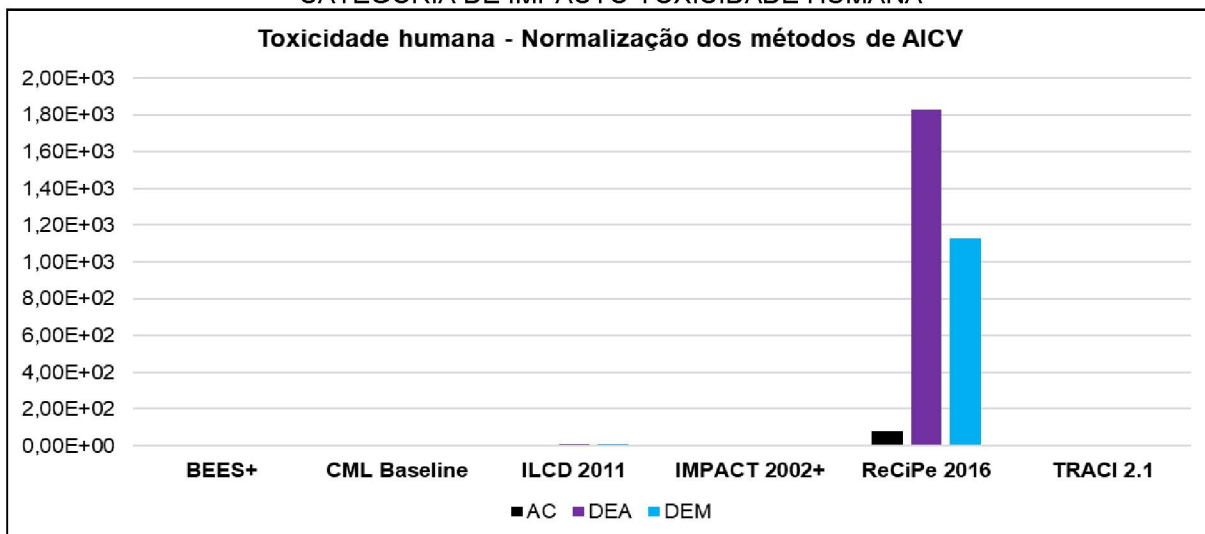


FONTE: A autora (2020).

Além disso, para que o método CML *Baseline* também fosse comparado, como forma de complementar os resultados apresentados nessa seção, delimitou-se a análise comparativa do potencial de toxicidade humana, sem distinção das substâncias que causam e não causam efeitos cancerígenos (GRÁFICO 65). Assim, para o método CML, foi realizada somente a harmonização da unidade, enquanto a contribuição das categorias de impacto de carcinogênicos e não-carcinogênicos

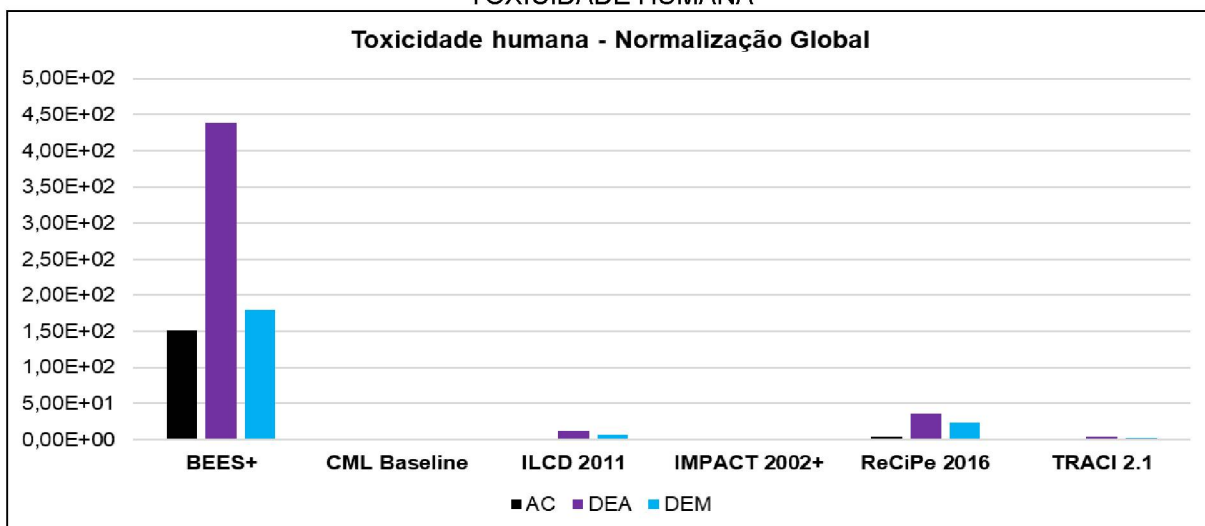
foram somadas para as outras metodologias.

GRÁFICO 65 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO TOXICIDADE HUMANA



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 66 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO TOXICIDADE HUMANA



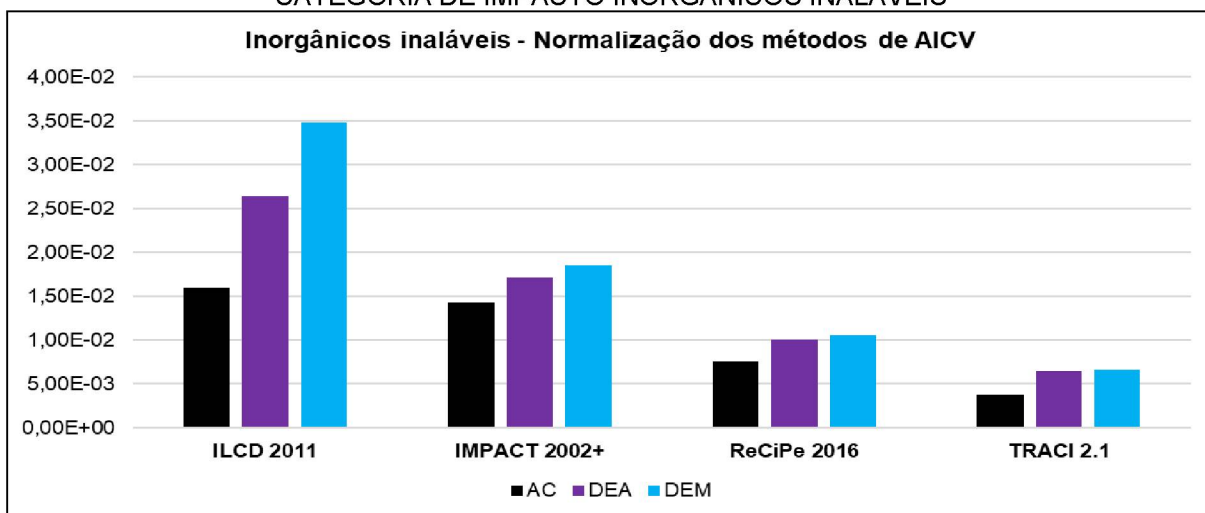
FONTE: A autora (2020).

Dessa forma, foi possível observar que, para a normalização dos métodos de AICV, o método ReCiPe dominou a contribuição nos impactos potenciais, relativos à magnitude apresentada. Além disso, destaca-se que os sistemas em DEA e DEM tiveram nível de significância muito maior para o ReCiPe, ILCD e TRACI, enquanto a distribuição desses impactos para os métodos BEES+ e CML foi mais uniforme entre os sistemas (ainda que não estejam visíveis no gráfico).

Como conclusão dessa análise, com exceção do método IMPACT 2002+, que apresentou resultados que demonstraram que o sistema em AC teve desempenho ambiental inferior ao sistema em DEM, as metodologias restantes obtiveram um consenso, indicando como pior alternativa o DEA, seguido pelo DEM e AC.

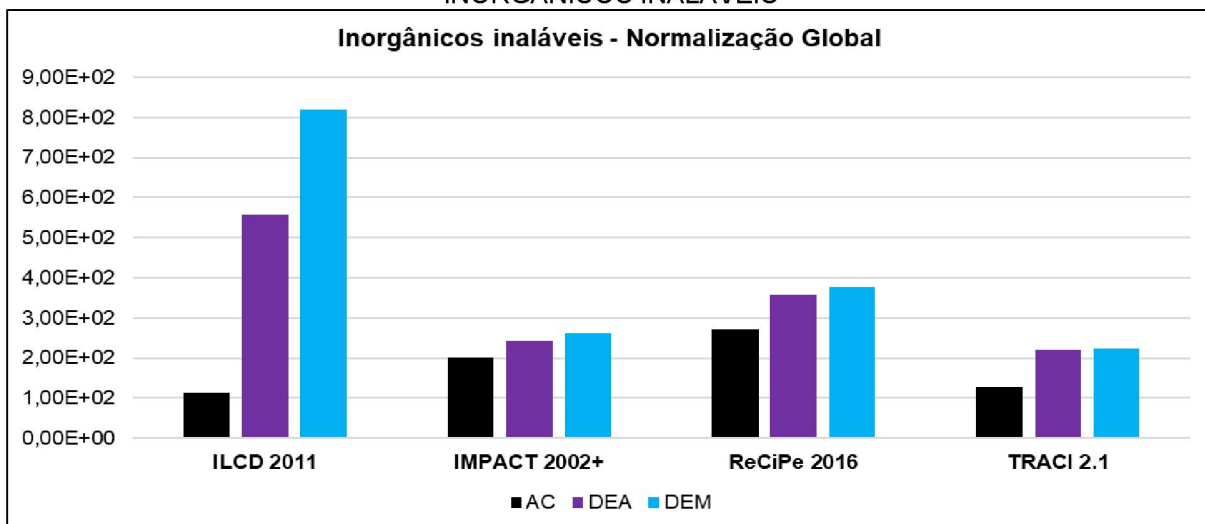
Referente à categoria de inorgânicos inaláveis, apesar das diferenças de magnitude entre as metodologias, os resultados normalizados pelos métodos de AICV e pelos fatores de normalização globais, demonstraram-se consistentes nesta categoria (GRÁFICO 67 e GRÁFICO 68).

GRÁFICO 67 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO INORGÂNICOS INALÁVEIS



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 68 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO INORGÂNICOS INALÁVEIS

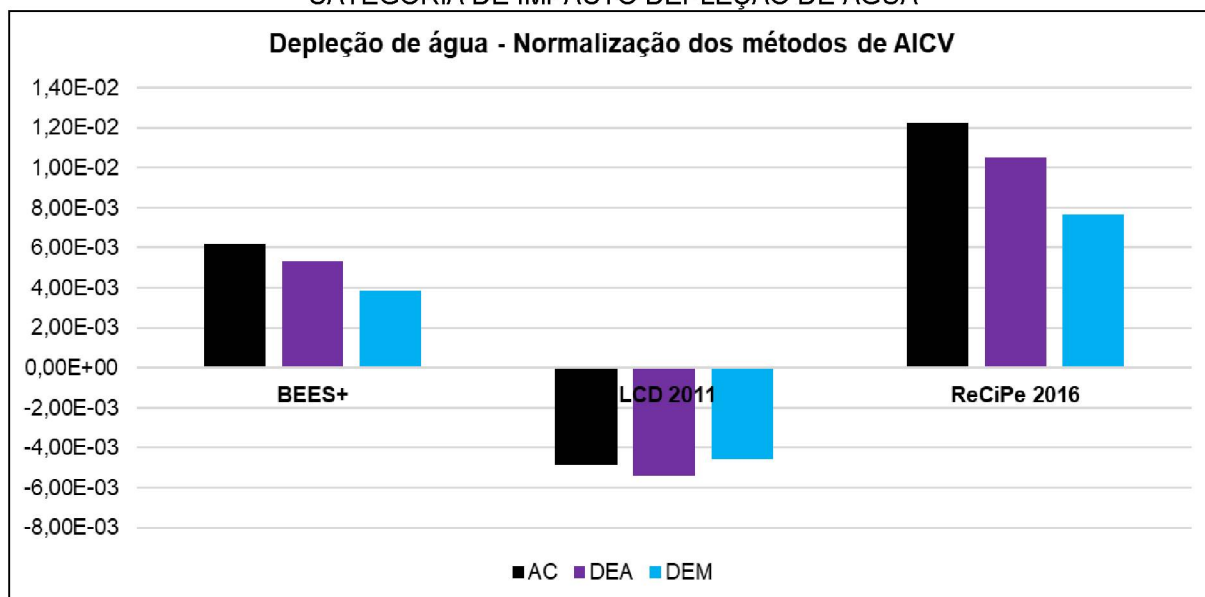


FONTE: A autora (2020).

Apenas uma ressalva deve ser feita para a normalização global do método ILCD 2011. Neste caso, os resultados indicaram diminuição significativa da contribuição do sistema AC para essa categoria de impacto, enquanto os sistemas em DEA e DEM foram claramente evidenciados.

Já os resultados da depleção de água foram coerentes para os métodos BEES+ e ReCiPe, demonstrando o mesmo perfil de impacto (GRÁFICO 69).

GRÁFICO 69 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE ÁGUA



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 70 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE ÁGUA

FONTE: A autora (2020).

Contudo, a depleção de água destacada para a metodologia ILCD, retratou um perfil de impacto muito diferente. Esse resultado foi consequência da produção de alumínio primário líquido, podendo ser justificado pelo perfil das indústrias de alumínio, que gerenciam a água de modo racional, por meio da reciclagem e reutilização em outros processos internos. Além disso, os métodos analisados apresentam modelos de caracterização diferentes, que influenciam diretamente no comportamento dos impactos caracterizados e normalizados.

Referente aos resultados globalizados para a depleção de água, vale salientar a mudança de magnitude entre as metodologias. Nesse caso, o método BEES+ apresentou maior magnitude absoluta. Por outro lado, ainda que o comportamento dos resultados para o método ILCD e ReCiPe não esteja aparente no gráfico, foi possível evidenciar uma grande diminuição na contribuição do sistema em AC para o ILCD.

Sobre a categoria de energia não-renovável, os resultados da normalização pelos métodos demonstraram consistência entre as cinco metodologias, embora a magnitude dos impactos entre os métodos tenha apresentado distinções (GRÁFICO 71).

GRÁFICO 71 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL (COMBUSTÍVEL FÓSSIL)

FONTE: A autora (2020).

Além disso, após a conversão das unidades e normalização global (GRÁFICO 72), os resultados foram absolutamente consistentes para todas as metodologias de AICV, levando à mesma conclusão entre os métodos aplicados.

GRÁFICO 72 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL (COMBUSTÍVEL FÓSSIL)

FONTE: A autora (2020).

Com relação à categoria de recursos naturais (minerais), os resultados da normalização, pelos métodos de AICV, apresentaram perfis de impacto diferentes para os mesmos sistemas de vedação (GRÁFICO 73).

GRÁFICO 73 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS)

FONTE: A autora (2020).

Enquanto os métodos CML *Baseline* e IMPACT 2002+ apresentaram o mesmo padrão de resultados para a normalização, o método ReCiPe demonstrou grande destaque para o sistema em AC. De modo geral, faz sentido que o sistema em AC seja um dos mais contribuintes para a depleção de recursos naturais, uma vez que os produtos utilizados por esse sistema são, em sua grande maioria, provenientes da extração de materiais metálicos e não-metálicos.



GRÁFICO 74 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS)

FONTE: A autora (2020).

Relativa à normalização global, conforme o GRÁFICO 74, embora o desempenho ambiental apresentado pela normalização dos métodos de AICV e pela normalização global tenha sido a mesma, a ordem de magnitude para essa categoria teve alteração entre as metodologias. Dessa forma, o método IMPACT 2002+ teve maior escala de impacto, comparada à metodologia ReCiPe e CML.

Por fim, uma última análise foi adicionada para a verificação do comportamento dos resultados da normalização pela metodologia de AICV ILCD 2011 e da normalização global após a harmonização. Neste caso, a categoria de depleção de recursos naturais, incluindo minerais e energia, foi avaliada conjuntamente, uma vez que a metodologia ILCD apresenta um inventário unificado.

GRÁFICO 75 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO PELOS MÉTODOS DE AICV PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS E ENERGIA)

FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 76 – RESULTADOS DA NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA A CATEGORIA DE IMPACTO DEPLEÇÃO DE RECURSOS NATURAIS (MINERAIS E ENERGIA)

FONTE: A autora (2020).

Com base nos GRÁFICOS 75 e 76, os resultados foram consistentes entre as referências de normalização utilizadas, apesar do resultado do sistema em AC, em escala global, ter apresentado diminuição de magnitude nessa categoria, quando comparada aos sistemas em DEA e DEM.

A partir dessa análise, torna-se evidente as dificuldades inerentes à avaliação de impacto do ciclo vida. Pizzol *et al.* (2011) e Heijungs *et al.* (2007) evidenciam essa dificuldade e, ainda, destacam as altas incertezas resultantes das diferentes metodologias de AICV.

De modo geral, a normalização global apresentou mudanças significativas, principalmente para o método ILCD, apresentando resultados com tendência de diminuição da magnitude dos impactos potenciais relacionados ao sistema em AC.

Esse comportamento foi repetido em todas as categorias analisadas desse método, às quais foram o aquecimento global, eutrofização terrestre, eutrofização marinha, eutrofização de água doce, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade de água doce, carcinogênicos, não-carcinogênicos, toxicidade humana, inorgânicos inaláveis, depleção de água e depleção de recursos naturais (minerais e energia).

Além disso, salienta-se que algumas categorias de impacto são consideradas globais, como o aquecimento global, significando que os impactos causados são independentes do contexto geográfico. Essa foi uma das razões na qual houve consenso dos resultados apresentados para essa categoria entre as

metodologias de AICV.

Contudo, há regiões do mundo que estão mais suscetíveis a sofrer com os efeitos das atividades humanas, incidindo na alteração da ordem de prioridade para ação. Nesse contexto, categorias de impacto que dependem do local em que ocorrem e/ou da sazonalidade, como a eutrofização, evidenciam a necessidade de regionalização dos modelos de caracterização (UGAYA *et al.*, 2016) e dos fatores de normalização.

Com base nisso, as categorias de impacto que apresentaram maiores disparidades de magnitude e desempenho ambiental com a normalização dos métodos de AICV e normalização global foram a eutrofização marinha, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana (com e sem efeitos cancerígenos) e depleção de água.

Resultados semelhantes foram evidenciados por Cavalett *et al.* (2013), Dreyer, Niemann e Hauschild (2003) e Owsianiak *et al.* (2014), no qual destacam divergências importantes, ao empregar diferentes metodologias de AICV, para as categorias de toxicidade humana, ecotoxicidade, oxidação fotoquímica, eutrofização, depleção da camada de ozônio, inorgânicos inaláveis e acidificação.

Ressalta-se ainda que, em face aos resultados das categorias de impacto entre os métodos de AICV, um tomador de decisões teria dificuldades durante a priorização de ações para melhoria do desempenho ambiental de produtos e processos. Em razão disso, é essencial que haja uma simplificação durante a escolha da metodologia mais adequada, assim como esforços para a melhoria da assertividade das análises, para que não ocorra a possibilidade de diferentes conclusões relacionadas ao mesmo sistema de produto, na mesma região do mundo.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A normalização é amplamente praticada na Avaliação do Ciclo de Vida de produtos para o suporte à decisão, por fornecer informações importantes às partes interessadas sobre quando melhorar. Todavia, embora haja um impulsionamento e iniciativas crescentes voltadas ao desenvolvimento de estudos de ACV, incertezas emergem do processo de decisão, limitando a interpretação e revelando imprecisões no projeto.

A possibilidade de análise do impacto de diversas substâncias, a partir do uso de diferentes modelos de caracterização e fatores de normalização, a medida em que facilita a execução de avaliações ambientais, pode introduzir inconsistências e subjetividades nos estudos.

Nesse cenário, o estudo realizado nessa dissertação destacou uma lacuna relativa à escolha das metodologias de AICV e dos fatores de normalização que representem os impactos de forma mais aproximada da realidade do sistema de produto em análise. Além disso, essa pesquisa evidenciou as semelhanças e diferenças, tanto dos resultados normalizados entre as metodologias de AICV, quanto no caso da aplicação de fatores de normalização globais, recomendados pela EC-JRC. Vale aqui ressaltar que o uso de fatores de normalização globais em estudos de ACV é considerado uma recomendação dada pela UNEP-SETAC.

Em síntese, salientou-se três horizontes de análise dos resultados normalizados: categorias de impacto mais significativas, desempenho ambiental dos sistemas de vedações e consistência dos resultados das categorias de impacto.

Na primeira análise, foi possível destacar diferentes conclusões sobre as categorias de impacto mais significativas pelas metodologias de AICV e pela normalização global. De fato, dependendo do fator de normalização aplicado, uma categoria com pouca relevância pode passar a ter grande relevância no estudo. E esse comportamento ocorreu com as seis metodologias analisadas.

Ou seja, conforme a normalização dos métodos de AICV, foi observado perfis diferentes de resultados em todas as metodologias. De acordo com os métodos BEES+, CML *Baseline*, ILCD 2011, ReCiPe 2016 e TRACI 2.1, as categorias de impacto mais significativas para o estudo de caso foram relativas ao aquecimento global, depleção de recursos naturais (minerais), depleção de água, ecotoxicidade, energia não-renovável, eutrofização, inorgânicos inaláveis, ocupação

da terra, oxidação fotoquímica e toxicidade humana (com e sem efeitos cancerígenos).

Por outro lado, após a harmonização das unidades e uso dos fatores de normalização globais, ocorreu mudanças consideráveis na ordem de significância das categorias de impacto. Os métodos ILCD 2011, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 e TRACI 2.1 apresentaram o mesmo comportamento de resultado, indicando a categoria de inorgânicos inaláveis como a mais significativa para o estudo de caso. Do mesmo modo, os métodos BEES+ e CML *Baseline* evidenciaram a categoria de ecotoxicidade de água doce e, em menor proporção, de não-carcinogênicos.

Esses resultados revelam a influência das referências de normalização adotadas nas metodologias e reforçam a necessidade de cautela durante a escolha do método de AICV. Além disso, torna-se evidente a tendência de resultado da normalização global para esse estudo de caso, sendo aqui recomendada a utilização destes fatores em produtos de outros segmentos industriais, para verificar se há similaridade do comportamento de impacto.

Relativo aos resultados sobre o desempenho ambiental dos sistemas de vedações em alvenaria convencional de blocos cerâmicos (AC), *drywall* com estrutura de aço (DEA) e *drywall* com estrutura de madeira (DEM), não foi constatado um consenso entre as metodologias e a normalização global.

As conclusões sobre as vedações ambientalmente significativas, de acordo com a normalização dos métodos, apresentaram duas variações. Segundo os métodos BEES+, CML *Baseline* e IMPACT 2002+, a vedação em AC foi a alternativa com maior potencial de impacto ambiental, seguida pela vedação em DEA e DEM. Por outro lado, os métodos ILCD 2011, ReCiPe 2016 e TRACI 2.1 indicaram a parede em DEA como a mais impactante, seguida pela DEM e AC.

O mesmo padrão foi verificado para a normalização global. Os métodos BEES+ e CML *Baseline* indicaram o DEA com maior magnitude de impacto, seguido pelo DEM e AC. Enquanto isso, o ILCD 2011, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 e TRACI 2.1 tiveram como resultados o DEM como pior alternativa, seguido pelo DEA e AC.

Sobre a consistência dos resultados das categorias de impacto normalizadas pelos dos métodos de AICV, as categorias de aquecimento global, inorgânicos inaláveis e energia não-renovável (combustível fóssil) apresentaram resultados consistentes entre as metodologias, apesar de algumas diferenças de magnitude.

De modo geral, os métodos que mais tiveram resultados divergentes nas análises foram o CML *Baseline*, o IMPACT 2002+ e ReCiPe 2016.

O CML apresentou diferentes desempenhos ambientais nas categorias eutrofização de água doce e oxidação fotoquímica.

Já a metodologia IMPACT 2002+ teve alterações nos perfis de impacto para as categorias de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, carcinogênicos e, conseqüentemente, toxicidade humana, ainda que a diferença de magnitude de impacto entre os sistemas não fosse discrepante.

Sobre o método ReCiPe 2016, as categorias que apresentaram grandes variações dos resultados foram os não-carcinogênicos e a depleção de recursos naturais (minerais).

Entre os resultados das categorias de impacto, observou-se padrões semelhantes de comportamento para a normalização global. Assim, a maioria das categorias de impacto, que não foram consistentes na análise comparativa dos resultados normalizados pelos métodos, demonstraram o mesmo padrão de desempenho em escala global.

Por outro lado, para a normalização global, é importante destacar as modificações que ocorreram nos perfis de impacto e de magnitude. Neste caso, tiveram algumas diferenciações nas categorias que apresentaram resultados consistentes, destacando-se o aquecimento global, eutrofização marinha e energia não-renovável (combustível fóssil). Uma ressalva deve ser feita para a eutrofização marinha, que apesar de apresentar um perfil de impacto muito próximo das outras metodologias, os métodos BEES+ e TRACI 2.1 indicaram que o sistema em DEA apresentou desempenho muito semelhante ao DEM, diferente dos métodos ILCD 2011 e ReCiPe 2016, que tiveram diferenças maiores de magnitudes entre as vedações.

Relativa às inconsistências identificadas, evidenciou-se uma mudança no comportamento de impacto de algumas categorias. No caso da oxidação fotoquímica, o ILCD mudou o comportamento com a normalização global, apresentando resultados divergentes junto ao CML *Baseline*. O mesmo ocorreu para a eutrofização de água doce (com o IMPACT 2002+) e eutrofização terrestre (com o ILCD 2011). Sobre a categoria de impacto de eutrofização terrestre, salienta-se que a única comparação possível de ser realizada foi relativa ao comportamento da normalização pelo método ILCD 2011 e global. Nesse caso, com a normalização

global, o desempenho ambiental dos sistemas sofreu alteração relativa à vedação mais e menos impactante, introduzindo incertezas durante o processo de decisão.

Além disso, salientam-se os impactos relativos à depleção de água, que apresentaram certa consistência dos resultados entre as metodologias. Entretanto, o método ILCD 2011 considerou um perfil de impacto totalmente diferente (impactos com valores negativos) e apresentou variações no desempenho ambiental entre as vedações quando normalizado em escala global.

Nesse contexto, chegar a uma conclusão sobre o melhor ou pior sistema, não se mostra uma tarefa tão simples. Ainda que a ACV seja uma das técnicas mais completas para esse tipo de análise, inúmeros fatores influenciam na sensibilidade dos resultados e geram incertezas durante a interpretação dos impactos do ciclo de vida.

Na literatura, pode-se encontrar vários estudos de caso de ACV, com diferentes considerações. Ainda que possam existir similaridades entre os resultados de produtos semelhantes, as decisões praticadas pelas partes interessadas e a escolha do modelo de caracterização e fatores de normalização influenciam, substancialmente, nas informações geradas a partir da fase de AICV. Por essa razão, a comunidade científica vem alertando sobre o uso adequado da normalização para a comparação de produtos.

Deste modo, embora existam alguns métodos de AICV recentes, com abordagens globais e regionalizadas, como o método *IMPACT World+*, recomenda-se que as categorias de impacto ambiental mais significativas identificadas nessa pesquisa sejam analisadas, prioritariamente, nos estudos de ACV para a construção civil. Assim, as categorias de impacto recomendadas, com base no nível de importância observado nos resultados da normalização dos métodos de AICV aplicados e da normalização global, são: aquecimento global, eutrofização, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade, carcinogênicos, não-carcinogênicos, inaláveis inorgânicos (ou material particulado), uso de água, energia não-renovável e uso de recursos naturais. Ainda, apesar disso, incentiva-se fortemente a realização de trabalhos correlatos a esse, para que os resultados da normalização sejam analisados com base em outros enfoques da construção civil, como outros tipos de obras (comercial, industrial, hospitalar, infra-estrutura, hidráulica, entre outras) e sistemas específicos (fundações, estruturas, cobertura, entre outros).

Contudo, em relação à normalização, dadas as divergências dos resultados



apresentados, torna-se evidente a necessidade de maior detalhamento dos fatores de normalização, com o propósito de estabelecer um consenso científico entre as abordagens e de induzir esforços para a regionalização de fatores.

Finalmente, com o propósito de suprir as limitações identificadas ao longo do desenvolvimento dessa dissertação, sugere-se como pesquisas futuras as seguintes análises:

- Adicionar na análise comparativa outras tipologias construtivas que empreguem materiais alternativos, para a verificação do comportamento da normalização. Ainda que os materiais fossem diferentes, a maioria era proveniente dos mesmos produtores primários, inferindo em resultados normalizados parecidos para os sistemas de vedações em análise;
- Utilizar dados primários sobre as produções dos principais materiais de construção, uma vez que a adaptação dos processos retirados das bases de dados não garante precisão dos resultados para o contexto brasileiro;
- Realizar uma análise de sensibilidade do inventário do ciclo de vida (ICV) com o uso dos três critérios de corte indicados na ISO 14044 (massa, energia e significância ambiental), para a verificação da sensibilidade dos resultados;
- Realizar, novamente, a simulação com o uso da base de dados *Ecoinvent* 3.6, que contém processos atualizados relativos à produção de cimento, areia e cal brasileiro;
- Adicionar na análise comparativa as variações da metodologia ReCiPe 2016, individualista (I) e hierárquico (H), pois estas apresentam os resultados das categorias de impacto com base em diferentes horizontes de tempo;
- Ampliar o debate sobre as considerações realizadas para os modelos de caracterização e fatores de normalização empregados nas metodologias de AICV;
- Rastrear referências sobre as emissões de poluentes que considerem os biomas, solos, climas, divisões geográficas e vulnerabilidades das

regiões brasileiras, para o desenvolvimento de fatores de normalização para as categorias de impacto evidenciadas nessa dissertação.

## REFERÊNCIAS

ACHENBACH, H.; WENKER, J. L.; RÜTER, S. Life cycle assessment of product- and construction stage of prefabricated timber houses : a sector representative approach for Germany according to EN 15804 , EN 15978 and EN 16485. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 2, p. 711–729, 2018.

AFONSO, M. H. F. et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47–62, 2011.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Manual da Construção Industrializada**. Brasil, 2015.

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

ALBRITTON, D. L.; MEIRA-FILHO, L. G. Technical Summary. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In: HOUGHTON, J. T. et al. (Eds.). **IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, United Kingdom, 2001.

ALLACKER, K.; SOUZA, D. M. DE; SALA, S. Land use impact assessment in the construction sector: an analysis of LCIA models and case study application. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 11, p. 1799–1809, 2014.

ALVARENGA, R. A. F. DE; DA SILVA JÚNIOR, V. P.; SOARES, S. R. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. **Journal of Cleaner Production**, v. 28, p. 25–32, 2012.

ANDRADE, E. P. et al. **Determinação de Fatores de Caracterização para avaliação de impactos na Escassez Hídrica em Sub-bacias cearenses**. In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. 2016

ANGELAKOGLU, K.; GAIDAJIS, G. A review of methods contributing to the assessment of the environmental sustainability of industrial systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 725–747, 2015.

ASDRUBALI, F.; BALDASSARRI, C.; FTHENAKIS, V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 73–89, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA (AEA). **Euro VI – Análise do Programa Europeu, impactos e desafios para a realidade brasileira: DT AEA 002/15**. Brasil, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8681. **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15575. **Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013a.

\_\_\_\_\_. NBR 15575. **Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas**. Rio de Janeiro, 2013b.

\_\_\_\_\_. 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.

BALASBANEH, A. T.; BIN MARSONO, A. K.; KASRA KERMANSHAHI, E. Balancing of life cycle carbon and cost appraisal on alternative wall and roof design verification for residential building. **Construction Innovation**, v. 18, n. 3, p. 274–300, 2018.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **O crescimento da economia brasileira: 2018 – 2023**. Brasil, 2018.

BARE, J. **Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI)**. US EPA, 2004. Disponível em: <[http://epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/iam\\_traci.htm](http://epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/iam_traci.htm)>. Acesso em 10 de abril de 2020.

BARE, J. C.; GLORIA, T.; NORRIS, G. A. Development of the Method and U.S. Normalization Database for Life Cycle Impact Assessment and Sustainability Metrics. In: **Environmental Science & Technology**. 2007.

BERARDI, U. Sustainability Assessment in the Construction Sector: Rating Systems and Rated Buildings. **Sustainable Development**, v. 424, n. September 2011, p. 411–424, 2012.

BIN MARSONO, A. K.; BALASBANEH, A. T. Combinations of building construction material for residential building for the global warming mitigation for Malaysia. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 100–108, 2015.

BOONSTRA, C.; PETERSEN, T. D. Tools for environmental assessment of existing buildings. **Industry and Environment**, v. 26, n. 2–3, p. 80–83, 2003.

BRAND, G. et al. **Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen**

**Knappeit – Ökofaktoren 1997.** Schriftenreihe Umwelt 297. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1998.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformado a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”).** Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais – SiNAT – Nº 003 – Revisão 2. Brasília, DF, 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistema construtivo a seco Saint-Gobain – Light Steel Frame.** Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais – SiNAT – DATec Nº 014b. Brasília, DF, 2018a.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistema estruturado em peças leves de madeira serrada – Tecverde (tipo light wood framing).** Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais – SiNAT – DATec Nº 020-C. Brasília, DF, 2018b.

BROUN, R. et al. Integrated life cycle energy and greenhouse gas analysis of exterior wall systems for residential buildings. **Sustainability (Switzerland)**, v. 6, n. 12, p. 8592–8603, 2014.

BUENO, C. et al. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208–2220, 2016.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Cadernos Técnicos de Composições Representativas.** Brasil, 2017. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-afetadas-lote1-habitacao-fundacoes-estruturas/SINAPI\\_CT\\_LOTE1\\_COMPOSICOES\\_REPRESENTATIVAS\\_v009.pdf](http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-afetadas-lote1-habitacao-fundacoes-estruturas/SINAPI_CT_LOTE1_COMPOSICOES_REPRESENTATIVAS_v009.pdf)>. Acesso: 15 janeiro 2019.

\_\_\_\_\_. **Sistema de orçamentos.** Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.isinapi.com/>>. Acesso: 25 de julho de 2019.

CAO, X. et al. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 109, p. 131–143, 2015.

CASTRO, A. L. DE A. et al. **Recomendação de modelos de caracterização mais apropriados ao contexto brasileiro para avaliação de impacto na escassez hídrica.** In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. Fortaleza: 2016.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647–658, 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução N. 307, de 5 de Julho de 2002**. Ministério do Meio Ambiente, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 7 de maio de 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução N. 492, de 20 de dezembro de 2018**. Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=742>>. Acesso em: 25 de abril de 2020.

CONDEIXA, K.; HADDAD, A.; BOER, D. Life Cycle Impact Assessment of masonry system as inner walls : A case study in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 141–147, 2014.

DAHLBO, H. et al. Comparison of different normalised LCIA results and their feasibility in communication. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 4,

DAHLSTRØM, O. et al. Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional- or passive house standard. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 470–479, 2012.

DE SOUZA, D. M. et al. Land use impacts on biodiversity in LCA: proposal of characterization factors based on functional diversity. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 6, p. 1231–1242, 2013.

DE SOUZA, D. M. et al. Life cycle thinking in Brazil: challenges and advances towards a more comprehensive practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2016.

DE SOUZA, D. M. **Rede de pesquisa em AICV – O que é a RAICV?** Brasil, 2020. Disponível em: <<https://raicvbrasil.wixsite.com/raicv>>. Acesso em: 10 maio de 2020.

DE SOUZA, D. M.; TEIXEIRA, R. F. M.; OSTERMANN, O. P. Assessing biodiversity loss due to land use with Life Cycle Assessment: are we there yet? **Global Change Biology**, v. 21, n. 1, p. 32–47, 2015.

DREYER, L. C.; NIEMANN, A. L.; HAUSCHILD, M. Z. Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 4, p. 191–200, 2003.

DUTIL, Y.; ROUSSE, D.; QUESADA, G. Sustainable Buildings: An Ever-Evolving Target. **Sustainability**, v. 3, p. 443–464, 2011.

EN 15978, I. S. **Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method**. Irish Standard, 2011.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PINTO, H. DE M. Processo de Investigação e Análise Bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013.

ENSSLIN, S. R. et al. Disclosure of the State of the Art of Performance Evaluation Applied to Project Management. **American Journal of Industrial and Business Management**, v. 4, p. 677–687, 2014.

EL HANANDEH, A. Environmental assessment of popular single-family house construction alternatives in Jordan. **Building and Environment**, v. 92, p. 192–199, 2015.

EMAMI, N. et al. A life cycle assessment of two residential buildings using two different LCA database-software combinations: Recognizing uniformities and inconsistencies. **Buildings**, v. 9, n. 1, 2019.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE (EC-JRC). **Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (ILCD Handbook)**. p. 105. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010a.

\_\_\_\_\_. **Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods (ILCD Handbook)**. p. 21. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

\_\_\_\_\_. **Framework and requirements for LCIA models and indicators (ILCD Handbook)**. p. 103. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010b.

\_\_\_\_\_. **General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance (ILDC Handbook)**. p. 394. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010c.

\_\_\_\_\_. **Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context (ILCD Handbook)**. p. 142. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.

EVANGELISTA, P. P. A. et al. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 748–761, 2018.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da Pesquisa Científica**. São Carlos: Serviço de Biblioteca e Informação, 2002.

FRISCHKNECHT, R. et al. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Ecoinvent Report n. 3, v.2.0 (2007). Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

\_\_\_\_\_. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Final report ecoinvent 2000. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2003.



GÁMEZ-GARCÍA, D. C. et al. A cradle to handover life cycle assessment of external walls: Choice of materials and prognosis of elements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 8, 2018.

GERHARDT, T.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. 1ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GLORIA, T. P.; LIPPIATT, B. C.; COOPER, J. Life Cycle Impact Assessment Weights to Support Environmentally Preferable Purchasing in the United States. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 21, p. 7551–7557, 2007.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GOEDKOOPE, M. et al. **ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), 2009. Disponível em: <[https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf)>. Acesso em: 12 de abril de 2020.

GOEDKOOPE, M.; SPRIENSMA, R. **Methodology Annex: The Ecoindicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment**. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 2000a.

GOEDKOOPE, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment**. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 2000b.

GRILLO, F. F.; TENÓRIO, J. A. S.; DE OLIVEIRA, J. R. Caracterização e adição de poeira de aciaria elétrica em ferro-gusa. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 3, p. 301–307, 2013.

GUINÉE, J. B. et al. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards – Parts 1 and 2**. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, 2001a.

GUINÉE, J. B. et al. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards – Part 3: Scientific Background**. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, 2001b.

HAUSCHILD, M.; POTTING, J. **Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP03 methodology**. Environmental Project No. 996. Institute for Product Development Technical University of Denmark, 2005.

HAUSCHILD, M.; WENZEL, H. **Environmental Assessment of Products**. v. 2: Scientific background. Chapman & Hall, London, Weinheim, New York, 1997.

HEEREN, N. et al. Environmental Impact of Buildings - What Matters? **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 16, p. 9832–9841, 2015.

HEIJUNGS, R.; SUH, S. **The computational structure of life cycle assessment**. Dordrecht; London: Springer, 2011.

HIRSCH, J. E. **An index to quantify an individual's scientific research output**. v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 2005.

HISCHIER, R. et al. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Final Report ecoinvent v2.1**. v. 1, n. 3. Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009.

HOXHA, E. et al. Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 33–47, 2017.

HUIJBREGTS, M. A critical view on scientific consensus building in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p. 477–479, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Instrução normativa IBAMA nº 122, de 18 de outubro de 2006**. Brasil, 2006.

INABA, A.; ITSUBO, N. Development of global scale LCIA method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 12, p. 2271–2275, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO/TR 14049:2012(E). **Environmental management – Life Cycle Assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope and inventory analysis**. Switzerland, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. Brasília: IBICT, 2018. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

\_\_\_\_\_. **Avaliação do Ciclo de Vida – Ontologia Terminológica**. Brasília: IBICT, 2015.

\_\_\_\_\_. **Avaliação do Ciclo de Vida – Iniciativas Brasileiras**. Brasília, 2020. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/iniciativas-brasileiras/>>. Acesso em: 11 de abril de 2020.

\_\_\_\_\_. **Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) – Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro**. Brasília: IBICT, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2001: The Scientific Basis. In: HOUGHTON J. T. et al. (Eds.). **Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge

University Press, United Kingdom, 2001.

ISLAM, H. et al. Optimization approach of balancing life cycle cost and environmental impacts on residential building design. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 282–292, 2015.

ITSUBO, N.; INABA, A. **LIME2 – Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling: Summary**. JLCA News Letter, n. 12. Japan: Life-Cycle Assessment Society of Japan, 2012.

\_\_\_\_\_. **LIME2 – Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling: Chapter 3 – Integration of Environmental Impacts**. JLCA News Letter, n. 19. Japan: Life-Cycle Assessment Society of Japan, 2015.

JAILLON, L.; POON, C. S. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 239–248, 2009.

JANJUA, S. Y.; SARKER, P. K.; BISWAS, W. K. Sustainability assessment of a residential building using a life cycle assessment approach. **Chemical Engineering Transactions**, v. 72, p. 19–24, 2019.

JOLLIET, O et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324–330, 2003.

JÚNIOR, M. A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4ª Edição. São Paulo: CEMPRE, 2018.

KAHHAT, R. et al. Environmental impacts over the life cycle of residential buildings using different exterior wall systems. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 15, n. 3, p. 211–221, 2009.

KNEIFEL, J. et al. **Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) Online 2.0 Technical Manual**. National Institute of Standards and Technology Technical Note 2032, 2018. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2032.pdf>>. Acesso em: 12 de abril de 2020.

KEMNA, R. et al. **MEEUP – Methodology Report**. Brussels: European Commission, 2005.

KERN, A. P. et al. Factors influencing temporary wood waste generation in high-rise building construction. **Waste Management**, v. 78, p. 446–455, 2018.

LASVAUX, S. et al. Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters? **Ecological Indicators**, v. 67, p. 174–182, 2016.

LASVAUX, S. et al. Towards guidance values for the environmental performance of buildings: application to the statistical analysis of 40 low-energy single family houses' LCA in France. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 5, p. 657–674, 2017.

LAVAGNA, M. et al. Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock. **Building and Environment**, v. 145, p. 260–275, 2018.

LEWANDOWSKA, A. et al. Between full LCA and energy certification methodology—a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 1, p. 9–22, jan. 2015.

LIEBEREI, J.; GHEEWALA, S. H. Resource depletion assessment of renewable electricity generation technologies—comparison of life cycle impact assessment methods with focus on mineral resources. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 185–198, 2017.

LIPPIATT, B. C. **BEES 4.0: Building for Environmental and Economic Sustainability**. Technical Manual and User Guide. NISTIR 7423. National Institute of Standards and Technology, 2007.

MACIAS, J. et al. Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 107–120, 2017.

MIGUEL, P. A. C. et. al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2<sup>o</sup> Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MONAHAN, J.; POWELL, J. C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 1, p. 179–188, 2011.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Environmental life-cycle impacts of a single-family house in Portugal: Assessing alternative exterior walls with two methods. **Gazi University Journal of Science**, v. 24, n. 3, p. 527–534, 2011.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 572–583, 2012.

MORENO, R. E et al. **Documentation of changes implemented in ecoinvent Data 3.0 – Ecoinvent Report 5**, v. 4. St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013.

MORENO, R. E et al. **Documentation of changes implemented in ecoinvent database v 3.5**. Zürich, Switzerland: Ecoinvent, 2018.

MOSTEIRO-ROMERO, M. et al. Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy

related life-cycle impacts. **Energy and Buildings**, v. 68, n. PARTA, p. 620–631, 2014.

NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT (RIVM). ReCiPe 2016 v1.1 – **A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: Characterization**. The Netherlands: Ministry of Health, Welfare and Sport (VWS), 2017.

OLIVEIRA, F. et al. Comparative environmental and economic analysis of south European building constructive systems. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, v. 10, p. 509–528, 2014.

OLIVIERI, H. et al. A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 45–60, 2017.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28–39, 2009.

OWSIANIAK, M. et al. IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: A case study-based comparison. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 5, p. 1007–1021, 2014.

OYARZO, J.; PEUPOORTIER, B. Life cycle assessment model applied to housing in Chile. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 109–116, 2014.

PACHECO-TORRES, R. et al. Analysis of CO<sub>2</sub> emissions in the construction phase of single-family detached houses. **Sustainable Cities and Society**, v. 12, p. 63–68, 2014.

PANT, R. et al. Comparison between three different LCIA methods for aquatic ecotoxicity and a product environmental risk assessment: Insights from a detergent case study within OMNIITOX. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 5, p. 295–306, 2004.

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

PAVAN, A. L. R. et al. **Avaliação de impactos do uso da terra em serviços ecossistêmicos**. In: **V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida**. Anais. 2016.

PAVAN, A. L. R.; OMETTO, A. R. Regionalization of land use impact models for life cycle assessment: Recommendations for their use on the global scale and their applicability to Brazil. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 60, p. 148–155, 2016.

PETROVSKI, A.; IVANOVIĆ-ŠEKULARAC, J.; ŠEKULARAC, N. D. Comparison of wooden and conventional houses sustainability: Increasing application of modified wood In R. Of Macedonia. **Thermal Science**, v. 2018, 2018.

PINI. TCPO – **Tabelas de composições de Preços para Orçamentos**. 13ª Edição. São Paulo: Pini, 2008.

PIZZOL, M. et al. Impacts of “metals” on human health: A comparison between nine different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 646–656, 2011.

PIZZOL, M. et al. Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 6, p. 853–866, 2017.

PRADO, V.; WENDER, B. A.; SEAGER, T. P. Interpretation of comparative LCAs: external normalization and a method of mutual differences. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 12, p. 2018–2029, 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª Edição. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QUALE, J. et al. Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 2, p. 243–253, 2012.

QUÉRÉ, C. LE et al. Global carbon budget 2013. **Earth System Science Data**, v. 6, n. 1, p. 235–263, 2014.

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

RAMOS, V. M. K. **Avaliação do ciclo de vida dos materiais de uma habitação de interesse social em alvenaria convencional, light steel framing e light wood framing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

RODRIGUES, T. O. **Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), 2015. Disponível em: <[http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/03/Ibict\\_Curso-IntroACV\\_Apostila\\_dez15-1.pdf](http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/03/Ibict_Curso-IntroACV_Apostila_dez15-1.pdf)>. Acesso em 17 de abril de 2020.

ROSSI, B. et al. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. **Building and Environment**, v. 51, p. 395–401, 2012.

ROSSI, B.; MARIQUE, A.F.; REITER, S. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. **Building and Environment**, v. 51, p. 402–407, 2012.

SABA, L. A.; AHMAD, M. H.; MAJID, R. B. A. Quantifying the embodied carbon of a low energy alternative method of construction (AMC) house in Nigeria. **Chemical Engineering Transactions**, v. 63, p. 643–648, 2018.

SALA, S. et al. **Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment, EUR (28984)**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.

SALAZAR, J.; MEIL, J. Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 17, p. 1563–1571, 2009.

SALOMÃO, P. E. A. et al. Análise comparativa dos sistemas construtivos alvenaria convencional e light steel framing: um estudo de caso em residência uniifamiliar em Teófilo Otoni, MG. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 9, p. 5–10, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE (SMMA). **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://multimidia.curitiba.pr.gov.br/2017/00211737.pdf>>. Acesso em: 7 de maio de 2018.

SHIRAZI, A.; ASHURI, B. Embodied life cycle assessment comparison of single family residential houses considering the 1970s transition in construction industry: Atlanta case study. **Building and Environment**, v. 140, p. 55–67, 2018.

SIM, J.; SIM, J. The atmospheric environmental impact of a Korean traditional building's life cycle, along with carbon footprint analysis. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 172–186, 2017.

SOUST-VERDAGUER, B. et al. BIM-Based LCA Method to Analyze Envelope Alternatives of Single-Family Houses: Case Study in Uruguay. **Journal of Architectural Engineering**, v. 24, n. 3, 2018.

SOUZA, L. G. Análise comparativa do custo de uma casa unifamiliar nos sistemas construtivos de alvenaria, madeira de lei e Wood Frame. **Revista Especialize On-Line**, v. 50, 2013.

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

STEEN, B. **A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS): Version 2000 – General system characteristics**. Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems (CPM), Chalmers University of Technology, Gotheburg, Sweden, 1999.

SWART, P.; ALVARENGA, R.A.F.; DEWULF, J. Abiotic resource use. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. In: HAUSCHILD, M.; HUIJBREGTS, M. A. J. (Eds.). **Life cycle impact assessment**. [s.l.] Springer Press, Dordrecht, 2015. p. 247–26.

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

TAVARES, V.; LACERDA, N.; FREIRE, F. Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The “Moby” case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 1044–1053, 2019.

TECCHIO, P. et al. Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 268–279, 2019.

THOMAZ, E. et al. **Código de práticas nº 01: alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2009.

TIKUL, N.; SRICHANDR, P. Assessment of environmental impact of Thai housing. **Gazi University Journal of Science**, v. 24, n. 3, p. 585–591, 2011.

TOFFOLETTO, L. et al. LUCAS - A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 2, p. 93–102, 2007.

UGAYA, C. M. L. Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos. In: PAULO JOSÉ ADISSI; PINHEIRO, F. A.; CARDOSO, R. DA S. (Eds.). **Gestão ambiental de unidades produtivas**. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 275–298.

UGAYA, C. M. L. et al. **Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: critérios para recomendação de métodos e modelos de caracterização para o Brasil**. In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Buildings and climate change: summary for decision-makers**. United Nations Environment Programme, 2009.

\_\_\_\_\_. **Common Carbon Metric for measuring Energy Use & Reporting Greenhouse Gas Emissions from Building Operations**. United Nations Environment Programme, 2010.

\_\_\_\_\_. **2018 Global Status Report – Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. United Nations Environment Programme, 2018.

VATAN, M. Evolution of Construction Systems: cultural effects on traditional structures and their reflection on modern building construction. In: **Evolution of Construction Systems**. [s.l.: s.n.]. 2018. p. 35–57.

VITALE, P. et al. Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 839–852, 2018.



VIVAN, A. L.; PALIARI, J. C.; NOVAES, C. C. Vantagem Produtiva do Sistema Light Steel Framing: Da Construção Enxuta à Racionalização Construtiva. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**. 2010.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de informação de segurança de produto químico**. Curitiba, 2014. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/06/FispqCaHidratadaltau.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2019.

WAN OMAR, W. M. S. W. et al. Assessment of the embodied carbon in precast concrete wall panels using a hybrid life cycle assessment approach in Malaysia. **Sustainable Cities and Society**, v. 10, p. 101–111, 2014.

WEIDEMA, B. P. Comparing Three Life Cycle Impact Assessment Methods from an Endpoint Perspective. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 1, p. 20–26, 2015.

WEIDEMA, B. P. et al. **Overview and methodology – Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. Ecoinvent Report v. 3, n. 1. St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013.

WEIDEMA, B. P. Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 259–265, 1998.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3, p. 167–174, 1996.

WOLF, M.-A. et al. **The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe**. JRC Reference Report, EUR 24982 EN. European Commission – Joint Research Centre. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

YAMAZAKI, Y. Future Innovative Construction Technologies: Directions and Strategies to Innovate Construction Industry. **21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction**, 2004.

YAN, X. et al. Carbon footprints of urban residential buildings: A household survey-based approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018.

YANG, X. et al. Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 729–743, 2018.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2ª Edição. Porto Alegre: Book-man, 2001.

ZAMPORI, L. et al. **Guide for Interpreting Life Cycle Assessment Result – EUR 28266 EM – JRC Technical Report**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.

ZHANG, W. et al. Life cycle assessment of a single-family residential building in Canada: A case study. **Building Simulation**, v. 7, n. 4, p. 429–438, 2014.

### APÊNDICE 1 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM AC

nº	Material	Qtd.	Un.	Qtd. com perdas	Qtd. sem perdas	Perdas	Un.	Índice de perdas	Referência Índice	Densidade (Kg/m³)	Referência Densidade
<b>1</b>	<b>Vedação em AC</b>	<b>5,76</b>	<b>m²</b>								
1.1	Bloco cerâmico furado com 8 furos horizontais (9x19x19cm, e = 9 cm)	155,52	Un.	342,14	307,93	34,21	kg	10%	(1)	2300,00	(3)
1.2	<i>Argamassa para assentamento (Traço 1:2:8 - Cimento:Cal:Areia); e junta = 12 mm, A/C = 0,5</i>	0,07	m³					35%	(2)		
1.2.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32,00 MPa)	12,25	kg	12,25	7,35	4,90	kg	40%	(3)	1950,00	(3)
1.2.2	Cal hidratada CH III	27,77	kg	27,77	15,00	12,78	kg	46%	(2)	2210,00	-
1.2.3	Areia lavada tipo média	76,16	kg	76,16	38,08	38,08	kg	50%	(2)	1515,00	(3)
1.2.4	Água	3,13	kg	3,13	3,13	0,00	kg			997,00	
<b>2</b>	<b>Revestimento e acabamento</b>										
2.1	<i>Chapisco (Traço 1:3 - Cimento:Areia) e = 5 mm, A/C = 0,5</i>	0,06	m³								
2.1.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32,00 MPa)	28,08	kg	28,08	16,85	11,23	kg	40%	(3)	1950,00	
2.1.2	Areia lavada tipo média	65,45	kg	65,45	32,72	32,72	kg	50%	(2)	1515,00	(3)
2.1.3	Água	7,18	kg	7,18	7,18	0,00	kg			997,00	
2.2	<i>Emboço Manual (Traço 1:2:8 - Cimento:Cal:Areia); e = 20 mm, A/C = 0,5</i>	0,23	m³					29%	(2)		
2.2.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32,00 MPa)	40,84	kg	40,84	24,51	16,34	kg	40%	(3)	1950,00	(3)
2.2.2	Cal hidratada CH III	92,58	kg	92,58	49,99	42,59	kg	46%	(2)	2210,00	(4)
2.2.3	Areia lavada tipo média	253,86	kg	253,86	126,93	126,93	kg	50%	(2)	1515,00	(3)
2.2.4	Água	10,44	kg	10,44	10,44	0,00	kg			997,00	
2.3	<i>Reboco (Traço 1:2 - Cal:Areia); e = 5 mm, A/C = 0,5</i>	0,06	m³								
2.3.1	Cal hidratada CH III	42,43	kg	42,43	22,91	19,52	kg	46%	(2)	2210,00	(4)

(Continuação da Tabela)

nº	Material	Qtd.	Un.	Qtd. com perdas (kg)	Qtd. sem perdas (kg)	Perdas (kg)	Un.	Índice de perdas	Referência Índice	Densidade (Kg/m³)	Referência Densidade
2.3.2	Areia média - secagem e peneiramento	58,18	kg	58,18	29,09	29,09	kg	50%	(2)	1515,00	(3)
2.3.3	Água	9,57	kg	9,57	9,57	0,00	kg			997,00	

(1) FONTE: PINI (2008).

(2) FONTE: AGOPYAN (1998).

(3) FONTE: TAVARES (2006).

(4) FONTE: VOTORANTIM CIMENTOS (2014).

## APÊNDICE 2 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM DEA

nº	Material	Qtd.	Un.	Qtd. com perdas	Qtd. sem perdas	Perdas	Un.	Índice de perdas	Referência Índice	Densidade (Kg/m³)	Referência densidade
<b>1</b>	<b>Vedação em <i>Drywall</i> com estrutura de aço</b>	<b>5,76</b>	<b>m²</b>								
1.1	Chapa de Gesso <i>Drywall</i> tipo <i>Standard</i> (240 cm x 120 cm x 1,25 cm, e = 1,25 cm)	4	Un.	147,69	96,00	51,69	kg	35%	(1)	666,67	(2)
1.2	<i>Estrutura de aço zincado conformados a frio, conforme NBR 6673</i>										
1.2.1	Perfil guia inferior e superior tipo "U" (90x40x0,8 mm, para 2,4 m)	2	Un.	7,70	6,16	1,54	kg	20%	(2)		
1.2.2	Perfil montante tipo "Ue" (90 mm x 40 mm x 12 mm x 0,8 mm) espaçados a cada 40 cm, altura 2,4 m	7	Un.	24,57	19,66	4,91	kg	20%	(2)		
1.2.3	Pino liso de aço temperado para fixação em concreto 7,6 x 28 mm c/ arruela a cada 40 cm	14	Un.	0,13	0,13	0,00	kg				
1.2.4	Parafuso de aço para <i>Drywall</i> 4,8x19mm Auto Brocante Flangeada	28	Un.	0,07	0,07	0,00	kg				
1.2.5	Lã de vidro (rolo com 12500x1200x50mm, e = 50 mm)	5,76	m²	3,00	2,88	0,12	kg	4%	(2)	10,00	(2)
1.2.6	Parafuso <i>Drywall</i> cabeça trombeta ponta broca (3,5 x 25 mm) para fixação da chapa de gesso a cada 25 cm	160	Un.	0,21	0,21	0,00	kg				
1.2.7	Cantoneiras em aço zincado conformado a frio	9,60	m	2,04	1,63	0,41	kg	20%	(2)		
1.2.8	Pregos ardox (diâmetro 7,5 mm x comprimento 100 mm)	8	un.	0,14	0,14	0,00	kg				
1.2.9	Tratamento superficial do aço (Ecoinvent = 64 m² de tratamento por tonelada de aço)	2,20	m²	2,20	1,76	0,44	m²		(3)		
<b>2</b>	<b>Revestimento e acabamento</b>										
2.1	Massa para <i>Drywall</i> (juntas)	5,95	kg	5,95	5,18	0,77	kg	13%	(1)		

(1) FONTE: AGOPYAN (1998).

(2) FONTE: Calculado em projeto (2019).

(3) FONTE: Calculado conforme recomendação do *Ecoinvent 3.5* (64 m<sup>2</sup> de tratamento por tonelada de aço).

**(2) Para os cálculos efetuados em projeto, as seguintes informações foram utilizadas como referência:**

- Perfil U *Light Steel Frame* de aço galvanizado (3 m de comprimento x 0,04 m de largura x 0,95 mm de espessura) – Massa por perfil = 3,85 kg.
- Perfil Montante *Light Steel Frame* (3 m x 0,08 m x 0,8) – Massa por perfil = 3,51 kg.
- Lã de vidro (rolo com 12,5 m x 1,2 m x 0,5 m, e = 0,5 m) – Massa por perfil = 7,5 kg; Área = 15 m<sup>2</sup>.
- Cantoneiras em aço zincado conformado a frio (3 m x 0,0254 m) – Massa por metro = 0,17 kg.

– O desperdício dos perfis e cantoneiras foram calculados com base no corte realizado para a construção de uma parede de altura e comprimento de 2,4 m.

– As densidades da chapa de gesso acartonado e da lã de vidro foram calculadas de acordo as massas fornecidas pelos fabricantes e os volumes calculados em projeto. Assim, as equações (1) e (2) foram utilizadas:

**Volume de um paralelepípedo:**  $V = S_b \times h$ ; onde  $V$  = Volume,  $S_b$  = área da base (retangular) e  $h$  = altura.

**Densidade ou massa específica:**  $d = m / V$ ; onde  $d$  = densidade,  $m$  = massa e  $V$  = volume.

### APÊNDICE 3 – CÁLCULO DE MATERIAIS PARA A VEDAÇÃO EM DEM

nº	Material	Qtd.	Un.	Qtd. com perdas	Qtd. sem perdas	Perdas	Un.	Índice de perdas	Referência Índice	Densidade (Kg/m³)	Referência densidade
<b>1</b>	<b>Vedação em <i>Drywall</i> com estrutura de madeira</b>	<b>5,76</b>									
1.1	Chapa de Gesso <i>Drywall</i> tipo <i>Standard</i> (240 cm x 120 cm x 1,25 cm, e = 1,25 cm)	4	un.	147,69	96,00	51,69	kg	35%	(1)	666,67	(2)
1.2	<i>Estrutura de madeira autoclavada</i>	0,13	m³	88,17	88,17	0,00	kg			696,97	(2)
1.2.1	Tratamento químico da madeira com arseniato de cobre cromatado do tipo C (CCA-C)	1,04	kg	0,89	0,89	0,00	kg			7,0	(4)
1.2.2	Soleiras superiores e inferiores de madeira maciça em <i>Pinus</i> , com 2,4 m de comprimento	4,80	m	21,60	18,40	3,20	kg	15%	(2)	696,97	(2)
1.2.3	Perfil montante de madeira maciça em <i>Pinus</i> espaçados a cada 40 cm, altura 2,3 m	16,10	m	72,45	61,72	10,73	kg	15%	(2)	696,97	(2)
1.2.4	Perfil de madeira posicionada no centro da estrutura (6 pedaços de 35 cm de comprimento)	2,10	m	9,45	8,05	1,40	kg	15%	(2)	696,97	(2)
1.2.5	Pregos ardox (diâmetro 7,5 mm x comprimento 100 mm)	22	un.	0,38	0,38	0,00	kg				
1.2.6	Pregos ardox (diâmetro 3,4 mm x comprimento 83 mm)	52	un.	0,31	0,31	0,00	kg				
1.2.7	Lã de vidro (rolo com 12500x1200x50mm, e = 50 mm)	5,76	m²	3,00	2,88	0,12	kg	4%	(2)	10,00	(2)
1.2.8	Parafuso <i>Drywall</i> cabeça trombeta ponta broca (3,5 x 25 mm) para fixação da chapa de gesso a cada 25 cm	160	un.	0,21	0,21	0,00	kg				
1.2.9	Cantoneiras em aço zincado conformado a frio	9,60	m	2,04	1,63	0,41	kg	20%	(2)		
1.2.10	Tratamento superficial do aço (Ecoinvent = 64 m² de tratamento por tonelada de aço)	0,13	m²	0,13	0,10	0,03	m²		(3)		

nº	Material	Qtd.	Un.	Qtd. com perdas	Qtd. sem perdas	Perdas	Un.	Índice de perdas	Referência Índice	Densidade (Kg/m³)	Referência densidade
<b>2</b>	<b>Revestimento e acabamento</b>										
2.1	Massa para <i>Drywall</i> (juntas)	5,95	kg	5,95	5,18	0,77	kg	13%	(1)		

(1) FONTE: AGOPYAN (1998).

(2) FONTE: Calculado em projeto (2019).

(3) FONTE: Calculado conforme recomendação do *Ecoinvent 3.5* (64 m² de tratamento por tonelada de aço).

(4) FONTE: BRASIL (2018b).

**(2) Para os cálculos efetuados em projeto, as seguintes informações foram utilizadas como referência:**

- Viga de *Pinus* Bruto (0,05 m x 0,11 m x 3 m) – Massa por perfil = 11,5 kg.  
O volume adquirido e utilizado foi calculado para cada processo de montagem das paredes, ou seja, para a quantidade necessária de soleiras superiores e inferiores, de perfil montante (posicionados verticalmente entre as soleiras e espaçados a cada 0,4 m, de acordo com as recomendações da DATec N° 020) e de perfis de madeira posicionados ao centro.
- A lã de vidro e as cantoneiras em aço zincado conformado a frio possuem as mesmas especificações do DEA.

– O desperdício dos perfis de madeira foram calculados com base no corte realizado para a construção de uma parede de altura e comprimento de 2,4 m. O mesmo procedimento de cálculo, utilizado na vedação de DEA, para cálculo do volume e da densidade, foi aplicado para a quantidade adquirida e utilizada de madeira, chapa de gesso acartonado e lã de vidro para o DEM.



### APÊNDICE 4 – TRANSPORTE DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

nº	Material	Fornecedor	Localização da fábrica	Distância até a obra (km)	Massa (kg)	Massa (t)	t.km
<b>1</b>	<b>Vedação em AC</b>						
	Bloco cerâmico	Cenário 1	Curitiba (PR)	26,60	342,14	0,34	9,10
		Cenário 2	Prudentópolis (PR)	212,00			72,53
		Cenário 3	Tatuí (SP)	368,00			125,91
	Cimento Portland	Cenário 1	Rio Branco do Sul (PR)	49,00	81,18	0,08	3,98
		Cenário 2	Votorantim (SP)	475,00			38,56
		Cenário 3	Esteio (RS)	569,00			46,19
	Cal hidratada	Cenário 1	Ponta Grossa (PR)	122,00	162,78	0,16	19,86
		Cenário 2	Itapeva (SP)	251,00			40,86
		Cenário 3	Jundiaí (SP)	447,00			72,76
	Areia média	Cenário 1	São José dos Pinhais (PR)	16,70	453,64	0,45	7,58
		Cenário 2	Paranaguá (PR)	79,50			36,06
		Cenário 3	Carambeí (PR)	167,00			75,76
<b>2</b>	<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura de aço</b>						
	Chapa de gesso acartonado	Cenário 1	Mogi das Cruzes (SP)	581,00	147,69	0,15	85,81
		Cenário 2	Queimados (RJ)	784,00			115,79
		Cenário 3	Rio de Janeiro (RJ)	813,00			120,07
	Estrutura de aço zincado	Cenário 1	Almirante Tamandaré (PR)	20,20	34,31	0,03	0,69
		Cenário 2	Mogi das Cruzes (SP)	581,00			19,93
		Cenário 3	Saquarema (RJ)	1027,00			35,24
	Parafusos e pregos em aço inoxidável	Cenário 1	Araucária (PR)	30,00	0,54	0,54 x 10 <sup>-3</sup>	0,02
		Cenário 2	Vinhedo (SP)	570,00			0,31
		Cenário 3	Novo Hamburgo (RS)	666,00			0,36
	Lã de vidro	Cenário 1	São José dos Pinhais (PR)	11,40	3,00	0,3 x 10 <sup>-2</sup>	0,03
		Cenário 2	São Paulo (SP)	397,00			1,19
		Cenário 3	Poá (SP)	457,00			1,37

nº	Material	Fornecedor	Localização da fábrica	Distância até a obra (km)	Massa (kg)	Massa (t)	t.km
	Massa para <i>Drywall</i>	Cenário 1	Contenda (PR)	47,00	5,95	0,01	0,28
		Cenário 2	Mogi das Cruzes (SP)	581,00			3,46
		Cenário 3	Queimados (RJ)	784,00			4,66
<b>3</b>	<b>Vedação em <i>drywall</i> com estrutura de madeira</b>						
	Chapa de gesso acartonado	Cenário 1	Mogi das Cruzes (SP)	581,00	147,69	0,15	85,81
		Cenário 2	Queimados (RJ)	784,00			115,79
		Cenário 3	Rio de Janeiro (RJ)	813,00			120,07
	Madeira de <i>pinus</i> maciço	Cenário 1	Araucária (PR)	28,50	103,50	0,10	2,95
		Cenário 2	Indaial (SC)	211,00			21,84
		Cenário 3	Reserva (PR)	230,00			23,81
	Parafusos e pregos em aço inoxidável	Cenário 1	Araucária (PR)	30,00	0,90	0,9 x 10 <sup>-3</sup>	0,03
		Cenário 2	Vinhedo (SP)	570,00			0,52
		Cenário 3	Novo Hamburgo (RS)	666,00			0,60
	Lã de vidro	Cenário 1	São José dos Pinhais (PR)	11,40	3,00	0,3 x 10 <sup>-2</sup>	0,03
		Cenário 2	São Paulo (SP)	397,00			1,19
		Cenário 3	Poá (SP)	457,00			1,37
	Cantoneiras de aço zincado	Cenário 1	Almirante Tamandaré (PR)	20,20	2,04	0,2 x 10 <sup>-2</sup>	0,04
		Cenário 2	Mogi das Cruzes (SP)	581,00			1,19
		Cenário 3	Saquarema (RJ)	1027,00			2,10
	Massa para <i>Drywall</i>	Cenário 1	Contenda (PR)	47,00	5,95	0,01	0,28
		Cenário 2	Mogi das Cruzes (SP)	581,00			3,46
		Cenário 3	Queimados (RJ)	784,00			4,66

## APÊNDICE 5 – MATRIZ PEDIGREE (QUALIDADE DOS DADOS)

### QUADRO A – QUALIDADE ESPERADA DOS DADOS

Categoria	Qualidade esperada	Considerações	Pontuação
<b>Confiança na fonte</b>	Dados derivados de fontes confiáveis, como de base de dados com alto rigor científico e aprovação internacional	Dados provenientes da base de dados <i>Ecoinvent 3.5</i> , biblioteca <i>Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification - unit</i>	1
<b>Completeza</b>	Dados que representam todos os locais relevantes para o mercado considerado, durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais	A área coberta pelo resto do mundo ( <i>RoW – Rest of World</i> ) é dinâmica e pode ser alterada com envios futuros para o banco de dados. As atividades de mercado para serviços e infraestrutura imobiliizadas existem apenas com um escopo global (GLO) e consiste no fornecimento de insumos para o resto do mundo. Nesse sentido, <i>RoW</i> é definida como a diferença entre o conjunto de dados de referência global e o conjuntos de dados com geografias definidas	1
<b>Cobertura Temporal</b>	Dados recentes, entre 2010 e 2019	A versão 3.5 da base de dados <i>ecoinvent</i> foi lançada em 2018, com atualizações em todo o banco de dados (MORENO <i>et al.</i> , 2018)	1
<b>Cobertura Geográfica</b>	Dados regionais ou coletados em regiões com as mesmas características da cidade de Curitiba. No caso dos materiais de construção	A delimitação realizada foi para o resto do mundo ( <i>RoW</i> ), devido à falta de processos brasileiros. Deste modo, a adaptação dos principais processos foi necessária para melhorar a qualidade dos dados	5
<b>Cobertura Tecnológica</b>	Dados obtidos por meio de tecnologias idênticas ou parecidas	A maioria dos processos apresentaram processos com o uso de tecnologias idênticas na base de dados. Entretanto, algumas adaptações foram fundamentais para a cobertura coerente dos processos de transformação	2

FONTE: A autora (2020).

Com base no QUADRO A, relativo à qualidade esperada dos dados, foi considerada a adaptação dos principais processos de produção dos materiais de construção utilizados nesse estudo. Desta forma, a pontuação da matriz Pedigree em relação aos requisitos de qualidade dos dados, após a adaptação dos processos coletados no *Ecoinvent 3.5*, são apresentados na TABELA A.

TABELA A – AVALIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS COLETADOS NO BANCO DE DADOS ECOINVENT 3.5

Processo	Confiabilidade	Completeza	Correlação	Correlação	Correlação
			Temporal	Geográfica	Tecnológica
Bloco Cerâmico	1	1	1	1	1
Cimento Portland	1	1	1	1	1
Cal hidratada	1	1	1	1	1
Areia	1	1	1	1	1
Laminação de Chapas de Aço	1	1	1	2	2
Revestimento de zinco	1	1	1	2	2
Aço de baixa liga laminado a quente	1	1	1	2	2
Forjamento do aço	1	1	1	2	1
Chapa de gesso acartonado	1	1	1	1	1
Lã de vidro	1	1	1	2	2
Massa para <i>drywall</i>	1	1	1	1	1
Madeira serrada	1	1	1	1	2
Tratamento químico da madeira	1	1	1	2	2

FONTE: A autora (2020).

## APÊNDICE 6 – PROCESSOS ADAPTADOS DO ECOINVENT 3.5

Processos regionalizados
Acrylic filler {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Cement, Portland {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Clay {Adaptado BR}  clay pit operation   Cut-off, U
Clay {Adaptado BR}  market for clay   Cut-off, U
Clay brick {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Clinker {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Corrugated board box {Adaptado BR}  market for corrugated board box   Cut-off, U
Diesel {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Diesel {Adaptado BR}  market group for   Cut-off, U
Diesel {Adaptado BR}  petroleum refinery operation   Cut-off, U
Diesel, burned in building machine {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Diesel, low-sulfur {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Diesel, low-sulfur {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Electricity, high voltage {BR}  market for   Cut-off, U
Electricity, low voltage {BR}  market for   Cut-off, U
Electricity, medium voltage {BR}  market for   Cut-off, U
Folding boxboard/chipboard {Adaptado BR}  chipboard production, white lined   Cut-off, U
Folding boxboard/chipboard {Adaptado BR}  folding boxboard production   Cut-off, U
Folding boxboard/chipboard {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Forging, steel {Adaptado BR}  forging, steel, large open die   Cut-off, U
Glass fibre {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Glass fibre {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Glass wool mat {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Gravel, crushed {Adaptado BR}  market for gravel, crushed   Cut-off, U
Gravel, crushed {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Gypsum plasterboard {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Gypsum, mineral {Adaptado BR}  gypsum quarry operation   Cut-off, U
Gypsum, mineral {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Hard coal {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Heat, district or industrial, other than natural gas {Adaptado BR}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U
Heat, district or industrial, other than natural gas {Adaptado BR}  heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW   Cut-off, U
Heat, district or industrial, other than natural gas {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Heavy fuel oil {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Heavy fuel oil {Adaptado BR}  petroleum refinery operation   Cut-off, U
Heavy fuel oil, burned in refinery furnace {Adaptado BR}  processing   Cut-off, U
Kraft paper, unbleached {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Kraft paper, unbleached {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Light fuel oil {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Light fuel oil {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U
Light fuel oil {Adaptado BR}  petroleum refinery operation   Cut-off, U
Lime {Adaptado BR}  market for lime   Cut-off, U
Lime {Adaptado BR}  production, milled, loose   Cut-off, U
Lime, hydrated, loose weight {Adaptado BR}  market for lime, hydrated, loose weight   Cut-off, U
Lime, hydrated, loose weight {Adaptado BR}  production   Cut-off, U
Lime, hydrated, loose weight {Adaptado BR1}  market for lime, hydrated, loose weight   Cut-off, U
Lime, hydrated, loose weight {Adaptado BR1}  production   Cut-off, U
Lime, hydrated, loose weight {Adaptado BR2}  production   Cut-off, U
Lime, hydrated, packed {Adaptado BR}  market for lime, hydrated, packed   Cut-off, U



(Continuação do Quadro)

<b>Processos regionalizados</b>
<i>Lime, hydrated, packed {Adaptado BR} production   Cut-off, U</i>
<i>Lime, packed {Adaptado BR} lime production, milled, packed   Cut-off, U</i>
<i>Lime, packed {Adaptado BR} market for lime, packed   Cut-off, U</i>
<i>Limestone, crushed, for mill {Adaptado BR} market for limestone, crushed, for mill   Cut-off, U</i>
<i>Limestone, crushed, for mill {Adaptado BR} production   Cut-off, U</i>
<i>Limestone, unprocessed {Adaptado BR} limestone quarry operation   Cut-off, U</i>
<i>Limestone, unprocessed {Adaptado BR} market for limestone, unprocessed   Cut-off, U</i>
<i>Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil   Cut-off, U</i>
<i>Packing, lime product {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Packing, lime product {Adaptado BR} processing   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum {Adaptado BR} production, onshore   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum {Adaptado BR1} production, onshore   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum coke {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum refinery {Adaptado BR} construction   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum refinery {Adaptado BR} market for refinery   Cut-off, U</i>
<i>Petroleum refinery {Adaptado BR} market for refinery   Cut-off, U {Adaptado BR}</i>
<i>Petroleum refinery {Adaptado BR1} construction   Cut-off, U</i>
<i>Pig iron {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Pig iron {Adaptado BR} production   Cut-off, U</i>
<i>Quicklime, in pieces, loose {Adaptado BR} production   Cut-off, U</i>
<i>Sand {Adaptado BR} gravel and quarry operation   Cut-off, U</i>
<i>Sand {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {Adaptado BR} hardwood forestry, beech, sustainable forest management   Cut-off, U</i>
<i>Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} planing, beam, hardwood, u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, beam, hardwood, raw, dried (u=10%) {Adaptado BR} beam, hardwood, raw, kiln drying to u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, board, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, board, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} planing, board, hardwood, u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%) {Adaptado BR} board, hardwood, raw, kiln drying to u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} production   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, hardwood, raw {Adaptado BR} sawing, hardwood   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, lath, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, lath, hardwood, dried (u=10%), planed {Adaptado BR} planing, lath, hardwood, u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sawnwood, lath, hardwood, raw, dried (u=10%) {Adaptado BR} lath, hardwood, raw, kiln drying to u=10%   Cut-off, U</i>
<i>Sheet rolling, steel {Adaptado BR} processing   Cut-off, U</i>
<i>Steel, low-alloyed {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>
<i>Steel, low-alloyed {Adaptado BR} steel production, converter, low-alloyed   Cut-off, U</i>
<i>Steel, low-alloyed {Adaptado BR} steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U</i>
<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {Adaptado BR} production   Cut-off</i>
<i>Steel, unalloyed {Adaptado BR} market for   Cut-off, U</i>

(Continuação do Quadro)

<b>Processos regionalizados</b>
<i>Steel, unalloyed {Adaptado BR}  steel production, converter, unalloyed   Cut-off, U</i>
<i>Stucco {Adaptado BR}  market for   Cut-off, U</i>
<i>Stucco {Adaptado BR}  production   Cut-off, U</i>
<i>Tap water {Adaptado BR}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U</i>
<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, euro5 {Adaptado BR}  market for transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO5   Cut-off, U</i>
<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO5 {Adaptado BR}  transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO5   Cut-off, U</i>
<i>Water, BR</i>
<i>Water, cooling, unspecified natural origin, BR</i>
<i>Water, river, BR</i>
<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>
<i>Water, well, BR</i>
<i>Water, well, in ground, BR</i>
<i>Wood chips, wet, measured as dry mass {Adaptado BR}  wood chips production, hardwood, at sawmill   Cut-off, U</i>
<i>Wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact {Adaptado BR}  wood preservation, vacuum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   Cut-off, U</i>
<i>Zinc coat, coils {Adaptado BR}  zinc coating, coils   Cut-off, U</i>

## APÊNDICE 7 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO BEES+

CARACTERIZAÇÃO									
Impactos	Cenário 1. Vedação AC	Cenário 2. Vedação AC	Cenário 3. Vedação AC	Cenário 1. Vedação DEA	Cenário 2. Vedação DEA	Cenário 3. Vedação DEA	Cenário 1. Vedação DEM	Cenário 2. Vedação DEM	Cenário 3. Vedação DEM
ma	3,23E+04	3,60E+04	3,93E+04	3,72E+04	3,82E+04	3,85E+04	4,15E+04	4,25E+04	4,27E+04
	1,95E-11	2,01E-11	2,05E-11	4,61E-12	4,80E-12	4,87E-12	4,52E-12	4,72E-12	4,75E-12
	2,28E+05	2,46E+05	2,63E+05	1,18E+05	1,23E+05	1,25E+05	1,11E+05	1,16E+05	1,16E+05
	6,42E+02	6,84E+02	7,22E+02	1,11E+03	1,12E+03	1,13E+03	7,81E+02	7,91E+02	7,93E+02
e ozônio	9,07E-03	1,19E-02	1,45E-02	6,36E-03	7,12E-03	7,42E-03	6,93E-03	7,70E-03	7,83E-03
	3,21E+03	3,27E+03	3,32E+03	2,79E+03	2,81E+03	2,82E+03	2,03E+03	2,04E+03	2,04E+03
naturais	2,13E+02	2,52E+02	2,87E+02	1,61E+02	1,71E+02	1,75E+02	1,51E+02	1,61E+02	1,63E+02
	9,58E+02	1,04E+03	1,11E+03	1,26E+04	1,27E+04	1,27E+04	1,58E+03	1,61E+03	1,61E+03
	2,48E+02	2,68E+02	2,86E+02	3,27E+02	3,32E+02	3,34E+02	3,27E+02	3,27E+02	3,27E+02
	1,25E+06	1,36E+06	1,46E+06	3,97E+06	4,00E+06	4,01E+06	1,59E+06	1,62E+06	1,63E+06
Smog)	5,83E+02	6,56E+02	7,21E+02	4,41E+02	4,61E+02	4,69E+02	5,29E+02	5,49E+02	5,52E+02
(Critérios HH)	1,80E+01	2,09E+01	2,34E+01	4,27E+01	4,36E+01	4,39E+01	4,07E+01	4,16E+01	4,17E+01
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	1,52E+06	1,65E+06	1,76E+06	4,14E+06	4,18E+06	4,19E+06	1,75E+06	1,79E+06	1,79E+06

NORMALIZAÇÃO									
de Impactos	Cenário 1. Vedação AC	Cenário 2. Vedação AC	Cenário 3. Vedação AC	Cenário 1. Vedação DEA	Cenário 2. Vedação DEA	Cenário 3. Vedação DEA	Cenário 1. Vedação DEM	Cenário 2. Vedação DEM	Cenário 3. Vedação DEM
ma	4,14E-06	4,61E-06	5,03E-06	4,76E-06	4,88E-06	4,93E-06	5,32E-06	5,44E-06	5,44E-06
	5,83E-09	6,00E-09	6,14E-09	1,38E-09	1,43E-09	1,46E-09	1,35E-09	1,41E-09	1,41E-09
	8,90E-03	9,63E-03	1,03E-02	4,63E-03	4,82E-03	4,90E-03	4,33E-03	4,52E-03	4,52E-03
	1,93E-05	2,05E-05	2,17E-05	3,33E-05	3,36E-05	3,38E-05	2,34E-05	2,37E-05	2,37E-05
e ozônio	2,67E-05	3,50E-05	4,26E-05	1,87E-05	2,09E-05	2,18E-05	2,04E-05	2,27E-05	2,27E-05
	6,07E-03	6,18E-03	6,27E-03	5,28E-03	5,31E-03	5,32E-03	3,83E-03	3,86E-03	3,86E-03
naturais	6,02E-03	7,13E-03	8,12E-03	4,55E-03	4,85E-03	4,97E-03	4,26E-03	4,56E-03	4,56E-03
	1,83E-04	1,98E-04	2,12E-04	2,41E-03	2,42E-03	2,42E-03	3,03E-04	3,07E-04	3,07E-04
	6,42E-03	6,94E-03	7,41E-03	8,47E-03	8,60E-03	8,65E-03	8,46E-03	8,59E-03	8,59E-03
	7,10E-06	7,72E-06	8,27E-06	2,25E-05	2,27E-05	2,28E-05	9,05E-06	9,22E-06	9,22E-06
Smog)	3,85E-03	4,33E-03	4,76E-03	2,91E-03	3,04E-03	3,09E-03	3,49E-03	3,62E-03	3,62E-03
(Critérios HH)	9,40E-04	1,09E-03	1,22E-03	2,22E-03	2,27E-03	2,29E-03	2,12E-03	2,17E-03	2,17E-03
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	3,24E-02	3,56E-02	3,83E-02	3,06E-02	3,14E-02	3,17E-02	2,68E-02	2,77E-02	2,77E-02



## APÊNDICE 8 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO CML

### CARACTERIZAÇÃO

de Impacto	Cenário 1. Vedação AC	Cenário 2. Vedação AC	Cenário 3. Vedação AC	Cenário 1. Vedação DEA	Cenário 2. Vedação DEA	Cenário 3. Vedação DEA	Cenário 1. Vedação DEM	Cenário 2. Vedação DEM	Cenário 3. Vedação DEM
	5,37E-01	5,97E-01	6,52E-01	6,84E-01	7,00E-01	7,06E-01	7,31E-01	7,47E-01	7,50E-01
(MP 100a)	2,30E+02	2,49E+02	2,66E+02	1,21E+02	1,26E+02	1,28E+02	1,13E+02	1,18E+02	1,18E+02
	2,99E-04	3,50E-04	3,96E-04	8,24E-04	8,33E-04	8,37E-04	1,15E-03	1,16E-03	1,16E-03
ozônio	1,22E-05	1,57E-05	1,88E-05	9,44E-06	1,04E-05	1,07E-05	9,73E-06	1,07E-05	1,08E-05
is fósseis	1,51E+03	1,80E+03	2,05E+03	1,41E+03	1,49E+03	1,52E+03	1,30E+03	1,38E+03	1,39E+03
doce	2,02E+01	2,20E+01	2,36E+01	8,34E+01	8,38E+01	8,40E+01	4,03E+01	4,07E+01	4,08E+01
	2,15E+05	2,20E+05	2,25E+05	1,53E+05	1,54E+05	1,55E+05	1,15E+05	1,16E+05	1,16E+05
	2,86E-01	3,11E-01	3,35E-01	3,03E+00	3,04E+00	3,04E+00	5,45E-01	5,52E-01	5,53E-01
	1,53E-01	1,67E-01	1,79E-01	1,83E-01	1,87E-01	1,88E-01	1,96E-01	2,00E-01	2,00E-01
	3,23E-02	3,53E-02	3,81E-02	3,93E-02	4,01E-02	4,04E-02	4,64E-02	4,72E-02	4,74E-02
	4,99E+01	5,66E+01	6,26E+01	7,21E+01	7,41E+01	7,48E+01	6,61E+01	6,80E+01	6,83E+01
	2,17E+05	2,22E+05	2,27E+05	1,55E+05	1,56E+05	1,56E+05	1,16E+05	1,18E+05	1,18E+05

### NORMALIZAÇÃO

de Impacto	Cenário 1. Vedação AC	Cenário 2. Vedação AC	Cenário 3. Vedação AC	Cenário 1. Vedação DEA	Cenário 2. Vedação DEA	Cenário 3. Vedação DEA	Cenário 1. Vedação DEM	Cenário 2. Vedação DEM
	1,91E-11	2,12E-11	2,31E-11	2,43E-11	2,49E-11	2,51E-11	2,59E-11	2,65E-11
(MP 100a)	4,58E-11	4,95E-11	5,29E-11	2,41E-11	2,50E-11	2,54E-11	2,24E-11	2,34E-11
	3,53E-12	4,13E-12	4,68E-12	9,73E-12	9,83E-12	9,88E-12	1,35E-11	1,36E-11
ozônio	1,37E-13	1,75E-13	2,10E-13	1,06E-13	1,16E-13	1,20E-13	1,09E-13	1,20E-13
is fósseis	4,81E-11	5,72E-11	6,53E-11	4,48E-11	4,73E-11	4,82E-11	4,15E-11	4,39E-11
doce	3,90E-11	4,24E-11	4,55E-11	1,61E-10	1,62E-10	1,62E-10	7,78E-11	7,86E-11
	1,84E-09	1,89E-09	1,93E-09	1,31E-09	1,32E-09	1,33E-09	9,84E-10	9,96E-10
	5,88E-12	6,42E-12	6,90E-12	6,24E-11	6,26E-11	6,26E-11	1,12E-11	1,14E-11
	1,16E-11	1,26E-11	1,36E-11	1,39E-11	1,42E-11	1,43E-11	1,49E-11	1,51E-11
	3,81E-12	4,17E-12	4,50E-12	4,64E-12	4,74E-12	4,77E-12	5,48E-12	5,57E-12
	6,44E-12	7,30E-12	8,07E-12	9,31E-12	9,55E-12	9,65E-12	8,52E-12	8,78E-12
	2,03E-09	2,09E-09	2,15E-09	1,66E-09	1,68E-09	1,69E-09	1,21E-09	1,22E-09

## APÊNDICE 9 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO ILCD 2011

### CARACTERIZAÇÃO

Grupos de Impacto	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM	Cenário 3. DEM
	6,87E-01	7,64E-01	8,34E-01	8,46E-01	8,67E-01	8,75E-01	9,28E-01	9,49E-01	9,52E-01
	2,25E+02	2,44E+02	2,61E+02	1,13E+02	1,18E+02	1,20E+02	-2,07E+02	-2,02E+02	-2,01E+02
	5,54E-06	6,11E-06	6,61E-06	1,34E-04	1,34E-04	1,34E-04	8,18E-05	8,18E-05	8,18E-05
de ozônio	1,22E-05	1,57E-05	1,88E-05	9,44E-06	1,04E-05	1,07E-05	9,73E-06	9,73E-06	9,73E-06
minerais, fósseis e renováveis	6,32E-03	7,61E-03	8,78E-03	2,49E-02	2,51E-02	2,52E-02	2,78E-02	2,81E-02	2,81E-02
hídricos	-2,95E-01	-3,36E-01	-3,73E-01	-3,65E-01	-3,72E-01	-3,75E-01	-2,82E-01	-2,90E-01	-2,91E-01
doce	5,79E+02	6,86E+02	7,83E+02	2,88E+03	2,90E+03	2,91E+03	1,85E+03	1,88E+03	1,88E+03
oceano	2,01E-02	2,17E-02	2,30E-02	3,72E-02	3,76E-02	3,77E-02	3,69E-02	3,73E-02	3,73E-02
	1,82E-01	2,04E-01	2,25E-01	1,43E-01	1,49E-01	1,51E-01	1,68E-01	1,75E-01	1,76E-01
	2,05E+00	2,30E+00	2,52E+00	1,78E+00	1,85E+00	1,87E+00	2,23E+00	2,30E+00	2,31E+00
de ozônio	5,74E-01	6,50E-01	7,18E-01	4,37E-01	4,58E-01	4,66E-01	5,40E-01	5,61E-01	5,65E-01
	7,18E-02	8,15E-02	9,02E-02	1,32E-01	1,34E-01	1,35E-01	1,96E-01	1,96E-01	1,96E-01
	2,49E-05	2,94E-05	3,34E-05	1,42E-04	1,43E-04	1,44E-04	6,14E-05	6,14E-05	6,14E-05
(provisória)	2,56E-05	3,44E-05	4,23E-05	2,51E-05	2,75E-05	2,84E-05	2,62E-05	2,86E-05	2,90E-05
	4,74E+00	6,12E+00	7,36E+00	6,09E+00	6,46E+00	6,60E+00	5,89E+00	6,27E+00	6,33E+00
	4,30E+02	5,07E+02	5,77E+02	2,61E+02	2,84E+02	2,93E+02	1,76E+03	1,79E+03	1,79E+03
	1,24E+03	1,45E+03	1,63E+03	3,26E+03	3,31E+03	3,34E+03	3,42E+03	3,48E+03	3,48E+03

### NORMALIZAÇÃO

Grupos de Impacto	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM	Cenário 3. DEM
	1,22E-02	1,36E-02	1,49E-02	1,51E-02	1,55E-02	1,56E-02	1,65E-02	1,69E-02	1,69E-02
	3,19E-02	3,45E-02	3,69E-02	1,60E-02	1,67E-02	1,70E-02	-2,92E-02	-2,85E-02	-2,85E-02
	4,47E-01	4,92E-01	5,33E-01	1,08E+01	1,08E+01	1,08E+01	6,60E+00	6,61E+00	6,61E+00
de ozônio	9,99E-04	1,28E-03	1,54E-03	7,74E-04	8,50E-04	8,80E-04	7,98E-04	8,75E-04	8,75E-04
minerais, fósseis e renováveis	3,28E-02	3,94E-02	4,55E-02	1,29E-01	1,30E-01	1,31E-01	1,44E-01	1,45E-01	1,45E-01
hídricos	-4,28E-03	-4,88E-03	-5,42E-03	-5,29E-03	-5,40E-03	-5,44E-03	-4,09E-03	-4,20E-03	-4,20E-03
doce	1,55E-01	1,84E-01	2,09E-01	7,69E-01	7,76E-01	7,79E-01	4,95E-01	5,02E-01	5,02E-01
oceano	3,08E-03	3,31E-03	3,52E-03	5,69E-03	5,74E-03	5,77E-03	5,64E-03	5,70E-03	5,70E-03
	5,98E-03	6,73E-03	7,39E-03	4,70E-03	4,90E-03	4,97E-03	5,54E-03	5,74E-03	5,74E-03
	1,25E-02	1,40E-02	1,54E-02	1,08E-02	1,13E-02	1,14E-02	1,36E-02	1,40E-02	1,40E-02
de ozônio	1,27E-02	1,43E-02	1,58E-02	9,64E-03	1,01E-02	1,03E-02	1,19E-02	1,24E-02	1,24E-02
	1,42E-02	1,61E-02	1,78E-02	2,60E-02	2,65E-02	2,67E-02	3,87E-02	3,92E-02	3,92E-02
	1,61E-01	1,89E-01	2,15E-01	9,17E-01	9,24E-01	9,27E-01	3,96E-01	4,04E-01	4,04E-01
(provisória)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	1,97E-02	2,54E-02	3,05E-02	2,53E-02	2,68E-02	2,74E-02	2,44E-02	2,60E-02	2,60E-02
	8,27E-05	9,75E-05	1,11E-04	5,02E-05	5,47E-05	5,64E-05	3,39E-04	3,44E-04	3,44E-04
	9,04E-01	1,03E+00	1,14E+00	1,27E+01	1,27E+01	1,27E+01	7,72E+00	7,75E+00	7,75E+00

**APÊNDICE 10 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO IMPACT 2002+**

**CARACTERIZAÇÃO**

<b>Impacto</b>	<b>Cenário 1. AC</b>	<b>Cenário 2. AC</b>	<b>Cenário 3. AC</b>	<b>Cenário 1. DEA</b>	<b>Cenário 2. DEA</b>	<b>Cenário 3. DEA</b>	<b>Cenário 1. DEM</b>	<b>Cenário 2. DEM</b>	<b>Cenário 3. DEM</b>
	5,98E-01	6,65E-01	7,26E-01	7,06E-01	7,24E-01	7,31E-01	7,86E-01	8,04E-01	8,07E-01
	2,86E+00	3,21E+00	3,52E+00	2,62E+00	2,71E+00	2,75E+00	3,16E+00	3,25E+00	3,27E+00
	2,23E+02	2,41E+02	2,57E+02	1,14E+02	1,18E+02	1,20E+02	1,06E+02	1,11E+02	1,12E+02
	3,84E+00	3,97E+00	4,08E+00	1,49E+01	1,49E+01	1,49E+01	2,89E+00	2,92E+00	2,92E+00
de ozônio	1,22E-05	1,57E-05	1,88E-05	9,44E-06	1,04E-05	1,07E-05	9,73E-06	1,07E-05	1,08E-05
	2,58E+04	2,79E+04	2,98E+04	2,46E+04	2,52E+04	2,54E+04	2,56E+04	2,62E+04	2,63E+04
	6,74E+03	8,39E+03	9,87E+03	7,91E+03	8,42E+03	8,62E+03	8,54E+03	9,06E+03	9,14E+03
	1,67E+03	1,98E+03	2,25E+03	1,59E+03	1,67E+03	1,70E+03	1,46E+03	1,54E+03	1,56E+03
	1,54E-02	1,76E-02	1,95E-02	2,25E-02	2,30E-02	2,33E-02	2,98E-02	3,03E-02	3,04E-02
	4,03E+00	4,29E+00	4,53E+00	4,59E+00	4,65E+00	4,67E+00	8,03E+00	8,08E+00	8,09E+00
	1,28E-01	1,45E-01	1,61E-01	1,70E-01	1,75E-01	1,77E-01	1,84E-01	1,89E-01	1,90E-01
	2,78E+00	3,20E+00	3,57E+00	6,03E+00	6,16E+00	6,20E+00	3,25E+00	3,38E+00	3,39E+00
	4,41E+00	5,47E+00	6,42E+00	5,32E+00	5,70E+00	5,84E+00	6,65E+01	6,69E+01	6,69E+01
	6,33E-02	7,34E-02	8,24E-02	4,88E-02	5,18E-02	5,30E-02	7,26E-02	7,57E-02	7,62E-02
	4,78E+02	6,16E+02	7,41E+02	6,17E+02	6,55E+02	6,69E+02	5,96E+02	6,34E+02	6,40E+02
	3,49E+04	3,92E+04	4,30E+04	3,48E+04	3,61E+04	3,66E+04	3,64E+04	3,76E+04	3,78E+04

**NORMALIZAÇÃO**

<b>Impacto</b>	<b>Cenário 1. AC</b>	<b>Cenário 2. AC</b>	<b>Cenário 3. AC</b>	<b>Cenário 1. DEA</b>	<b>Cenário 2. DEA</b>	<b>Cenário 3. DEA</b>	<b>Cenário 1. DEM</b>	<b>Cenário 2. DEM</b>
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	2,17E-04	2,44E-04	2,67E-04	1,99E-04	2,06E-04	2,09E-04	2,40E-04	2,47E-04
	2,25E-02	2,43E-02	2,60E-02	1,15E-02	1,20E-02	1,21E-02	1,07E-02	1,12E-02
	1,52E-03	1,57E-03	1,61E-03	5,87E-03	5,89E-03	5,89E-03	1,14E-03	1,15E-03
de ozônio	1,80E-06	2,32E-06	2,78E-06	1,40E-06	1,54E-06	1,59E-06	1,44E-06	1,58E-06
	9,44E-05	1,02E-04	1,09E-04	9,01E-05	9,24E-05	9,32E-05	9,37E-05	9,60E-05
	3,89E-03	4,84E-03	5,70E-03	4,57E-03	4,86E-03	4,98E-03	4,93E-03	5,23E-03
	1,10E-02	1,30E-02	1,48E-02	1,05E-02	1,10E-02	1,12E-02	9,61E-03	1,02E-02
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	2,65E-05	2,83E-05	2,98E-05	3,02E-05	3,06E-05	3,07E-05	5,28E-05	5,32E-05
	1,27E-02	1,44E-02	1,59E-02	1,68E-02	1,72E-02	1,74E-02	1,82E-02	1,86E-02
	1,10E-03	1,26E-03	1,41E-03	2,38E-03	2,43E-03	2,45E-03	1,28E-03	1,33E-03
	3,51E-04	4,35E-04	5,11E-04	4,23E-04	4,53E-04	4,65E-04	5,29E-03	5,32E-03
	1,90E-05	2,20E-05	2,47E-05	1,47E-05	1,56E-05	1,59E-05	2,18E-05	2,27E-05
	1,41E-05	1,82E-05	2,10E-05	1,82E-05	1,94E-05	1,98E-05	1,77E-05	1,88E-05



**APÊNDICE 11 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO RECIPE 2016**

CARACTERIZAÇÃO									
categorias de Impacto	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM	Cenário 3. DEM
	4,29E-01	4,76E-01	5,19E-01	5,69E-01	5,82E-01	5,87E-01	6,14E-01	6,27E-01	6,29E-01
	2,21E+02	2,39E+02	2,55E+02	1,11E+02	1,16E+02	1,17E+02	1,04E+02	1,08E+02	1,09E+02
	2,59E+02	2,86E+02	3,10E+02	6,81E+03	6,81E+03	6,81E+03	4,18E+03	4,19E+03	4,19E+03
	3,21E+00	3,27E+00	3,32E+00	2,80E+00	2,81E+00	2,82E+00	2,03E+00	2,04E+00	2,05E+00
de ozônio	8,03E-05	9,97E-05	1,17E-04	1,38E-04	1,43E-04	1,45E-04	1,45E-04	1,51E-04	1,51E-04
doce	1,99E+00	2,32E+00	2,61E+00	5,81E+00	5,88E+00	5,91E+00	4,55E+00	4,62E+00	4,64E+00
	2,02E+04	2,43E+04	2,80E+04	4,30E+04	4,39E+04	4,43E+04	4,57E+04	4,67E+04	4,68E+04
	3,12E+02	6,09E+02	8,77E+02	7,63E+02	8,57E+02	8,94E+02	7,46E+02	8,42E+02	8,57E+02
ósseis	3,57E+01	4,23E+01	4,83E+01	3,31E+01	3,48E+01	3,55E+01	3,05E+01	3,23E+01	3,26E+01
minerais	6,19E+00	6,23E+00	6,26E+00	1,26E+00	1,27E+00	1,27E+00	1,15E+00	1,16E+00	1,16E+00
oce	1,99E-02	2,14E-02	2,28E-02	3,69E-02	3,73E-02	3,74E-02	3,61E-02	3,65E-02	3,66E-02
	2,05E-03	2,17E-03	2,28E-03	3,79E-03	3,82E-03	3,83E-03	4,17E-03	4,20E-03	4,20E-03
ossistemas terrestres	4,77E-01	5,39E-01	5,95E-01	3,50E-01	3,67E-01	3,73E-01	4,21E-01	4,38E-01	4,41E-01
saúde humana	4,66E-01	5,26E-01	5,80E-01	3,42E-01	3,58E-01	3,64E-01	4,08E-01	4,25E-01	4,27E-01
s finas	1,74E-01	1,96E-01	2,16E-01	2,52E-01	2,58E-01	2,60E-01	2,65E-01	2,71E-01	2,72E-01
	1,66E+04	2,01E+04	2,31E+04	3,02E+04	3,10E+04	3,13E+04	3,60E+04	3,69E+04	3,70E+04
	6,10E+00	7,88E+00	9,48E+00	7,82E+00	8,30E+00	8,49E+00	7,57E+00	8,06E+00	8,13E+00
	8,54E+00	9,57E+00	1,05E+01	9,78E+00	1,01E+01	1,03E+01	1,73E+02	1,73E+02	1,73E+02
	3,77E+04	4,56E+04	5,27E+04	8,09E+04	8,27E+04	8,35E+04	8,70E+04	8,89E+04	8,92E+04

NORMALIZAÇÃO									
categorias de Impacto	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM	Cenário 3. DEM
	1,05E-02	1,16E-02	1,27E-02	1,39E-02	1,42E-02	1,43E-02	1,50E-02	1,53E-02	1,53E-02
	3,79E-02	4,11E-02	4,39E-02	1,91E-02	1,99E-02	2,02E-02	1,78E-02	1,87E-02	1,87E-02
	6,94E+01	7,66E+01	8,31E+01	1,82E+03	1,83E+03	1,83E+03	1,12E+03	1,12E+03	1,12E+03
	1,20E-02	1,23E-02	1,24E-02	1,05E-02	1,05E-02	1,06E-02	7,60E-03	7,66E-03	7,66E-03
de ozônio	1,14E-03	1,42E-03	1,66E-03	1,96E-03	2,03E-03	2,06E-03	2,07E-03	2,14E-03	2,14E-03
doce	1,43E+00	1,66E+00	1,87E+00	4,16E+00	4,21E+00	4,23E+00	3,26E+00	3,31E+00	3,31E+00
	1,98E+00	2,38E+00	2,75E+00	4,22E+00	4,31E+00	4,35E+00	4,49E+00	4,58E+00	4,58E+00
	2,83E-01	5,53E-01	7,96E-01	6,93E-01	7,78E-01	8,12E-01	6,77E-01	7,64E-01	7,64E-01
ósseis	3,64E-02	4,32E-02	4,93E-02	3,37E-02	3,55E-02	3,62E-02	3,11E-02	3,29E-02	3,29E-02
minerais	5,16E-05	5,19E-05	5,22E-05	1,05E-05	1,06E-05	1,06E-05	9,59E-06	9,66E-06	9,66E-06
oce	3,07E-02	3,30E-02	3,51E-02	5,69E-02	5,74E-02	5,76E-02	5,56E-02	5,62E-02	5,62E-02
	4,46E-04	4,71E-04	4,94E-04	8,22E-04	8,28E-04	8,31E-04	9,05E-04	9,11E-04	9,11E-04
ossistemas terrestres	2,69E-02	3,04E-02	3,35E-02	1,97E-02	2,07E-02	2,10E-02	2,37E-02	2,47E-02	2,47E-02
saúde humana	2,27E-02	2,56E-02	2,82E-02	1,66E-02	1,74E-02	1,77E-02	1,98E-02	2,06E-02	2,06E-02
s finas	6,81E-03	7,66E-03	8,43E-03	9,83E-03	1,01E-02	1,02E-02	1,04E-02	1,06E-02	1,06E-02
	1,78E+00	2,15E+00	2,48E+00	3,23E+00	3,31E+00	3,35E+00	3,86E+00	3,94E+00	3,94E+00
	8,72E-03	1,13E-02	1,36E-02	1,12E-02	1,19E-02	1,21E-02	1,08E-02	1,15E-02	1,15E-02
	1,38E-03	1,55E-03	1,70E-03	1,58E-03	1,64E-03	1,67E-03	2,80E-02	2,81E-02	2,81E-02

## APÊNDICE 12 – IMPACTOS POTENCIAIS COM O MÉTODO TRACI 2.1

### CARACTERIZAÇÃO

Impactos	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM	Cenário 3. DEM
de ozônio	1,60E-05	2,06E-05	2,47E-05	1,21E-05	1,33E-05	1,38E-05	1,25E-05	1,38E-05	1,40E-05
	2,28E+02	2,47E+02	2,64E+02	1,19E+02	1,24E+02	1,26E+02	1,11E+02	1,16E+02	1,17E+02
(Smog)	1,12E+01	1,26E+01	1,39E+01	8,18E+00	8,57E+00	8,71E+00	9,72E+00	1,01E+01	1,02E+01
	5,97E-01	6,64E-01	7,25E-01	7,03E-01	7,21E-01	7,28E-01	7,84E-01	8,02E-01	8,05E-01
	2,50E-01	2,70E-01	2,88E-01	3,32E-01	3,37E-01	3,39E-01	3,31E-01	3,36E-01	3,37E-01
	5,55E-06	6,11E-06	6,61E-06	1,34E-04	1,34E-04	1,34E-04	8,18E-05	8,19E-05	8,20E-05
	2,49E-05	2,94E-05	3,34E-05	1,42E-04	1,43E-04	1,44E-04	6,14E-05	6,26E-05	6,28E-05
	8,04E-02	9,23E-02	1,03E-01	1,55E-01	1,58E-01	1,60E-01	1,58E-01	1,61E-01	1,62E-01
	5,76E+02	6,84E+02	7,81E+02	2,87E+03	2,90E+03	2,91E+03	1,85E+03	1,87E+03	1,88E+03
de combustível fóssil	2,08E+02	2,50E+02	2,87E+02	1,52E+02	1,63E+02	1,67E+02	1,45E+02	1,56E+02	1,58E+02
	1,03E+03	1,19E+03	1,35E+03	3,15E+03	3,20E+03	3,21E+03	2,11E+03	2,16E+03	2,16E+03

### NORMALIZAÇÃO

de Impactos	Cenário 1. AC	Cenário 2. AC	Cenário 3. AC	Cenário 1. DEA	Cenário 2. DEA	Cenário 3. DEA	Cenário 1. DEM	Cenário 2. DEM
	6,57E-03	7,31E-03	7,98E-03	7,74E-03	7,94E-03	8,02E-03	8,63E-03	8,83E-03
	9,43E-03	1,02E-02	1,09E-02	4,93E-03	5,13E-03	5,20E-03	4,60E-03	4,80E-03
	1,05E-01	1,16E-01	1,25E-01	2,53E+00	2,53E+00	2,54E+00	1,55E+00	1,55E+00
de combustível fóssil	1,11E-02	1,33E-02	1,52E-02	8,05E-03	8,64E-03	8,87E-03	7,70E-03	8,30E-03
de ozônio	9,92E-05	1,28E-04	1,53E-04	7,47E-05	8,24E-05	8,54E-05	7,78E-05	8,56E-05
	5,21E-02	6,18E-02	7,05E-02	2,59E-01	2,62E-01	2,63E-01	1,67E-01	1,69E-01
	3,32E-03	3,80E-03	4,24E-03	6,39E-03	6,53E-03	6,59E-03	6,51E-03	6,65E-03
	1,16E-02	1,25E-02	1,33E-02	1,53E-02	1,56E-02	1,57E-02	1,53E-02	1,55E-02
	2,37E-02	2,80E-02	3,18E-02	1,35E-01	1,36E-01	1,37E-01	5,85E-02	5,96E-02
(Smog)	8,03E-03	9,05E-03	9,96E-03	5,88E-03	6,15E-03	6,26E-03	6,98E-03	7,26E-03
	2,31E-01	2,62E-01	2,90E-01	2,98E+00	2,98E+00	2,99E+00	1,83E+00	1,83E+00



**APÊNDICE 13 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS CENÁRIOS PARA AS VEDAÇÕES EM AC, DEA E DEM**

**CARACTERIZAÇÃO BEES+**

de Impactos	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC	Desvio Padrão DEA	Desvio Padrão DEM
	3,59E+04	3,80E+04	4,22E+04	3,50E+03	7,00E+02	6,24E+02
ma	2,00E-11	4,76E-12	4,66E-12	5,18E-13	1,36E-13	1,21E-13
	2,46E+05	1,22E+05	1,14E+05	1,76E+04	3,46E+03	3,08E+03
	6,83E+02	1,12E+03	7,88E+02	3,98E+01	7,09E+00	6,32E+00
e ozônio	1,18E-02	6,97E-03	7,49E-03	2,70E-03	5,47E-04	4,88E-04
	3,27E+03	2,81E+03	2,04E+03	5,30E+01	1,14E+01	1,02E+01
naturais	2,51E+02	1,69E+02	1,58E+02	3,72E+01	7,50E+00	6,68E+00
	1,03E+03	1,26E+04	1,60E+03	7,56E+01	1,45E+01	1,29E+01
	2,67E+02	3,31E+02	3,27E+02	1,91E+01	3,63E+00	6,79E-07
	1,35E+06	3,99E+06	1,61E+06	1,02E+05	2,10E+04	1,87E+04
Smog)	6,54E+02	4,57E+02	5,44E+02	6,91E+01	1,41E+01	1,26E+01
(Critérios HH)	2,08E+01	4,34E+01	4,13E+01	2,69E+00	6,25E-01	5,57E-01
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

**CARACTERIZAÇÃO CML BASELINE**

Categorias de Impacto	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC
Acidificação	5,95E-01	6,97E-01	7,42E-01	5,77E-02
Aquecimento global (GWP 100a)	2,48E+02	1,25E+02	1,16E+02	1,77E+01
Depleção abiótica	3,49E-04	8,32E-04	1,15E-03	4,86E-05
Depleção da camada de ozônio	1,55E-05	1,02E-05	1,04E-05	3,29E-06
Depleção de combustíveis fósseis	1,79E+03	1,47E+03	1,36E+03	2,71E+02
Ecotoxicidade de água doce	2,19E+01	8,38E+01	4,06E+01	1,68E+00
Ecotoxicidade marinha	2,20E+05	1,54E+05	1,16E+05	4,95E+03
Ecotoxicidade terrestre	3,11E-01	3,04E+00	5,50E-01	2,46E-02
Eutrofização	1,66E-01	1,86E-01	1,99E-01	1,33E-02
Oxidação fotoquímica	3,52E-02	4,00E-02	4,70E-02	2,92E-03
Toxicidade Humana	5,64E+01	7,37E+01	6,75E+01	6,31E+00

**CARACTERIZAÇÃO ILCD 2011**

Categorias de Impacto	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC	Desvio Padrão DEA	Desvio Padrão DEM
	7,62E-01	8,63E-01	9,43E-01	7,40E-02	1,48E-02	1,32E-02
	2,43E+02	1,17E+02	-2,03E+02	1,77E+01	3,46E+00	3,09E+00
	6,09E-06	1,34E-04	8,18E-05	5,35E-07	9,23E-08	4,54E-14
e ozônio	1,55E-05	1,02E-05	9,73E-06	3,29E-06	6,66E-07	2,06E-14
minerais, fósseis e renováveis	7,57E-03	2,51E-02	2,80E-02	1,23E-03	1,62E-04	1,44E-04
hídricos	-3,35E-01	-3,71E-01	-2,88E-01	3,94E-02	5,39E-03	4,81E-03
doce	6,83E+02	2,90E+03	1,87E+03	1,02E+02	1,98E+01	1,77E+01
doce	2,16E-02	3,75E-02	3,72E-02	1,45E-03	2,65E-04	2,36E-04
	2,04E-01	1,48E-01	1,73E-01	2,14E-02	4,35E-03	3,88E-03
	2,29E+00	1,83E+00	2,28E+00	2,36E-01	4,79E-02	4,27E-02
e ozônio	6,47E-01	4,54E-01	5,55E-01	7,20E-02	1,50E-02	1,34E-02
	8,12E-02	1,34E-01	1,96E-01	9,16E-03	1,97E-03	5,45E-11
	2,92E-05	1,43E-04	6,14E-05	4,24E-06	8,40E-07	1,06E-14
provisória)	3,41E-05	2,70E-05	2,80E-05	8,38E-06	1,70E-06	1,51E-06
	6,07E+00	6,38E+00	6,16E+00	1,31E+00	2,66E-01	2,37E-01
	5,05E+02	2,80E+02	1,78E+03	7,34E+01	1,68E+01	1,50E+01

**CARACTERIZAÇÃO IMPACT 2002+**

Categorias de Impacto	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC
Acidificação aquática	6,63E-01	7,20E-01	7,99E-01	6,41E-02
Acidificação terrestre	3,20E+00	2,69E+00	3,22E+00	3,28E-01
Aquecimento global	2,40E+02	1,17E+02	1,10E+02	1,74E+01
Carcinogênicos	3,96E+00	1,49E+01	2,91E+00	1,17E-01
Depleção da camada de ozônio	1,55E-05	1,02E-05	1,04E-05	3,29E-06
Ecotoxicidade aquática	2,78E+04	2,51E+04	2,60E+04	2,04E+03
Ecotoxicidade terrestre	8,33E+03	8,31E+03	8,91E+03	1,57E+03
Energia não-renovável	1,97E+03	1,65E+03	1,52E+03	2,92E+02
Eutrofização aquática	1,75E-02	2,29E-02	3,01E-02	2,04E-03
Extração mineral	4,29E+00	4,64E+00	8,07E+00	2,50E-01
Inorgânicos inaláveis	1,45E-01	1,74E-01	1,88E-01	1,63E-02
Não-carcinogênicos	3,19E+00	6,13E+00	3,34E+00	3,95E-01
Ocupação da terra	5,43E+00	5,62E+00	6,68E+01	1,00E+00
Orgânicos inaláveis	7,30E-02	5,12E-02	7,49E-02	9,52E-03
Radiação ionizante	6,12E+02	6,47E+02	6,23E+02	1,32E+02

CARACTERIZAÇÃO RECIPE 2016						
Impactos de Impacto	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC	Desvio Padrão DEA	Desvio Padrão DEM
	4,75E-01	5,79E-01	6,23E-01	4,53E-02	9,01E-03	8,03E-03
	2,38E+02	1,15E+02	1,07E+02	1,72E+01	3,38E+00	3,01E+00
	2,85E+02	6,81E+03	4,18E+03	2,57E+01	4,41E+00	3,93E+00
	3,27E+00	2,81E+00	2,04E+00	5,32E-02	1,14E-02	1,02E-02
de ozônio	9,90E-05	1,42E-04	1,49E-04	1,83E-05	3,63E-06	3,24E-06
doce	2,31E+00	5,87E+00	4,60E+00	3,10E-01	5,42E-02	4,83E-02
	2,41E+04	4,37E+04	4,64E+04	3,91E+03	6,88E+02	6,13E+02
	5,99E+02	8,38E+02	8,15E+02	2,83E+02	6,75E+01	6,02E+01
ósseis	4,21E+01	3,45E+01	3,18E+01	6,30E+00	1,27E+00	1,13E+00
minerais	6,23E+00	1,27E+00	1,16E+00	3,36E-02	5,65E-03	5,04E-03
oce	2,14E-02	3,72E-02	3,64E-02	1,44E-03	2,63E-04	2,35E-04
	2,17E-03	3,81E-03	4,19E-03	1,11E-04	2,06E-05	1,84E-05
ossistemas terrestres	5,37E-01	3,63E-01	4,34E-01	5,87E-02	1,21E-02	1,07E-02
áude humana	5,24E-01	3,55E-01	4,20E-01	5,70E-02	1,17E-02	1,04E-02
s finas	1,95E-01	2,56E-01	2,70E-01	2,07E-02	4,30E-03	3,83E-03
	2,00E+04	3,08E+04	3,66E+04	3,25E+03	5,71E+02	5,09E+02
	7,82E+00	8,21E+00	7,92E+00	1,69E+00	3,43E-01	3,06E-01
	9,53E+00	1,01E+01	1,73E+02	9,74E-01	2,60E-01	2,32E-01

CARACTERIZAÇÃO TRACI 2.1				
Categorias de Impactos	Média AC	Média DEA	Média DEM	Desvio Padrão AC
Depleção da camada de ozônio	2,04E-05	1,30E-05	1,34E-05	4,38E-06
Aquecimento global	2,46E+02	1,23E+02	1,15E+02	1,77E+01
Oxidação fotoquímica (Smog)	1,25E+01	8,49E+00	1,00E+01	1,35E+00
Acidificação	6,62E-01	7,18E-01	7,97E-01	6,41E-02
Eutrofização	2,69E-01	3,36E-01	3,35E-01	1,92E-02
Carcinogênicos	6,09E-06	1,34E-04	8,19E-05	5,35E-07
Não-carcinogênicos	2,92E-05	1,43E-04	6,23E-05	4,24E-06
Efeitos respiratórios	9,19E-02	1,58E-01	1,60E-01	1,13E-02
Ecotoxicidade	6,80E+02	2,89E+03	1,87E+03	1,02E+02
Consumo de combustível fóssil	2,48E+02	1,60E+02	1,53E+02	3,94E+01



**APÊNDICE 14 – MÉDIA DOS IMPACTOS NORMALIZADOS COM OS MÉTODOS DE AICV E FATORES DE NORMALIZAÇÃO GLOBAIS**

NORMALIZAÇÃO						
Impactos	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais		
	AC	DEA	DEM	AC	DEA	DEM
	9,60E-03	4,78E-03	4,46E-03	2,92E-02	1,46E-02	1,36E-02
	6,92E-03	8,57E-03	8,55E-03	9,44E-03	1,17E-02	1,15E-02
	4,31E-03	3,02E-03	3,59E-03	1,61E-02	1,13E-02	1,34E-02
Água doce	1,98E-04	2,42E-03	3,06E-04	7,55E+01	9,23E+02	1,17E+02
	2,05E-05	3,36E-05	2,37E-05	4,63E+00	7,59E+00	5,34E+00
	7,70E-06	2,27E-05	9,17E-06	1,46E+02	4,31E+02	1,74E+02
	6,17E-03	5,30E-03	3,85E-03	2,84E-01	2,44E-01	1,77E-01
(combustível fóssil)	7,09E-03	4,79E-03	4,48E-03	2,66E-02	1,80E-02	1,68E-02

NORMALIZAÇÃO				
CML Baseline	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais
Categorias de Impactos	AC	DEA	DEM	AC
Aquecimento global	2,25E-02	1,13E-02	1,05E-02	2,96E-02
Eutrofização de água doce	5,74E-03	6,43E-03	6,86E-03	1,94E-03
Oxidação fotoquímica	1,89E-03	2,15E-03	2,53E-03	1,47E-03
Ecotoxicidade de água doce	1,93E-02	7,36E-02	3,57E-02	1,83E+00
Toxicidade Humana	3,31E-03	4,33E-03	3,97E-03	2,58E-02
Energia não-renovável (combustível fóssil)	2,59E-02	2,13E-02	1,97E-02	2,74E-02
Depleção de recursos naturais (minerais)	1,87E-03	4,47E-03	6,20E-03	5,48E-03

NORMALIZAÇÃO						
Impactos	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais		
	AC	DEA	DEM	AC	DEA	DEM
	3,44E-02	1,66E-02	-1,36E-02	2,90E-02	4,19E-02	-7,26E-02
	1,40E-02	1,12E-02	1,30E-02	1,29E-02	3,10E-02	3,86E-02
	6,70E-03	4,86E-03	5,42E-03	7,20E-03	1,56E-02	1,83E-02
Água doce	3,30E-03	5,73E-03	5,70E-03	2,94E-02	1,53E-01	1,52E-01
	1,43E-02	1,00E-02	1,15E-02	1,59E-02	3,35E-02	4,10E-02
Água doce	1,83E-01	7,75E-01	5,92E-01	5,79E-02	7,37E-01	4,76E-01
	4,91E-01	1,08E+01	8,00E+00	1,58E-01	1,04E+01	6,37E+00
	1,89E-01	9,23E-01	5,76E-01	6,15E-02	9,03E-01	3,88E-01
	1,60E-02	2,64E-02	3,49E-02	1,13E+02	5,59E+02	8,19E+02
	-4,86E-03	-5,38E-03	-4,58E-03	-2,91E-05	-9,67E-05	-7,50E-05
Recursos naturais (minerais)	3,92E-02	1,30E-01	1,40E-01	1,18E-01	1,17E+00	1,31E+00

NORMALIZAÇÃO				
IMPACT 2002+	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais
Categorias de Impactos	AC	DEA	DEM	AC
Aquecimento global	2,43E-02	1,19E-02	1,11E-02	2,86E-02
Eutrofização de água doce	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,87E-03
Ecotoxicidade de água doce	1,02E-04	9,19E-05	9,53E-05	9,13E-01
Carcinogênicos	1,56E-03	5,88E-03	1,15E-03	2,75E-01
Não-carcinogênicos	1,26E-03	2,42E-03	1,32E-03	6,21E-03
Inorgânicos inaláveis	1,43E-02	1,72E-02	1,85E-02	2,02E+02
Energia não-renovável (combustível fóssil)	1,29E-02	1,09E-02	1,00E-02	3,01E-02
Depleção de recursos naturais (minerais)	2,82E-05	3,05E-05	5,31E-05	3,21E+00

NORMALIZAÇÃO						
Impactos	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais		
	AC	DEA	DEM	AC	DEA	DEM
	4,09E-02	1,97E-02	1,84E-02	2,83E-02	1,37E-02	1,28E-02
	4,70E-04	8,27E-04	9,10E-04	7,65E-05	1,35E-04	1,48E-04
Água doce	3,29E-02	5,73E-02	5,60E-02	2,91E-02	5,07E-02	4,96E-02
	5,57E-02	3,77E-02	4,48E-02	2,61E-02	1,77E-02	2,10E-02
Água doce	1,65E+00	4,20E+00	3,30E+00	1,92E-01	4,89E-01	3,83E-01
	7,64E+01	1,83E+03	1,12E+03	1,34E+00	3,20E+01	1,97E+01
	2,13E+00	3,30E+00	3,92E+00	2,28E+00	3,52E+00	4,18E+00
	7,63E-03	1,00E-02	1,05E-02	2,72E+02	3,57E+02	3,75E+02
	1,23E-02	1,05E-02	7,64E-03	2,84E-04	2,44E-04	1,77E-04
(combustível fóssil)	4,30E-02	3,51E-02	3,24E-02	2,71E-02	2,22E-02	2,04E-02

NORMALIZAÇÃO				
TRACI 2.1	Média Cenários			Média Cenários Harmonizados Globais
Categorias de Impactos	AC	DEA	DEM	AC
Aquecimento global	1,02E-02	5,08E-03	4,74E-03	2,93E-02
Eutrofização marinha	1,25E-02	1,55E-02	1,55E-02	9,51E-03
Ecotoxicidade de água doce	6,15E-02	2,61E-01	1,69E-01	5,76E-02
Carcinogênicos	1,15E-01	2,53E+00	1,55E+00	1,58E-01
Não-carcinogênicos	2,78E-02	1,36E-01	5,93E-02	6,15E-02
Inorgânicos inaláveis	3,79E-03	6,50E-03	6,61E-03	1,28E+02
Energia não-renovável (combustível fóssil)	1,32E-02	8,52E-03	8,14E-03	2,64E-02