



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Leticia Dalpaz de Azevedo

**COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E DA AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO COMO TÉCNICAS DE TOMADA DE DECISÃO
NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL**

Florianópolis

2021

Leticia Dalpaz de Azevedo

**COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E DA AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO COMO TÉCNICAS DE TOMADA DE DECISÃO
NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Eneir Ghisi, PhD.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, por meio do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Azevedo, Leticia Dalpaz de

Comparação da avaliação do ciclo de vida e da avaliação do ciclo de vida energético como técnicas de tomada de decisão na construção de habitações de interesse social/Leticia Dalpaz de Azevedo; orientador, Enedir Ghisi, 2021.

225 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Impacto ambiental em edificações. 3. Impacto energético em edificações. 4. Simulação energética. 5. Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂eq. I. Ghisi, Enedir. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Leticia Dalpaz de Azevedo

**COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E DA AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO COMO TÉCNICAS DE TOMADA DE DECISÃO
NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^ª. Thalita Gorban Ferreira Giglio, Dr^ª.
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Ricardo Forgiarini Rupp, Dr.
Technical University of Denmark

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Coordenador do PPGEC

Prof. Enedir Ghisi, Ph.D.
Orientador

Florianópolis, 2021

AGRADECIMENTOS

À minha família, que, composta por diversas individualidades, forma o todo que constrói minha base. Especialmente à minha mãe, Ivete, por se dedicar intensivamente à minha educação e liberdade, por me lembrar diariamente a sabedoria do que é e deve ser simples, pelo carinho, cuidado e amor compartilhados. À minha irmã, Larissa, pela inspiração que representa para mim e para muitas outras pessoas, por sempre fazer com que eu me descubra, seja essa descoberta fácil ou difícil de enfrentar, e, mesmo ela já estando na casa dos 30, sabemos que nunca vamos envelhecer. À minha tia, Kika, pelo incentivo à minha criatividade, pelo amadurecimento da oposição de ideias e do diálogo, por instigar meu autoconhecimento e por me apoiar na busca dos meus sonhos. Ao meu cunhado, Fernando, pelas trocas em conversas sinceras e livres, pelo conhecimento construído com diferentes pontos de vista e por impulsionar a minha confiança em mim mesma.

Ao professor e orientador desta pesquisa, Enedir Ghisi, que me acompanha desde o ano de 2013. Por ser um excelente e dedicado professor, pelos conhecimentos compartilhados e, principalmente, por mostrar a importância da transmissão do conhecimento, seja por meio de aulas, artigos ou conversas.

À minha amiga Aline, por me mostrar a beleza do encontro de vidas, estilos e realidades que se complementam, por todo o apoio, pelos desabafos, conversas sinceras e puxões de orelha que me ensinam sobre o mundo e sobre mim mesma. À minha amiga Jake, pela nossa amizade incondicional, pela inspiração, motivação e lembrança de sempre lutar pelos meus sonhos, pelos caminhos inesquecíveis que percorremos juntas e pelos que estão por vir.

A todos os amigos que me transformam em cada troca, conversa, caminhada ou café da tarde. Aos companheiros de laboratório e pesquisadores do país, que lutam pela construção e fortalecimento da ciência livre de preconceitos e estigmas, e que buscam pelo conhecimento, por permitirem que essa e muitas outras pesquisas pudessem ser desenvolvidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Universidade Federal de Santa Catarina pelo financiamento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A mim.

RESUMO

A avaliação do ciclo de vida (ACV) e a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) podem ser usadas como técnicas para a escolha de projetos de menor impacto ambiental. Com isso, esse trabalho tem como objetivo principal comparar a ACV e a ACVE como técnicas de tomada de decisão para adoção de estratégias arquitetônicas voltadas para redução do impacto ambiental de habitações de interesse social. Para isso, foram definidos quatro sistemas de parede estrutural, ou seja, bloco cerâmico, bloco de concreto, *light steel framing* e concreto moldado *in loco*, e dois sistemas de cobertura, variando o uso de forro de madeira e de laje maciça. Tanto para a ACV como para a ACVE foram desenvolvidas análises de sensibilidade e de contribuição e identificação das questões significativas para validação do método aplicado. A unidade funcional utilizada foi a construção, operação e demolição de uma habitação de interesse social unifamiliar de 41,16m² com vida útil de 40 anos, com quatro moradores, localizada na zona bioclimática 3. O consumo energético durante a operação foi obtido por meio de simulação computacional. O conjunto de parede de *light steel framing* com forro de madeira apresentou o maior consumo. Considerando a ACV, o conjunto que apresentou tendência a ter menor impacto foi o de parede de concreto moldado *in loco* com forro de madeira. A análise de sensibilidade mostrou que é necessário definir a zona bioclimática e o uso ou não de aparelhos de ar-condicionado durante a operação da edificação. Alterações nessas duas variáveis podem gerar escolhas de sistemas distintos. Considerando a ACVE, a análise de sensibilidade demonstrou que a consideração das emissões de gases do efeito estufa acarreta em resultados diversos. Com isso, a ACVCO_{2eq} também foi considerada na análise. A parede definida na ACV como a de menor impacto foi a mesma selecionada nas análises de ACVE e ACVCO_{2eq}. Para a energia primária, a laje foi selecionada como cobertura de menor impacto, entretanto, para a ACVCO_{2eq} o forro de madeira foi selecionado. A comparação da ACV, ACVE e ACVCO_{2eq} como técnicas de tomada de decisão resultou em maior similaridade entre a ACVCO_{2eq} e a ACV. A consideração exclusiva da ACVE tende a favorecer os casos em que o consumo de energia durante a fase de operação é menor, não representando necessariamente o menor impacto durante o ciclo de vida. Com isso, as diferentes técnicas não podem ser utilizadas de forma equivalente.

Palavras-chave: Impacto ambiental em edificações. Impacto energético em edificações. Simulação energética. Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO_{2eq}.

ABSTRACT

Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy assessment (LCEA) can be used as techniques for choosing projects with lower environmental impact. Thus, the main objective of this work is to compare LCA and LCEA as decision-making techniques for the adoption of architectural strategies aimed at reducing the environmental impact of low-income housing. For this, four structural wall systems were defined, i.e. ceramic block, concrete block, light steel structure and cast-in-place concrete, and two roofing systems, varying the use of wooden ceiling and a concrete slab. For both LCA and LCEA, sensitivity and contribution analysis and the identification of relevant issues were developed for the validation of the method used. The functional unit used was the construction, operation and demolition of a 41.16m² single-family house with a lifespan of 40 years, with four residents, located in the bioclimatic zone 3. The energy consumption during the operation was obtained through computer simulation. The light steel framing wall set with wooden ceiling reached the highest consumption. Considering the LCA, the set that tends to have the lowest impact was the cast-in-place concrete wall with a wooden ceiling. The sensitivity analysis showed that it is necessary to define the bioclimatic zone and the use or not of air-conditioning during the building's operation. Changes to these two variables can generate different system choices. Considering LCEA, the sensitivity analysis showed that the consideration of greenhouse gas emissions leads to different results. Thus, the define LCCO₂eqA was also considered in the analysis. The wall defined in the LCA as the one with the lowest impact was the same that was selected in the LCEA and LCCO₂eqA analysis. For primary energy, the slab was selected as the lowest impact roofing, however, for LCCO₂eqA the wood ceiling was selected. The comparison of LCA, LCEA and LCCO₂eqA as decision-making techniques resulted in greater similarity between LCCO₂eqA and LCA. The exclusive consideration of LCEA tends to favour cases in which the energy consumption during the operation phase is the lowest, but not necessarily have the lowest impact during the life cycle. Therefore, the different techniques cannot be used in an equivalent way.

Keywords: Environmental impact of buildings. Energy impact of buildings. Energy simulation. Life Cycle Assessment of CO₂eq.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de sistema de produto e identificação dos fluxos.	32
Figura 2 – Elementos mandatórios e opcionais da AICV.	34
Figura 3 – Componentes da energia embutida total da edificação e suas fases no ciclo de vida.	41
Figura 4 – Variação da abrangência de cada fase do ciclo de vida dos estudos analisados.	50
Figura 5 – Fases do ciclo de vida consideradas para o estudo.	53
Figura 6 – Emissões de CO ₂ e consumo de energia por m ² dos sistemas de fachada analisados.	54
Figura 7 – Fluxograma do método proposto.	57
Figura 8 – Planta baixa sem escala da edificação unifamiliar modelo.	58
Figura 9 – Composição das paredes consideradas para o estudo.	60
Figura 10 – Composição das coberturas consideradas para o estudo.	60
Figura 11 – Etapas aplicadas para o desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida.	61
Figura 12 – Fronteira do sistema	62
Figura 13 – Estrutura do sistema de produto para a ACV.	63
Figura 14 – Vista dos elementos de sombreamento (a) e modelagem da cobertura (b).	69
Figura 15 – Relação das categorias de impacto e categorias de danos para o método <i>Impact</i> <i>2002+</i>	75
Figura 16 – Valor mínimo, médio e máximo de consumo energético mensal por componente construtivo.	89
Figura 17 – Valor anual e média das horas de desconforto por calor por componente construtivo.	90
Figura 18 – Valor anual e média das horas de desconforto por frio por componente construtivo.	91
Figura 19 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 26°C.	92
Figura 20 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 25°C.	92

Figura 21 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 24°C.	93
Figura 22 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de aquecimento global, depleção do ozônio estratosférico e radiação ionizante.	94
Figura 23 - Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação da vida útil da edificação.	96
Figura 24 - Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação do comportamento do usuário.	98
Figura 25 – Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação da zona bioclimática.	99
Figura 26 – Resultados normalizados do método <i>Impact 2002+</i> para as categorias de impacto de aquecimento global, radiação ionizante e ocupação da terra.	101
Figura 27- Análise de contribuição para a categoria de impacto de aquecimento global.	102
Figura 28- Análise de contribuição para a categoria de impacto de escassez de recursos minerais.	103
Figura 29 – Contribuição dos materiais do forro de madeira por categoria de impacto.	104
Figura 30 – Contribuição dos materiais da laje maciça por categoria de impacto.	105
Figura 31 - Contribuição dos materiais da parede de bloco cerâmico por categoria de impacto.	106
Figura 32 - Contribuição dos materiais da parede de bloco de concreto por categoria de impacto.	107
Figura 33 - Contribuição dos materiais da parede de <i>light steel framing</i> por categoria de impacto.	107
Figura 34 - Contribuição dos materiais da parede de concreto moldado <i>in loco</i> por categoria de impacto.	108
Figura 35 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para o aquecimento global.	109
Figura 36 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a escassez de recursos minerais.	109
Figura 37- Perfil de consumo de energia primária da ACVE.	113

Figura 38 – Resultado da variação da categoria de impacto da ACVE.....	114
Figura 39 – Variação da vida útil para o consumo de energia primária.....	116
Figura 40 - Variação da vida útil para a emissão de gases do efeito estufa.	116
Figura 41 - Variação do comportamento do usuário para o consumo de energia primária....	117
Figura 42 - Variação do comportamento do usuário para a emissão de gases do efeito estufa.	118
Figura 43 - Variação da zona bioclimática para o consumo de energia primária.	120
Figura 44 - Variação da zona bioclimática para a emissão de gases do efeito estufa.	121
Figura 45 – Análise de contribuição para a energia primária.....	122
Figura 46 – Análise de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa.	123
Figura 47- Contribuição dos materiais das coberturas para a energia primária e emissão de gases do efeito estufa.	124
Figura 48- Contribuição dos materiais das paredes para a energia primária e emissão de gases do efeito estufa.	125
Figura 49 – Percentual de contribuição de cada fase do ciclo de vida para a energia primária.	126
Figura 50 – Percentual de contribuição de cada fase do ciclo de vida para a emissão de gases do efeito estufa.	127
Figura 51 – Correlação da energia embutida com a energia de operação.	129
Figura 52 – Comparação da ACVE com a categoria de dano de recursos.....	131
Figura 53 – Comparação da ACVE com a categoria de dano de saúde humana.	133
Figura 54 – Comparação da ACVE com a categoria de dano do ecossistema – Parte 1.....	135
Figura 55 – Comparação da ACVE com a categoria de dano do ecossistema – Parte 2.....	136
Figura 56 - Comparação da ACVCO ₂ eq com a categoria de dano de recursos.	137
Figura 57 – Comparação das médias de contribuição por fase do ciclo de vida para as 18 categorias de impacto da ACV, a ACVE e a ACVCO ₂ eq.....	141

Figura 58 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de formação de ozônio troposférico (humana e ecossistema), formação de partículas finas, acidificação terrestre e eutrofização de água doce.	167
Figura 59 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de eutrofização de água salgada, ecotoxicidade (terrestre, de água doce e de água salgada) e toxicidade humana cancerígena.	168
Figura 60 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de toxicidade humana não cancerígena, ocupação/transformação da terra, escassez de recursos (minerais e fósseis) e uso de água.	169
Figura 61 - Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação da vida útil da edificação.....	172
Figura 62 - Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação da vida útil da edificação.....	173
Figura 63 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação da vida útil da edificação.	173
Figura 64 - Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação da vida útil da edificação.....	174
Figura 65 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação da vida útil da edificação.	174
Figura 66 - Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação da vida útil da edificação.	175
Figura 67 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação da vida útil da edificação.....	175
Figura 68 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação da vida útil da edificação.....	176
Figura 69 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação da vida útil da edificação.	176
Figura 70 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação da vida útil da edificação.....	177

Figura 71 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação da vida útil da edificação.....	177
Figura 72 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação da vida útil da edificação.	178
Figura 73 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação da vida útil da edificação.....	178
Figura 74 - Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação da vida útil da edificação.....	179
Figura 75 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação da vida útil da edificação.....	179
Figura 76 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação da vida útil da edificação.....	180
Figura 77 - Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação da vida útil da edificação.....	180
Figura 78 - Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação do comportamento do usuário.	181
Figura 79 - Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação do comportamento do usuário.	182
Figura 80 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação do comportamento do usuário.....	182
Figura 81 - Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação do comportamento do usuário.	183
Figura 82 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação do comportamento do usuário.....	183
Figura 83 - Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação do comportamento do usuário.	184
Figura 84 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação do comportamento do usuário.	184

Figura 85 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação do comportamento do usuário.	185
Figura 86 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação do comportamento do usuário.	185
Figura 87 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação do comportamento do usuário.	186
Figura 88 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação do comportamento do usuário.	186
Figura 89 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação do comportamento do usuário.....	187
Figura 90 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação do comportamento do usuário.	187
Figura 91 - Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação do comportamento do usuário.	188
Figura 92 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação do comportamento do usuário.	188
Figura 93 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação do comportamento do usuário.	189
Figura 94 - Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação do comportamento do usuário.	189
Figura 95 – Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação da zona bioclimática.	190
Figura 96 – Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação da zona bioclimática.	191
Figura 97 – Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação da zona bioclimática.	191
Figura 98 – Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação da zona bioclimática.....	192

Figura 99 – Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação da zona bioclimática.	192
Figura 100 – Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação da zona bioclimática.	193
Figura 101 – Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação da zona bioclimática.....	193
Figura 102 – Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação da zona bioclimática.....	194
Figura 103 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação da zona bioclimática.	194
Figura 104 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação da zona bioclimática.....	195
Figura 105 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação da zona bioclimática.....	195
Figura 106 – Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação da zona bioclimática.....	196
Figura 107 – Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação da zona bioclimática.	196
Figura 108 – Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação da zona bioclimática.	197
Figura 109 – Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação da zona bioclimática.....	197
Figura 110 – Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação da zona bioclimática.....	198
Figura 111 – Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação da zona bioclimática.	198
Figura 112 – Resultados normalizados do método <i>Impact 2002+</i> para as categorias de impacto de cancerígenos, não cancerígenos, inorgânicos respiráveis e energia não renovável.	199

Figura 113 – Resultados normalizados do método <i>Impact 2002+</i> para as categorias de impacto de depleção da camada de ozônio, orgânicos respiráveis e ecotoxicidade (aquática e terrestre).....	200
Figura 114 – Resultados normalizados do método <i>Impact 2002+</i> para as categorias de impacto de acidificação/eutrofização terrestre, extração mineral, acidificação aquática e eutrofização aquática.	201
Figura 115- Análise de contribuição para a categoria de impacto de acidificação terrestre. .	202
Figura 116- Análise de contribuição para a categoria de impacto de depleção do ozônio estratosférico.	202
Figura 117- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade de água doce.	203
Figura 118- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade de água salgada.	203
Figura 119- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade terrestre.	204
Figura 120- Análise de contribuição para a categoria de impacto de escassez de recursos fósseis.	204
Figura 121- Análise de contribuição para a categoria de impacto de eutrofização de água doce.	205
Figura 122- Análise de contribuição para a categoria de impacto de eutrofização de água salgada.	205
Figura 123- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de ozônio troposférico (ecossistema).....	206
Figura 124- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de ozônio troposférico (humano).	206
Figura 125- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de partículas finas.	207
Figura 126- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ocupação/transformação da terra.....	207

Figura 127- Análise de contribuição para a categoria de impacto de radiação ionizante.	208
Figura 128- Análise de contribuição para a categoria de impacto de toxicidade humana (cancerígena).	208
Figura 129- Análise de contribuição para a categoria de impacto de toxicidade humana (não-cancerígena).....	209
Figura 130- Análise de contribuição para a categoria de impacto de uso de água.....	209
Figura 131 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a radiação ionizante.	210
Figura 132 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para depleção do ozônio estratosférico.	210
Figura 133 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de ozônio troposférico (humano).	211
Figura 134 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de partículas finas.	211
Figura 135 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de ozônio troposférico (ecossistema).	212
Figura 136 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para acidificação terrestre.	212
Figura 137 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para eutrofização de água doce.	213
Figura 138 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para eutrofização de água salgada.	213
Figura 139 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade terrestre.	214
Figura 140 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade de água doce.	214
Figura 141 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade de água salgada.	215
Figura 142 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para toxicidade humana (cancerígena).	215

Figura 143 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para toxicidade humana (não-cancerígena).....	216
Figura 144 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ocupação/transformação da terra.....	216
Figura 145 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para escassez de recursos fósseis.	217
Figura 146 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para uso de água.	217
Figura 147 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 1.....	218
Figura 148 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 1.	218
Figura 149 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 4.....	219
Figura 150 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 4.	219
Figura 151 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 8.....	220
Figura 152 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 8.	220
Figura 153 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 25°C.	221
Figura 154 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 25°C.	221
Figura 155 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 26°C.	222
Figura 156 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 26°C.	222

Figura 157 – Comparação da ACVCO ₂ eq com a categoria de dano de saúde humana.	223
Figura 158 – Comparação da ACVCO ₂ eq com a categoria de dano do ecossistema – Parte 1.	224
Figura 159 – Comparação da ACVCO ₂ eq com a categoria de dano do ecossistema – Parte 2.	225

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – As fases do ciclo de vida de edificações e as fronteiras de análise.	35
Quadro 2 – Sistemas construtivos selecionados para análise e suas referências de aplicação.	59
Quadro 3 – Relação entre as categorias de impacto e de dano para a metodologia ReCiPe.	72
Quadro 4 – Processos utilizados para a ACV da Ecoinvent 3.5.	73
Quadro 5 – Variáveis e valores definidos para a análise de sensibilidade da ACV.	74
Quadro 6 – Variáveis e valores definidos para a análise de sensibilidade da ACVE.	80
Quadro 7 – Materiais de maior influência para cada sistema construtivo por categoria de impacto.	130
Quadro 8 – Relação de similaridade entre as categorias de impacto da ACV e as técnicas de ACVE e ACVCO ₂ eq.	138
Quadro 9 – Comparação do material de maior contribuição de cada sistema construtivo para cada técnica aplicada.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de vida útil de projeto para cada sistema analisado.	64
Tabela 2 – Distâncias de transporte consideradas para cada etapa.....	66
Tabela 3 – Densidade de potência instalada para iluminação.	67
Tabela 4 – Densidade de potência instalada para equipamentos.....	67
Tabela 5 – Cidades e zonas bioclimáticas utilizadas para a simulação computacional.	68
Tabela 6 – Dimensão das esquadrias da edificação.....	68
Tabela 7 – Características dos elementos construtivos para as paredes.....	70
Tabela 8 – Características dos elementos construtivos para o sistema de cobertura.....	69
Tabela 9 – Características dos elementos construtivos para o sistema de piso.	70
Tabela 10 – Valores da energia embutida por unidade funcional considerados para a ACVE.	77
Tabela 11 – Fatores de emissão de carbono equivalente para cada material da ACVE.....	80
Tabela 12 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de forro de madeira.....	84
Tabela 13 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de laje maciça.	85
Tabela 14 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de parede de bloco de concreto.	85
Tabela 15 – Quantitativo para o sistema construtivo de parede de bloco cerâmico.....	86
Tabela 16 – Quantitativo para o sistema construtivo de parede de <i>light steel framing</i>	86
Tabela 17 – Quantitativo total para o sistema construtivo de parede de concreto moldado <i>in loco</i>	87
Tabela 18 – Consumo energético mensal da edificação, do sistema de HVAC e durante a fase de operação para todos os conjuntos considerados para a ACV.....	87
Tabela 19 – Contribuição média para os materiais de maior influência de cada sistema.	112
Tabela 20 – Taxa de ocupação dos cômodos de longa permanência para o verão.....	153
Tabela 21 – Taxa de ocupação dos cômodos de longa permanência para o inverno.	154

Tabela 22 – Rotinas de abertura das esquadrias para os cômodos de longa permanência.	155
Tabela 23 – Rotinas de uso do sistema de iluminação por cômodo de longa permanência. ...	156
Tabela 24 – Rotinas de uso de equipamentos por cômodo de longa permanência.	157
Tabela 25 – Nível de atividade metabólica conforme atividade desenvolvida por cômodo. .	157
Tabela 26 – Quantitativo dos materiais para o forro de madeira.....	158
Tabela 27 – Quantitativo dos materiais para a laje maciça.	159
Tabela 28 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco de concreto.....	160
Tabela 29 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco cerâmico.	162
Tabela 30 – Quantitativo dos materiais para a parede de <i>light steel framing</i>	163
Tabela 31 - Quantitativo dos materiais para a parede de concreto moldado <i>in loco</i>	164
Tabela 32 – Consumo energético para limite de resfriamento de 25°C.	165
Tabela 33 – Consumo energético para limite de resfriamento de 26°C.	166
Tabela 34 – Resultado por categoria de impacto dos conjuntos com parede de bloco cerâmico e parede de bloco de concreto.	170
Tabela 35 – Resultado por categoria de impacto dos conjuntos com parede de <i>light steel framing</i> e parede de concreto moldado <i>in loco</i>	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do ciclo de vida

ACVCO₂eq – Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂eq

ACVE – Avaliação do ciclo de vida energético

AICV – Avaliação de impacto do ciclo de vida

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica Brasileira

CML – do holandês *Centrum Milieukunde Leiden*, em português: Centro de Ciências Ambientais de Leiden

CT – Capacidade térmica

DAP – Declaração Ambiental de Produto

EE – Energia embutida

EO – Energia operacional

FT – Fator de correção da transmitância

HIS – Habitação de interesse social

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IEA – do inglês *International Energy Agency*, em português: Agência Internacional de Energia

ISO – do inglês *International Organization for Standardization*, em português: Organização Internacional de Padronização

LCA – do inglês *Life cycle assessment*, em português: Avaliação do ciclo de vida (ACV)

OSB – do inglês *oriented strand board*, em português: painel de tiras de madeira orientadas

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

STQA – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

TRY – do inglês *test reference year*, em português: Ano climático de referência

VUP – Vida útil de projeto

SUMÁRIO

1. Introdução	26
1.1. Objetivos	29
1.1.1. Objetivo geral	29
1.1.2. Objetivos específicos	29
1.2. Estrutura do trabalho	29
2. Revisão bibliográfica	31
2.1. Avaliação do Ciclo de Vida pela NBR 14040	31
2.1.1. Primeira fase – Objetivo e escopo	32
2.1.2. Segunda fase – Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	33
2.1.3. Terceira fase – Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	33
2.1.4. Quarta fase – Interpretação do ciclo de vida	34
2.2. Avaliação do Ciclo de Vida em edificações	34
2.2.1. Métodos para avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	36
2.2.2. Estudos analisados	36
2.3. Avaliação do Ciclo de Vida Energético em edificações	39
2.3.1. Energia embutida	41
2.3.2. Energia operacional	46
2.3.3. Emissão de carbono	47
2.3.4. Estudos analisados	49
2.4. Considerações Finais	55
3. Método	57
3.1. Projeto arquitetônico	58
3.2. Componentes construtivos	59
3.3. Avaliação do ciclo de vida (ACV)	61
3.3.1. Objetivo e escopo	61
3.3.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	63
3.3.2.1. Equivalência dos sistemas	63
3.3.2.2. Materiais e serviços	64
3.3.2.3. Consumo energético (operação)	66
3.3.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	71
3.3.3.1. Categorias de Impacto	71
3.3.3.2. Análise de sensibilidade	73
3.3.3.3. Análise de contribuição	75
3.3.4. Interpretação do ciclo de vida	76

3.3.4.1. Identificação das questões significativas	76
3.3.4.2. Conclusões, limitações e recomendações	76
3.4. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE).....	77
3.4.1. Objetivo e escopo	77
3.4.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICVE).....	77
3.4.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida energético (AICVE).....	78
3.4.3.1. Energia primária.....	78
3.4.3.2. Análise de sensibilidade.....	79
3.4.3.3. Análise de contribuição.....	81
3.4.4. Interpretação do ciclo de vida energético	81
3.5. Comparação da ACV e ACVE.....	82
4. Resultados.....	83
4.1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	83
4.1.1. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	83
4.1.1.1. Equivalência dos sistemas.....	83
4.1.1.2. Materiais e serviços.....	84
4.1.1.3. Consumo energético (operação)	87
4.1.2. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	93
4.1.2.1. Categorias de impacto	94
4.1.2.2. Análise de sensibilidade.....	95
4.1.2.3. Análise de contribuição.....	102
4.1.3. Interpretação do ciclo de vida.....	108
4.1.3.1. Identificação das questões significativas	108
4.1.3.2. Conclusões, limitações e recomendações	110
4.2. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE).....	113
4.2.1. Avaliação do impacto do ciclo de vida energético (AICVE).....	113
4.2.1.1. Análise de sensibilidade.....	114
4.2.1.2. Análise de contribuição.....	122
4.2.2. Interpretação do ciclo de vida energético	125
4.2.2.1. Identificação das questões significativas	126
4.2.2.2. Conclusões, limitações e recomendações	129
4.3. Comparação da ACV, ACVE e ACVCO ₂ eq	131
5. Conclusões	143
5.1. Limitações do trabalho.....	144
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	145

Referências	147
ANEXO A – Rotinas de operação da edificação.....	153
APÊNDICE A – Inventário da ACV.....	158
APÊNDICE B – Categorias de impacto da ACV.....	167
APÊNDICE C – Análise de sensibilidade da ACV.....	172
APÊNDICE D – Análise de contribuição para a ACV.....	202
APÊNDICE E – Identificação das questões significativas para a ACV.....	210
APÊNDICE F – Identificação das questões significativas para a ACVE.....	218
APÊNDICE G – Comparação da ACV e ACVCO ₂ eq.....	223

1. Introdução

O setor da construção civil e a operação das edificações somam mais de um terço do consumo final global de energia, e aproximadamente 40% do total de emissões diretas e indiretas de CO₂. Além disso, a demanda de energia para as fases de construção e operação das edificações aumenta gradativamente. Isso ocorre, principalmente, por melhorias no acesso à energia em países em desenvolvimento, aumento das tecnologias disponíveis e adquiridas pelos usuários que consomem energia e o rápido crescimento do número de edificações (IEA, 2019a).

Para alcançar o Cenário de Desenvolvimento Sustentável proposto para 2030 pela *International Energy Agency* (IEA), é necessário que todos os países estabeleçam requisitos mínimos de desempenho energético para as construções, e que a área construída de edificações de alto desempenho aumente de 250 milhões de m² para quatro bilhões de m². Além disso, o estoque de edificações existentes precisa ter seu desempenho energético melhorado em uma intensidade de 30% a 50% (IEA, 2019b).

Apesar disso, a maioria dos países não apresenta códigos mandatórios relacionados ao desempenho energético das construções, resultando na adição anual de bilhões de metros quadrados ao estoque de edificações sem requisitos mínimos de desempenho (IEA, 2019b). No entanto, a pressão econômica, ambiental e social tem transformado o estilo dos projetos e o processo construtivo das edificações atuais (DIXIT, 2017).

Diversas políticas voltadas para a melhoria da envoltória das edificações surgiram entre 2017 e 2018. Porém, na maioria delas foram atualizações feitas em países que já apresentavam normas e diretrizes voltadas para a área. Além disso, para a maioria ainda é facultativa a adoção das diretrizes estabelecidas (DULAC; ABERGEL; DELMASTRO, 2019).

Em 2017 a Nigéria lançou sua primeira norma de construção relacionada a desempenho energético. A Argentina desenvolveu a primeira norma nacional voltada para a energia das construções, com foco no desempenho energético da envoltória de habitações de interesse social. No Canadá, foi lançada uma norma voltada para construções de zero carbono, considerando as emissões de carbono o principal indicador para o desempenho da edificação durante a fase de operação. No Brasil, foi criada a certificação *Zero Energy Building*, com onze edificações piloto em cinco estados (DULAC; ABERGEL; DELMASTRO, 2019). A Organização Internacional de Padronização (ISO) publicou a norma ISO 52000-1 - *Energy*

performance of buildings, que estabelece uma estrutura sistemática para avaliar o desempenho energético de edificações novas ou já existentes (IEA, 2019b).

Em 2018, a Índia desenvolveu o Código de construção de conservação de energia para edifícios residenciais. Além disso, durante 2017 e 2018, o *Energiesprong programme* passou a ser ativo na França, na Alemanha, na Holanda e no Reino Unido. O programa tem como objetivo alavancar o financiamento de reformas para transformar os prédios públicos em edificações de energia zero (DULAC; ABERGEL; DELMASTRO, 2019).

Apesar dos avanços, os estudos relacionados à energia das edificações estão concentrados na energia operacional, fazendo com que ela sofra reduções de forma gradual (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017). No entanto, de modo geral, essa redução está associada ao aumento do impacto embutido (MONCASTER; SYMONS, 2013). Com isso, existe uma urgência pela consideração da energia embutida e pelo entendimento da influência das possíveis mudanças feitas nos projetos ao longo de todo o ciclo de vida, e não pela consideração de cada fase individualmente (DIXIT, 2017).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) considera todos os impactos ambientais do produto ou serviço analisado. Entretanto, sua análise não tem como finalidade mensurar de forma precisa ou absoluta esses impactos (ABNT, 2009a; SARTORI; HESTNES, 2007). Um dos pontos fortes da ACV é a consideração de todas as fases do ciclo de vida, garantindo a minimização dos impactos e evitando a adoção de medidas que apenas os movam de uma fase para outra (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

No entanto, uma ACV completa exige o uso de muitos dados e torna seu desenvolvimento muito complexo (PAULSEN; SPOSTO, 2013). Além disso, para o desenvolvimento da ACV podem ser utilizados diversos bancos de dados e diferentes métodos de avaliação do impacto no ciclo de vida (AICV), levando a diferentes conclusões. Os métodos de AICV mais utilizados na Europa são o ReCiPe e o *Impact 2002+*. Estudos que compararam os resultados obtidos entre os dois métodos concluíram que eles podem apresentar diferentes cenários para uma mesma categoria de impacto (BUENO et al., 2016; SOUZA et al., 2016).

Em relação à ACV, a alteração geográfica também apresenta influência nos resultados obtidos, por representar variações relacionadas à matriz energética, aos modais de transporte, ao processo de fabricação dos materiais, entre outras características (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017).

Com a mesma abordagem holística, a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) considera o fluxo de energia ao longo de todo o ciclo de vida. A ACVE funciona como um indicador intermediário do impacto ambiental, analisando todas as entradas de energia no ciclo de vida (PAULSEN; SPOSTO, 2013). Seus resultados são apresentados em unidade de energia e, para alguns casos, a emissão de carbono também é considerada (HUMBERT et al., 2012; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Tanto a ACV quanto a ACVE são reconhecidas como técnicas de tomada de decisão no estudo de edificações, no entanto, as duas apresentam limitações. Resultados diversos podem ser obtidos quando desenvolvidos estudos de ACV e ACVE para um mesmo cenário (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Dependendo da metodologia utilizada, a ACV apresenta uma análise mais ampla do que a ACVE, visto que considera diferentes tipos de impactos ambientais, como danos referentes à saúde humana, à qualidade do ecossistema, às mudanças climáticas e aos recursos naturais (HUMBERT et al., 2012; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Ainda não existe uma diretriz sólida que especifique qual tipo de avaliação é a mais indicada para comparar os impactos ambientais de diferentes projetos. Teoricamente, quanto maior é a quantidade de detalhes, mais precisa é a técnica. No entanto, a exigência de muitas características pode inviabilizar sua aplicação pela quantidade de recursos e o tempo disponível para realização do estudo (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Nesse contexto, no Brasil, o incentivo a programas habitacionais alavancou a construção civil no país (CALDAS; LIRA; SPOSTO, 2017). O Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), que tem papel fundamental na construção de habitações de interesse social (HIS), tem seus projetos replicados ao longo do território do país sem a consideração das especificidades do clima local ou dos impactos ambientais oriundos de sua construção e operação (MONTES, 2016), aumentando o estoque de edificações com baixo desempenho térmico e energético. Entre 2008 e 2014, três milhões de edificações foram planejadas para serem construídas para a categoria de famílias com menor renda do programa.

Devido à grande quantidade de projetos construídos e à alta demanda de materiais, existe a necessidade do desenvolvimento de mais estudos na área para investigar o impacto energético-ambiental dessas habitações, permitindo a seleção de materiais e componentes que resultem em projetos mais sustentáveis (SPOSTO; PAULSEN, 2013).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar a avaliação do ciclo de vida (ACV) e a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) como técnicas de tomada de decisão para adoção de estratégias arquitetônicas voltadas para redução do impacto ambiental de habitações de interesse social unifamiliares.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados a seguir:

- Analisar a influência de cada fase do ciclo de vida de uma edificação residencial unifamiliar no fluxo energético e nos potenciais impactos ambientais;
- Identificar os sistemas construtivos com menor impacto ambiental e menor demanda energética no ciclo de vida;
- Levantar as diferenças obtidas na avaliação do ciclo de vida energético com e sem a consideração das emissões de carbono.

1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos. No primeiro, a introdução apresenta os principais estudos desenvolvidos e políticas adotadas em diversos países relacionados à sustentabilidade no setor da construção civil. Também são apresentadas brevemente as técnicas de avaliação do ciclo de vida (ACV) e a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) e a importância que apresentam na ampliação do conhecimento sobre o impacto ambiental dos diferentes materiais utilizados nas construções.

O segundo capítulo apresenta, em sequência, as diretrizes gerais da avaliação do ciclo de vida e os principais métodos utilizados para a aplicação da ACV e da ACVE no setor da construção civil, com a apresentação de alguns trabalhos desenvolvidos.

O capítulo três contém o método desenvolvido neste trabalho, apresentando um fluxograma resumido. Nele são definidos os sistemas construtivos que foram analisados no estudo e o

método utilizado para desenvolvimento da ACV e da ACVE. Também são apresentadas as análises desenvolvidas para atingir os objetivos estabelecidos.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos. Inicialmente a ACV é apresentada, com os resultados das análises de sensibilidade, de contribuição e a identificação das questões significativas. Em seguida, os resultados da ACVE são apresentados. Por fim, é apresentada a comparação entre as diferentes técnicas de avaliação do ciclo de vida.

O capítulo cinco apresenta as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho, em conjunto com as principais limitações e as sugestões de trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Avaliação do Ciclo de Vida pela NBR 14040

A avaliação do ciclo de vida¹ (ACV) é uma técnica de gestão ambiental em desenvolvimento que apresenta como principal objetivo a compreensão dos impactos associados a todas as fases do ciclo de vida do produto ou serviço objeto do estudo. Ela não tem como objetivo a mensuração de impactos ambientais absolutos ou precisos, mas sim de impactos ambientais potenciais. Isso ocorre porque seu resultado expressa impactos ambientais futuros, relativos a uma unidade funcional de referência, e expressa dados ambientais em diferentes dimensões de tempo e espaço (ABNT, 2009a).

Por meio de sua aplicação é possível subsidiar o reconhecimento de oportunidades de melhoria do desempenho do produto ou serviço, o aprofundamento da compreensão dos tomadores de decisão, a seleção de indicadores relevantes e o marketing, como, por exemplo, com o uso de certificados como a Declaração Ambiental de Produto (DAP). Apesar de comumente ser voltada para questões ambientais, a ACV pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas para estudos que consideram questões econômicas e sociais de um produto ou serviço (ABNT, 2009a).

Ressalta-se que a ACV é uma técnica iterativa e que apresenta uma abordagem relativa à unidade funcional definida para o estudo. Por priorizar características ambientais, as decisões tomadas ao longo da ACV devem ser embasadas nas ciências naturais. No entanto, para situações em que isto não for possível, técnicas derivadas das ciências econômicas ou sociais podem ser aplicadas, desde que sejam coerentes com o objetivo do estudo (ABNT, 2009a).

De forma geral, duas abordagens têm sido utilizadas em estudos de ACV: considerando um sistema de produto e com o objetivo principal de fazer seu balanço histórico, ou considerando os impactos potenciais entre diferentes sistemas de produtos (ABNT, 2009a).

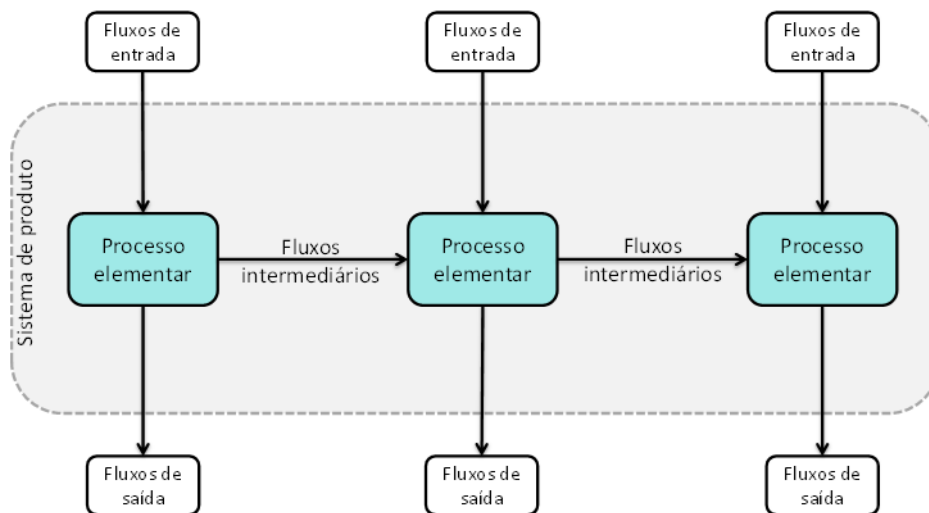
Além disso, a adaptação do método para estudos que não são caracterizados como ACV, por não englobar todo o ciclo de vida, é aceitável mediante justificativa adequada. Dentre esses

¹ O ciclo de vida é definido como “todas as etapas desencadeadas por um sistema de produto (ou serviço), envolvendo desde a aquisição de matéria-prima como a disposição final de seus elementos” (ABNT, 2009a).

estudos, pode-se citar o berço-a-portão, portão-a-portão e avaliações de partes específicas do ciclo de vida (ABNT, 2009a).

O estudo da ACV é modelado considerando um sistema de produto composto por fluxos de entrada (elementares ou de produto), fluxos intermediários e de saída e processos elementares (ABNT, 2009a). A Figura 1 apresenta um modelo de sistema de produto com três processos elementares.

Figura 1 – Modelo de sistema de produto e identificação dos fluxos.



Fonte: Baseado em ABNT (2009a).

Segundo a ABNT (2009a), uma ACV é dividida em quatro fases essenciais: Objetivo e escopo, Análise de inventário de ciclo de vida, Avaliação de impacto do ciclo de vida e Interpretação do ciclo de vida. As quatro fases estão apresentadas a seguir.

2.1.1. Primeira fase – Objetivo e escopo

O objetivo de uma ACV define a aplicação pretendida, as motivações para desenvolvimento do estudo, o público-alvo e a existência ou não da intenção de utilizar os resultados de forma comparativa para serem divulgados publicamente. O escopo engloba o sistema de produto a ser estudado, suas funções, a unidade funcional, a fronteira do sistema, os procedimentos de

alocação, as categorias de impacto e a metodologia de avaliação e interpretação, os requisitos de dados, os pressupostos, as limitações, os requisitos quanto à qualidade dos dados e o tipo de análise crítica e de relatório necessários para o estudo (ABNT, 2009a).

2.1.2. Segunda fase – Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

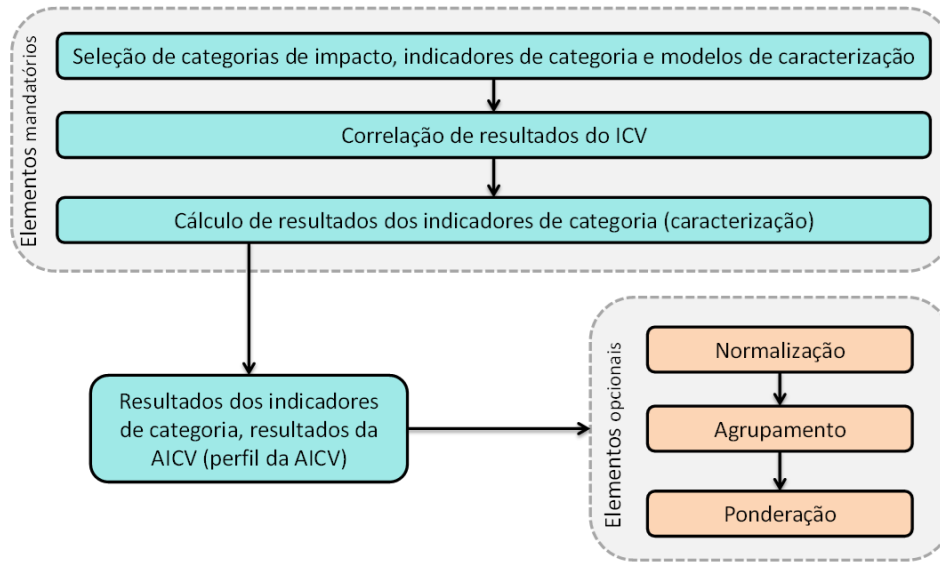
A fase de ICV engloba a quantificação das entradas e saídas de cada processo elementar do sistema de produto definido. As restrições práticas relacionadas à coleta de dados devem ser consideradas no escopo e documentadas ao longo do estudo. Após a coleta, é necessário fazer a validação dos dados, a correlação com os processos elementares e com os fluxos de referência, considerando a unidade funcional. Para cálculos com fluxos energéticos é necessário considerar as diferentes fontes de combustível e energia elétrica e a eficiência para sua conversão e distribuição. Em seguida, quando aplicável, a alocação das saídas e entradas deverá ser feita (ABNT, 2009a).

2.1.3. Terceira fase – Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A terceira fase de uma ACV é caracterizada pela tradução dos dados levantados na ICV para categorias de impacto. Além disso, desenvolve-se o processo iterativo de análise crítica do objetivo e escopo definidos, de forma a garantir que será possível alcançá-los. Caso contrário, retorna-se para a primeira fase e as características previamente definidas podem ser modificadas (ABNT, 2009a).

Para essa fase, a escolha, modelagem e avaliação das categorias de impacto são subjetivas. O método utilizado deve ser definido de forma a se adequar ao objetivo principal do estudo, e a transparência nas decisões é essencial para a correta interpretação dos resultados obtidos. A Figura 2 apresenta as etapas necessárias e opcionais para aplicação da AICV. É importante ressaltar que a AICV é desenvolvida visando o cumprimento do objetivo estabelecido previamente, não sendo caracterizada necessariamente como uma avaliação completa das questões ambientais do produto ou serviço avaliado (ABNT, 2009a).

Figura 2 – Elementos mandatórios e opcionais da AICV.



Fonte: Baseado em ABNT (2009a).

2.1.4. Quarta fase – Interpretação do ciclo de vida

A última fase da ACV consiste em prover as conclusões, explicar as limitações e recomendações obtidas com o desenvolvimento do estudo. Para a interpretação dos resultados da AICV é necessário considerar que os impactos obtidos não são absolutos e que a abordagem desenvolvida é relativa à unidade funcional definida (ABNT, 2009a).

Além da interpretação dos resultados, a quarta fase da ACV apresenta o processo iterativo de analisar e revisar o escopo, visando garantir a coerência da natureza e qualidade dos dados utilizados (ABNT, 2009a).

Além das quatro fases principais de uma ACV, a análise crítica do estudo aumenta sua credibilidade quando ocorrer envolvimento de partes interessadas. Existem dois tipos principais de análise crítica: por especialista interno ou externo ou por um painel de partes interessadas (ABNT, 2009a).

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida em edificações

Para a construção civil, a análise de ciclo de vida envolve três fases essenciais: pré-uso, ocupação e de fim da vida. A fase de pré-uso inclui todos os impactos ambientais causados até

o momento de uso da edificação. Ela inclui a extração e fabricação dos materiais de construção, o transporte dos materiais e o processo de construção da edificação, considerando os desperdícios. A fase de operação inclui as atividades de manutenção da edificação e sua operação. A fase de fim da vida inclui a demolição da edificação, o transporte dos materiais para o aterro e eventuais processos de reciclagem (PAULSEN; SPOSTO, 2013). O Quadro 1 apresenta as fases do ciclo de vida das edificações e as classificações de escopo conforme a fronteira de análise definida para o estudo.

Quadro 1 – As fases do ciclo de vida de edificações e as fronteiras de análise.

Etapas	Avaliação do ciclo de vida de uma edificação				Além do ciclo de vida
	Pré-uso		Ocupação	Fim da vida	Benefícios
	Materiais	Construção			
	Matéria prima	Transporte	Operação	Demolição	Potencial de reuso
	Transporte		Manutenção	Transporte	Potencial de recuperação
Fabricação	Processo construtivo	Reparos	Processamento	Potencial de reciclagem	
		Reformas	Disposição		
Berço ao portão	M	M			
Berço ao portão (variações)	M	M	O	O	O
Berço ao túmulo	M	M	M	M	O

M – Mandatório/ O - opcional

Fonte: Baseado em BRE (2016) e Moncaster e Symons (2013).

Os elementos que compõem uma edificação podem ser separados em duas categorias principais: componentes simples ou compostos. Os componentes simples são aqueles que podem ser medidos por meio de sua massa, como concreto, aço e madeira. Eles constituem cerca de 90% de uma construção típica. Os elementos compostos são mensurados pela sua quantidade unitária, como janelas, acessórios, utensílios e os serviços prestados (MONCASTER; SYMONS, 2013).

Os impactos durante a fase de operação são oriundos do uso de energia, consumo de água, manutenção, reformas e substituição de materiais. A fase de fim da vida pode ser dividida em

quatro etapas: demolição, transporte, processamento dos resíduos e disposição final. Os resíduos podem ser estimados pela massa dos materiais que constituem a edificação, desconsiderando as perdas associadas ao transporte e construção dos materiais (MONCASTER; SYMONS, 2013).

2.2.1. Métodos para avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

Um método de AICV tem como principal objetivo transformar os resultados do inventário do ciclo de vida em categorias de impacto. Para isso, existem duas abordagens principais: transformação em impacto no ponto médio (*midpoint*) ou no ponto final (*endpoint*). A primeira converte os resultados do ICV em indicadores de categoria de impacto, como acidificação, mudanças climáticas e ecotoxicidade. A abordagem de *endpoint* transforma os resultados do ICV para categorias de dano, como danos à saúde humana e à qualidade do ecossistema (GOEDKOOOP et al., 2013).

A construção desse perfil ambiental considera diferentes características, como mudanças climáticas, uso da água, uso da terra, entre outros. Cada uma recebe uma pontuação, podendo representar uma influência positiva ou negativa para o ambiente. A tradução dessas características é feita por meio de fatores de caracterização, que indicam o impacto ambiental por unidade do produto analisado (HUIJBREGTS, 2017).

2.2.2. Estudos analisados

Caldas, Lira e Sposto (2017) analisaram uma habitação de interesse social. As paredes foram alteradas com o objetivo de considerar o uso de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto armado. Além disso, as edificações foram simuladas em todas as zonas bioclimáticas do país.

A ACV desenvolvida foi de berço ao portão com opções. Com isso, as fases de produção dos materiais, substituição e uso de energia para operação da edificação foram definidas como fronteira do sistema. A unidade funcional estabelecida foi de uma HIS com 46 m² com vida útil de 50 anos. O método de avaliação de impactos do ciclo de vida utilizado foi o *Impact 2002+*, não sendo considerados os processos de ponderação, normalização e agrupamento. A orientação foi definida para o pior cenário de desempenho térmico, estabelecido por meio de

simulações. Além disso, o uso de aparelhos de ar-condicionado foi considerado em todos os ambientes de longa permanência (CALDAS; LIRA; SPOSTO, 2017).

Para a fase de produção da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, os materiais que mais apresentaram contribuição para os impactos foram a argamassa e os blocos cerâmicos, respectivamente. Com isso, a redução das camadas de assentamento e revestimento e sua composição apresentam grande potencial para diminuição dos impactos oriundos do sistema construtivo. Para os blocos cerâmicos, o combustível utilizado para sua queima influencia de forma significativa no impacto da sua produção. Para os painéis de concreto, a argamassa colante representou grande parte do impacto ambiental obtido, principalmente pelo dispersante acrílico utilizado. Para os dois sistemas, o cimento apresentou impacto significativo. O aço, apesar de ser um material de grande impacto na sua produção, apresentou baixo percentual de contribuição nos impactos, devido principalmente à pequena quantidade utilizada (CALDAS; LIRA; SPOSTO, 2017).

Em todas as categorias de impacto consideradas, a alvenaria cerâmica obteve melhores resultados no ciclo de vida considerado no estudo. Os resultados apresentaram variações significativas para o mesmo sistema construtivo em diferentes zonas bioclimáticas, expondo a necessidade de mais estudos considerando diferentes zonas bioclimáticas (CALDAS; LIRA; SPOSTO, 2017).

Souza et al. (2016) avaliaram os impactos ambientais do ciclo de vida de três tipos de paredes: bloco cerâmico, bloco de concreto e parede de concreto moldada *in loco*. A unidade funcional definida foi a construção e manutenção de um m² de parede exterior, acima do solo, com vida útil de 40 anos no Brasil. O estudo foi desenvolvido considerando desde a extração de matéria prima até seu descarte final. Os dados do inventário foram obtidos, em sua maioria, da Associação Nacional da Indústria Cerâmica Brasileira (ANICER), com o objetivo de representar as indústrias brasileiras de concreto e cerâmica. A ACV foi desenvolvida por meio do programa SimaPro, utilizando o método *Impact 2002+*. Além da avaliação do ciclo de vida, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida variando, dentre outras características, o tempo de vida útil, a distância de transporte para distribuição dos produtos, o método de avaliação do ciclo de vida e diferentes fatores de perdas na construção.

Os resultados da ACV indicam que, de modo geral, a parede de bloco cerâmico apresenta valores menores de impacto ambiental do que as paredes de bloco de concreto ou de concreto

moldada *in loco*. Em relação à emissão de gases do efeito estufa, a parede de bloco cerâmico (32,1 kgCO₂eq/m²) apresenta aproximadamente metade do valor obtido para a de bloco de concreto e um terço do valor em relação à de concreto moldada *in loco* (SOUZA et al., 2016).

Para a análise de sensibilidade, a alteração da vida útil não apresentou variação significativa nos resultados obtidos. Em relação às distâncias de distribuição dos materiais, de modo geral, a parede de bloco cerâmico apresentou os menores valores de impactos. Apenas nas categorias de Saúde Humana, quando a distância era maior do que 200 km, ou nas categorias de Qualidade do Ecossistema, Recursos e Retirada de Água, quando a distância de transporte era maior do que 500 km, a parede de bloco cerâmico não apresentou o melhor cenário. O uso do método ReCiPe gerou as mesmas conclusões que as obtidas utilizando o *Impact 2002+*. No entanto, para a categoria de impacto de ocupação do solo, a parede de bloco cerâmico apresentou resultados piores do que os outros tipos de paredes analisadas. Esse cenário é consequência da consideração da transformação do solo e da ocupação do solo pelo método ReCiPe, enquanto que o método *Impact 2002+* considera somente a ocupação do solo (SOUZA et al., 2016).

A alteração das perdas durante a construção apresentou grande influência nos resultados finais. Considerando perdas de até 10% para a parede de blocos cerâmicos, os impactos ambientais obtidos são menores do que para os outros tipos de paredes analisadas (SOUZA et al., 2016).

Bueno et al. (2016) realizaram uma análise de sensibilidade de uma ACV considerando o uso de cinco métodos de avaliação de impacto no ciclo de vida. Os métodos analisados foram o EDIP 97/2003, CML2001, ILCD, *Impact 2002+* e ReCiPe. Os três primeiros apresentam análise somente até a categoria de impacto, enquanto os dois últimos apresentam, também, análise de categoria de dano. Foram considerados quatro tipos de paredes externas de vedação: bloco cerâmico, blocos de concreto, placa de concreto e *steel framing* com placas de cimento. A unidade funcional foi definida como um metro quadrado de parede externa com desempenho térmico e acústico conforme exigido pela NBR 15575 para a zona bioclimática três do Brasil, para um período de 40 anos. A fase de uso não foi considerada na avaliação.

Para as categorias de impacto de depleção da camada de ozônio e formação fotoquímica de oxidantes, os resultados levaram a conclusões discrepantes, sendo as diferenças entre os métodos mais antigos e mais recentes as mais significativas. Para as outras categorias de impacto, os resultados foram de consistentes a parcialmente consistentes. Apesar de os

resultados apresentarem diferenças na magnitude para algumas categorias de impacto, todas as metodologias levaram à mesma conclusão na classificação dos sistemas analisados, com a parede de bloco de concreto sendo a de menor impacto ambiental (BUENO et al., 2016).

2.3. Avaliação do Ciclo de Vida Energético em edificações

A avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) é uma simplificação da ACV. Nela são consideradas todas as entradas de energia ao longo do ciclo de vida de uma edificação, sendo possível identificar as fases que apresentam maiores demandas energéticas (CHAU; LEUNG; NG, 2015; HUMBERT et al., 2012).

Como os processos relacionados aos materiais podem emitir ou sequestrar carbono, a energia embutida não apresenta relação direta com o carbono embutido (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Com isso, seus resultados são apresentados em unidade de energia e, para alguns casos, também é considerada a emissão de carbono (HUMBERT et al., 2012; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

De forma simplificada, as parcelas de energia consideradas para cada fase do ciclo de vida da edificação podem ser definidas conforme apresentado na Equação 1.

$$E = EE_{inicial} + EE_{recorrente} + EE_{demolição} + EO \quad (1)$$

Onde:

E é a energia total consumida ao longo de todo o ciclo de vida;

$EE_{inicial}$ é a energia embutida inicial;

$EE_{recorrente}$ é a energia embutida recorrente;

$EE_{demolição}$ é a energia embutida de demolição;

EO é a energia operacional.

Para o desenvolvimento de um estudo de ACVE é necessário considerar os parâmetros de fronteira do sistema, o método utilizado para medir a energia embutida e o tipo e a forma da energia analisada. Ele pode analisar, por exemplo, somente a estrutura da edificação ou

componentes como as vias de acesso à edificação, os estacionamentos, as áreas de lazer, entre outros (DIXIT, 2017).

Os principais desafios encontrados no desenvolvimento envolvem a dificuldade de comparação dos resultados, devido ao uso de diferentes metodologias e banco de dados diversos, e a dificuldade de aplicação do método na prática (AZARI; ABBASABADI, 2018).

Alguns parâmetros como o uso de energia primária são simples de serem estabelecidos como padrão de análise. Entretanto, outros parâmetros, como a fronteira do sistema, são mais complexos para estabelecimento de um padrão, visto que dependem de outras questões, como a completude da base de dados utilizada (DIXIT, 2017).

Energia primária é a energia bruta, não processada, como o carvão, gás natural e o petróleo, utilizada diretamente na forma que é extraída da natureza. A energia de uso final é caracterizada como a energia gerada pelo processamento de outras energias primárias, como a eletricidade e a gasolina (MONCASTER; SYMONS, 2013; PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Esses dois tipos de energia não são comparáveis diretamente, uma vez que representam diferentes montantes. Com isso, estudos de ciclo de vida que utilizam o fluxo de energia como a energia de fim de uso não podem ser comparados globalmente, além de não representarem realmente a energia consumida ao longo do ciclo de vida (DIXIT, 2017).

A quantidade de energia primária consumida para fornecer a energia de fim de uso normalmente é maior devido à existência de perdas na geração e distribuição. Além disso, a variedade de fontes de energia primária também influencia no montante resultante de energia de fim de uso (DIXIT, 2017).

O fator de energia primária (FEP) representa a quantidade de energia primária consumida e perdida ao longo do processo de produção da energia de fim de uso. Os três parâmetros chave que influenciam no montante de energia primária e de fim de uso são a eficiência da conversão energética, perdas de transmissão e distribuição (T&D) e a fonte utilizada. Atualmente, diferentes fontes de energia, como gás, óleo, carvão e algumas fontes renováveis são utilizadas na geração de energia de fim de uso, como a eletricidade (DIXIT, 2017).

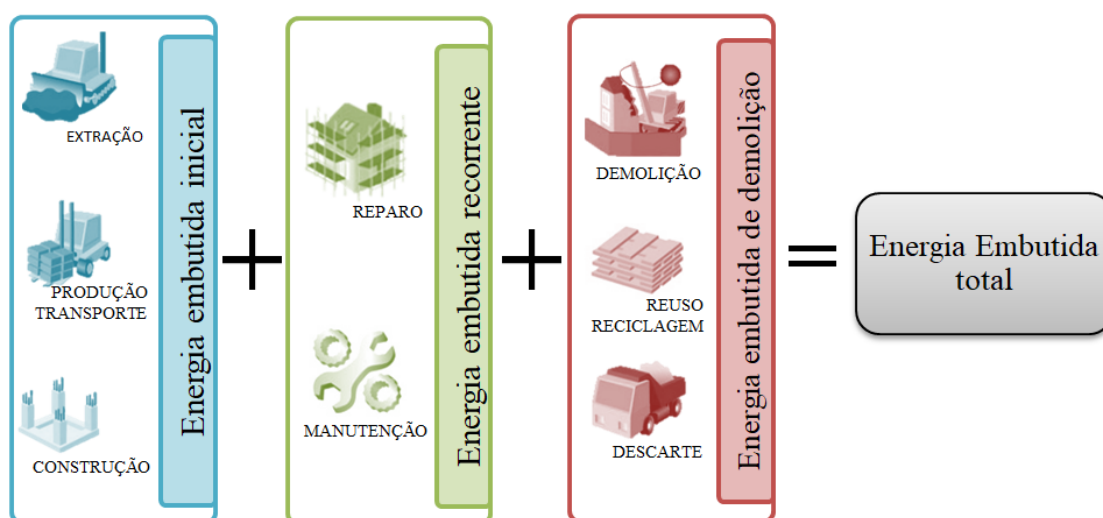
Devido à grande variação na eficiência de conversão, cada país apresenta um montante necessário de energia primária para produzir uma unidade de energia de fim de uso. Essa diferença altera o total de energia consumida e a quantidade de carbono emitido para sua produção, não caracterizando o impacto ambiental ao longo do ciclo (DIXIT, 2017).

Com base no setor de energia dos Estados Unidos, o uso de valores de energia em energia de fim de uso pode subestimar os impactos ao longo do ciclo em aproximadamente 250% (DIXIT, 2017).

2.3.1. Energia embutida

A energia embutida (EE) total considera todos os fluxos de energia do ciclo de vida de uma edificação, com exceção da energia requerida para a fase de operação (DIXIT, 2017; MONCASTER; SYMONS, 2013). Para sua composição, consideram-se três tipos de energia embutida: inicial, recorrente e de demolição, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Componentes da energia embutida total da edificação e suas fases no ciclo de vida.



Fonte: Baseado em Dixit (2017).

A EE inicial expressa toda a energia utilizada antes da ocupação da edificação. Dessa forma, ela engloba os processos de extração de matéria prima, produção e transporte dos produtos e componentes utilizados, bem como a energia para a própria construção da edificação (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017).

A energia embutida devido aos processos de produção e extração dos materiais pode ser determinada por meio da aplicação da Equação 2.

$$EE_{in.mat} = \sum_1^i \alpha_i m_i \quad (2)$$

Onde:

$EE_{in.mat}$ é a energia embutida inicial dos materiais utilizados (MJ);

α_i é a intensidade de energia embutida do material i (MJ/kg ou MJ/unidade);

m_i é a massa/quantidade utilizada na edificação do material de construção i (kg ou unidade).

Para a energia embutida relacionada ao transporte, existem três maneiras para determinação da distância, dependendo do cenário definido. A primeira considera elementos compostos, considerando a distância em linha reta do distribuidor até o local do empreendimento. Em seguida, ela é multiplicada por um fator de correção de 1,25, para considerar as distâncias reais das estradas. A segunda, também para elementos compostos, considera a distância real entre o fabricante e o local da obra. A terceira, para elementos simples que normalmente apresentam uma distância pequena entre o distribuidor e a construção, utiliza uma distância padrão para todos os distribuidores (MONCASTER; SYMONS, 2013).

A energia embutida recorrente faz referência à energia utilizada para a manutenção e reparo dos materiais da edificação durante a fase de operação. A quantidade de energia requerida depende da forma como a edificação é utilizada pelos usuários e da vida útil e qualidade dos materiais utilizados (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017).

Ela é determinada de forma similar à EE inicial, considerando a quantidade de material utilizado e o número de vezes que ele é substituído ao longo da vida útil da edificação, conforme a Equação 3 (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

$$EE_{recorrente} = \left(\frac{V_e}{V_i} - 1 \right) * m_i * \alpha_i \quad (3)$$

Onde:

$EE_{recorrente}$ é a energia embutida recorrente (MJ);

V_e é a vida útil da edificação (anos);

V_i é a vida útil do material de construção i (anos);

α_i é a intensidade de energia embutida do material i (MJ/kg);

m_i é a massa utilizada na edificação do material de construção i (kg).

O elemento $\left(\frac{V_e}{V_i}\right)$ é conhecido como fator de reposição. Ele representa a quantidade de vezes que um material é substituído ao longo da vida útil de uma edificação (DIXIT, 2017; CALDAS; SPOSTO; PIRES; PAULSEN, 2016).

Para a EE inicial e a EE recorrente, consideram-se também as possíveis perdas que ocorrem no transporte e na construção da edificação, e orienta-se a utilização de energia primária medida em kWh (MONCASTER; SYMONS, 2013).

Em seguida, a energia embutida de demolição varia com o sistema de reuso, reciclagem ou descarte que os materiais utilizados e o local da construção oferecem como possibilidade. Ela apresenta as maiores incertezas na quantificação da energia embutida, sendo desconsiderada em diversos estudos (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017).

Além das energias mencionadas anteriormente, um produto pode apresentar a energia de matéria-prima. Ela representa a energia que pode ser parcialmente liberada após o fim da vida útil do produto. Geralmente, esse processo ocorre por meio de incineração, podendo ser útil para outros processos de fabricação ou produção de energia (MONCASTER; SYMONS, 2013). Ela pode representar um valor 80% maior do que a energia embutida inicial de uma edificação (DIXIT, 2017).

Fazer a estimativa da energia embutida é mais complexo e exige mais recursos do que estimar a energia operacional (DIXIT, 2017). De modo geral, seu resultado depende do método utilizado, da fronteira estabelecida para o sistema, da qualidade do inventário e da base de dados, das estimativas assumidas, limitações do estudo, dos critérios de corte estabelecidos e da localização geográfica do empreendimento (AZARI; ABBASABADI, 2018).

A localização geográfica apresenta influência devido a variações na matriz energética local, nos modais de transporte, no processo de fabricação dos materiais, na distância do empreendimento até o ponto de distribuição dos materiais e no estilo arquitetônico (AZARI; ABBASABADI, 2018; DIXIT, 2017).

Os três métodos mais utilizados para a estimativa da energia embutida no setor da construção civil são: *Process-based LCA* (ACV baseada em processos), *Economic Input-Output*

based LCA (ACV baseada em entrada-saída econômica) e *Hybrid LCA* (ACV híbrida). Ressalta-se que esses métodos foram desenvolvidos para a estimativa de outros impactos dentro do ciclo de vida, por isso sua aplicação não é limitada à estimativa da energia embutida (AZARI; ABBASABADI, 2018).

A ACV baseada em processos aplicada para a estimativa da energia embutida consiste em identificar o tipo e a quantidade de energia utilizada em cada fase do ciclo de vida agregando os resultados no total de energia embutida utilizada. O método desenvolve-se seguindo as quatro fases descritas pela NBR ISO 14040:2009 (AZARI; ABBASABADI, 2018).

As fases de análise de inventário (ICV) e avaliação dos impactos (AICV) envolvem o rastreamento, a compilação e a agregação dos tipos e quantidades de energia utilizada ao longo do ciclo de vida da edificação estudada. O método consiste no desenvolvimento de três matrizes: tecnológica (A), de intervenção (B) e o vetor de demanda (f). A Matriz tecnológica contém todos os processos industriais identificados do ciclo de vida da edificação. A Matriz de intervenção contém os tipos e quantidades de energia primária e o vetor de demanda (f) a quantidade dos produtos finais (AZARI; ABBASABADI, 2018).

Em seguida, as três matrizes são utilizadas para obtenção do vetor de inventário (g), determinado por meio da Equação 4. O vetor g agrega a quantidade das entradas de energia que são utilizadas no ciclo de vida por tipo. Na AICV, os valores obtidos no vetor de inventário são convertidos e agregados em um valor único que representa o total de energia embutida em uma unidade representativa (AZARI; ABBASABADI, 2018).

$$[Matriz B] * [Matriz A]^{-1} * [Vetor f] = [Vetor g] \quad (4)$$

Onde:

Matriz B é a matriz de intervenção;

Matriz A é a matriz tecnológica;

Vetor f é o vetor de demanda;

Vetor g é o vetor de entrada de energia do ciclo de vida por tipo.

Esse método é adequado para aplicação nos casos em que os quantitativos do projeto estão disponíveis e é possível utilizar um banco de dados de impacto ambiental com os produtos de construção necessários para a análise (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

O método de entrada-saída econômica é uma análise estatística baseada em transações financeiras (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Ele tem como principal vantagem a expansão das fronteiras do sistema por meio da consideração da economia local, culminando em resultados mais abrangentes e representativos. No entanto, variações dentro de um mesmo setor econômico, como a localização geográfica do empreendimento, não são consideradas (AZARI; ABBASABADI, 2018).

O método de entrada-saída econômica assume homogeneidade entre os diferentes setores utilizados na análise. Dessa forma, considera-se que todos os setores e subsetores envolvidos apresentam o mesmo consumo energético, volume de produção e qualidade de produtos e serviços (CHAU; LEUNG; NG, 2015; DIXIT, 2017).

Para aplicação desse método, as tabelas utilizadas normalmente apresentam dados desatualizados devido à frequência de publicação das mesmas. Além disso, o uso de preços imprecisos para o custo da energia acumula erros ao longo do estudo. Para o método baseado em processos, os dados utilizados podem definir a fronteira do sistema pela falta de abrangência e também apresentar imprecisões devido às aproximações feitas no desenvolvimento da base de dados (DIXIT, 2017).

O método híbrido consiste na utilização do método baseado em processos para o preenchimento das lacunas existentes com a aplicação do método de entrada-saída econômica (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

O método de ACV baseada em processos apresenta maior precisão quando comparado com os outros. No entanto, ele não representa integralmente as fronteiras do sistema. O método de ACV baseada em entrada-saída econômica, apesar de englobar o sistema de forma completa, apresenta maior imprecisão nos dados. O método mais preciso é o híbrido, no entanto sua complexidade pode torná-lo inviável para uso (ISLAM; PONNAMBALAM; LAM, 2016).

Nos 96 estudos de ACVE analisados por Dixit (2017), 44% utilizaram o método híbrido, 32% de entrada-saída econômica e 24% o método baseado em processos. O uso de diferentes métodos de estimativa de energia embutida apresentou resultados inconsistentes. Os métodos selecionados para uso foram definidos de forma subjetiva, com base na disponibilidade e

qualidade dos dados utilizados. Visto que cada método abrange uma fronteira do sistema diferente, sempre haverá alguma variação nos resultados obtidos (DIXIT, 2017).

Normalmente, devido à fronteira menos abrangente, o método baseado em processos resulta em valores de energia embutida menores do que o método de entrada-saída econômica. O método híbrido, por apresentar fronteira mais ampla, resulta em valores maiores do que o método baseado em processos. No entanto, o método de entrada-saída econômica é o que apresenta os maiores valores finais de energia embutida. Com isso, os resultados obtidos por meio da aplicação de diferentes métodos não podem ser comparados (DIXIT, 2017).

Dixit (2017) analisou 96 estudos desenvolvidos em quatro continentes que realizaram a avaliação do ciclo de vida energético de edificações residenciais. O valor obtido de energia embutida apresentou grande variação entre os estudos, originado principalmente pelo método utilizado e pela fronteira definida para o sistema.

A energia embutida inicial de edificações residenciais de madeira apresenta menos variação nos valores em relação às paredes de bloco cerâmico. Esse resultado pode ser devido à menor quantidade de processos industriais necessários para produção da madeira em relação aos materiais utilizados na alvenaria (DIXIT, 2017).

2.3.2. Energia operacional

A energia operacional (EO) engloba todos os processos diários realizados após a construção da edificação, considerando os ciclos para aquecimento e resfriamento dos ambientes, aquecimento de água, iluminação e uso dos equipamentos eletrodomésticos (AZARI; ABBASABADI, 2018; CHAU; LEUNG; NG, 2015), incluindo a demanda de energia para cozinhar alimentos (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Para a estimativa da energia operacional, três abordagens diferentes são comumente utilizadas. A primeira considera medições do real consumo, por meio de consulta às contas de energia obtidas nas concessionárias ou então pela realização de uma auditoria energética. A segunda abordagem utiliza consultas em bancos de dados de consumo de energia para estimativa do consumo médio, considerando o tipo de uso da edificação (residencial, comercial, pública, escritórios, entre outros). A última abordagem estima a energia operacional com o desenvolvimento da simulação computacional da edificação (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

A envoltória das edificações é o principal sistema que contribui para aumento ou redução da demanda de energia embutida e energia operacional. Ela engloba os pisos, as paredes, o telhado e os acabamentos, não considerando as instalações elétricas, os móveis, o encanamento e a fundação. Para uma residência modelo na Nova Zelândia, a contribuição da envoltória na energia embutida representa de 48% a 50%, considerando uma estrutura leve, de concreto ou super isolada (AZARI; ABBASABADI, 2018).

As estratégias para redução da energia operacional são, inicialmente, adotadas no projeto arquitetônico, com estratégias bioclimáticas passivas, para redução da demanda energética para manutenção do conforto térmico, acústico e visual dos usuários e da qualidade do ar. Além do projeto, é possível reduzir a energia operacional com o uso de equipamentos de baixo consumo energético (AZARI; ABBASABADI, 2018).

A energia operacional (EO) sofre influência de algumas incertezas, como o comportamento do usuário, o clima e suas variações e a operação das instalações. Para a energia embutida (EE), o valor é fixado e determinado no momento inicial da construção da edificação, na escolha dos materiais e definição do projeto (AZARI; ABBASABADI, 2018).

2.3.3. Emissão de carbono

Para obter a emissão de carbono embutida (CE) de um produto, consideram-se as emissões da fábrica que o produz em relação à massa do produto. Geralmente, as emissões são de origem fóssil, resultado da combustão de combustíveis nos processos de extração, fabricação ou transporte. Mas uma parcela é decorrente de eventuais reações químicas ao longo de sua fabricação, conhecida como emissões de carbono de processos. Um exemplo é o processo de transformação de calcário (CaCO_3) em cal (CaO) na produção de cimento (CHAU; LEUNG; NG, 2015; MONCASTER; SYMONS, 2013). Com isso, a emissão de carbono embutida pode ser determinada por meio da Equação 5.

$$CE_{total} = CE_{fóssil} + CE_{processos} \quad (5)$$

Onde:

CE_{total} é a emissão de carbono embutida total;

CE_{fossil} é a emissão de carbono embutida fóssil;

$CE_{processos}$ é a emissão de carbono embutida de processos.

A emissão de carbono fóssil é influenciada pela quantidade e qualidade de energia primária utilizada para a produção dos materiais. Dois métodos principais são utilizados para estimá-la. O primeiro método considera a quantidade e energia utilizada na fabricação dos materiais multiplicada pelo fator de combustível referente a cada tipo de energia primária. Sua estimativa é determinada por meio da aplicação da Equação 6 (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

$$CE_{fossil} = \alpha_i * \beta_i * m_i \quad (6)$$

Onde:

CE_{fossil} é a emissão de carbono embutida fóssil (kgCO₂-eq/kg);

α_i é a intensidade de energia embutida do material i (MJ/kg);

β_i é o fator médio de emissão de CO₂ do material de construção i (kgCO₂-eq/MJ);

m_i é a massa utilizada na edificação do material de construção i (kg).

O segundo método estima a emissão diretamente pela multiplicação da quantidade dos materiais utilizados pelos seus respectivos valores de emissão. Para uso desse método, é necessário ter acesso a bancos de dados que forneçam os valores de emissão de cada material de acordo com a fronteira estabelecida para o sistema de produto estudado (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Além da emissão de carbono embutida fóssil e de processos, alguns estudos consideram as emissões resultantes da fase de demolição da edificação. O transporte dos materiais até o descarte final e seu processo de degradação podem apresentar emissões de carbono. Sua determinação é feita por meio da Equação 7 (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

$$CD = \frac{m}{\mu} * d * \omega \quad (7)$$

Onde:

CD é a quantidade de emissão de carbono de demolição da edificação (kgCO_2/t);

m é o peso do material de descarte (t);

μ é a taxa de carregamento dos veículos utilizados para transporte;

d é a distância de transporte do local da demolição até o descarte final (km);

ω é a emissão por unidade de transporte do veículo utilizado (kgCO_2/tkm).

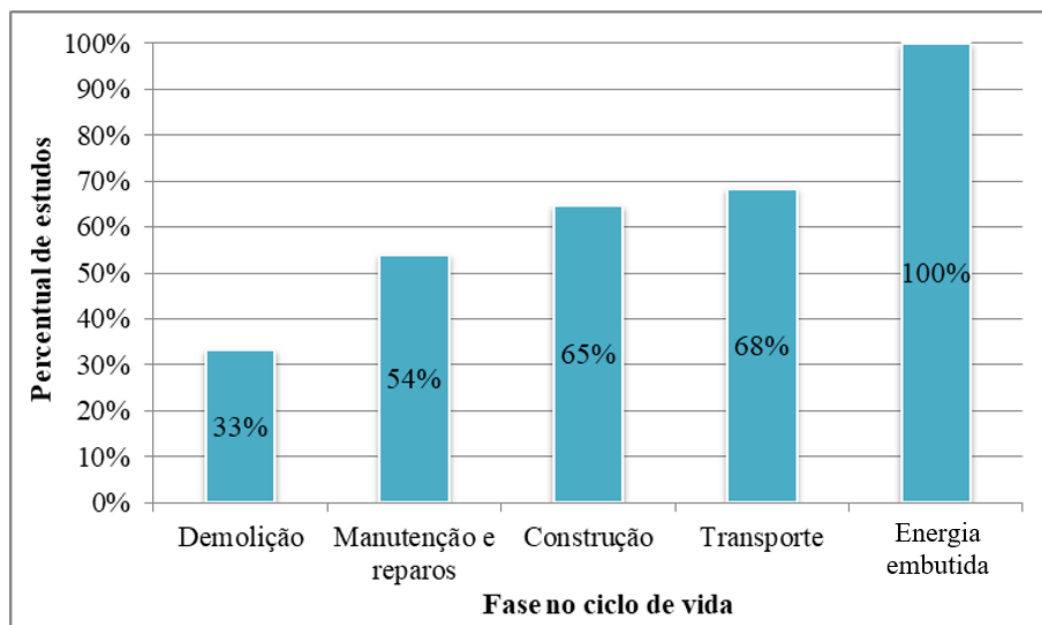
Para os processos de biodegradação, que representa a maioria dos casos, os principais produtos são CO_2 , CH_4 (metano), água e calor, para processos aeróbicos, e CH_4 e CO_2 para os processos anaeróbicos (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Assim como para a energia embutida, os produtos podem apresentar um potencial de emissão de carbono após o fim da sua vida útil, que não foi liberado ao longo do processo de fabricação. Em contrapartida, algumas matérias-primas, como a madeira, podem atuar como sequestradores naturais de carbono em seu processo de origem. O carbono armazenado pode ser considerado como uma emissão de carbono negativa ao longo do ciclo de vida (MONCASTER; SYMONS, 2013).

2.3.4. Estudos analisados

Segundo Dixit (2017), entre o período de 1975 e 2016, foram realizados 96 estudos voltados para a avaliação do ciclo de vida energético de edificações residenciais uni e multifamiliares nos continentes da Ásia, América, Oceania e Europa. Todos os estudos levantaram a energia embutida dos materiais, no entanto, outras etapas como o transporte dos materiais, a construção, manutenção e demolição da edificação apresentaram bastante variação de abrangência. A Figura 4 apresenta o percentual de estudos que abordaram cada fase do ciclo.

Figura 4 – Variação da abrangência de cada fase do ciclo de vida dos estudos analisados.



Fonte: Baseado em Dixit (2017).

O principal fator para a não inclusão dessas demandas energéticas no estudo envolve a escassez de dados e a adoção de simplificações, por considerar que algumas dessas etapas não são significativas dentro do ciclo de vida (DIXIT, 2017).

Para os estudos analisados, a energia de construção da edificação varia entre 0,2% e 37% do valor da energia embutida inicial e a energia de transporte dos materiais entre 0,5% e 21%. Em alguns casos, a energia recorrente apresentou valores iguais ou maiores do que a energia embutida inicial, sendo mais significativa naqueles com longo período de vida útil. A energia embutida de demolição, que apresenta maior frequência de exclusão das análises, apresentou valores equivalentes entre 0,1% e 13% do valor da energia embutida inicial (DIXIT, 2017).

Ramesh, Prakash e Shukla (2010) analisaram 73 estudos que consideraram a ACVE de edificações residenciais e escritórios de treze países. Para comparação dos valores apresentados, os resultados do consumo de energia primária para cada edificação foram transformados em kWh/m².ano, evitando o acúmulo de diferenças devido ao tamanho da edificação e à duração de vida útil utilizada em cada análise.

Para as edificações residenciais, a energia primária obtida considerando o ciclo de vida está na faixa de 150 até 400 kWh/m².ano. Para os escritórios, o valor aumenta, variando de 250 até

550 kWh/m².ano. As principais mudanças de consumo no ciclo de vida estão associadas às condições climáticas às quais cada projeto está submetido. Além disso, a origem da eletricidade também influencia no valor consumido de energia primária (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Sartori e Hestnes (2007) analisaram 60 estudos de avaliação do ciclo de vida energético de edificações de diferentes tipologias. A análise desenvolvida não considerou a fase de demolição da edificação e reciclagem dos materiais utilizados. Assim como no estudo citado anteriormente, o valor da energia foi normalizado em kWh/m².ano.

A energia de operação apresentou relação linear com a demanda total do ciclo de vida. Os edifícios de baixo consumo energético na fase de operação foram os que apresentaram as menores demandas de energia ao longo do ciclo de vida. Com isso, sua redução apresenta-se como a principal medida a ser considerada para o ciclo de vida. A energia embutida não apresentou relação com a baixa demanda de energia de operação. Conclui-se que as principais influências para essa redução estão associadas a variáveis externas, como o clima e os critérios adotados para o projeto (SARTORI; HESTNES, 2007).

Paulsen e Sposto (2013) analisaram o ciclo de vida energético de uma edificação do programa Minha Casa Minha Vida próximo à cidade de Brasília. A edificação possui 48 m² de área construída e, devido ao padrão da construção, seu consumo energético é baixo. A unidade funcional definida para o estudo foi o ciclo de vida de uma edificação padrão para uma família de 3,3 habitantes. A vida útil considerada foi de 50 anos.

A energia utilizada para a construção da edificação foi desconsiderada, uma vez que esse tipo de edificação é construído majoritariamente de maneira artesanal, com baixo consumo energético. Entretanto, o desperdício de materiais no processo construtivo é elevado, representando um acréscimo significativo na demanda de materiais. Para a fase de demolição, não foram considerados processos de reciclagem, visto que não é uma prática recorrente no Brasil (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Para a edificação analisada, a energia operacional resultou em 68,9%, sendo 45,5% devido ao consumo de eletricidade e 23,4% ao cozimento de alimentos, e a energia embutida somou 30,1% da energia no ciclo de vida. A fase de demolição apresentou apenas 1,1% do total de energia utilizada no ciclo, sendo a maioria oriunda do transporte dos materiais para o aterro (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

O maior percentual de energia embutida provém da extração e produção dos materiais, totalizando 41,5%. No entanto, 41,1% da energia embutida é originada pela manutenção ao longo do ciclo de vida. Para os materiais, o bloco cerâmico foi o que apresentou maior influência no total de energia embutida. Para a manutenção, a pintura apresentou o maior valor devido à periodicidade estabelecida a cada dois anos. Com isso, a parede apresentou a maior demanda de energia embutida da edificação, representando o elemento de maior potencial de melhoria (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Para a mesma edificação, Sposto e Paulsen (2013) utilizaram a avaliação do ciclo de vida energético para avaliar somente a energia embutida inicial. A unidade funcional definida para o estudo foi de um padrão de habitação com uma área interna de 48m². As fases do ciclo de vida consideradas englobam a extração de materiais, a fabricação dos componentes, o transporte para a obra e a sua construção. Para a fase de construção somente o desperdício de materiais foi considerado (SPOSTO; PAULSEN, 2013).

A fundação não foi analisada por variar muito conforme a resistência do solo e as instalações também foram desconsideradas por representarem pouca quantidade de material neste tipo de projeto (SPOSTO; PAULSEN, 2013).

A energia embutida inicial resultou em 151 GJ, com as fases de transporte e desperdício de materiais representando 20% desse valor e o restante sendo resultado dos processos de extração de matéria prima e da produção dos materiais. Esse valor resulta em uma taxa de 3,2 GJ/m², considerada elevada em comparação com construções similares de países como a Índia, Noruega, Suécia e Nova Zelândia, que têm uma média de 2,9 GJ/m² (SPOSTO; PAULSEN, 2013).

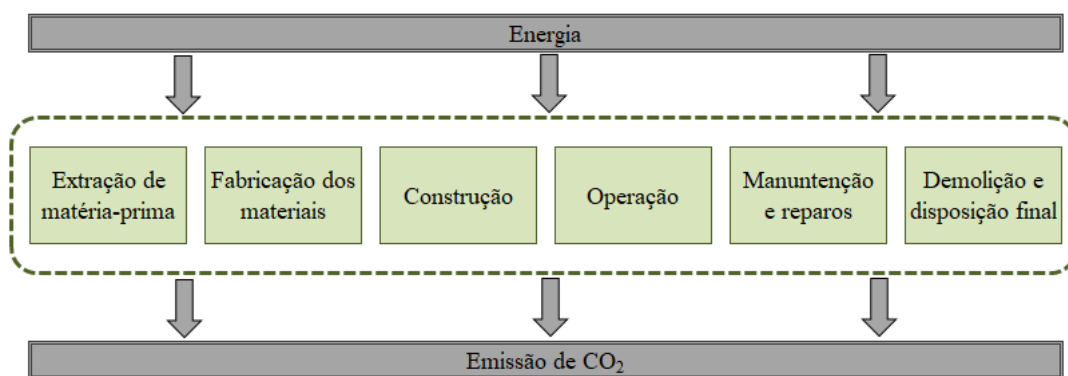
Em relação aos sistemas construtivos, as paredes representam 62% de toda energia embutida inicial, o telhado 12% e o piso e as esquadrias 13% cada um. Essa distribuição indica o elevado potencial de redução da energia embutida inicial pela alteração dos materiais que compõem as paredes. A influência significativa da parede de bloco cerâmico estrutural ocorre principalmente pelo processo de queima dos blocos (SPOSTO; PAULSEN, 2013).

Crawford (2013) analisou o ciclo de vida energético de uma edificação residencial na Austrália. A energia primária e o potencial de aquecimento global foram considerados. O projeto tem área de 291,3 m² e é construído com paredes de bloco cerâmico estrutural

enquadrado com madeira e revestimento interno de gesso acartonado, telhas de concreto e pisos revestidos com carpete.

O consumo de gás natural e de energia elétrica na fase de operação foi obtido diretamente por meio das faturas, considerando a média de três anos de consumo. A vida útil considerada foi de 50 anos. O método híbrido foi utilizado para obtenção da energia embutida (CRAWFORD, 2013). As fases consideradas para a ACV estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Fases do ciclo de vida consideradas para o estudo.



Fonte: Baseado em Crawford (2013).

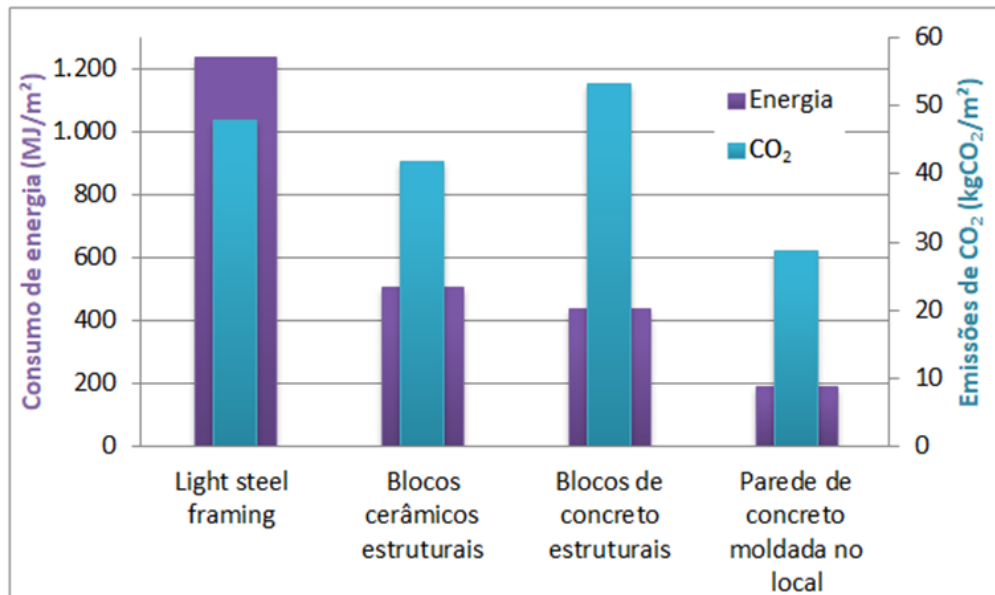
A pintura foi o elemento que obteve maior valor de energia embutida, devido, principalmente, à manutenção, considerada com frequência de dois anos. Para a energia, 40% do valor obtido vêm da fase de operação enquanto 37% é da energia embutida inicial e 22% da manutenção. Para o potencial de aquecimento global, 45% do valor final é da fase de operação e 34% da energia embutida inicial (CRAWFORD, 2013).

Considerando todo o ciclo de vida, a edificação apresentou consumo de 36,4 GJ/m², sendo 13,4 GJ/m² oriundo da energia embutida inicial e 14,7 GJ/m² da energia de operação. Em relação às emissões de CO₂, o ciclo de vida totalizou em 2,3 tCO₂eq/m² (CRAWFORD, 2013).

Caldas et al. (2016) utilizaram a ACVE e a ACVCO₂ como indicadores para classificação de diferentes sistemas de fachada utilizados em habitações de interesse social no Brasil. Os sistemas considerados foram o *light steel framing*, parede de concreto moldada no local, blocos de concreto estruturais e blocos cerâmicos estruturais.

As fronteiras do sistema consideraram as etapas de extração, processamento e manutenção dos sistemas ao longo da vida útil, considerada de 50 anos. A unidade funcional estabelecida foi m^2 de fachada. O sistema de pintura não foi considerado por ser o mesmo para todos os sistemas de fachada. Os dados de consumo energético e emissão de CO_2 foram retirados da literatura nacional, com exceção da placa *oriented strand board* (OSB) utilizada no *light steel framing*. Para esse componente, os dados utilizados são referentes à literatura norte-americana. Foi considerada a análise híbrida, sendo o método mais utilizado para desenvolvimento de estudos na área (CALDAS et al., 2016). Os resultados obtidos, tanto para consumo de energia quanto para emissão de CO_2 estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Emissões de CO_2 e consumo de energia por m^2 dos sistemas de fachada analisados.



Fonte: Baseado em Caldas et al. (2016).

Inicialmente, a massa dos sistemas foi considerada. Espera-se que, quanto maior a massa por m^2 , maior será o consumo de materiais para sua construção e, conseqüentemente, maiores serão as emissões e o consumo de recursos. No entanto, para os sistemas de fachadas estudados, a parede de concreto moldada no local apresentou a maior massa por m^2 de fachada e os menores valores de emissão de CO_2 e consumo de energia. Com isso, dentro do escopo estabelecido, o sistema de parede de concreto moldada no local foi o mais indicado para uso em habitações de interesse social (CALDAS et al., 2016).

O sistema que apresentou maior valor de consumo energético foi o de *light steel framing* e o que apresentou maior valor de emissão de CO₂ foi o de bloco de concreto estrutural. Como o resultado obtido variou entre os sistemas, não foi possível definir qual seria o de maior impacto para uso, sendo necessária a consideração de outros indicadores além daqueles definidos para o estudo (CALDAS et al., 2016).

2.4. Considerações Finais

Os trabalhos revisados permitiram a análise do panorama sobre o ciclo de vida e o ciclo de vida energético em edificações.

Para a ACV, devido à complexidade de aplicação da técnica e exigência de banco de dados, encontra-se um menor número de estudos desenvolvidos do que para ACVE. A maioria deles não considera todas as fases do ciclo de vida. Na fase de fim da vida, o processamento dos materiais, disposição final e o próprio processo de demolição da edificação normalmente são desconsiderados, principalmente pela falta de dados relacionados a esses processos. Na fase de pré-uso, o processo construtivo da edificação é desconsiderado por representar baixo percentual de impacto no ciclo e, para alguns casos, na fase operacional, a manutenção, reposição e reparo da edificação.

A fase de operação da edificação é a mais significativa ao longo do ciclo de vida, e a vida útil mais utilizada é de 50 anos. O cimento apareceu como um material de destaque no impacto embutido.

Para a ACVE, a energia de operação representa a maior parcela no ciclo de vida, sendo sua redução a principal medida considerada nos projetos desenvolvidos. Além disso, a energia de operação apresenta relação linear com o total de energia no ciclo de vida.

No entanto, o desenvolvimento de projetos de baixo consumo energético na fase de operação, de modo geral, tem levado a um aumento da energia embutida dos materiais e instalações utilizados. O aumento da energia embutida, quando não feito adequadamente, não representa necessariamente a redução da energia de operação. Para os casos em que a demanda energética da edificação é muito baixa, aumentar a energia embutida não altera de forma significativa a energia de operação.

Com isso, torna-se necessário encontrar o equilíbrio de redução de energia de operação e aumento da energia embutida para os projetos desenvolvidos. Para auxiliar a definição desse limite, torna-se necessária a padronização das análises de ciclo de vida desenvolvidas e a criação de bancos de dados de energia embutida locais para análise detalhada do tipo de projeto desenvolvido em cada região.

Devido ao alto grau de complexidade e o nível de detalhamento exigido para desenvolvimento de estudos de ACV, a avaliação do ciclo de vida energético tem sido utilizada como técnica de tomada de decisão para redução da demanda energética ao longo do ciclo de vida de edificações. Entretanto, impactos como escassez de recursos e emissões de gases do efeito estufa ocorrem de forma independente do consumo energético.

Mesmo assim, não foi possível encontrar estudos que confirmem que reduzir somente o consumo de energia das edificações signifique uma redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, apontando a necessidade do desenvolvimento de pesquisas para melhorar o entendimento dos resultados obtidos por cada técnica.

3. Método

Neste capítulo é descrito o método proposto para desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, o projeto definido para o estudo de caso, referente a uma habitação de interesse social unifamiliar, é apresentado.

Em seguida, estão definidos os sistemas construtivos a serem avaliados ao longo do trabalho. Para isso, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica para identificação dos materiais mais utilizados em edificações residenciais que apresentam o mesmo padrão do projeto escolhido. Em seguida, levantou-se os dados necessários para desenvolvimento da simulação computacional, realizada por meio do programa *EnergyPlus*.

Após o processamento dos resultados obtidos com a simulação computacional, a avaliação do ciclo de vida foi feita por meio do programa SimaPro, utilizando a base de dados Ecoinvent 3.5. Para o desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida energético foram levantados dados nacionais relacionados tanto ao consumo energético quanto às emissões de gases de efeito estufa (CO₂eq).

Com os resultados das avaliações do ciclo de vida foi possível comparar a ACV e a ACVE como técnicas de tomada de decisão para escolha das melhores estratégias arquitetônicas. Além disso, serão definidas as estratégias que apresentarem os melhores e os piores resultados ao longo do ciclo de vida. O fluxograma do método proposto é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do método proposto.



3.1. Projeto arquitetônico

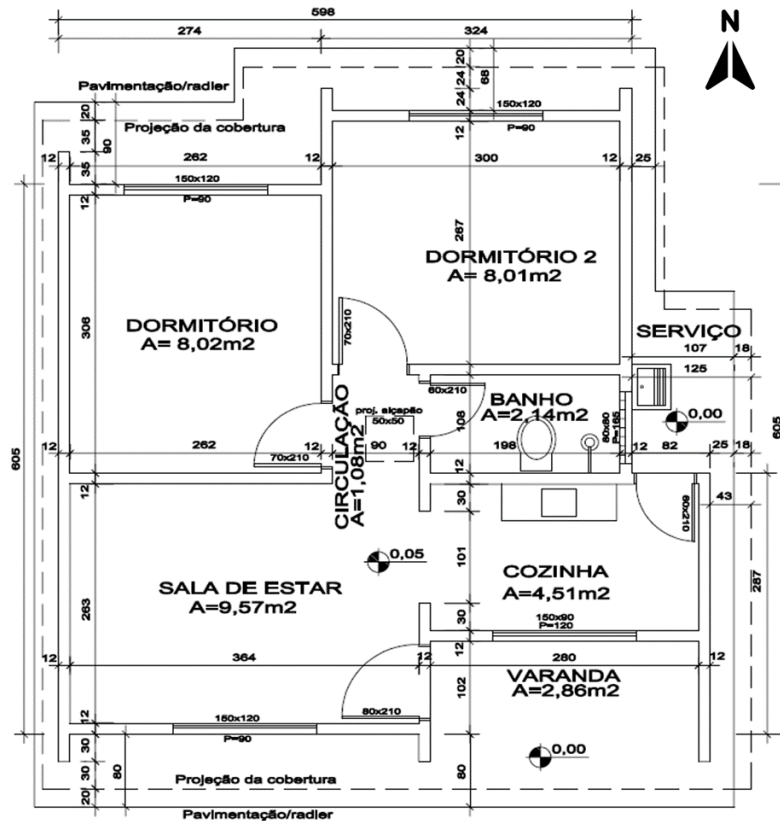
O projeto unifamiliar selecionado está disponibilizado pela Caixa Econômica Federal no Banco de Projetos – Projetos de Habitação de Interesse Social. Esse modelo de habitação foi escolhido devido à grande quantidade de edificações construídas por meio do Programa Minha Casa Minha Vida no Brasil. Ele tem 41,16m², dois quartos, um banheiro, uma sala e uma cozinha. A área de serviço é externa à edificação, conforme apresentado na

Figura 8.

De acordo com o memorial arquitetônico do projeto, ele foi desenvolvido com base em diretrizes bioclimáticas voltadas para o clima equatorial. Sua orientação é definida com o eixo Norte-Sul no sentido vertical da

Figura 8 e o eixo Leste-Oeste no sentido horizontal. Para o estudo desenvolvido, a orientação estabelecida considera que a fachada dos dormitórios está orientada a Norte.

Figura 8 – Planta baixa sem escala da edificação unifamiliar modelo.



Fonte: Banco de Projetos da Caixa para projetos de habitação de interesse social. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>.

3.2. Componentes construtivos

A envoltória das edificações é o principal sistema que contribui para aumento ou redução da demanda de energia embutida e energia operacional (AZARI; ABBASABADI, 2018). Nesse contexto e com o objetivo de considerar os principais componentes construtivos utilizados na construção de edificações residenciais no país, os sistemas de cobertura e parede do projeto arquitetônico apresentado serão modificados.

Optou-se pelo uso de alvenaria estrutural devido ao intensivo uso desse sistema em HIS, pois apresenta fácil execução, dispensa o uso de formas e escoramento e não necessita mão de obra especializada, reduzindo os custos do projeto e construção da edificação (CAMACHO, 2006).

Para definição dos sistemas construtivos a serem analisados, foi realizada uma revisão bibliográfica com base em estudos nacionais relacionados a habitações de interesse social, levantando os sistemas encontrados. O Quadro 2 apresenta os sistemas definidos para as paredes e coberturas, e as fontes de estudos que os utilizaram. A Figura 9 apresenta a composição das paredes consideradas para o estudo e a Figura 10 a composição das coberturas.

Quadro 2 – Sistemas construtivos selecionados para análise e suas referências de aplicação.

Sistemas construtivos		Referências
Parede	Bloco cerâmico estrutural	Caldas et al. (2016); Caldas, Lira e Sposto (2017)
	<i>Light steel framing</i>	Caldas et al. (2016); Bernardes et al. (2012)
	Parede de concreto moldado no local	Caldas et al. (2016); Caldas, Lira e Sposto (2017); Ferreira (2012)
	Bloco de concreto estrutural	Caldas et al. (2016); Menezes et al. (2014); Carraro e Dias (2014)
Cobertura	Telha cerâmica	Caldas, Lira e Sposto (2017); Menezes et al. (2014); Carraro e Dias (2014); Brandão, Callejas e Durante (2019); Rodrigues, Oliveira e Carlo (2015)
	Forro de madeira	Silva et al. (2010); Brandão, Callejas e Durante (2019)
	Laje de concreto	Silva et al. (2010); Rodrigues, Oliveira e Carlo (2015)

Figura 9 – Composição das paredes consideradas para o estudo.

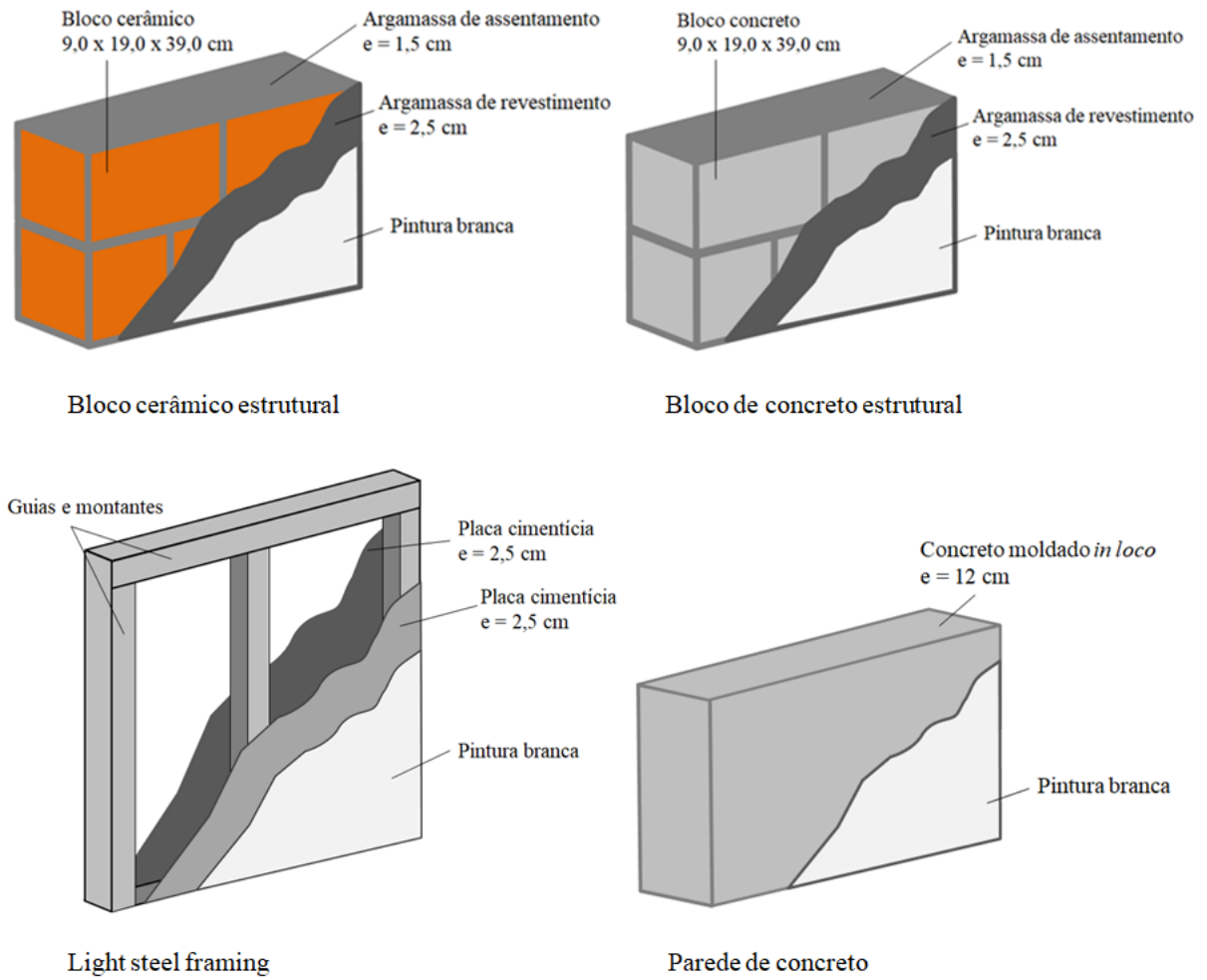
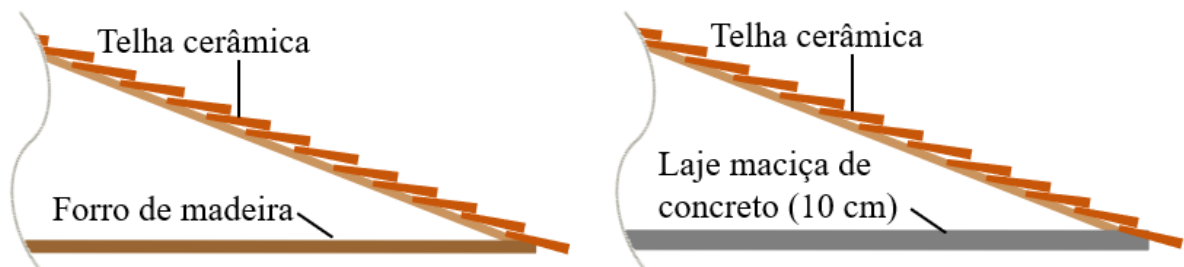


Figura 10 – Composição das coberturas consideradas para o estudo.

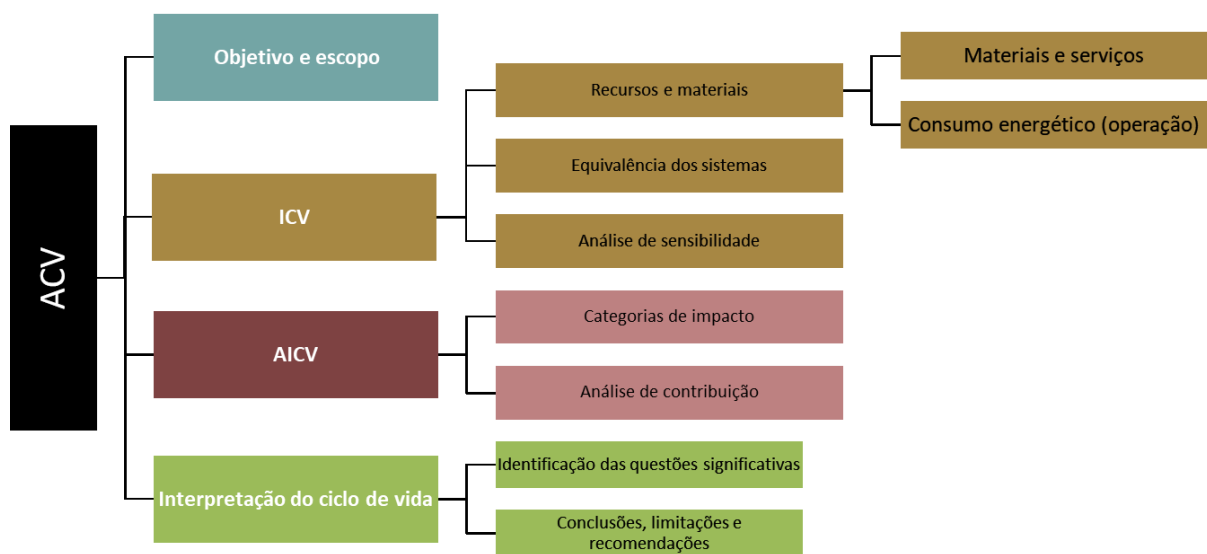


3.3. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) foi desenvolvida considerando as etapas e definições estabelecidas pelas normas brasileiras ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura e ABNT NBR ISO 14044 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

Como o estudo desenvolvido apresenta uma avaliação do ciclo de vida comparativa que terá seu resultado divulgado de forma aberta, a ABNT NBR ISO 14044 determina o uso de alguns mecanismos para validação do método e dos dados utilizados. Com isso, para facilitar o entendimento do passo a passo aplicado, a Figura 11 apresenta e organiza as diferentes etapas consideradas para cada fase do ciclo de vida.

Figura 11 – Etapas aplicadas para o desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida.



Fonte: Baseado em ABNT (2009a).

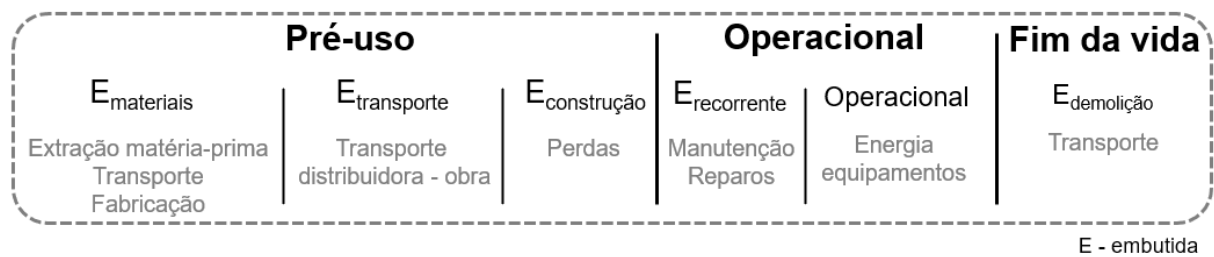
3.3.1. Objetivo e escopo

O objetivo da ACV tem como foco principal entender a influência do uso de diferentes sistemas na envoltória de habitações de interesse social no impacto ambiental. O público-alvo é de pesquisadores e estudantes da área, não havendo interesses econômicos.

O desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida visa, principalmente, a comparação dos diferentes estudos de caso considerados com a adoção das variações dos sistemas construtivos.

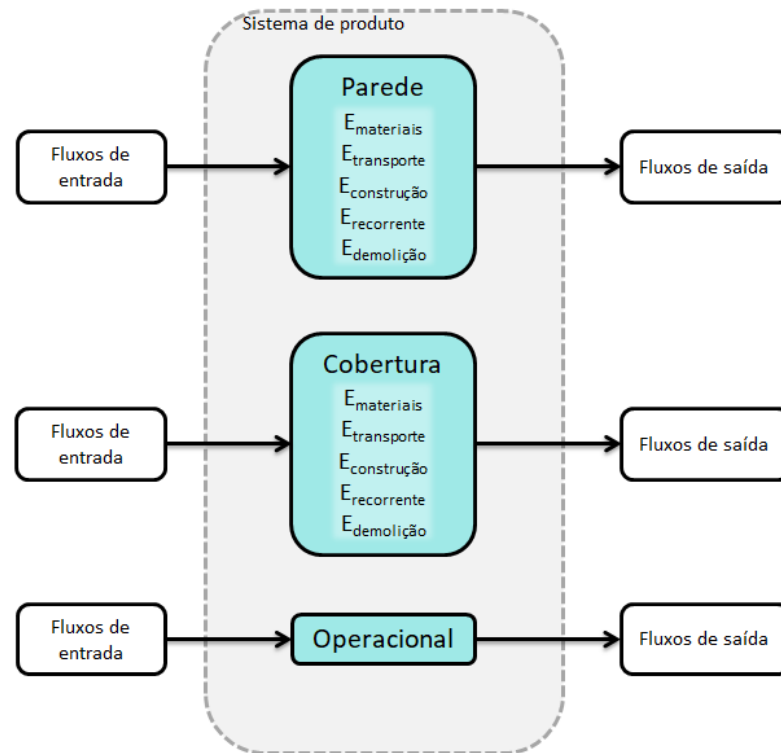
A unidade funcional definida foi a construção, operação e demolição de uma habitação de interesse social unifamiliar de 41,16m² com vida útil de 40 anos, para quatro moradores, para a zona bioclimática 3. A fronteira do sistema foi delimitada conforme apresentado na Figura 12. As etapas de reuso, reciclagem, reparo e disposição final dos materiais na fase de demolição não serão consideradas por não serem práticas comuns no Brasil e pela falta de dados.

Figura 12 – Fronteira do sistema



O sistema de produto foi determinado com base na fronteira estabelecida. As categorias de impactos embutidos e operacionais foram definidas com o objetivo de permitir a identificação da participação percentual dos impactos potenciais em cada fase no ciclo de vida. A Figura 13 apresenta o sistema de produto em sua formatação resumida.

Figura 13 – Estrutura do sistema de produto para a ACV.



3.3.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

Inicialmente é apresentada a descrição de equivalência dos sistemas considerados. Em seguida, os procedimentos utilizados para o levantamento quantitativo dos materiais e recursos envolvidos no ciclo de vida da edificação e para a estimativa do consumo energético anual são descritos.

O levantamento de recursos e materiais envolve as fases de pré-uso, operação e demolição da edificação. O consumo energético durante a fase de operação foi obtido por meio de simulação computacional.

3.3.2.1. Equivalência dos sistemas

A descrição da equivalência dos sistemas analisados para uma ACV comparativa garante que os diferentes sistemas considerados no estudo sejam equivalentes entre si e coerentes com a unidade funcional definida para o estudo.

A equivalência dos sistemas foi feita considerando os critérios definidos pela ABNT NBR 15575-1, que discorre sobre o desempenho de edificações habitacionais. De modo geral, a norma define os critérios mínimos de desempenho relacionados à segurança, habitabilidade, sustentabilidade e outras generalidades relacionadas às habitações e aos diferentes sistemas que as compõem.

3.3.2.2. Materiais e serviços

O quantitativo de materiais foi levantado por meio de consulta à tabela de composição de preços para orçamentos (TCPO) e aos manuais dos fabricantes nacionais dos produtos utilizados. Além desses materiais, foram consultados trabalhos similares voltados para a realidade brasileira, como os estudos desenvolvidos por Caldas, Lira e Sposto (2017) e Souza et al. (2016).

Foram considerados, além da quantidade necessária para construção da edificação, o fator de desperdício do próprio processo construtivo de cada material. Como o objetivo principal é comparativo, somente foram englobados os sistemas construtivos que variam entre os casos analisados (parede e cobertura).

Para consideração da reposição de materiais ao longo da operação da edificação, o tempo de vida útil de projeto² (VUP) definido pela ABNT (2013a) foi considerado para cálculo do fator de reposição. A Tabela 1 apresenta os valores mínimos estabelecidos.

Tabela 1 – Valores de vida útil de projeto para cada sistema analisado.

Sistema	VUP (anos)
Estrutura	50
Vedação vertical externa	40
Vedação vertical interna	20
Cobertura	20

Fonte: Baseado em ABNT (2013a).

² A vida útil de projeto considera que o usuário está realizando a manutenção da edificação conforme as orientações de processo e periodicidade definidas pela ABNT NBR 5674.

O fator de reposição (FR) para cada sistema foi obtido por meio da aplicação da Equação 8. Ele indica quantas vezes cada sistema terá que ser substituído ao longo da vida útil da edificação.

$$FRs = \frac{VU_e}{VUP_s} - 1 \quad (8)$$

Onde:

FRs é o fator de reposição dos sistemas construtivos;

VU_e é a vida útil da edificação (anos);

VUP_s é a vida útil de projeto do sistema da edificação (anos).

Para consideração da manutenção dos sistemas construtivos analisados, foi levantado o período de manutenção indicado pelos fabricantes nacionais dos materiais utilizados. O fator de manutenção foi obtido por meio da aplicação da Equação 9. Ressalta-se que o resultado da divisão de VU_e por VUP_s deve ser utilizado com o número inteiro arredondado para cima.

$$FRm = \left(\frac{VUP_s}{P_m} - 1 \right) * \left(\frac{VU_e}{VUP_s} \right) \quad (9)$$

Onde:

FRm é o fator de reposição de manutenção;

VUP_s é a vida útil de projeto do sistema da edificação (anos);

P_m é o período de manutenção definido pelo fabricante (anos);

VU_e é a vida útil da edificação (anos).

Para a fase de demolição, foi considerado somente o transporte dos materiais que compõem a edificação até o aterro.

Como existem muitas diferenças relacionadas às distâncias de transporte de cada material, foi levantado o valor médio das distâncias utilizadas em outros estudos aplicados para a realidade brasileira. Com isso, as distâncias da fábrica até a construção e da construção até o aterro foram definidas conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distâncias de transporte consideradas para cada etapa.

Etapa	Distância média (km)
Fábrica - Construção	135
Construção - Aterro	50

Fonte: Baseado em Moraga et al. (2016), Paulsen e Sposto (2013), Souza et al. (2015) e Souza et al. (2016).

3.3.2.3. Consumo energético (operação)

O consumo energético anual foi estimado por meio de uma simulação computacional desenvolvida no programa *EnergyPlus*. O valor de consumo energético durante a operação foi transformado em diferentes categorias de impacto ambiental, com base na composição da matriz energética brasileira. Dessa forma, são considerados diferentes tipos de fluxos de entrada e de saída, como, por exemplo, o material para queima (fluxo de entrada) e emissões de CO₂ (fluxo de saída) no caso do uso de energia elétrica oriunda de usinas termelétricas.

Considerando os objetivos definidos, as simulações foram realizadas com o uso de um sistema de refrigeração artificial para condicionamento da edificação. Para consideração das diferentes estratégias arquitetônicas, os sistemas construtivos foram alterados individualmente.

As rotinas de operação consideradas foram baseadas em Ghisi et al. (2015) e estão detalhadas no Anexo A. A densidade de potência instalada em cada ambiente foi definida conforme os valores apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Densidade de potência instalada para iluminação.

Ambiente	Densidade de Potência (W/m²)	Área (m²)	Potência Instalada Adotada (W)
Cozinha	2,60	4,51	11,73
Quarto 1	3,82	8,02	30,64
Quarto 2	3,82	8,01	30,60
Sala	2,02	9,57	19,33

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 4 – Densidade de potência instalada para equipamentos.

Ambiente	Densidade de Potência (W/m²)	Área (m²)	Potência Instalada Adotada (W)
Cozinha	71,90	4,51	324,27
Quarto 1	18,30	8,02	146,77
Quarto 2	18,30	8,01	146,58
Sala	19,30	9,57	184,70
Banheiro (W)*	-	-	5214,45

*considerado somente chuveiro

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Para o sistema de condicionamento de ar, considerou-se uso de aparelhos do tipo *split* com função de resfriamento, instalados nos dois quartos. A rotina de operação foi associada à rotina de ocupação e às temperaturas de conforto para calor. A temperatura de 24°C foi definida para limite do início do resfriamento e o aquecimento não foi considerado por não ser comum em habitações de interesse social no Brasil.

A ABNT NBR ISO 14044 apresenta alguns requisitos para a publicação de ACV que considera a comparação entre produtos de mesma função. Com isso, é necessário o desenvolvimento de uma análise de sensibilidade.

Para isso, foi considerada a alteração no comportamento do usuário e da localização da construção. Com isso, variou-se a temperatura limite para o início do resfriamento de 24°C para 25°C e, em seguida, para 26°C. Para considerar diferentes zonas bioclimáticas, foram definidas três cidades para a análise de sensibilidade. As cidades foram selecionadas seguindo os critérios de serem capitais e de apresentarem o arquivo climático no modelo TRY (*test reference year*). Os arquivos foram obtidos por meio de consulta ao *climate.onebuilding.org*.

As cidades determinadas para o estudo e as zonas bioclimáticas correspondentes estão apresentadas na Tabela 5. A zona bioclimática 3 (São Paulo) foi definida para uso na unidade funcional da ACV, conforme apresentado na seção 3.3.1, enquanto que as outras foram utilizadas para a análise de sensibilidade.

Tabela 5 – Cidades e zonas bioclimáticas utilizadas para a simulação computacional.

Cidades/Estado	Zona bioclimática
Curitiba/PR	1
São Paulo/SP	3
Brasília/DF	4
Rio de Janeiro/RJ	8

Fonte: Baseado em ABNT (2003).

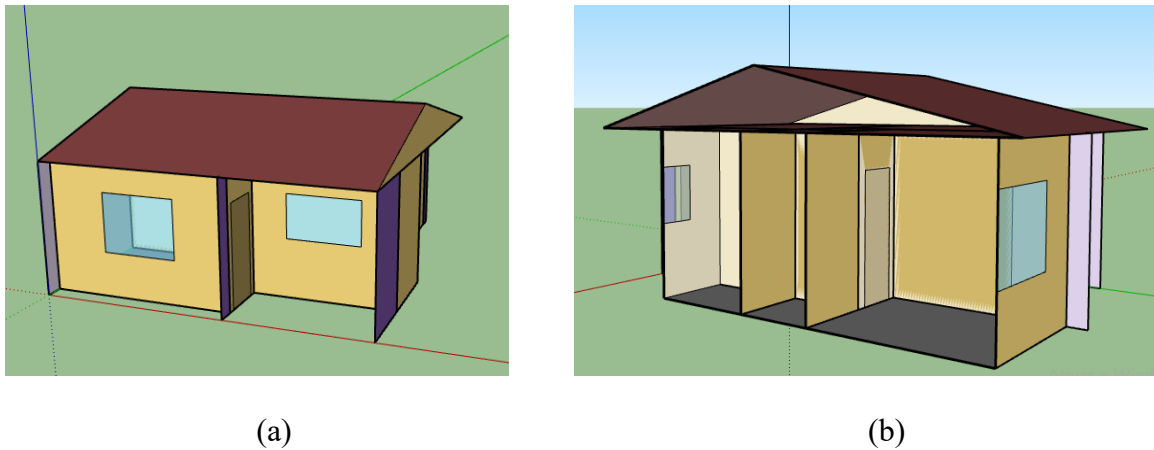
Para as aberturas, foram consideradas as janelas e portas definidas no projeto, conforme apresentado na Tabela 6. Todas as janelas foram definidas com vidro simples, com espessura de 3 mm. As portas foram consideradas de madeira sem o uso de vidro.

Tabela 6 – Dimensão das esquadrias da edificação.

Tipo	Ambiente	Dimensão (cm)
Porta	Dormitórios	70 x 210
Porta	Banheiro e cozinha	60 x 210
Porta	Sala de estar	80 x 210
Janela	Cozinha	150 x 90
Janela	Dormitórios e sala de estar	120 x 90
Janela	Banheiro	80 x 80

A modelagem da edificação foi desenvolvida por meio do programa *SkechUp*, com o uso da extensão *Euclid*. Com o objetivo de permitir a análise do conforto térmico para cada ambiente, as zonas térmicas seguiram as divisões dos cômodos da edificação. O pé-direito adotado foi de 2,70m e a cobertura foi modelada com uma câmara de ar entre o forro (*ceiling*) e as telhas (*roof*). As paredes que não fazem parte de nenhum ambiente interno foram modeladas como elementos de sombreamento, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Vista dos elementos de sombreamento (a) e modelagem da cobertura (b)



Fonte: Gerado por meio do programa *SketchUp*.

Conforme citado na seção 3.2, foram definidos quatro modelos de parede e dois de cobertura a serem analisados. As características de entrada de cada elemento dos componentes construtivos considerados para simulação estão apresentadas nas Tabelas 7, 8 e 9. Para as paredes foi considerada a absorptância solar de 0,35, equivalente à cor branca. Para a cobertura foi considerada absorptância solar de 0,7, equivalente à cor da telha cerâmica.

Tabela 7 – Características dos elementos construtivos para o sistema de cobertura.

Coberturas		<i>Roughness</i>	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.k)
Telha	Cerâmica	<i>Rough</i>	0,01	1,05	2000	920
Forro	Madeira	<i>Rough</i>	0,01	0,15	600	1340
Laje	Concreto	<i>Rough</i>	0,10	1,15	2200	1000

Fonte: Baseado em Weber et al. (2017).

Tabela 8 – Características dos elementos construtivos para as paredes.

Parede		Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.k)
Bloco cerâmico	Argamassa interna	0,025	1,15 ¹	2000 ¹	1000 ¹
	Bloco cerâmico				
Bloco concreto	Argamassa externa	0,025	1,15 ¹	2000 ¹	1000 ¹
	Argamassa interna	0,025	1,15 ¹	2000 ¹	1000 ¹
	Concreto	0,0173	1,75 ¹	2400 ¹	1000 ¹
	Câmara de ar	0,0554	0,443 ¹	-	-
	Concreto	0,0173	1,75 ¹	2400 ¹	1000 ¹
Concreto moldado <i>in loco</i>	Argamassa externa	0,025	1,15 ¹	2000 ¹	1000 ¹
	Concreto armado	0,12	1,75 ¹	2200 ¹	1000 ¹
<i>Light steel framing</i>	Placa cimentícia	0,012	0,95 ²	1750 ²	840 ²
	Câmara de ar	0,09			
	Placa cimentícia	0,012	0,95 ²	1750 ²	840 ²

Fonte:

1 - Weber et al. (2017)

2 - Palacio (2013)

Tabela 9 – Características dos elementos construtivos para o sistema de piso.

Piso	<i>Roughness</i>	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.k)
Membrana Betuminosa	<i>Rough</i>	0,003	0,23	1050	1460
Contrapiso laje	<i>Rough</i>	0,02	1,15	2000	1000
Argamassa Piso	<i>Rough</i>	0,03	1,15	1950	1000
Piso Cerâmico	<i>Rough</i>	0,0075	1,05	2000	920

Fonte: Baseado em Weber et al. (2017).

Para validar os resultados encontrados, foi realizada uma análise do desempenho térmico dos casos simulados. Para isso, foram consideradas as análises de horas de desconforto, definida pela ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013, e do indicador de graus-hora. As duas análises

foram aplicadas considerando somente os ambientes de longa permanência. Para o indicador de graus-hora foram definidas como temperaturas base para resfriamento os valores de 24°C, 25°C e 26°C.

3.3.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo principal transformar os quantitativos levantados durante a análise do inventário em categorias de impacto, permitindo a compreensão do perfil de impacto de cada caso considerado (ABNT, 2009a).

Inicialmente foram apresentados os resultados obtidos para todas as categorias de impacto. Em seguida, foram apresentados os itens exigidos pela ABNT NBR ISO 14044 para a publicação de afirmações comparativas entre produtos ou serviços que apresentam a mesma função. São eles:

- Análise de sensibilidade;
- Análise de contribuição.

3.3.3.1. Categorias de Impacto

Para o desenvolvimento da AICV foi utilizada a base de dados Ecoinvent 3.5 por meio da aplicação do método ReCiPe, utilizando o programa SimaPro.

O SimaPro é um programa desenvolvido pelo *PRÉ Sustainability* que permite a coleta, análise e o monitoramento dos dados de desempenho de sustentabilidade de diversos produtos e serviços por meio do uso de bancos de dados pré-existentes. Dessa forma, seu uso possibilita o desenvolvimento de relatórios de sustentabilidade, pegadas de carbono, geração de declarações ambientais de produtos, dentre outras aplicações (PRÉ SUSTAINABILITY, 2021).

A base de dados da Ecoinvent, disponibilizada para acesso por meio do SimaPro, é desenvolvida pelo Centro Suíço para Inventários de Ciclo de Vida (*Swiss Centre for Life Cycle Inventories*). Ele tem como objetivo principal o fornecimento de dados de inventário do ciclo de vida de forma transparente e acessível para usuários em todo o mundo. Seu banco de dados é composto por processos que permitem a avaliação do impacto ambiental e socioeconômico.

Além disso, devido ao sistema de validação e padronização dos dados, é possível o desenvolvimento de avaliações comparativas (WEIDEMA et al., 2013).

O método ReCiPe é amplamente utilizado na Europa e passou por uma atualização no ano de 2016. Além da escala europeia utilizada na versão anterior, na nova atualização a escala global passou a ser considerada nos fatores de caracterização (HUIJBREGTS, 2017).

O método considera três categorias de dano (danos à saúde humana, danos à qualidade do ecossistema e danos à disponibilidade de recursos) e dezoito categorias de impacto. O Quadro 3 apresenta a relação estabelecida entre as duas categorias.

Quadro 3 – Relação entre as categorias de impacto e de dano para a metodologia ReCiPe.

Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Categorias de Dano (<i>endpoint</i>)		
	Saúde humana	Ecossistema	Recursos
Formação de partículas finas			
Radiação ionizante			
Depleção do ozônio estratosférico			
Toxicidade humana (cancerígena)			
Toxicidade humana (não-cancerígena)			
Formação de ozônio troposférico (humano)			
Aquecimento global			
Uso de água			
Formação de ozônio troposférico (ecossistema)			
Ecotoxicidade de água doce			
Eutrofização de água doce			
Ecotoxicidade terrestre			
Acidificação terrestre			
Ocupação/transformação da terra			
Ecotoxicidade de água salgada			
Eutrofização de água salgada			
Escassez de recursos minerais			
Escassez de recursos fósseis			

Fonte: Baseado em Huijbregts (2017).

Para consideração dos diferentes materiais e do consumo energético levantados na fase de análise de inventário de ciclo de vida, foram utilizados os processos existentes na base Ecoinvent 3.5, conforme apresentado no Quadro 4. Não foi feita adaptação de *datasets*³.

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos, quando necessário, as categorias de impacto foram normalizadas, sem o uso de ponderação ou agrupamento. A normalização foi feita considerando o caso com o maior valor como 100%. Com isso, o resultado dos outros sistemas construtivos representa redução do potencial de impacto ambiental do ciclo de vida.

Foram comparados os resultados de cada caso considerando cada categoria de impacto, permitindo a identificação do conjunto com maior potencial de impacto ambiental.

Quadro 4 – Processos utilizados para a ACV da Ecoinvent 3.5.

Material	Ecoinvent
Tábua de madeira	<i>Sawnwood, board, hardwood, dried (u=10%), planed</i>
Verniz para madeira	<i>Acrylic varnish, without water, in 87,5% solution state</i>
Tinta acrílica	<i>Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state</i>
Cimento	<i>Cement, Portland</i>
Cal hidratada	<i>Lime, hydrated, loose weight</i>
Areia	<i>Sand</i>
Brita	<i>Gravel, crushed</i>
Aço	<i>Reinforcing steel</i>
Bloco de concreto 9x19x39	<i>Concrete block</i>
Bloco cerâmico 9x19x39	<i>Clay brick</i>
Aço (guias e montantes)	<i>Sheet rolling, chromium steel</i>
Placa cimentícia e= 2,5 cm	<i>Particle board, cement bonded</i>
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 3,5-7,5</i>
Consumo energético	<i>Electricity, low voltage {BR}</i>

3.3.3.2. Análise de sensibilidade

Como existem muitas características que podem variar ao longo do ciclo de vida das edificações, como variações no consumo energético na fase de operação e até mesmo a vida

³ A adaptação de *datasets* engloba a alteração dos fluxos que compõem o processo escolhido, fazendo com que ele represente a realidade do produto ou serviço que está sendo analisado.

útil da edificação, a análise de sensibilidade é uma ferramenta essencial para considerar os diferentes cenários possíveis e garantir que a melhor escolha de materiais será feita.

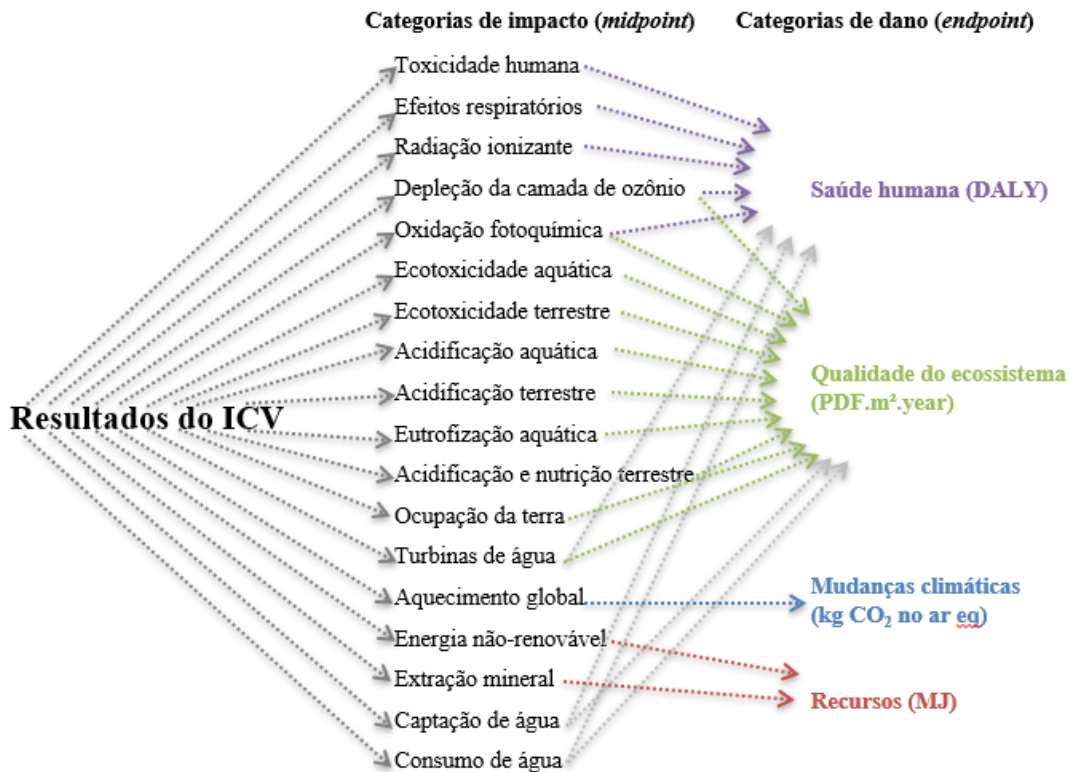
Para desenvolvimento da análise de sensibilidade foram consideradas quatro variáveis: vida útil da edificação, alteração no comportamento do usuário, o uso de diferentes métodos de AICV e variação da zona bioclimática. O Quadro 5 apresenta os diferentes valores definidos para cada variável.

Quadro 5 – Variáveis e valores definidos para a análise de sensibilidade da ACV.

Variável	Valores
Vida útil (anos)*	30, 40 e 50
Alteração no comportamento do usuário	Ventilação natural e HVAC com variação do termostato
Método de AICV*	ReCiPe 2016 e <i>Impact 2002+</i>
Zona bioclimática	ZB1, ZB3, ZB4 e ZB8
*Fonte: Souza et al. (2016)	

Assim como o método ReCiPe, o *Impact 2002+* tem como objetivo relacionar todos os dados do inventário com seu impacto ambiental. Para isso, são consideradas 18 categorias de impacto que estão agrupadas em quatro categorias de dano (HUMBERT et al., 2012), conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Relação das categorias de impacto e categorias de danos para o método *Impact* 2002+.



Fonte: Baseado em Humbert et al. (2012)

Para comparação dos perfis de impacto, cada caso recebeu uma posição em relação aos outros em um mesmo cenário. A primeira posição representa o caso de menor potencial de impacto e a oitava o de maior. Dessa forma é possível comparar diretamente a posição relativa de um mesmo caso conforme os cenários são variados. Para evitar a consideração de pequenas variações, a normalização dos valores foi feita com os percentuais sem nenhuma casa depois da vírgula.

3.3.3.3. Análise de contribuição

Uma ACV que tem como objetivo a análise comparativa que será divulgada publicamente, como é o caso do estudo a ser desenvolvido, precisa apresentar uma análise adicional da qualidade dos dados (ABNT, 2009b). Para isso, além da análise de sensibilidade, foi desenvolvida uma análise de contribuição.

Essa análise tem como objetivo principal identificar os sistemas e materiais que mais influenciaram no impacto final de cada caso analisado. Dessa forma, a ACV foi dividida entre os sistemas de cobertura e parede, o consumo energético operacional e o transporte total, que engloba desde o transporte dos materiais da fábrica até a disposição final.

Foi considerado o percentual de contribuição de cada sistema construtivo no ciclo de vida e também analisadas as contribuições dos materiais para cada um dos sistemas, de modo a identificar a origem dos principais impactos.

3.3.4. Interpretação do ciclo de vida

O processo da ACV é iterativo e algumas análises desenvolvidas durante a interpretação do ciclo de vida são utilizadas para verificação do método definido, confirmando as escolhas estabelecidas em cada etapa. Com isso, conforme definido pela ABNT (2009b), as questões significativas da ACV foram identificadas e, em seguida, foram definidas as conclusões, limitações e recomendações do estudo.

3.3.4.1. Identificação das questões significativas

O objetivo principal dessa etapa é identificar, conforme o objetivo e o escopo do estudo, as questões mais significativas da ACV desenvolvida. Para isso, cada categoria de impacto foi analisada individualmente para identificar seu percentual de contribuição no ciclo de vida.

3.3.4.2. Conclusões, limitações e recomendações

A última etapa da AICV tem como principal objetivo apresentar as conclusões obtidas com o estudo, identificando as limitações e as recomendações. Dentre as conclusões tem-se a validação do método adotado, conforme os resultados obtidos com as análises citadas anteriormente.

Com o método validado, as conclusões obtidas com a ACV são reportadas como conclusões finais. Com isso, os resultados da comparação entre os casos, das questões significativas da ACV, das análises de contribuição e de sensibilidade são apresentados.

3.4. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)

3.4.1. Objetivo e escopo

O objetivo e escopo da avaliação do ciclo de vida energético são similares ao apresentado para a ACV. No entanto, ao invés de considerar os impactos ambientais, para a ACVE foi considerada apenas a energia primária do ciclo de vida.

3.4.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICVE)

Para a análise de inventário da ACVE, os quantitativos levantados para a ACV foram considerados. Para transformar os materiais utilizados em energia primária, foi identificado o fator de energia embutida (FEE) por unidade funcional de cada material. Ele foi obtido por meio de revisão bibliográfica de estudos previamente desenvolvidos que consideraram a realidade brasileira e que utilizaram o método híbrido. Os valores para cada material estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores da energia embutida por unidade funcional considerados para a ACVE.

Material	Unidade	FEE (MJ/unidade)
Tábua de madeira	m ³	9469,28 ¹
Verniz para madeira	kg	2,18 ¹
Tinta acrílica	kg	2,18 ¹
Cimento	kg	2,47 ¹
Cal hidratada	kg	0,24 ¹
Areia	m ³	0,03 ¹
Brita	m ³	0,09 ¹
Aço	kg	10,27 ¹
Bloco de concreto 9x19x39	kg	1,2 ³
Bloco cerâmico 9x19x39	kg	2,81 ³
Aço (guias e montantes)	kg	10,27 ¹
Placa cimentícia e= 2,5 cm	kg	6 ²
Óleo diesel	l	35,86 ³

Fonte:

1 - Saade et al. (2014)

2 - Graf (2011)

3 - Tavares (2006)

Para o transporte dos materiais, considerou-se que todas as distâncias de distribuição (conforme apresentado na seção 3.3.2.2) foram percorridas em caminhões semi-leves, e que a viagem de retorno foi feita com o caminhão vazio. O consumo de diesel foi calculado por meio da média da taxa de consumo no Brasil, que, segundo Campos (2012), varia de 0,006 l/t.km a 0,022 l/t.km. Com isso, adotou-se consumo igual a 0,014 l/t.km.

O peso utilizado para a tara do caminhão foi de 2,2t e sua capacidade de carga de 4t. Esses valores foram obtidos por meio da média dos dados disponibilizados nos catálogos dos fornecedores nacionais desse tipo de veículo.

Em relação ao consumo energético durante a fase de operação, foi calculada a energia primária de cada caso com base nos consumos energéticos anuais estimados para a ACV, conforme método apresentado na seção 3.3.2.3. Para isso, foram consideradas as perdas técnicas⁴ que, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), para o ano de 2018, representaram 7,5% da energia elétrica gerada no Brasil. Também foi considerado o fator de transformação de energia primária em secundária para a matriz energética brasileira, que, segundo Coltro, Garcia e Queiroz (2003), é de 1,6.

3.4.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida energético (AICVE)

A fase de AICVE está dividida em três etapas: cálculo do fluxo de energia, análise de sensibilidade e análise de contribuição, conforme apresentado a seguir.

3.4.3.1. Energia primária

O método utilizado para a avaliação do impacto do ciclo de vida energético foi baseado nos trabalhos desenvolvidos por Tavares (2006) e Caldas et al. (2016). Ele foi dividido em duas etapas principais: o cálculo da energia embutida, relacionada aos materiais utilizados durante todo o ciclo de vida, incluindo seu transporte; e a energia operacional, equivalente ao consumo energético anual oriundo dos equipamentos elétricos utilizados durante a operação da edificação, estimado por meio de simulação computacional.

⁴ As perdas técnicas são intrínsecas à atividade de distribuição de energia elétrica, estando relacionadas aos processos de transporte, transformação de tensão e medição.

Para determinação da energia embutida foi considerada a Equação 10.

$$EE = \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{p}{100}\right) * FEE_n * \mu_n \quad (10)$$

Onde:

EE é a quantidade de energia embutida do sistema considerado (kWh);

P é o percentual de perdas durante a construção ou transporte dos materiais (%);

FEE_n é o fator de energia embutida de cada material que compõe o sistema (kWh/unidade funcional);

μ é a quantidade considerada para cada material conforme sua unidade funcional.

Em relação à fase de operação da edificação, a energia primária foi obtida por meio da aplicação da Equação 11.

$$EO = \{EA * (1 + PT)\} * FC \quad (11)$$

Onde:

EO é a quantidade de energia primária consumida durante a fase de operação (kWh);

EA é o consumo de energia anual estimado (kWh);

PT é a taxa de perda técnica da energia elétrica no Brasil (7,5%);

FC é o fator de conversão de energia primária em secundária (1,6).

3.4.3.2. Análise de sensibilidade

Assim como para a ACV, foi feita uma análise de sensibilidade considerando as mesmas variáveis definidas anteriormente. No entanto, como os métodos ReCiPe e *Impact* 2002+ são aplicados para a consideração de diversos impactos ambientais, para a ACVE foi considerado

o uso ou não das emissões de gases de efeito estufa (CO_{2eq}) ao invés da variação do método de AICV, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Variáveis e valores definidos para a análise de sensibilidade da ACVE.

Variável	Valores
Vida útil (anos)*	30, 40 e 50
Alteração no comportamento do usuário	Ventilação natural e HVAC com variação do termostato
Categorias de impacto	Energia, Energia e emissão de CO _{2eq}
Zona bioclimática	ZB1, ZB3, ZB4 e ZB8
*Fonte: Souza et al. (2016)	

Para obtenção das emissões de gases do efeito estufa foi considerado o fator de emissão de CO₂ equivalente (FECO_{2eq}) para cada material, conforme apresentado na Tabela 11. A quantidade de CO_{2eq} embutida foi obtida por meio da aplicação da Equação 12.

Tabela 11 – Fatores de emissão de carbono equivalente para cada material da ACVE.

Material	Unidade	FECO _{2eq} (kgCO _{2eq} /unidade)
Tábua de madeira	m ³	73,22 ¹
Verniz para madeira	kg	1,99 ¹
Tinta acrílica	kg	1,99 ¹
Cimento	kg	0,37 ¹
Cal hidratada	kg	0,78 ¹
Areia	m ³	0,02 ¹
Brita	m ³	0,02 ¹
Aço	kg	1,95 ¹
Bloco de concreto 9x19x39	kg	0,22 ²
Bloco cerâmico 9x19x39	kg	0,24 ¹
Aço (guias e montantes)	kg	1,71 ¹
Placa cimentícia e= 2,5 cm	kg	0,36 ³
Óleo diesel	l	2,63 ³
Fonte:		
1 - Saade et al. (2014)		
2 - Souza et al. (2016)		
3 - Caldas, Lira, Melo e Sposto (2017)		

$$CO_2eqE = \sum_{i=1}^n FE_{CO_2eq_n} * \mu_n \quad (12)$$

Onde:

CO_2eqE é a quantidade de emissão de gases do efeito estufa embutida do sistema considerado;

$FE_{CO_2eq_n}$ é o fator de emissão de carbono equivalente de cada material ($kgCO_2eq$ /unidade funcional);

μ é a quantidade considerada para cada material conforme sua unidade funcional.

Para a fase de operação da edificação considerou-se o fator de emissão de CO_2eq para cada MWh gerado, conforme a composição da matriz energética brasileira. Segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (EPE, 2021), para cada MWh consumido são gerados 78,8 $kgCO_2eq$.

3.4.3.3. Análise de contribuição

A análise de contribuição foi desenvolvida de forma a identificar os sistemas e materiais que apresentaram a maior contribuição para a ACVE. Foram considerados os sistemas de parede, cobertura, o consumo energético e o transporte separadamente. Além disso, foram analisados os materiais dos sistemas construtivos individualmente. A análise foi elaborada considerando o percentual de contribuição de cada sistema ou material, apresentando o resultado graficamente.

3.4.4. Interpretação do ciclo de vida energético

Para interpretação do ciclo de vida, os consumos de energia primária obtidos para os casos analisados foram comparados entre si diretamente, sem o uso de normalização, ponderação ou agrupamento dos resultados. Com isso foi possível identificar o conjunto de menor demanda energética no ciclo de vida.

Assim como para a ACV, para a ACVE algumas análises para validação do método devem ser desenvolvidas. Para identificação das questões significativas, foi considerado o consumo de energia primária entre as diferentes fases do ciclo de vida. Para a fase de operação da edificação, a energia embutida, resultante da reposição e manutenção dos sistemas da edificação, foi analisada separadamente da energia estimada para a operação de equipamentos elétricos. Com a validação do método utilizado, as conclusões, limitações e recomendações foram apresentadas.

3.5. Comparação da ACV e ACVE

Para comparação da ACV e da ACVE como técnicas de tomadas de decisão, a ACV foi considerada em conjunto com as categorias de impacto de consumo de energia primária e de emissão de gases do efeito estufa. A comparação com a ACVCO_{2eq} (avaliação do ciclo de vida de emissões de CO_{2eq}) foi incluída devido aos resultados obtidos na análise de sensibilidade da ACVE.

Para comparação das três técnicas foram consideradas as análises de categoria de impacto, contribuição e identificação das questões significativas. Inicialmente, foram comparadas as categorias de impacto. Com isso, foi possível avaliar quais delas apresentam comportamento similar ao consumo de energia primária e à emissão de gases de efeito estufa. Foram consideradas as posições relativas de cada caso, seguindo o mesmo método aplicado para a análise de sensibilidade.

Em seguida, o percentual de contribuição dos sistemas de cobertura e parede e do transporte foi comparado entre si para verificar sua influência em cada técnica. Por fim, foram comparadas as questões significativas, considerando cada fase do ciclo de vida.

4. Resultados

4.1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida apresentada a seguir foi desenvolvida conforme o objetivo e escopo apresentados na seção 3.3.1, tendo como principal objetivo a comparação dos perfis de impactos obtidos com a variação dos sistemas construtivos de uma habitação de interesse social.

4.1.1. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

Para a análise do inventário do ciclo de vida, são apresentados inicialmente a descrição de equivalência dos sistemas e, em seguida, os quantitativos dos materiais, serviços e do consumo energético de operação.

4.1.1.1. Equivalência dos sistemas

As paredes estruturais apresentam duas funções principais: fazer a sustentação das cargas atuantes na edificação e a vedação vertical entre os cômodos internos e com o exterior da edificação. Os sistemas de cobertura, para os casos analisados, desempenham a função de vedação horizontal do interior com o exterior da edificação.

A ABNT (2013b) apresenta os requisitos mínimos para o desempenho dos sistemas de vedações verticais internas e externas. Para verificação da equivalência, considerou-se que todos os sistemas atendem às exigências mínimas de segurança. Em relação aos desempenhos de funcionalidade, acessibilidade e conforto tátil e antropodinâmico, todos os sistemas foram considerados equivalentes por apresentarem as mesmas possibilidades de função (vedação, estrutural e suporte de peças suspensas) e de acabamento.

A equivalência dos requisitos de sustentabilidade foi considerada como não obrigatória, visto que essas diferenças serão consideradas na avaliação do ciclo de vida, influenciando diretamente no perfil de impactos ambientais de cada um. Da mesma forma, os requisitos de desempenho térmico também foram definidos como não obrigatórios, uma vez que será utilizado sistema de climatização artificial e as diferenças serão refletidas na estimativa do consumo energético anual.

Para os sistemas de coberturas, a ABNT (2013c) apresenta os requisitos mínimos de desempenho. Dentre as principais funções desses sistemas, pode-se citar a proteção do interior da edificação e dos outros sistemas que a compõem em relação às intempéries, evitando a degradação dos materiais e promovendo a manutenção da habitabilidade dos ambientes, evitando a proliferação de micro-organismos patogênicos.

Como a única variável considerada para os sistemas de coberturas foi o forro, a principal variação considerada está relacionada ao desempenho térmico desses sistemas. Assim como estabelecido para as paredes, o desempenho térmico não foi considerado como requisito de equivalência, visto que seu desempenho será refletido no consumo energético anual e, conseqüentemente, no resultado do perfil de impacto ambiental de cada caso analisado.

4.1.1.2. Materiais e serviços

A seguir são descritos os materiais considerados em cada sistema construtivo e apresentados os quantitativos que envolvem a construção, manutenção, reparo e disposição final de cada um. O Apêndice A apresenta o detalhamento para cada fase da ACV.

Para o forro de madeira foram considerados a tábua de madeira com 1 cm de espessura e o verniz de madeira. A Tabela 12 apresenta o quantitativo final considerado para esse sistema.

Tabela 12 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de forro de madeira.

Forro de madeira			
Material	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Tábua de madeira	0,73	m ³	123,06
Verniz para madeira	26,74	1	6,28

Para a estrutura da laje maciça com espessura de 10cm, foram considerados o cimento, a areia, a brita e as armaduras. As fôrmas utilizadas foram desconsideradas devido à possibilidade de serem reutilizadas em outros sistemas da edificação e até mesmo em outras construções. Para o acabamento da parte inferior da laje foram considerados os materiais para o chapisco, reboco e a pintura, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de laje maciça.

Laje maciça			
Descrição	Material	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto, reboco e chapisco	Cimento	760,94	224,41
	Cal hidratada	802,82	221,89
	Areia	5164,26	1493,12
	Brita	3142,11	968,30
Aço	Aço	277,25	85,44
Pintura	Tinta	17,38	4,71

Para a parede de bloco de concreto, foram considerados o bloco construtivo com a argamassa de assentamento e o chapisco e reboco para o revestimento. Como todos os sistemas construtivos de paredes utilizados na ACV recebem o mesmo sistema de pintura, ele não foi considerado. A Tabela 14 apresenta o resumo do quantitativo de materiais levantado para a parede de bloco de concreto.

Tabela 14 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de parede de bloco de concreto.

Parede de bloco de concreto				
Descrição	Material	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco de concreto 9x19x39	1380,69	Bloco	3846,45
Argamassa de assentamento, reboco e chapisco	Cimento	1873,94	Kg	520,04
	Cal hidratada	4768,47	Kg	1323,93
	Areia	18339,70	Kg	5091,05

Para a parede de bloco cerâmico, foram considerados o bloco cerâmico, a argamassa de assentamento e o revestimento, com a mesma composição da parede de bloco de concreto. A Tabela 15 apresenta o total dos materiais para o sistema de parede de bloco cerâmico considerados para a ACV.

Tabela 15 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de parede de bloco cerâmico.

Parede de bloco cerâmico				
Descrição	Material	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco cerâmico 9x19x39	1407,50	Bloco	2041,59
Argamassa de assentamento, reboco e chapisco	Cimento	1873,94	Kg	520,04
	Cal hidratada	4768,47	Kg	1323,93
	Areia	18339,70	Kg	5091,05

Para a parede de *light steel framing* foi considerada somente a placa cimentícia como fechamento, e a estrutura composta pelos guias e montantes de aço. Devido ao elevado tempo de vida útil de projeto dos seus componentes, para as fases de reposição e manutenção somente a placa cimentícia apresentou demanda de novos materiais. A Tabela 16 apresenta o total de materiais considerados para a parede de *light steel framing* para toda a ACV.

Tabela 16 – Quantitativo de materiais para o sistema construtivo de parede de *light steel framing*.

Parede de <i>light steel framing</i>			
Descrição	Material	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Estrutura	Guias e montantes	556,14	170,43
Revestimento	Placa cimentícia e= 2,5 cm	676,66	116,17

Para o sistema construtivo de parede de concreto moldado *in loco*, foram considerados os materiais para o concreto e o aço estrutural. Como seu acabamento final é semelhante ao obtido com a parede de bloco de concreto e de bloco cerâmico, não foi considerado o uso de revestimento. Para as fases de reposição e manutenção não foram considerados materiais adicionais, devido ao alto valor de vida útil de projeto considerado para os sistemas estruturais, conforme definido pela ABNT (2013a). A Tabela 17 apresenta o quantitativo de materiais definido para a parede de concreto moldado *in loco*.

Tabela 17 – Quantitativo de materiais total para o sistema construtivo de parede de concreto moldado *in loco*.

Parede de concreto moldado <i>in loco</i>			
Descrição	Material	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto	Cimento	4222,48	1295,76
	Brita	13252,08	4066,69
	Areia	14551,30	4465,38
Estrutura	Aço	23,21	7,11

4.1.1.3. Consumo energético (operação)

Para obtenção do consumo energético ao longo da fase de operação, a demanda anual foi estimada por meio de simulação computacional,

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para cada caso, considerando a temperatura limite para resfriamento de 24°C. Os resultados dos limites de resfriamento para 25°C e 26°C estão apresentados no Apêndice A. O consumo energético durante toda a fase de operação foi calculado considerando que o consumo anual permaneceu o mesmo durante os 40 anos de vida útil da edificação.

Tabela 18 – Consumo energético mensal da edificação, do sistema de HVAC e durante a fase de operação para todos os conjuntos considerados para a ACV.

(CONTINUA)

Conjunto	Média mensal para toda a edificação (kWh)	Média mensal somente para o HVAC (kWh)	Consumo energético fase de operação (kWh)
ZB1 - Curitiba			
Bloco cerâmico/Forro	135	22	64.940
Bloco cerâmico/Laje	126	14	60.666
Bloco concreto/Forro	133	20	63.609
Bloco concreto/Laje	126	13	60.251
Parede de concreto/Forro	131	18	62.880
Parede de concreto/Laje	126	13	60.398
<i>Light steel framing</i> /Forro	155	42	74.509
<i>Light steel framing</i> /Laje	138	25	66.107

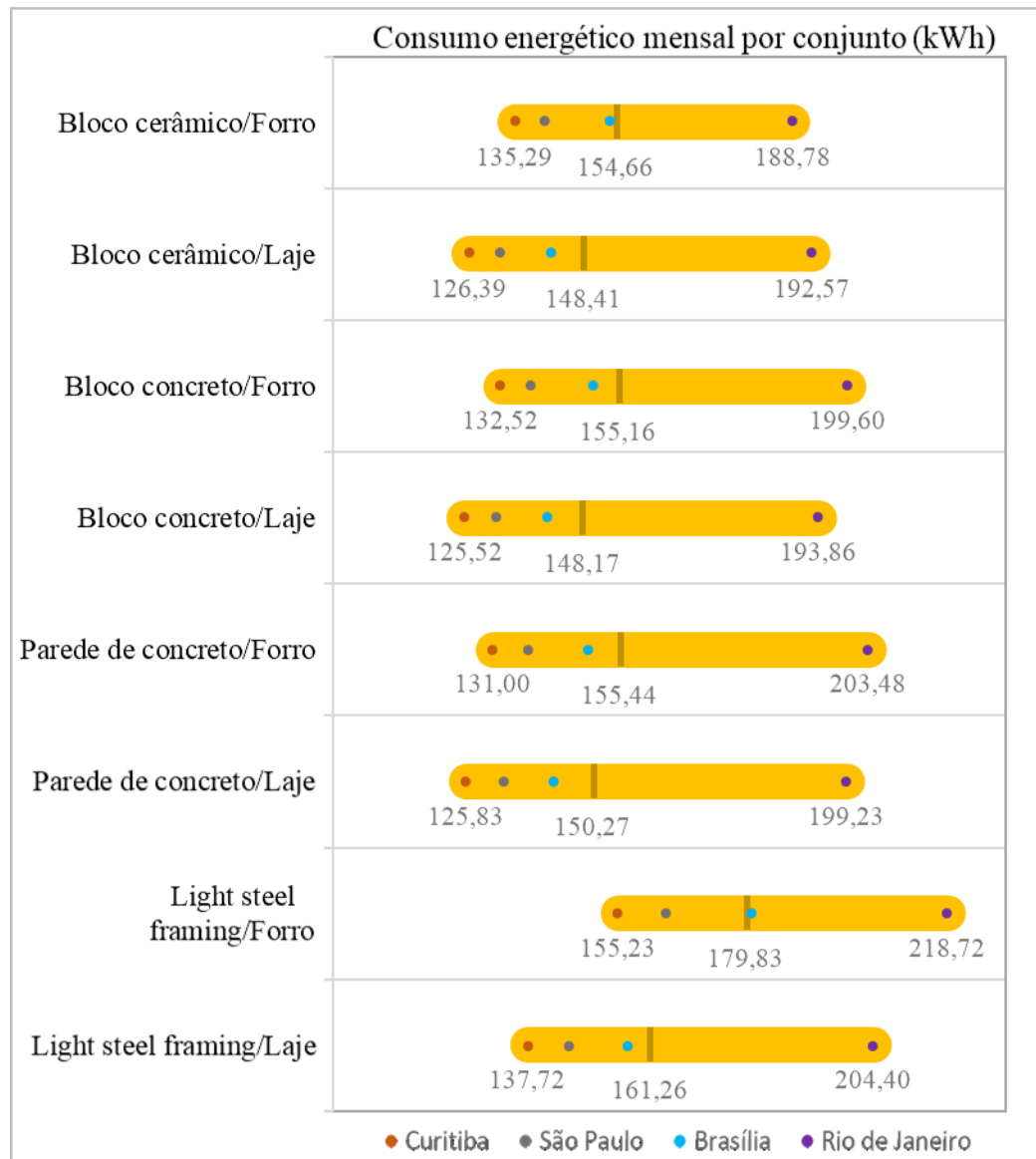
Tabela 18 – Consumo energético mensal da edificação, do sistema de HVAC e durante a fase de operação para todos os conjuntos considerados para a ACV.

(CONCLUSÃO)

Conjunto	Média mensal para toda a edificação (kWh)	Média mensal somente para o HVAC (kWh)	Consumo energético fase de operação (kWh)
ZB3 - São Paulo			
Bloco cerâmico/Forro	141	28	67.684
Bloco cerâmico/Laje	132	20	63.561
Bloco concreto/Forro	138	25	66.350
Bloco concreto/Laje	132	19	63.248
Parede de concreto/Forro	138	25	66.181
Parede de concreto/Laje	133	20	63.949
Light steel framing/Forro	164	52	78.932
Light steel framing/Laje	146	33	70.012
ZB4 - Brasília			
Bloco cerâmico/Forro	154	41	73.711
Bloco cerâmico/Laje	142	29	68.297
Bloco concreto/Forro	150	37	72.145
Bloco concreto/Laje	142	29	67.946
Parede de concreto/Forro	149	37	71.709
Parede de concreto/Laje	143	30	68.542
<i>Light steel framing/Forro</i>	181	68	86.840
<i>Light steel framing/Laje</i>	157	44	75.381
ZB8 - Rio de Janeiro			
Bloco cerâmico/Forro	189	76	90.614
Bloco cerâmico/Laje	193	80	92.432
Bloco concreto/Forro	200	87	95.808
Bloco concreto/Laje	194	81	93.051
Parede de concreto/Forro	203	91	97.669
Parede de concreto/Laje	199	86	95.632
<i>Light steel framing/Forro</i>	219	106	104.984
<i>Light steel framing/Laje</i>	204	92	98.111

Dentre as zonas bioclimáticas consideradas, a maior média de consumo energético mensal foi para a cidade do Rio de Janeiro (zona bioclimática 8), com uma média mensal de 200 kWh/mês. A cidade com a menor média foi Curitiba (zona bioclimática 1), com 134 kWh/mês. Esse resultado é coerente com as características climáticas das duas zonas, sendo, de modo geral, a zona bioclimática 1 a mais fria e a zona bioclimática 8 a mais quente. A Figura 16 apresenta a média, o valor máximo e o valor mínimo do consumo energético mensal considerando cada componente construtivo.

Figura 16 – Valor mínimo, médio e máximo de consumo energético mensal por componente construtivo.



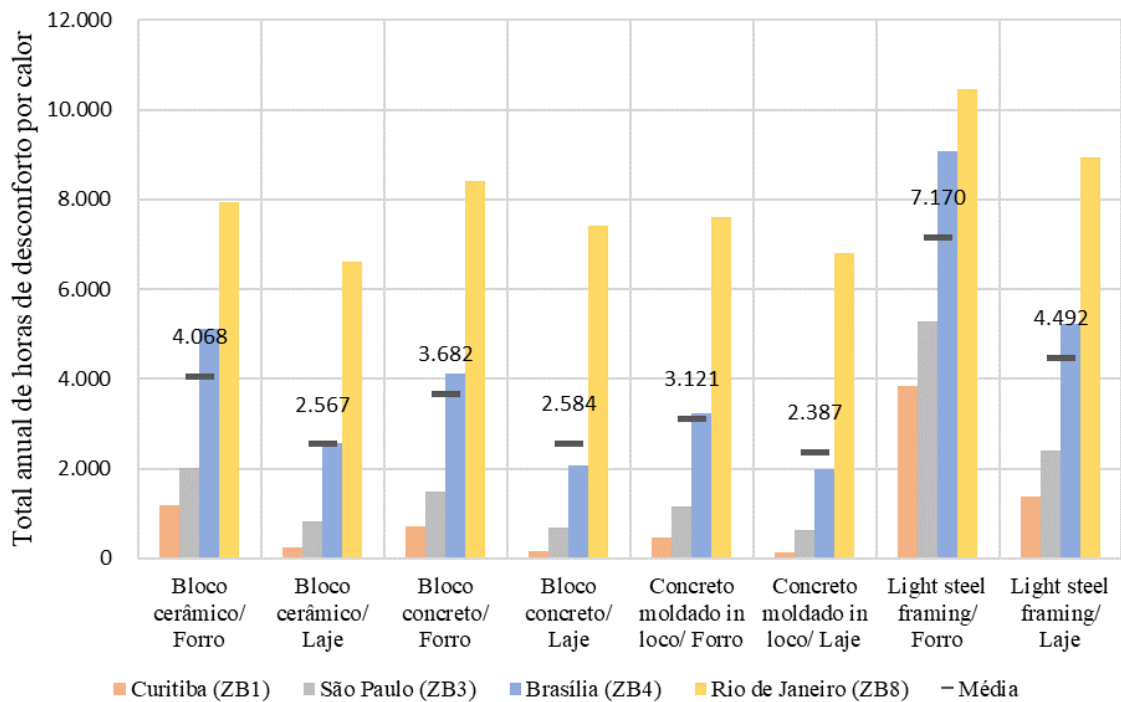
Considerando os diferentes componentes construtivos, o conjunto com paredes de *light steel framing* e forro de madeira apresentou o maior valor de consumo energético (219 kWh/mês) e a maior média (180 kWh/mês). O conjunto de parede de bloco de concreto com laje maciça foi o que apresentou o menor valor (125,52 kWh/mês) e também a menor média (148,17 kWh/mês). Entretanto, considerando o uso da laje maciça, todas as paredes, com exceção da parede de *light steel framing*, apresentaram valores semelhantes.

O uso da laje maciça em comparação ao forro de madeira apresentou redução do consumo energético mensal médio de, em média, uma economia de 5,80% por mês. O único caso em que a laje maciça apresentou aumento do consumo de energia foi considerando o uso de parede de bloco cerâmico para a cidade do Rio de Janeiro, com um aumento mensal médio de 2,01%.

Em relação à amplitude de consumo, o conjunto de bloco cerâmico com forro foi o que apresentou menor variação entre o maior e o menor consumo, com variação de 53,49 kWh. O caso que apresentou maior variação foi o de parede de concreto com o uso de laje, com um total de 73,40 kWh.

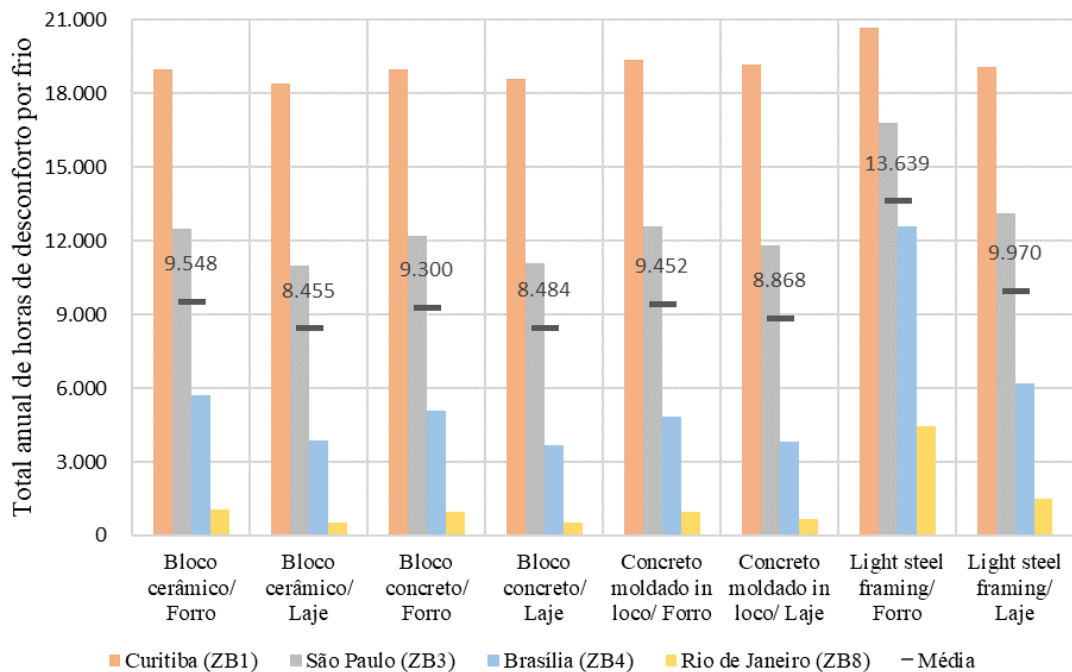
Além de levantar o consumo energético anual, foi analisado o desempenho térmico dos diferentes casos simulados por meio da consideração das horas de desconforto, aplicando o método definido pela ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013, e do cálculo do indicador de graus-hora. Os resultados obtidos para o total anual de horas de desconforto por calor (Figura 17) e por frio (Figura 18) são apresentados a seguir.

Figura 17 – Valor anual e média das horas de desconforto por calor por componente construtivo.



Considerando o desconforto por calor, a cidade do Rio de Janeiro apresentou os maiores valores. Em relação aos componentes construtivos, o uso da laje apresentou redução do total de horas de desconforto por calor, significando, em média, uma redução de 46,28%. O conjunto de componentes construtivos que apresentou a menor média foi o de paredes de bloco cerâmico com o uso de laje. No entanto, o conjunto de paredes de bloco de concreto e laje apresentou valores menores para a maioria das zonas bioclimáticas. Os resultados apresentados são coerentes com o consumo energético anual obtido por meio da simulação computacional.

Figura 18 – Valor anual e média das horas de desconforto por frio por componente construtivo.



A análise do total anual de horas de desconforto por frio resultou em valores mais similares entre os conjuntos do que a análise para desconforto por calor. Da mesma forma que foi observado anteriormente, o conjunto com paredes de bloco cerâmico e laje maciça apresentou a menor média enquanto que o conjunto de paredes de *light steel framing* com forro de madeira apresentou a maior média. Essa característica reforça a similaridade no desempenho térmico desses conjuntos tanto para o calor como para o frio.

A análise desenvolvida para o indicador de graus-hora é apresentada a seguir. Conforme especificado na seção 3.3.2.3, foram consideradas como temperatura base para resfriamento 26°C (Figura 19), 25°C (Figura 20) e 24°C (Figura 21).

Figura 19 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 26°C.

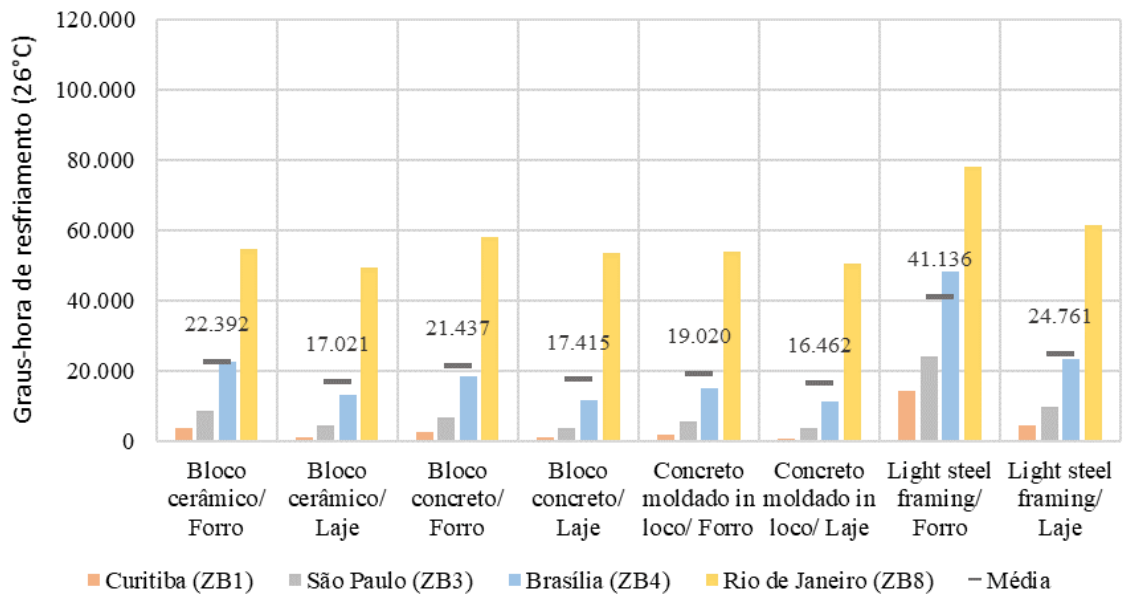


Figura 20 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 25°C.

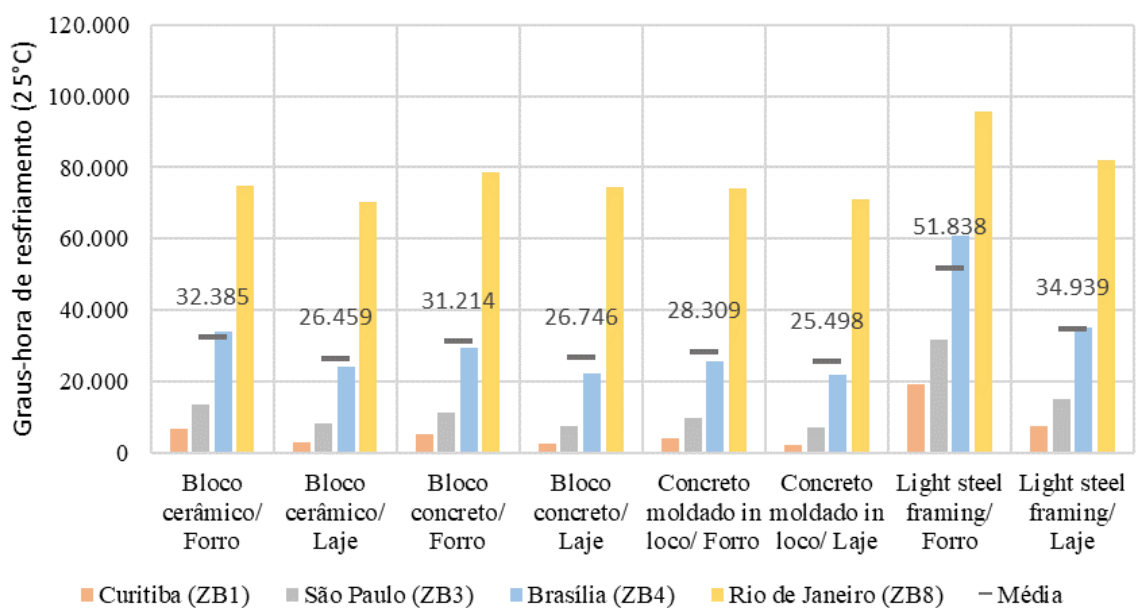
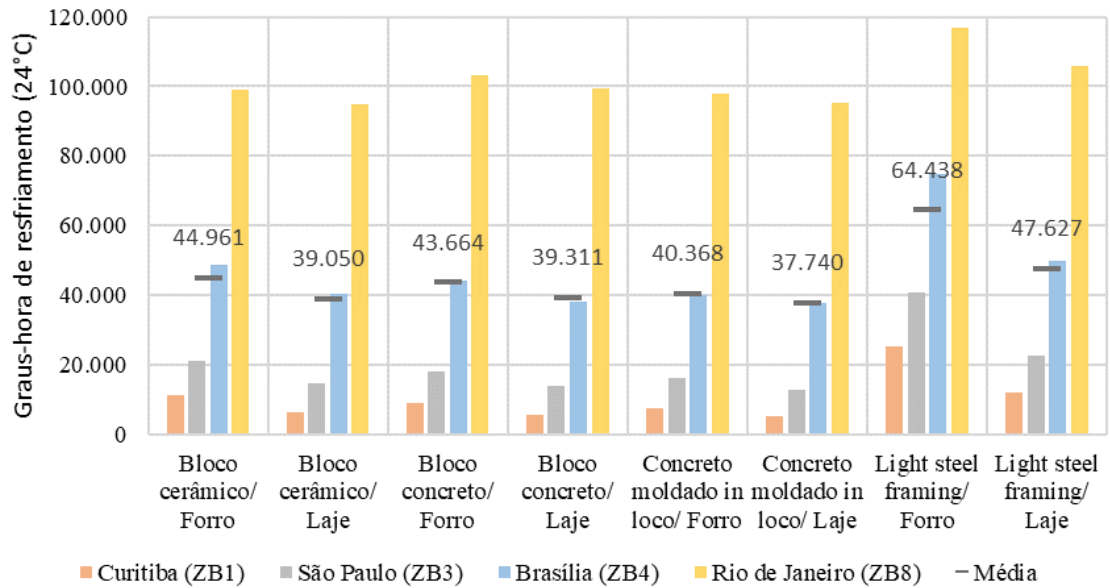


Figura 21 – Graus-hora para resfriamento com temperatura base de 24°C.



Para as três temperaturas analisadas, o conjunto com paredes de *light steel framing* com forro de madeira apresentou as maiores médias e os maiores valores entre as zonas bioclimáticas consideradas. Além disso, o uso da laje em substituição ao forro de madeira apresentou redução média para o indicador de graus-hora de 24,0%, 18,8% e 13,9% para as temperaturas base de 26°C, 25°C e 24°C, respectivamente.

Os resultados das análises do total anual de horas de desconforto e do indicador de graus-hora apresentaram resultados coerentes com os valores estimados para o consumo energético anual. De modo geral, o conjunto com paredes de *light steel framing* e a zona bioclimática oito (Rio de Janeiro) apresentaram os maiores valores para todas as análises. Além disso, o uso da laje no lugar do forro de madeira apresentou redução significativa da temperatura operativa dos ambientes de longa permanência, reduzindo o consumo de energia para resfriamento.

4.1.2. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

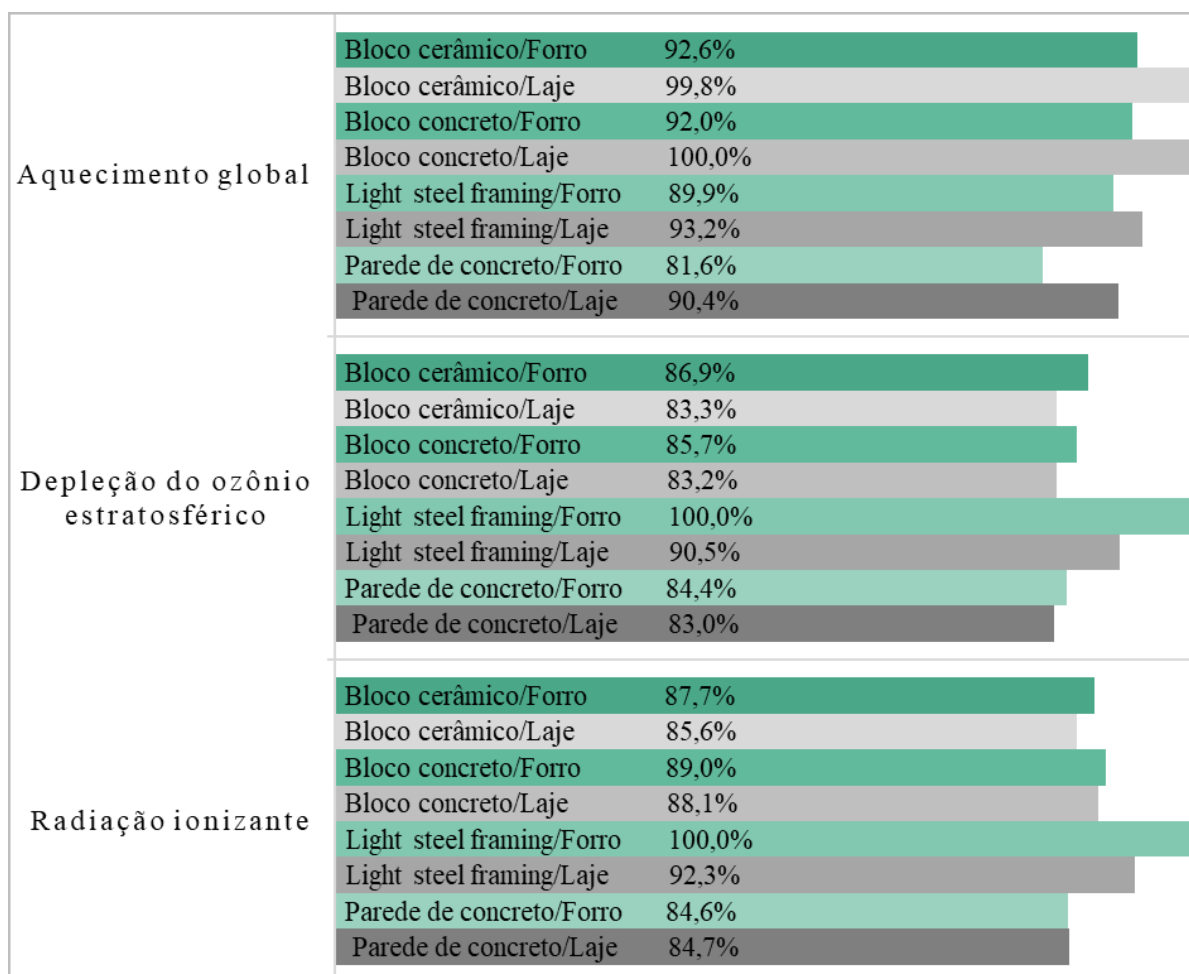
Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida foi estabelecido o perfil de impacto de cada caso considerado para a ACV. Após a apresentação dos resultados por categoria de impacto, os procedimentos de validação do método exigidos para análises comparativas são apresentados.

4.1.2.1. Categorias de impacto

Os materiais, serviços e o consumo energético levantados na fase de AICV foram transformados nas dezoito categorias de impacto estabelecidas pelo método ReCiPe.

Os resultados normalizados por categoria de impacto para o ciclo de vida da unidade funcional definida na seção 3.3.1 são analisados a seguir. A Figura 22 apresenta os resultados para as categorias de impacto de aquecimento global, depleção do ozônio estratosférico e radiação ionizante.

Figura 22 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de aquecimento global, depleção do ozônio estratosférico e radiação ionizante.



A parede de *light steel framing* destacou-se com os maiores valores para a depleção de ozônio estratosférico e a radiação ionizante. Em relação à mudança na cobertura, de modo geral,

o uso da laje representou redução no impacto nas duas categorias. Entretanto, para a radiação ionizante, o uso da laje maciça quando considerada em conjunto com a parede de concreto moldado *in loco* apresentou resultados semelhantes, expondo a necessidade de análise dos diferentes sistemas construtivos da edificação em conjunto.

Ao contrário do observado nas outras categorias, para o aquecimento global os casos que apresentaram o uso da laje tiveram aumento significativo do potencial de impacto, e as paredes de bloco cerâmico e bloco de concreto apresentaram os maiores valores. A parede de concreto moldada *in loco* e a de *light steel framing* apresentaram os menores valores quando utilizadas em conjunto com o forro de madeira.

Os perfis de impacto para as outras categorias estão apresentados no Apêndice B. De modo geral, a utilização da laje maciça resultou em aumento do potencial de impacto. Somente para as categorias de ocupação/transformação da terra e de uso de água houve redução. Esse comportamento foi oposto ao obtido na estimativa do consumo energético anual, que apresentou redução significativa com o uso da laje maciça.

As paredes de bloco de concreto e *light steel framing* foram as que apresentaram mais vezes os maiores potenciais de impacto. A parede de concreto moldado *in loco*, por sua vez, foi a que obteve maior frequência com os menores potenciais de impacto.

4.1.2.2. Análise de sensibilidade

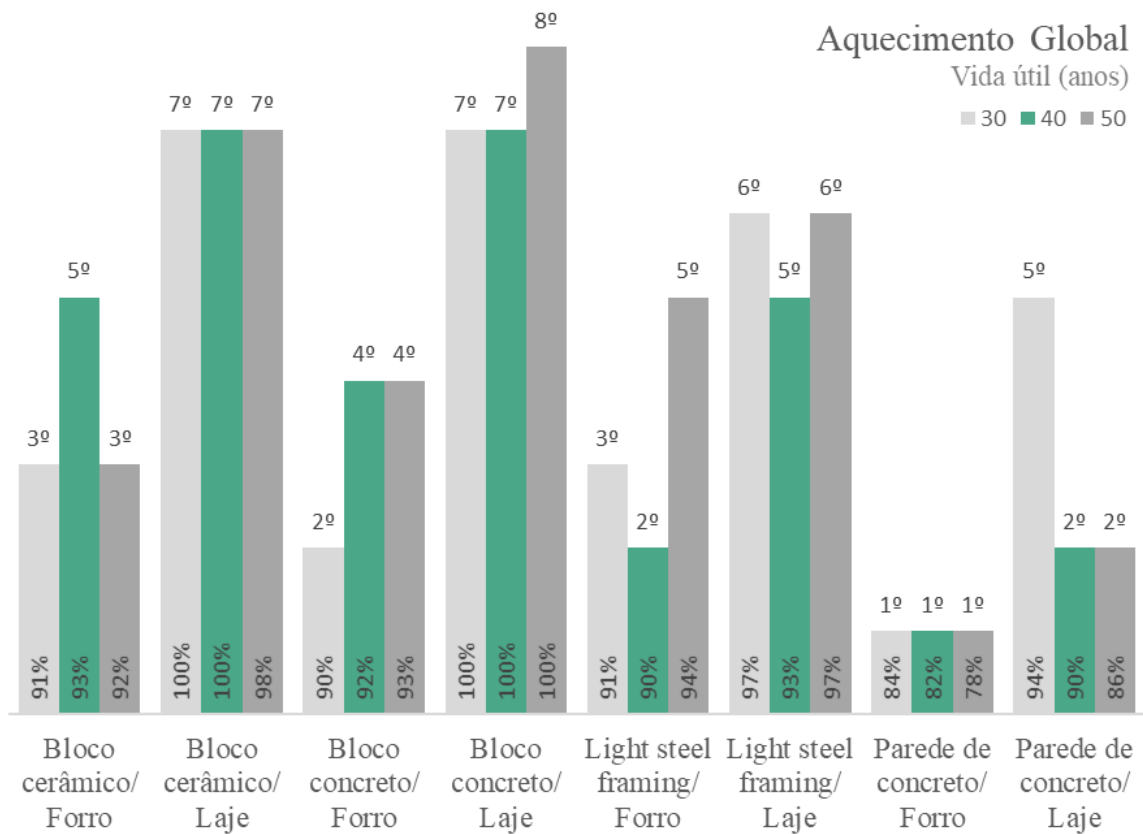
A análise de sensibilidade considerou quatro variáveis: vida útil da edificação, alteração no comportamento do usuário, uso de diferentes métodos de AICV e variação da zona bioclimática. Os resultados estão apresentados de forma a favorecer a comparação da variação da posição relativa de cada caso nos diferentes cenários criados, considerando o valor de impacto inteiro e normalizado.

Para isso, o gráfico de colunas agrupa, para cada conjunto, os resultados dos diferentes cenários considerados. A altura das colunas representa a posição crescente de impacto de cada conjunto em relação aos outros para um mesmo cenário. Na base da coluna encontra-se o valor do impacto normalizado, para identificar o distanciamento do resultado entre os conjuntos.

Para a ACV desenvolvida, a variação na vida útil da edificação apresenta alteração na fase de reposição e manutenção e no consumo total de energia da fase de operação. A Figura 23

apresenta a variação no perfil de impacto da categoria de aquecimento global quando considerados diferentes tempos de vida útil. As demais categorias estão apresentadas no Apêndice C.

Figura 23 - Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação da vida útil da edificação.



Para a categoria de impacto de aquecimento global, as paredes de bloco de concreto e bloco cerâmico quando utilizadas em conjunto com a laje maciça obtiveram os maiores valores, ocupando a sétima posição de maior impacto para os cenários de 30 e 40 anos de vida útil. Apenas no cenário de 50 anos de vida útil a parede de bloco de concreto superou a posição da parede de bloco cerâmico, ficando em oitavo lugar. Essa pequena variação (2%) ocorreu devido ao aumento do consumo energético durante a fase de operação.

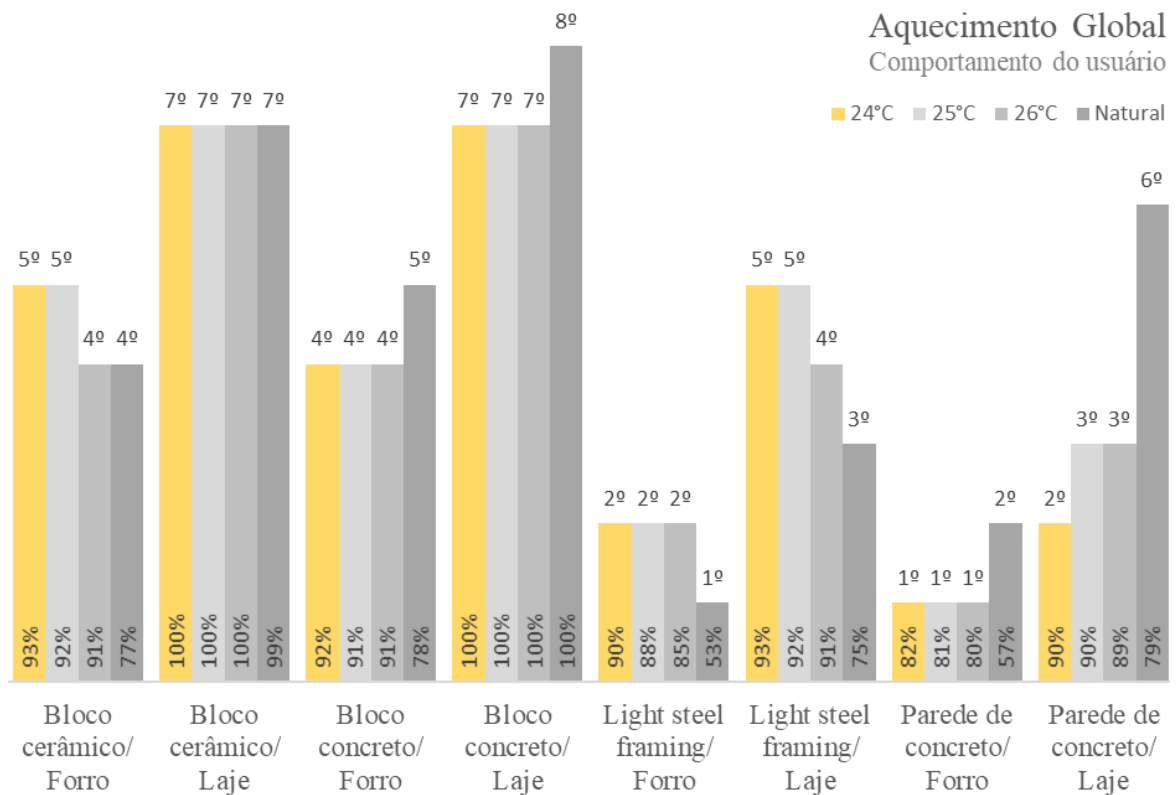
A parede de concreto moldado *in loco* apresentou os menores valores, com exceção do cenário de 30 anos de vida útil quando utilizada com a laje maciça. A influência desse resultado tem origem principal no ciclo de vida dos materiais utilizados para a construção da laje maciça.

De modo geral, a variação da vida útil da edificação representou redução da posição relativa da parede de concreto moldado *in loco* com o aumento da vida útil. Esse resultado está relacionado à baixa demanda de manutenção ou reposição desse tipo de parede. Além disso, a necessidade de consideração dos sistemas construtivos em conjunto apresentou-se necessária. O mesmo resultado foi observado por Souza et al. (2016), ou seja, não houve variação significativa alterando a vida útil em 30, 40 e 50 anos.

Por meio da análise de sensibilidade identificou-se que a variação do tempo de vida útil pode apresentar cenários diferentes, no entanto, a utilização do tempo de 40 anos mostrou-se satisfatória para a ACV. Sua adoção representa uma medida de segurança, visto que um tempo menor não representa a realidade da durabilidade das edificações e um tempo maior demanda um levantamento extremamente preciso dos materiais utilizados no período de manutenção e reposição e de uma previsão de variação do consumo de energia anual estimado.

A variação do comportamento do usuário para a ACV desenvolvida resulta em alterações do consumo energético anual, não havendo influência da demanda de materiais ou serviços. Foram consideradas alterações na temperatura limite de início do resfriamento e no uso exclusivo de sistema de ventilação natural. A Figura 24 apresenta o perfil de impacto obtido para a categoria de aquecimento global. Os resultados das outras categorias estão apresentados no Apêndice C.

Figura 24 - Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação do comportamento do usuário.



Os conjuntos que consideram as paredes de *light steel framing* e parede de concreto com o uso de laje maciça apresentaram alterações significativas para a categoria de impacto de aquecimento global.

Destaca-se que o caso de parede de *light steel framing* com o uso de forro de madeira foi o que apresentou o menor impacto quando considerado o uso exclusivo da ventilação natural. Entretanto, esse foi o conjunto que apresentou a maior média de consumo energético anual.

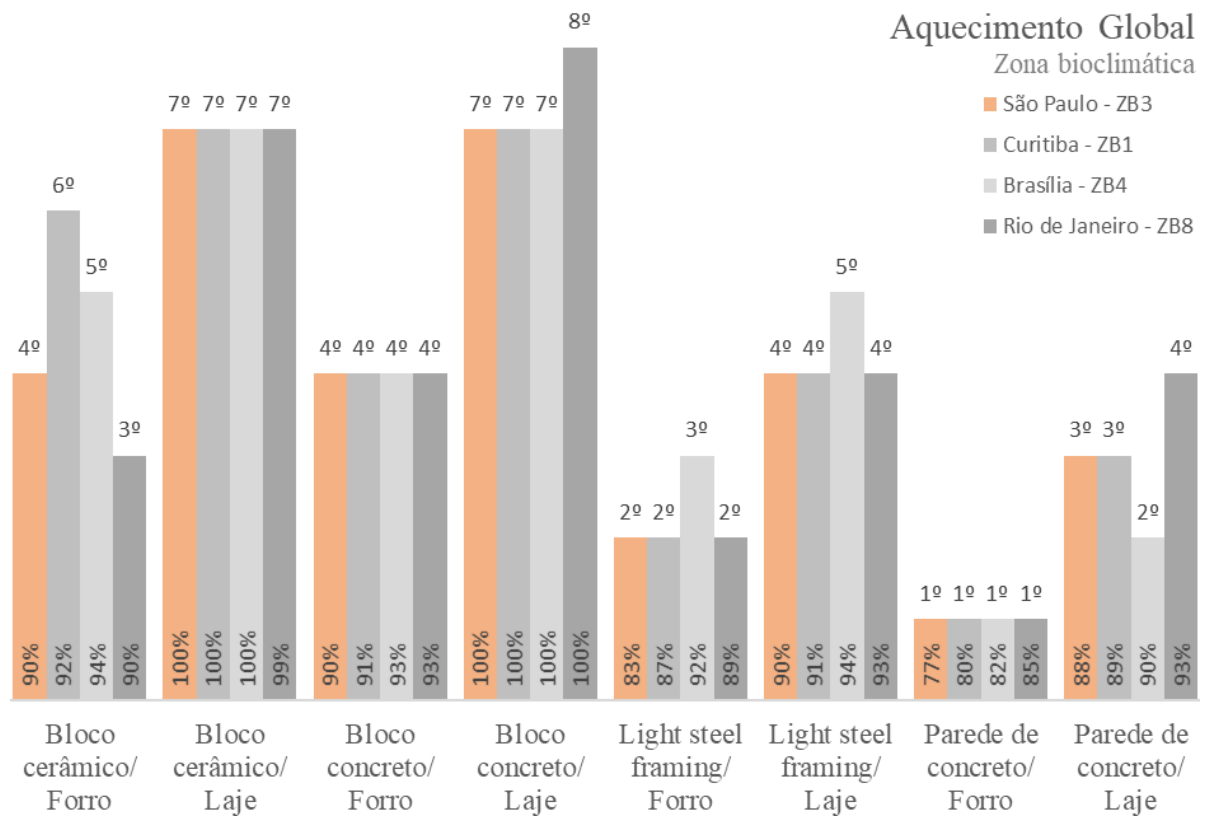
Para a maioria das categorias de impacto, a variação da temperatura limite de início do resfriamento não representou alteração expressiva da posição relativa dos casos analisados. Entretanto, ressalta-se a variação significativa do perfil de impacto quando considerada somente a ventilação natural.

Apesar disso, devido à popularização dos aparelhos de ar-condicionado, o cenário com sistema de refrigeração artificial foi estabelecido para análise. Contudo, torna-se necessário

identificar que a ACV foi desenvolvida considerando o uso de ar-condicionado desde o momento da sua construção até o fim da sua vida útil.

Assim como para a variação do comportamento do usuário, a consideração de diferentes zonas bioclimáticas apresenta alterações no consumo energético anual, conforme os valores apresentados na seção 4.1.1.3. A Figura 25 apresenta o resultado obtido para a categoria de impacto de aquecimento global. As análises para as demais categorias de impacto estão apresentadas no Apêndice C.

Figura 25 – Perfil de impacto para a categoria de aquecimento global com variação da zona bioclimática.



Para a categoria de impacto de aquecimento global, o conjunto de parede de bloco cerâmico com forro de madeira foi o que apresentou a variação da posição relativa mais expressiva. Nenhum dos quatro cenários considerados apresentou o mesmo resultado. Esse conjunto foi o que apresentou menor amplitude de consumo energético anual entre as diferentes zonas bioclimáticas.

A zona bioclimática que apresentou maior variação dentre os casos analisados foi a ZB 8 (Rio de Janeiro). Quando considerado o consumo energético, ela apresentou os maiores valores e a maior diferença entre os resultados. Enquanto a variação de consumo para as outras zonas bioclimáticas teve o valor máximo de 25,69 kWh/mês entre os diferentes conjuntos, a menor variação de consumo energético da zona bioclimática oito em relação às outras zonas foi de 35,21 kWh/mês.

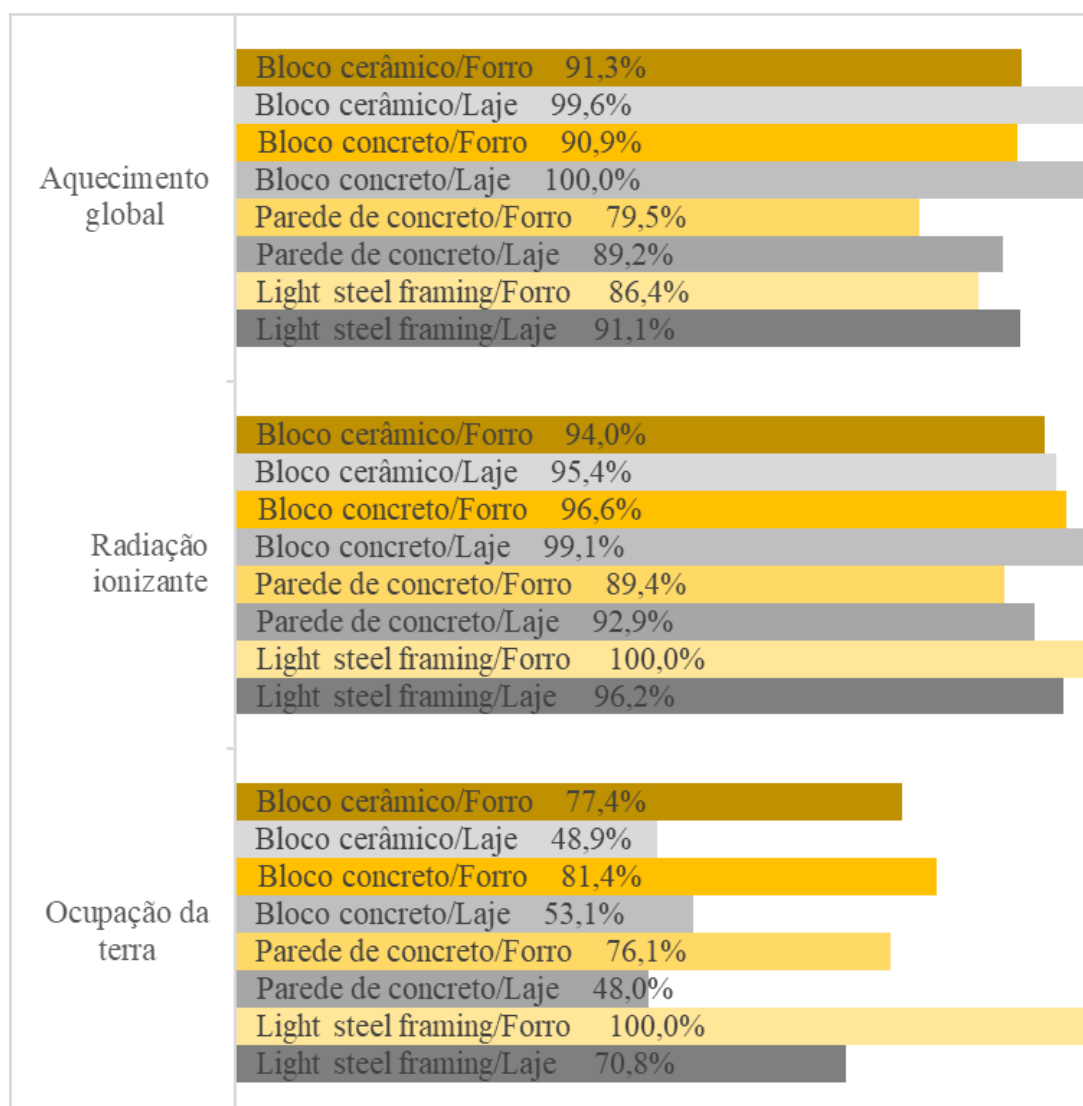
A identificação da zona bioclimática mostrou-se fundamental no desenvolvimento da ACV. Por isso, para a ACV desenvolvida, destaca-se seu resultado final voltado para habitações localizadas na zona bioclimática 3, representada pela cidade de São Paulo. Caldas, Lira e Sposto (2017) identificaram a mesma necessidade ao variar a localização da edificação. Eles utilizaram as zonas bioclimáticas 1, 3, 4, 6, 7 e 8, obtendo variações significativas para os casos analisados.

A alteração do método de AICV considerou a aplicação do *Impact 2002+* para transformação do quantitativo levantado na fase de análise de inventário em categorias de impacto. Com isso, as novas categorias de impacto foram analisadas para identificação das principais tendências de resultados. A Figura 26 apresenta o resultado para as categorias de aquecimento global, radiação ionizante e ocupação da terra. As demais categorias obtidas estão apresentadas no Apêndice C.

A parede de *light steel framing* foi a que obteve os maiores valores para a categoria de ocupação da terra. As demais paredes consideradas apresentaram resultados semelhantes, sendo a de concreto moldado *in loco* a que apresentou o menor valor. O uso da laje maciça representou redução significativa do potencial de impacto. Entretanto, para a categoria de aquecimento global, o uso da laje maciça representou aumento do valor.

Para a categoria de impacto de radiação ionizante, a parede de *light steel framing* também apresentou o maior valor quando considerada em conjunto com o forro de madeira. No entanto, seu resultado foi similar ao do conjunto de parede de bloco de concreto com o uso de laje.

Figura 26 – Resultados normalizados do método *Impact* 2002+ para as categorias de impacto de aquecimento global, radiação ionizante e ocupação da terra.



As paredes de bloco de concreto e *light steel framing* foram as que apresentaram mais vezes os maiores potenciais de impacto. A parede de concreto moldado *in loco*, no entanto, foi a que apresentou com maior frequência o menor potencial de impacto. Ela obteve o maior potencial de impacto somente na categoria de não cancerígenos quando utilizada em conjunto com a laje maciça.

Para as categorias de impacto de ocupação da terra, extração mineral, acidificação aquática, eutrofização aquática e acidificação/eutrofização terrestre o uso da laje maciça representou

redução do potencial de impacto. Para as doze categorias restantes, o uso da laje maciça representou aumento do valor.

Algumas categorias de impacto semelhantes entre os métodos *Impact 2002+* e o ReCiPe apresentaram perfis de impactos distintos. Entretanto, as conclusões gerais obtidas com a aplicação dos dois métodos foram similares. Esse resultado foi semelhante ao obtido por Bueno et al. (2016), que observaram variações entre as categorias de impacto, mas com as mesmas conclusões gerais para a ACV. Como não há interesse em avaliar especificamente uma única categoria, o uso do método ReCiPe foi mantido.

4.1.2.3. Análise de contribuição

Para desenvolvimento da análise de contribuição foram considerados separadamente os sistemas de parede e cobertura, o consumo energético durante a fase de operação e o transporte em todo o ciclo de vida, desde a distribuição dos materiais pelas fábricas até a disposição final.

As Figuras 27 e 28 apresentam a análise de contribuição para as categorias de impacto de aquecimento global e escassez de recursos minerais. As demais categorias de impacto estão apresentadas no Apêndice D.

Figura 27- Análise de contribuição para a categoria de impacto de aquecimento global.

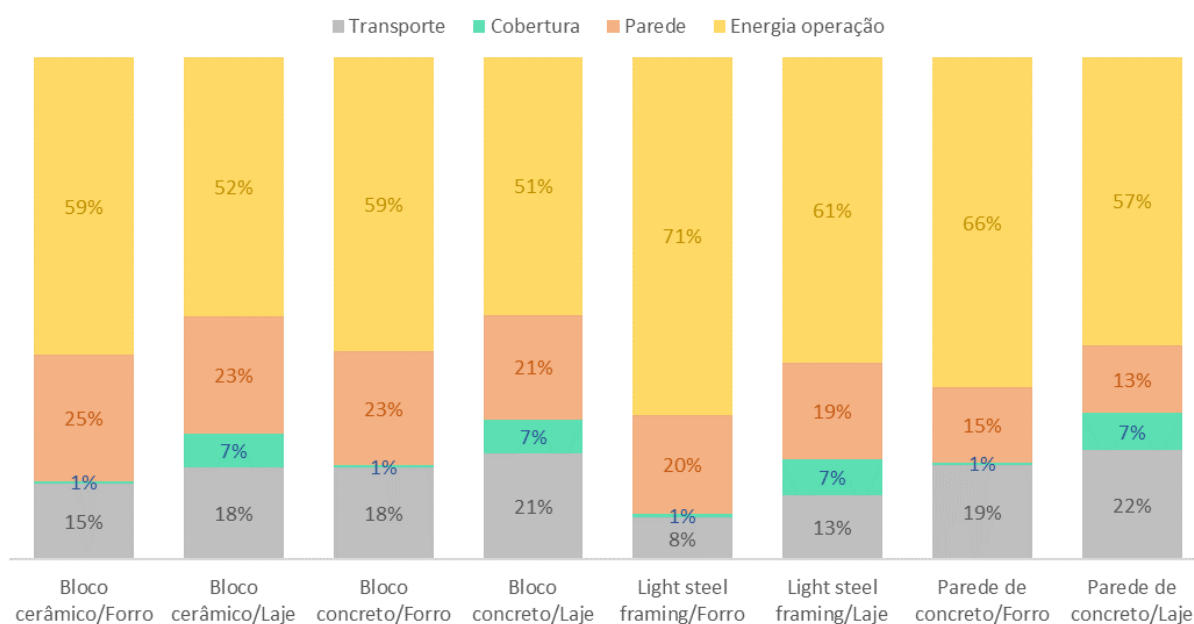
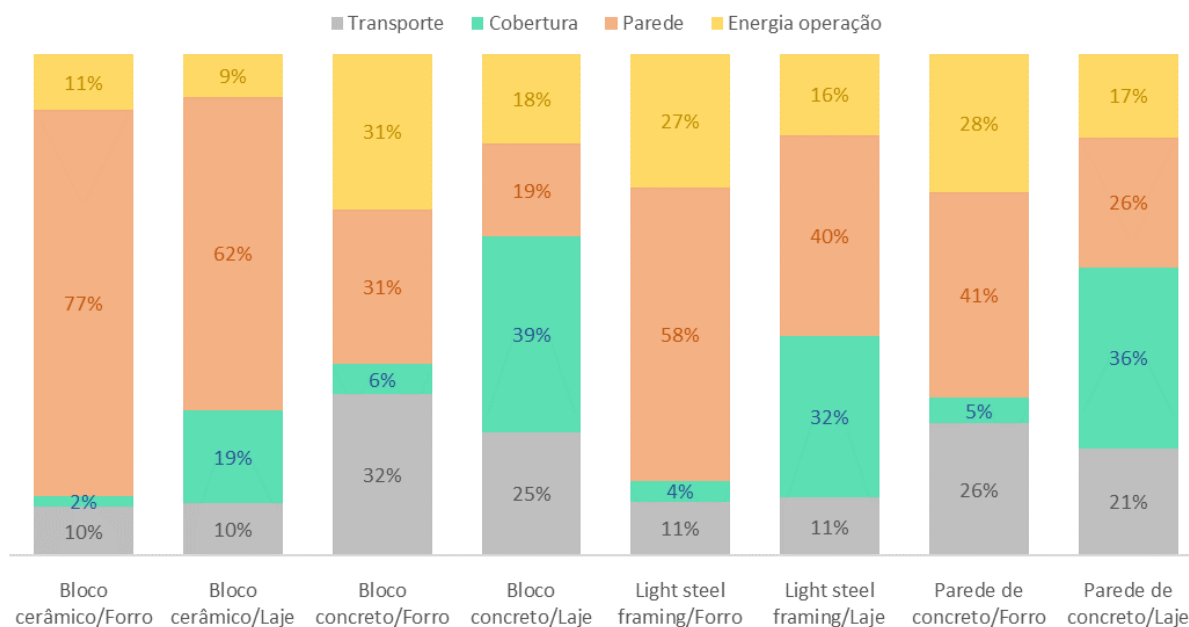


Figura 28- Análise de contribuição para a categoria de impacto de escassez de recursos minerais.



A contribuição de cada elemento considerado na análise apresentou grande variação conforme a categoria de impacto. O consumo de energia durante a fase de operação obteve maior influência para as categorias de depleção do ozônio estratosférico, radiação ionizante e uso de água, variando de 83% a 98%. As categorias que apresentaram menor contribuição foram a ecotoxicidade terrestre, escassez de recursos minerais e ocupação/transformação da terra, variando de 8% a 48%.

A laje maciça apresentou maior potencial de impacto para quase todas as categorias. Somente para a ocupação/transformação da terra o forro obteve maior contribuição, atingindo o valor de 72% quando utilizado em conjunto com a parede de concreto moldada *in loco*.

Para as paredes, o menor valor de contribuição observado foi para a categoria de escassez de recursos minerais para o conjunto de parede de bloco de cerâmico com forro de madeira, com 7% de influência no valor de impacto final. Entretanto, para a maioria das categorias o valor de contribuição das paredes não ultrapassou 20%.

O transporte ao longo de todo o ciclo de vida apresentou valor significativo para quase todas as categorias de impacto, com o maior valor observado para a categoria de ecotoxicidade

terrestre, com 65% de contribuição. As categorias de impacto de depleção do ozônio estratosférico e uso de água foram as únicas que obtiveram todos os percentuais de contribuição abaixo de 5% para o transporte.

As Figuras 29 e 30 apresentam a análise de contribuição considerando somente os materiais utilizados para os sistemas de cobertura. Para o forro de madeira, a madeira e o verniz variaram de forma significativa entre as categorias de impacto. O verniz apresentou a maior contribuição para a escassez de recursos minerais, com 91% do valor total de impacto para a cobertura. A madeira apresentou o maior valor para a ocupação/transformação da terra, representando 100% do potencial de impacto.

Para a laje maciça, o aço apresentou destaque dentre os materiais considerados; variou de 29% a 94% para as categorias de aquecimento global e toxicidade humana cancerígena, respectivamente. Em seguida, o cimento aparece em destaque, com contribuição de 31% para as categorias de aquecimento global, formação de ozônio troposférico do ecossistema e da saúde humana.

Figura 29 – Contribuição dos materiais do forro de madeira por categoria de impacto.

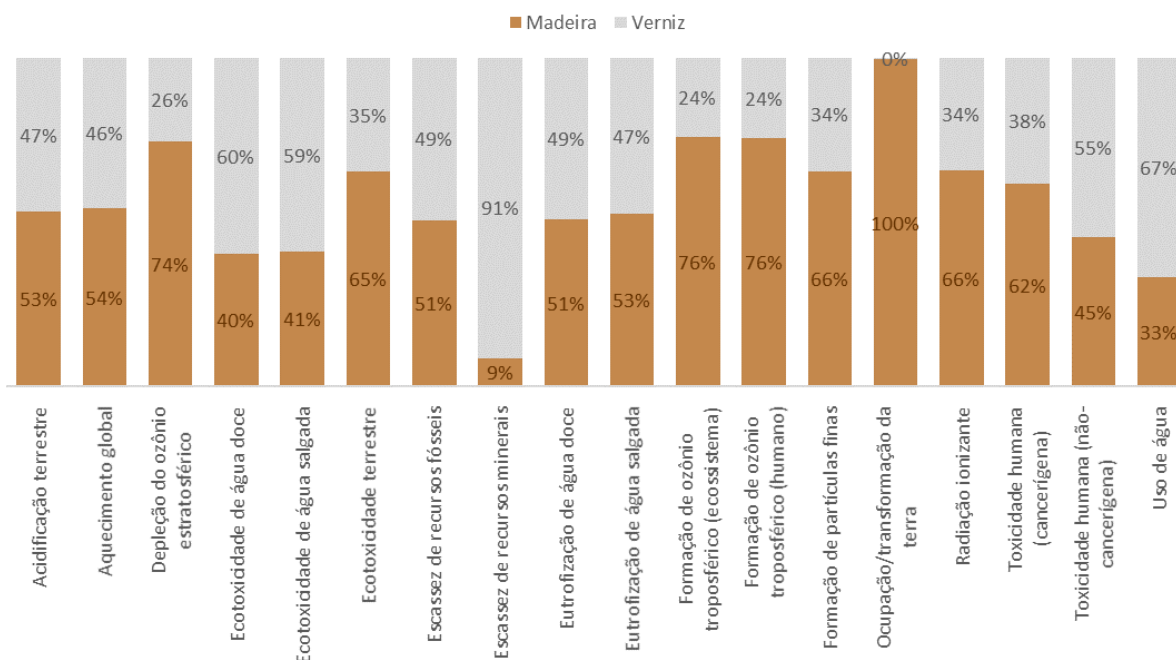
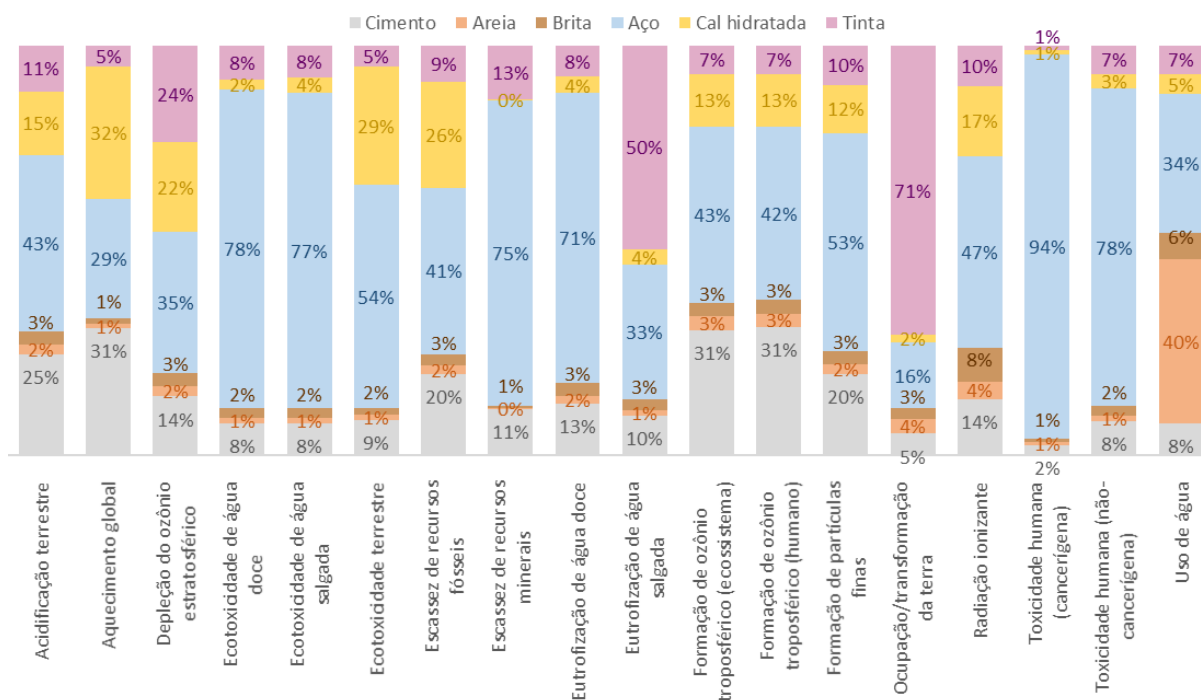


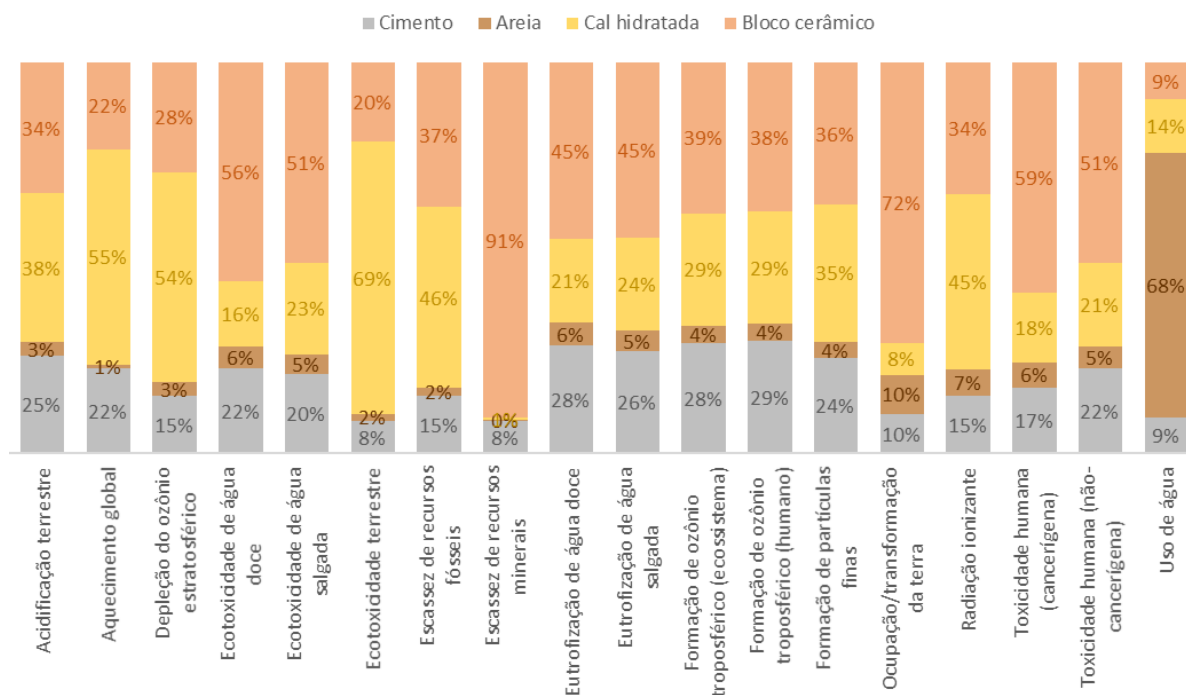
Figura 30 – Contribuição dos materiais da laje maciça por categoria de impacto.



A Figura 31 apresenta a contribuição para a parede de bloco cerâmico. O bloco cerâmico destacou-se com os principais valores de contribuição, com o maior percentual para a categoria de escassez de recursos minerais, 91%. O segundo material de maior destaque foi a cal hidratada.

Esse resultado sofre influência da fase de operação da edificação, que prevê a manutenção e reposição dos materiais dos sistemas construtivos. Devido ao tempo de vida útil de projeto definido pela ABNT (2013a), o bloco cerâmico não demanda novos materiais ao longo da operação, somente o revestimento da parede.

Figura 31 - Contribuição dos materiais da parede de bloco cerâmico por categoria de impacto.



O mesmo ocorre para a parede de bloco de concreto (Figura 32). A cal hidratada é um dos materiais de maior contribuição para o potencial de impacto. Entretanto, devido à menor contribuição do bloco de concreto em relação ao cerâmico, o cimento também aparece com destaque para essa parede.

Para a parede de *light steel framing* (Figura 33) foram considerados apenas dois materiais: o aço para as guias e montantes e a placa cimentícia para vedação da estrutura. Como a placa cimentícia apresenta demanda durante a fase de operação, sua contribuição de impacto apresenta destaque para o ciclo de vida.

Figura 32 - Contribuição dos materiais da parede de bloco de concreto por categoria de impacto.

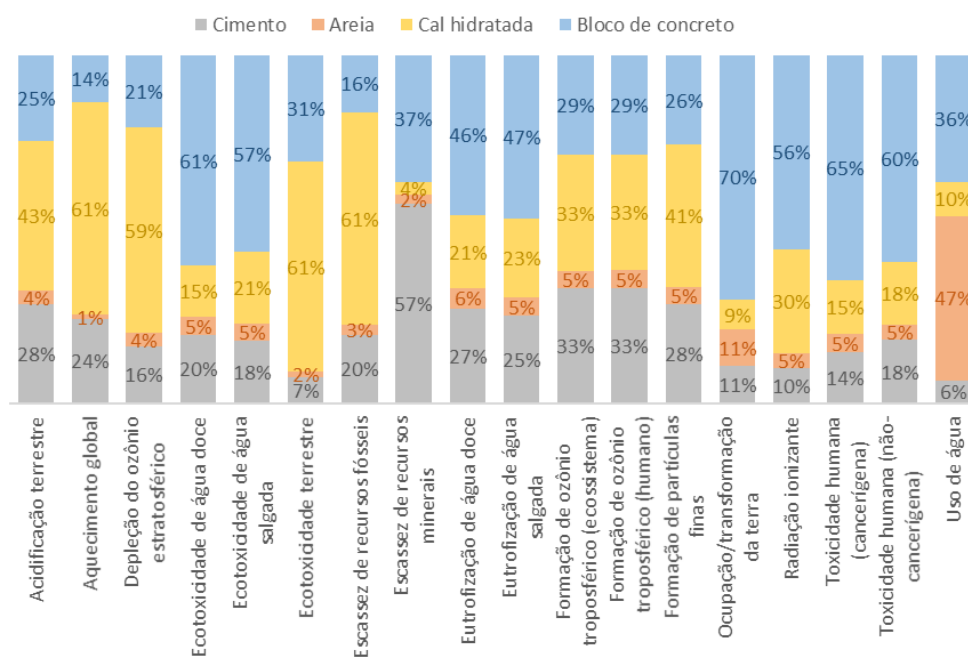
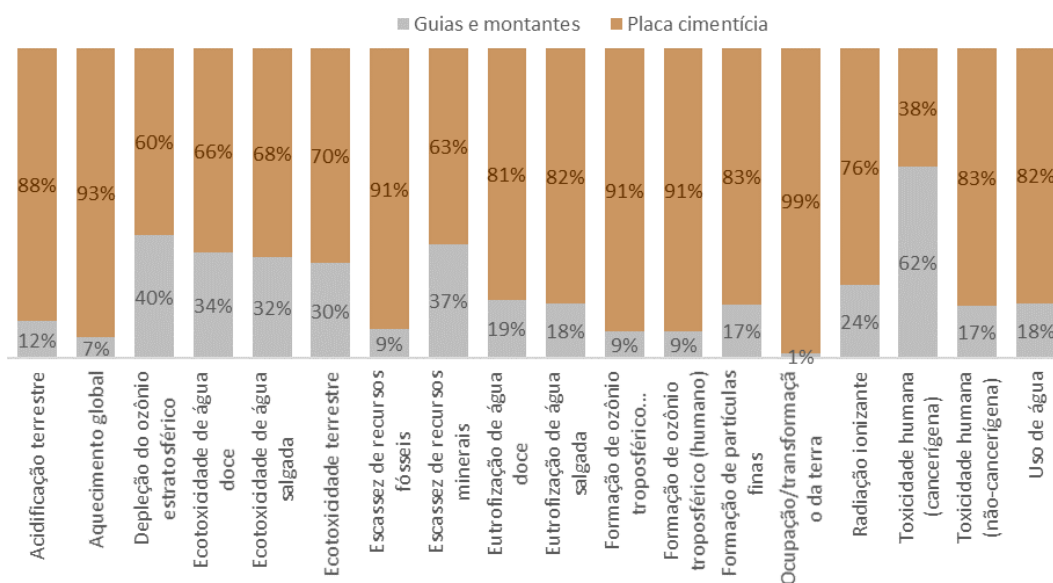


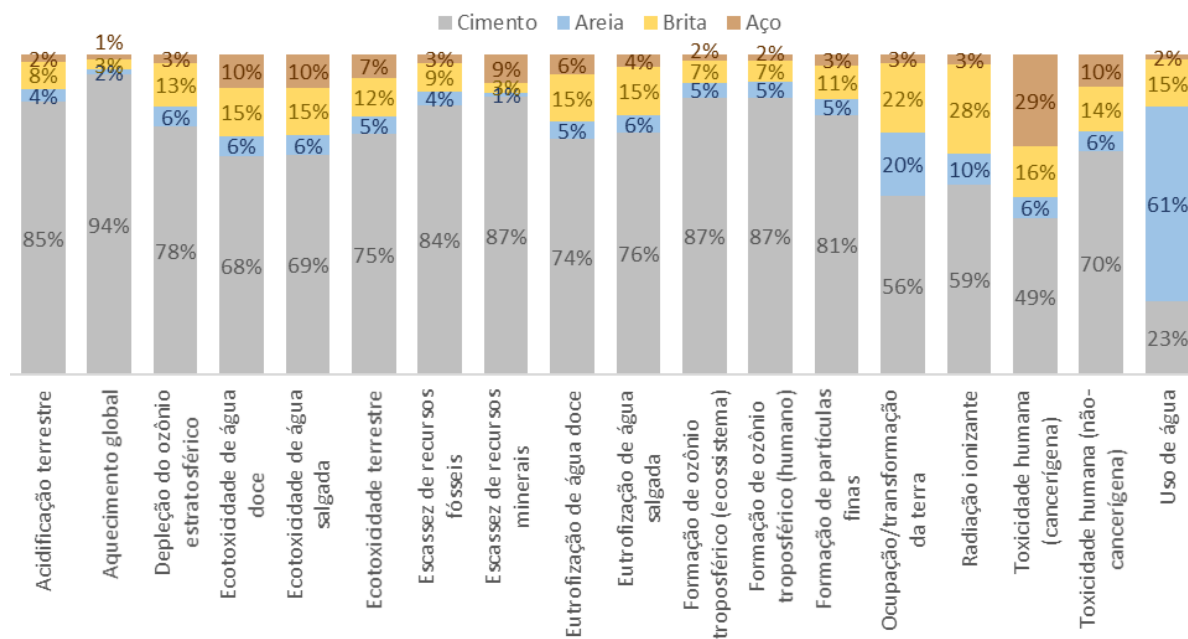
Figura 33 - Contribuição dos materiais da parede de *light steel framing* por categoria de impacto.



A parede de concreto moldado *in loco* exige pouca manutenção. Com isso, a contribuição ao longo do ciclo de vida de seus materiais, apresentada na Figura 34, é influenciada principalmente pelo impacto da fase de pré-uso. O cimento é o material que mais se destacou,

variando sua contribuição de 23% a 94%, para as categorias de uso de água e aquecimento global, respectivamente.

Figura 34 - Contribuição dos materiais da parede de concreto moldado *in loco* por categoria de impacto.



4.1.3. Interpretação do ciclo de vida

A fase de interpretação do ciclo de vida engloba as três últimas etapas finais da ACV: identificação das questões significativas, a avaliação do estudo e a apresentação das conclusões, limitações e recomendações finais.

4.1.3.1. Identificação das questões significativas

A identificação das questões significativas foi desenvolvida por meio da análise da influência de cada fase do ciclo de vida no valor final de cada categoria de impacto considerada pelo método ReCiPe.

As Figuras 35 e 36 apresentam os resultados para as categorias de impacto de aquecimento global e escassez de recursos minerais. As demais categorias estão apresentadas no Apêndice

E. A fase de operação foi considerada em duas etapas, uma para o impacto embutido oriundo da manutenção e reposição dos materiais da edificação e outra para o consumo energético.

Figura 35 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para o aquecimento global.

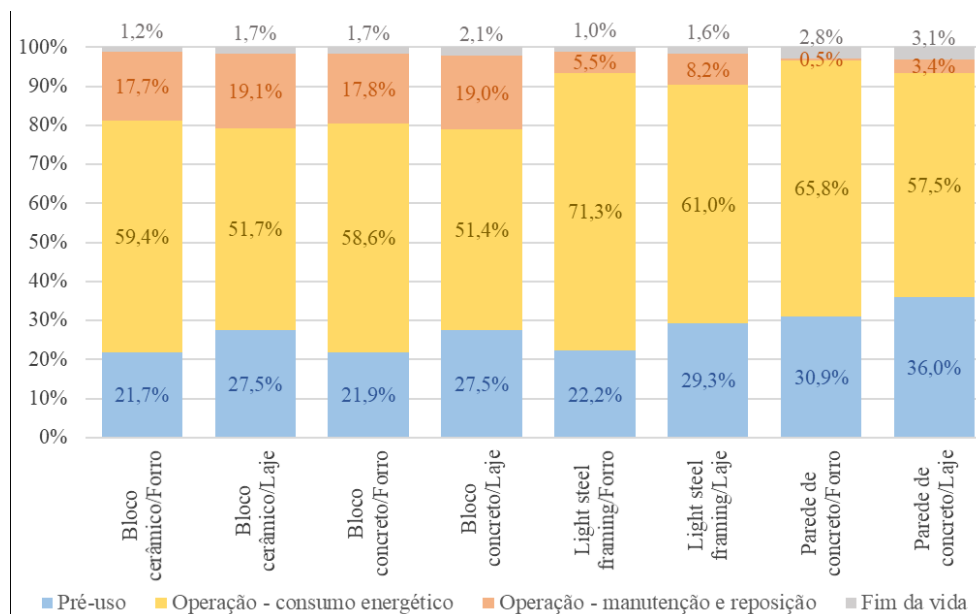
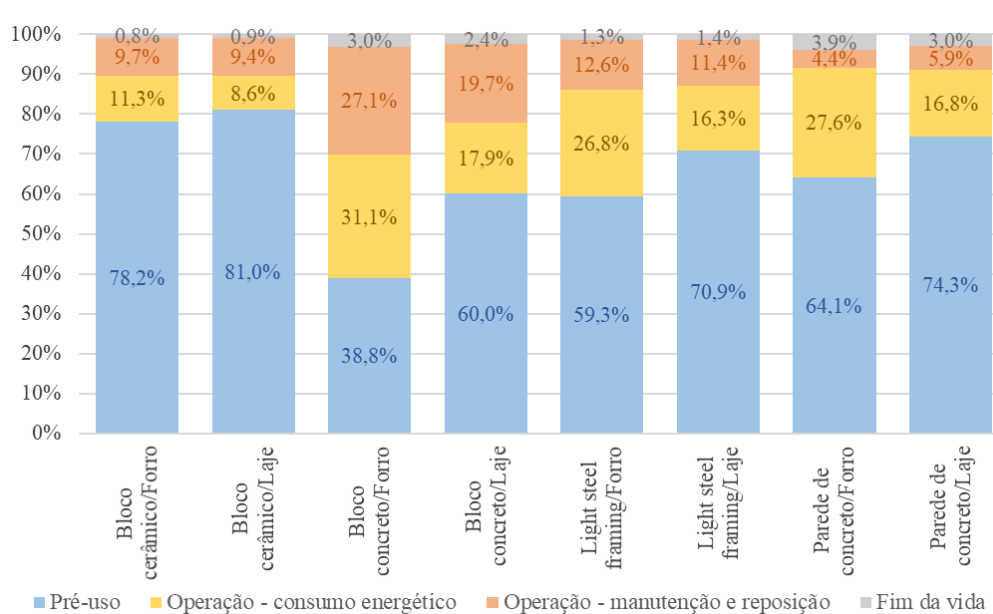


Figura 36 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a escassez de recursos minerais.



O percentual de contribuição de cada fase do ciclo de vida variou de forma significativa entre as categorias de impacto. Entretanto, de modo geral, a fase de operação da edificação representou a maior parte do impacto durante o ciclo de vida, principalmente devido ao consumo energético, que representou, em média, 59,3% do impacto no ciclo de vida.

A categoria de uso de água foi a que apresentou o maior valor para o consumo energético, com um total de 98% de todo o impacto do ciclo de vida. Consequentemente, foi a que obteve o menor percentual para todas as outras fases do ciclo. Para a categoria de ocupação/transformação da terra obteve-se o menor valor, 8%.

Para a manutenção e reposição dos materiais durante a operação da edificação, a contribuição média foi de 9,66%. A fase de pré-uso representou, em média, 28,6% do impacto total no ciclo de vida. A categoria de escassez de recursos minerais foi a que apresentou o maior valor, com 65,8% do impacto total. O fim da vida apresentou a menor influência para todo o ciclo de vida, com seu maior valor para a categoria de impacto de ecotoxicidade terrestre, 9,2%.

O conjunto que apresentou a maior média de contribuição para a fase de pré-uso foi o de parede de concreto moldado *in loco* com laje. Esse resultado é influenciado pela baixa demanda de manutenção e reposição da parede e pelo baixo valor de consumo energético obtido para o conjunto.

Em relação ao consumo energético, a maior média de contribuição foi do conjunto de parede de *light steel framing* com forro de madeira, sendo esse o conjunto de maior valor de consumo energético mensal.

Apesar do baixo valor encontrado para algumas fases do ciclo de vida, nenhuma delas pode ser considerada desprezível, visto que nenhuma delas obteve valor irrelevante em todas as categorias de impacto analisadas. As conclusões obtidas apresentaram coerência com o estudo desenvolvido e com os resultados encontrados na literatura para estudos de edificações residenciais, conforme identificado por Cabeza et al. (2014), validando o método aplicado para a ACV.

4.1.3.2. Conclusões, limitações e recomendações

A ACV teve como principal objetivo comparar o uso de diferentes sistemas construtivos para a envoltória de uma habitação de interesse social localizada na cidade de São Paulo.

As fronteiras do sistema consideraram as fases de pré-uso, operacional e fim da vida. Entretanto, nem todas as etapas de cada fase foram consideradas, caracterizando o estudo como de berço ao portão. Os materiais e serviços relacionados ao processo construtivo, reformas, demolição da edificação, potencial de reuso, reciclagem ou recuperação dos materiais no fim da vida não foram considerados.

As principais limitações encontradas para o desenvolvimento da ACV estão listadas a seguir.

Imprecisão dos dados: os materiais e serviços levantados para todas as fases do ciclo de vida são estimados e podem não representar fielmente a realidade do ciclo de vida de uma habitação de interesse social na cidade de São Paulo. A estimativa do consumo energético não considerou variações tecnológicas, ambientais e sociais que pudessem alterar o consumo mensal, e também não foram previstas alterações na matriz energética nacional.

Inexistência de dados: algumas etapas do ciclo de vida tiveram que ser retiradas do estudo devido à inexistência de dados para realizar estimativa de impacto, como o processo construtivo da edificação e a frequência de reformas realizadas em habitações de interesse social. A inexistência de um banco de dados nacional completo para ACV voltado para a construção civil resultou no uso de uma base de dados generalizada para o mundo, sem considerar especificidades dos processos de fabricação ou distâncias de distribuição do Brasil.

Além das limitações citadas, ressalta-se que não foram desenvolvidas análises de impacto econômico ou social em relação aos sistemas utilizados, sendo estas características relevantes quando considerado o ciclo de vida de habitações de interesse social.

Por se tratar de uma ACV comparativa, algumas análises de validação do método foram desenvolvidas e seus principais resultados estão resumidos a seguir. A análise de sensibilidade considerou as variáveis de vida útil, alteração no comportamento do usuário, método de AICV e a zona bioclimática.

Para a variação da vida útil foram observadas pequenas alterações nos cenários considerados. Entretanto, devido às estimativas feitas durante a fase de operação, a adoção de 40 anos de vida útil representou uma medida satisfatória para a ACV.

Em relação à alteração da zona bioclimática, destaca-se que, devido à grande extensão territorial e variação dos climas existentes no Brasil, não é possível definir o conjunto de sistema

construtivo de menor impacto ambiental para o país. Dessa forma, a ACV desenvolvida é voltada somente para a cidade de São Paulo e localidades com clima similar.

Em relação ao comportamento do usuário, a principal variação obtida foi pela consideração ou não do uso de um sistema de climatização artificial para a edificação. Com isso, é fundamental identificar como ocorrerá a climatização da edificação ao longo da vida útil. O estudo desenvolvido considerou o uso de equipamentos de ar-condicionado desde o momento de construção da edificação, não representando habitações que utilizam somente a ventilação natural.

A variação do método de AICV não representou mudança significativa das principais conclusões da ACV, sendo adotado o método ReCiPe.

A análise de contribuição teve como principal objetivo identificar os sistemas e os materiais que apresentaram as maiores contribuições no potencial de impacto de cada caso considerado. Os valores variaram significativamente entre as categorias de impacto, com destaque de maior contribuição para o consumo de energia durante a operação da edificação.

Entre os materiais, a Tabela 19 apresenta os que obtiveram os maiores valores entre os sistemas de parede e de cobertura analisados, com a contribuição média obtida entre as categorias de impacto.

Tabela 19 – Contribuição média para os materiais de maior influência de cada sistema.

Sistema	Material destaque	Contribuição média
Forro de madeira	Madeira	56%
Laje maciça	Aço	52%
Parede <i>light steel framing</i>	Placa cimentícia	78%
Prede de bloco cerâmico	Bloco cerâmico	43%
	Cal hidratada	30%
Prede de bloco de concreto	Bloco de concreto	40%
	Cal hidratada	31%
Parede de concreto moldado <i>in loco</i>	Cimento	72%

Considerando todas as categorias de impacto e o escopo definido para a ACV, conclui-se que o conjunto de parede de concreto moldado *in loco* com o uso de forro de madeira é o que apresenta tendência de menor potencial de impacto ambiental entre os conjuntos analisados. Entretanto, ressalta-se que a análise se aplica somente para o escopo definido, ou seja, uma

habitação de interesse social de 41,16m² na cidade de São Paulo, com uso de aparelhos de ar-condicionado desde o início de sua vida útil de 40 anos, considerando quatro moradores.

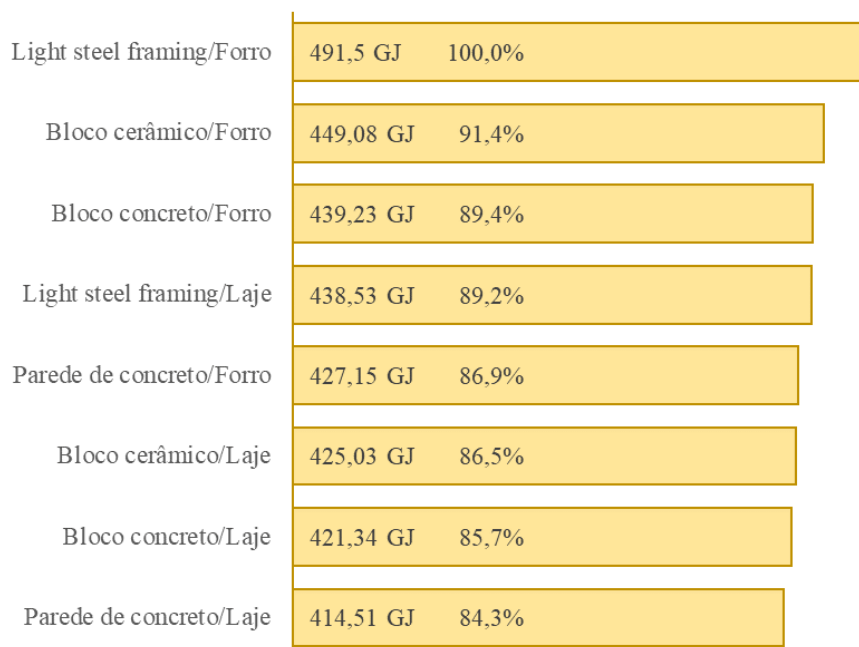
4.2. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)

A ACVE desenvolvida neste trabalho seguiu o escopo e objetivo apresentados na seção 3.4. Sua principal finalidade é a comparação do consumo total de energia primária de diferentes sistemas construtivos de uma habitação de interesse social.

4.2.1. Avaliação do impacto do ciclo de vida energético (AICVE)

Os resultados de consumo de energia primária para os diferentes casos considerados neste estudo são apresentados a seguir. O método de cálculo aplicado seguiu as especificações apresentadas na seção 3.4.3.1. A Figura 37 apresenta o consumo de energia primária ao longo de todo o ciclo de vida para cada caso considerado.

Figura 37- Perfil de consumo de energia primária da ACVE.



O conjunto de *light steel framing* e forro de madeira apresentou o maior valor de consumo de energia primária ao longo do ciclo de vida. De modo geral, o uso da laje maciça de concreto reduziu o consumo, apresentando o menor valor quando utilizada com a parede de concreto.

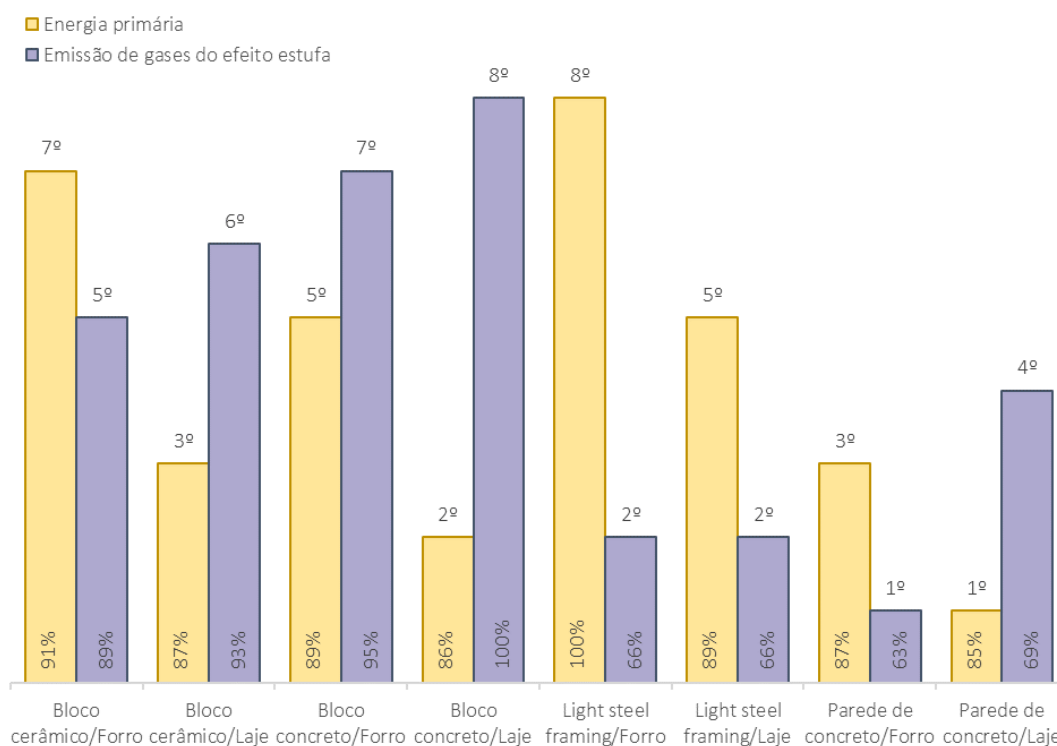
Para os casos analisados, o consumo de energia variou de 69,94 kWh/m².ano a 82,92 kWh/m².ano. Segundo os resultados encontrados por Ramesh, Prakash e Shukla (2010), que avaliaram 73 casos estudados em 13 países diferentes, para ACVEs de edificações residenciais esse valor varia de 150 a 400 kWh/m².ano. Entretanto, um estudo desenvolvido por Paulsen e Sposto (2013) para uma habitação de interesse social na cidade de Brasília apresentou uma taxa de 124,72 kWh/m².ano, considerando todos os sistemas da edificação. Como para a ACVE desenvolvida foram analisados somente os sistemas construtivos de parede e cobertura, o valor obtido foi considerado aceitável.

4.2.1.1. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi desenvolvida conforme as variáveis definidas na seção 3.4.3.2. A posição relativa de cada caso foi estabelecida com base no valor normalizado inteiro, evitando considerar pequenas diferenças de valores entre os casos.

Na análise categoria de impacto foi englobado o uso das emissões de gases de efeito estufa em conjunto com o consumo de energia primária. A Figura 38 apresenta o resultado das duas categorias para os diferentes casos analisados.

Figura 38 – Resultado da variação da categoria de impacto da ACVE.



O conjunto de parede de *light steel framing* com o uso do forro apresentou o maior valor para o consumo de energia primária, entretanto para a emissão de gases do efeito estufa foi o segundo caso com o menor valor. Os demais conjuntos também apresentaram classificações diferentes para cada categoria de impacto.

A laje maciça apresentou resposta contrária entre as duas categorias. Para a energia, seu uso significou redução do valor, enquanto para a emissão de gases do efeito estufa, houve aumento do valor.

Dessa forma, ao considerar as duas categorias em conjunto não é possível classificar os diferentes casos analisados em função do menor potencial de impacto. Devido ao resultado obtido, as demais variáveis da análise de sensibilidade foram desenvolvidas para as duas categorias.

A vida útil considerada para a edificação foi variada considerando, além do tempo de 40 anos definido para a ACVE, o uso de 30 anos e 50 anos. As Figuras 39 e 40 apresentam o resultado da análise de sensibilidade para os diferentes tempos de vida útil.

Figura 39 – Variação da vida útil para o consumo de energia primária.

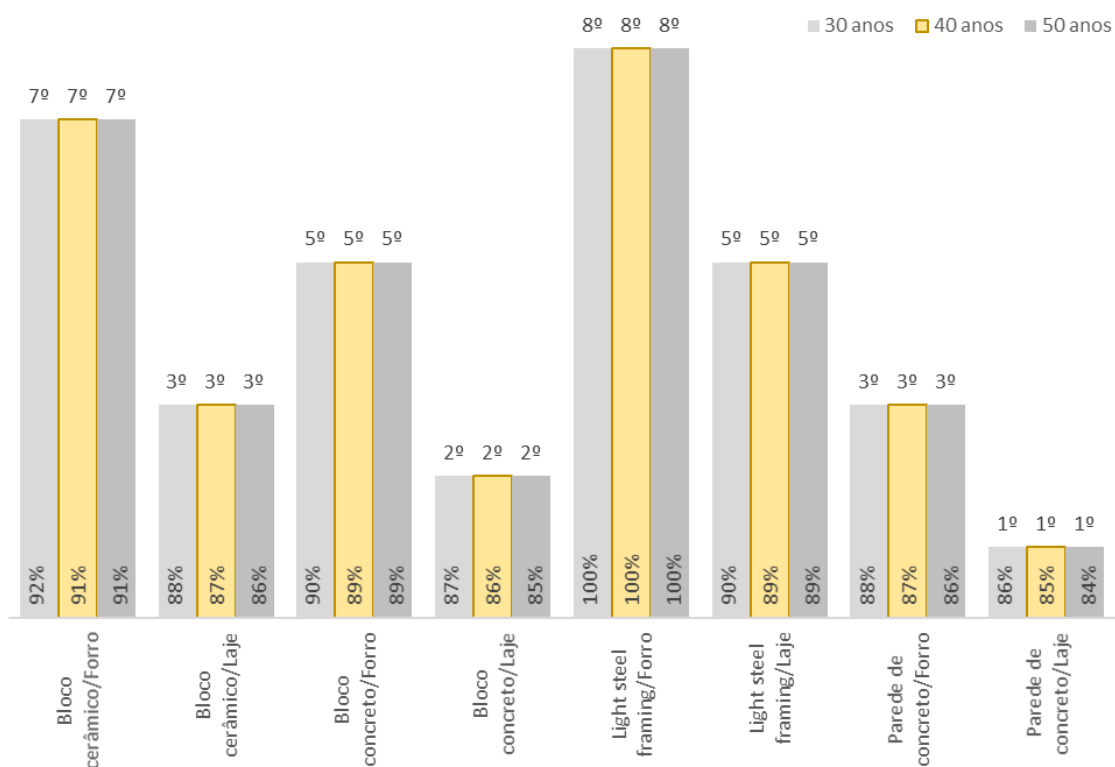
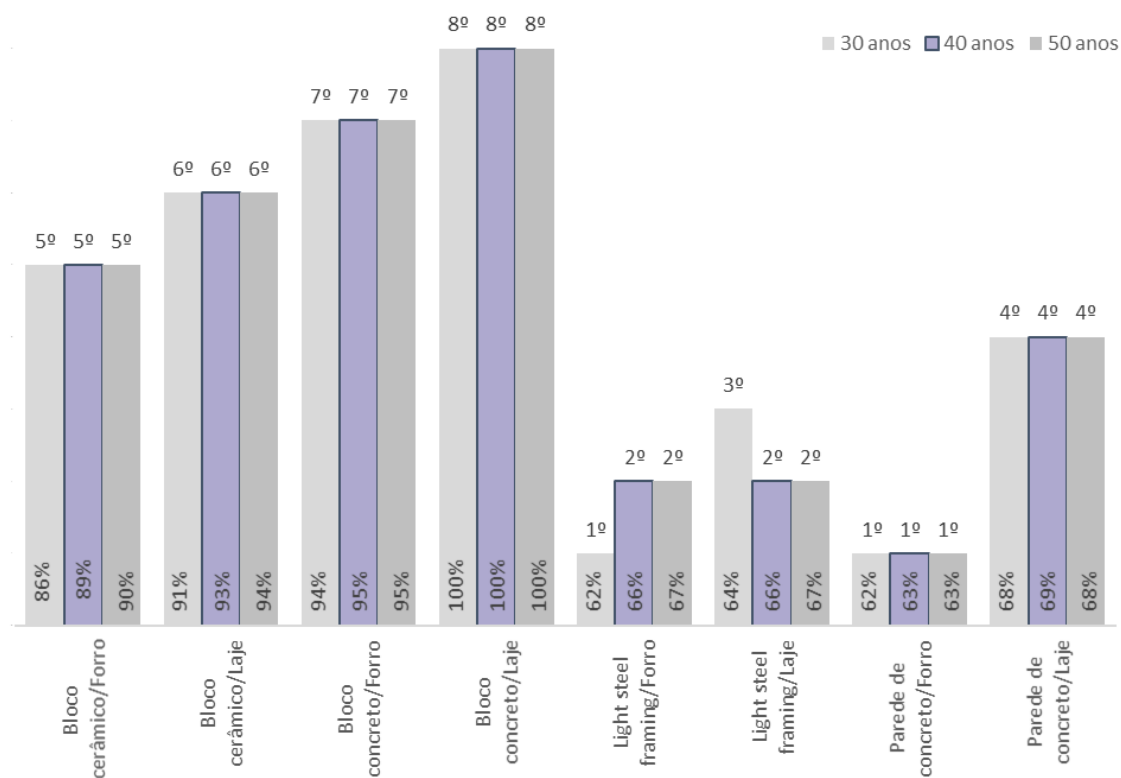


Figura 40 - Variação da vida útil para a emissão de gases do efeito estufa.

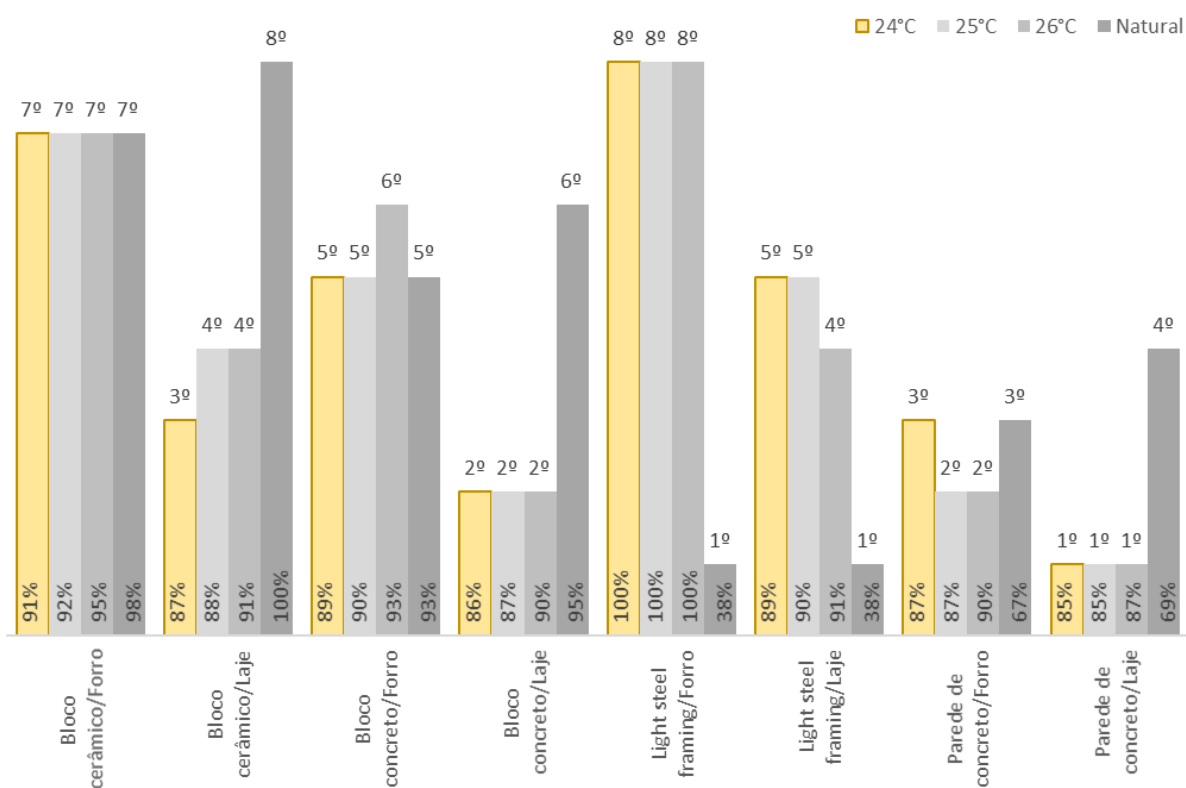


A variação da vida útil não representou alterações significativas na posição relativa entre os casos analisados. A principal diferença observada foi para o conjunto de parede de *light steel framing*, que, para as emissões de gases do efeito estufa, variou sua posição em uma colocação.

De acordo com os resultados obtidos, a variação da vida útil para a ACVE desenvolvida não representou influência relevante para o estudo. A alteração observada para a emissão de gases do efeito estufa está relacionada à proximidade dos valores de impacto entre os três casos de menor impacto, e sua posição relativa permanece a mesma quando considerado o valor não normalizado do impacto.

A análise do comportamento do usuário considerou a variação da temperatura limite para o resfriamento e o uso somente de ventilação natural, prática comum para habitações de interesse social. A Figura 41 apresenta os resultados para o consumo de energia primária.

Figura 41 - Variação do comportamento do usuário para o consumo de energia primária.

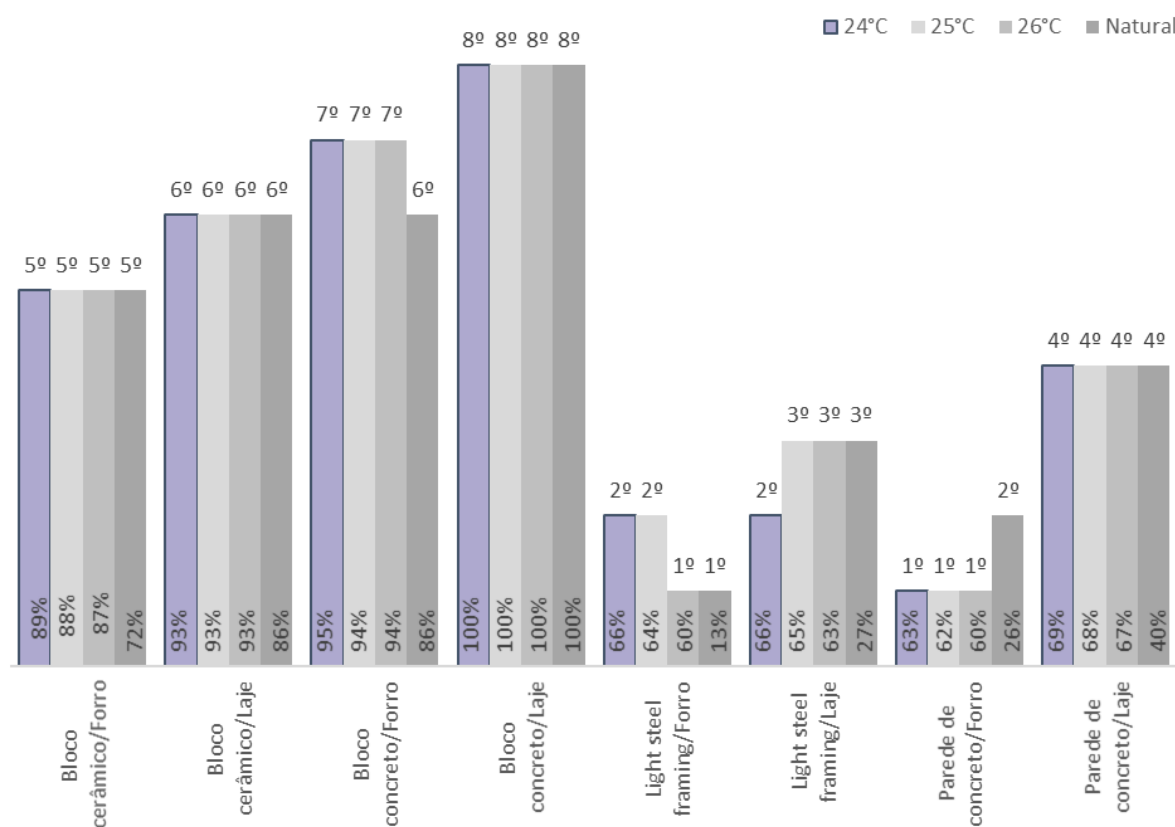


A variação no comportamento do usuário resultou em mudanças significativas para alguns conjuntos. A parede e *light steel framing* com o uso de forro manteve a última posição para todos os cenários com o uso de sistema de refrigeração artificial. Entretanto, quando considerada somente a ventilação natural, o conjunto passou da posição de maior impacto para a de menor.

Quando considerada em conjunto com a laje maciça, a parede de *light steel framing* apresentou grande variação de posição entre os cenários, reduzindo sua posição relativa de impacto conforme o consumo energético durante a fase de operação foi reduzido.

As paredes de bloco cerâmico e de bloco de concreto utilizadas em conjunto com a laje maciça apresentaram comportamento contrário, aumentando sua posição relativa de impacto com a redução do consumo energético durante a fase de operação. Os dois conjuntos apresentaram valores de consumo energético similares e as maiores posições quando considerado somente o uso de ventilação natural. A Figura 42 apresenta os resultados para a emissão de gases do efeito estufa.

Figura 42 - Variação do comportamento do usuário para a emissão de gases do efeito estufa.



Apesar da importante variação observada para o consumo de energia primária, a alteração no comportamento do usuário não resultou mudanças tão significativas para a emissão de gases do efeito estufa. As variações encontradas estão relacionadas à proximidade dos valores de impacto de alguns casos.

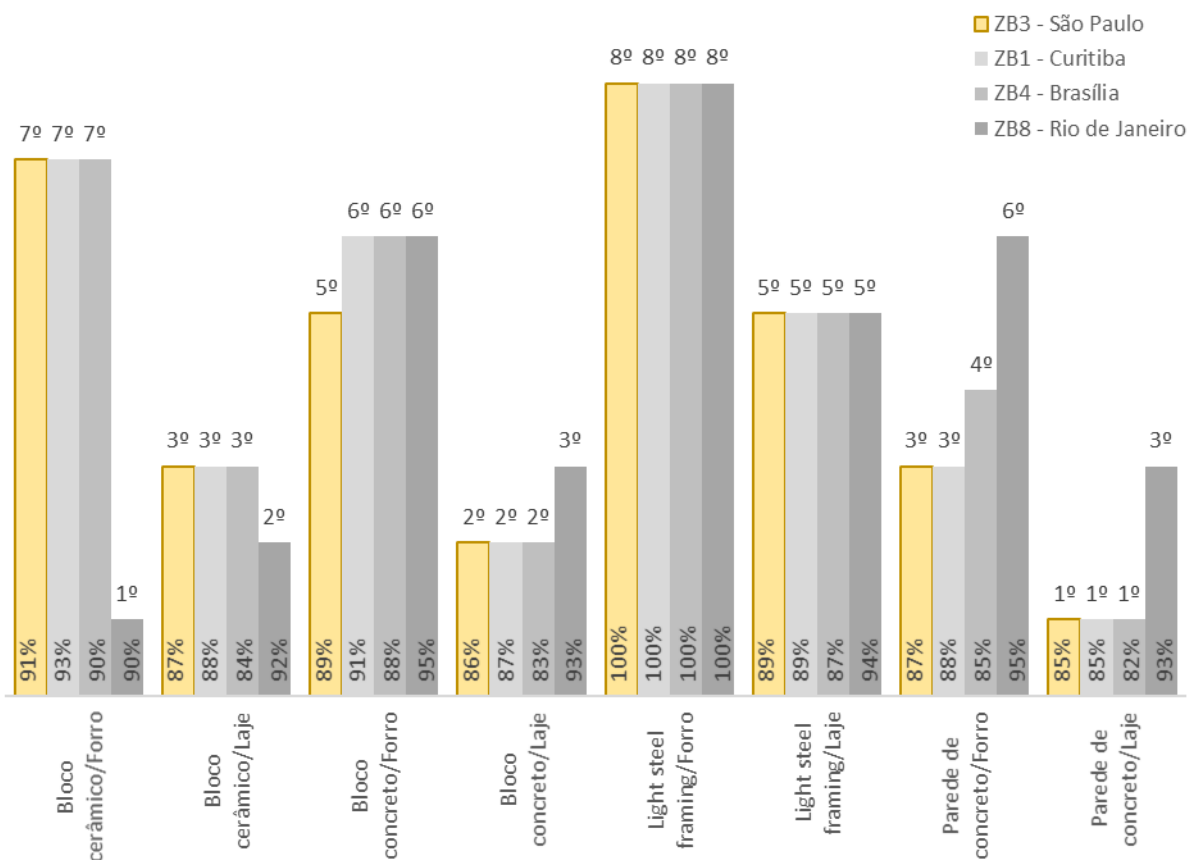
Os resultados obtidos ressaltaram os diferentes perfis de impacto encontrados com a análise das duas categorias consideradas. Para o consumo de energia primária, o consumo energético durante a fase de operação da edificação representou grande influência no valor final de consumo. Entretanto, para as emissões de gases do efeito estufa essa influência não foi tão significativa.

Devido à sensibilidade que a energia primária apresenta em relação à energia consumida durante a fase de operação, torna-se essencial que a estimativa feita considere diferentes cenários para assegurar que os resultados encontrados com a ACVE sejam representativos.

É necessário considerar variáveis que influenciam no consumo energético durante a fase de operação, como diferenças de comportamentos entre os usuários, a evolução tecnológica, variações do clima, entre outras características.

A análise de sensibilidade para as diferentes zonas bioclimáticas englobou as cidades de Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro, equivalentes às zonas bioclimáticas um, quatro e oito, respectivamente. A Figura 43 apresenta os resultados para cada caso analisado.

Figura 43 - Variação da zona bioclimática para o consumo de energia primária.



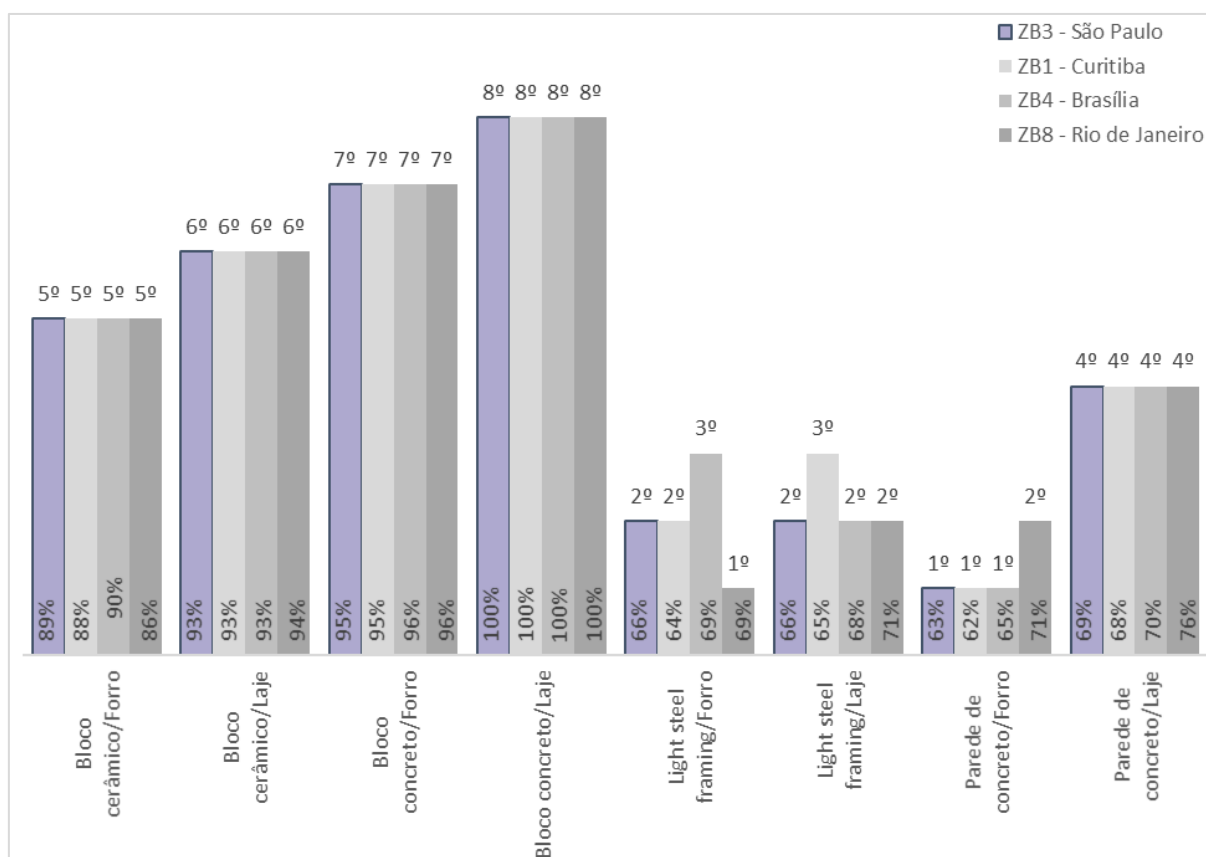
O conjunto de parede de bloco cerâmico com forro foi o que apresentou a maior variação entre os casos analisados, passando da sétima para a primeira posição. Esse resultado está relacionado ao consumo energético durante a fase de operação. Para a cidade do Rio de Janeiro, o conjunto apresentou o menor consumo, enquanto manteve o sexto maior consumo em todas as outras cidades.

A parede de concreto também apresentou variação significativa, variando do terceiro para o sexto lugar quando considerado o forro de madeira, e da primeira para a terceira posição, quando utilizada em conjunto com a laje maciça.

O conjunto de parede de *light steel framing* e forro de madeira não sofreu alteração, permanecendo na posição de maior impacto em todos os cenários. Esse também foi o conjunto que apresentou o maior consumo energético durante a fase de operação para todas as zonas bioclimáticas.

A cidade do Rio de Janeiro foi a que apresentou as principais variações, sendo a que obteve os maiores valores de consumo energético durante a fase de operação. A Figura 44 apresenta os resultados da análise de sensibilidade para a emissão de gases do efeito estufa.

Figura 44 - Variação da zona bioclimática para a emissão de gases do efeito estufa.



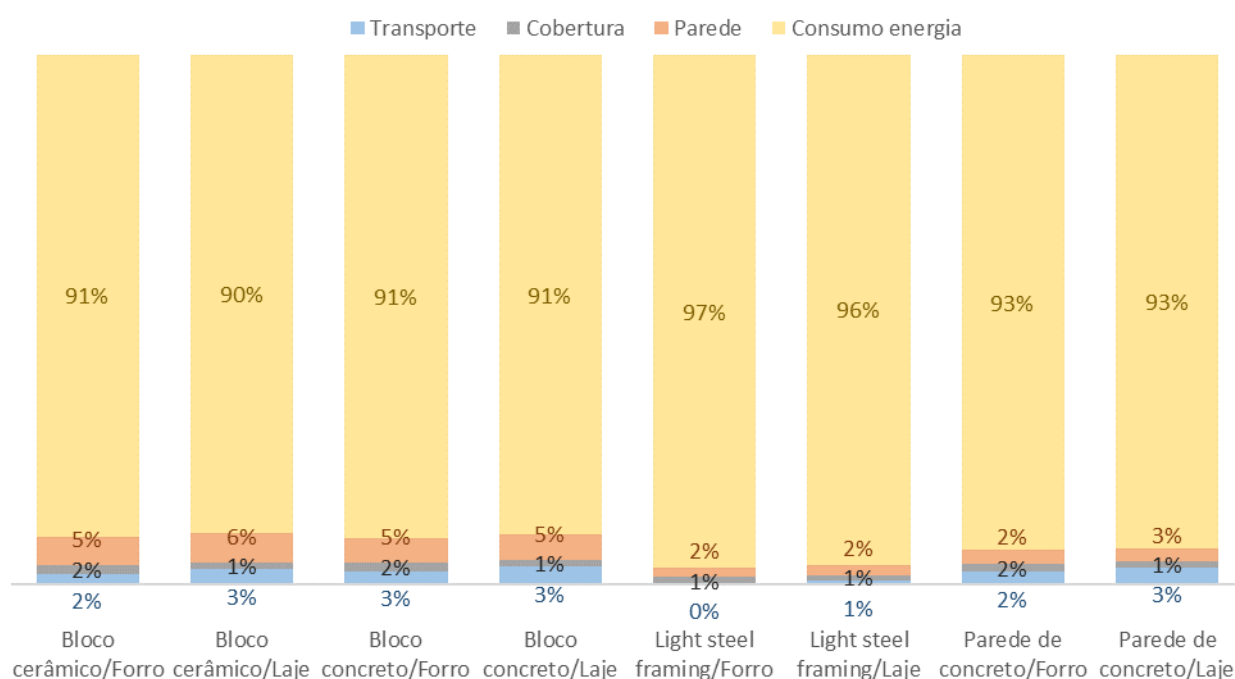
Ao contrário do observado para a energia primária, a maioria dos conjuntos não apresentou variação da posição relativa com alteração da zona bioclimática. As principais mudanças foram para a parede de *light steel framing* com o uso de forro ou de laje e para o conjunto de parede de concreto com laje.

Para um país com uma extensão territorial tão grande e que abrange diversos climas, é necessário que as ACVEs desenvolvidas com o objetivo de seleção de materiais para uso no Brasil considerem a localização. Esse resultado apresenta a impossibilidade de definição de um sistema construtivo com o menor impacto ambiental para uso em todo o território, prática frequentemente observada no processo de construção de habitações de interesse social.

4.2.1.2. Análise de contribuição

A Figura 45 apresenta a análise de contribuição para a energia primária. O consumo energético representou a maior parte do impacto para a ACVE, variando sua contribuição de 90% a 97%.

Figura 45 – Análise de contribuição para a energia primária.

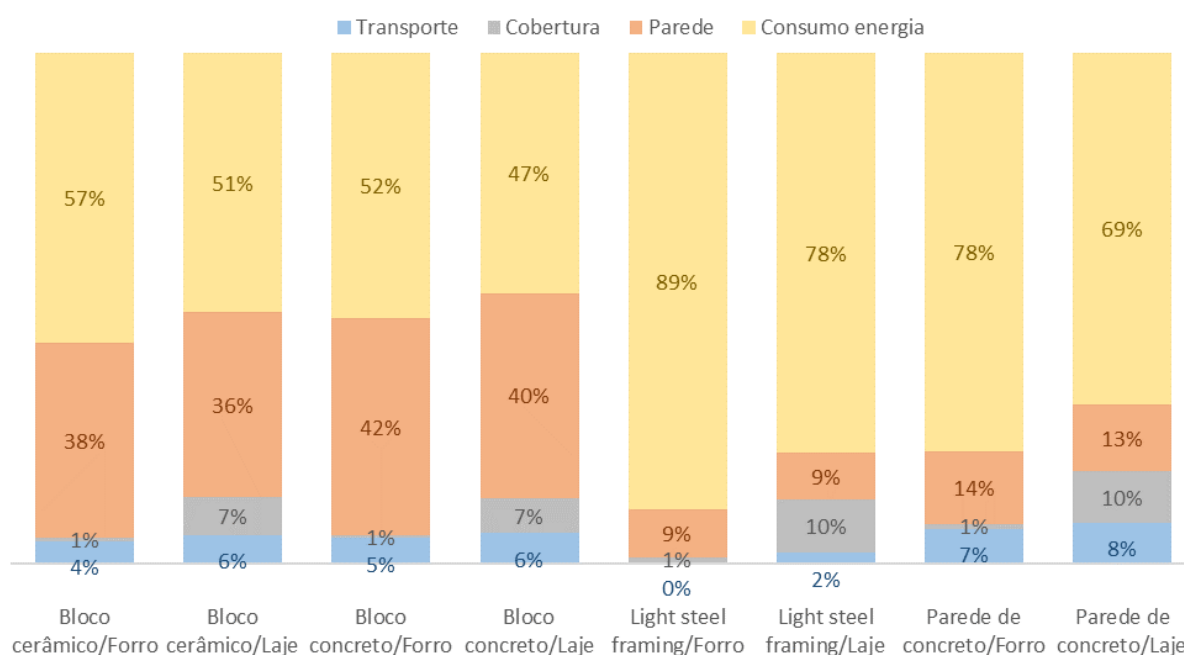


A parede de bloco cerâmico foi a que apresentou a maior contribuição, acumulando 6% do valor de impacto total. Enquanto isso, as paredes de concreto moldado *in loco* e de *light steel framing* obtiveram a menor influência, 2%. Esse resultado está associado ao baixo valor de energia embutida para as duas paredes e ao elevado valor de consumo energético durante a fase de operação. Destaca-se que a parede de *light steel framing* foi a que obteve menor energia embutida, entretanto, foi a que apresentou os maiores consumos de energia de operação.

A cobertura teve baixa influência no ciclo de vida, com valor máximo de 2%. Sposto e Paulsen (2013) obtiveram resultados semelhantes, com a cobertura apresentando menor valor de energia embutida do que as paredes da edificação. Da mesma forma, o transporte apresentou baixa contribuição, variando de 0% a 3%.

A Figura 46 apresenta o resultado da análise de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa. Assim como para a ACVE, o impacto do consumo energético durante a fase de operação foi significativo. Entretanto, a contribuição foi menor, com valor máximo de 89% para o conjunto de parede de *light steel framing* com forro.

Figura 46 – Análise de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa.



O transporte representou a menor contribuição média. No entanto, ao contrário do resultado da energia primária, seu valor não pode ser considerado desprezível. A maior influência foi observada para o conjunto de parede de concreto moldado *in loco* com o uso de laje, com valor de 8%.

As coberturas apresentaram variação do percentual de contribuição, entretanto a laje obteve os maiores valores, apresentando influência de 7% a 10%. Enquanto isso, o forro representou apenas 1% de contribuição com o total de emissões de gases do efeito estufa.

Para as paredes, a que apresentou maior contribuição foi a de bloco de concreto seguida pela de bloco cerâmico. Enquanto essas duas paredes apresentaram cerca de 40% de influência, as paredes de *light steel framing* e de concreto moldado *in loco* apresentaram valor máximo de 14%.

Os valores obtidos para o impacto embutido das paredes de bloco cerâmico, bloco de concreto e de concreto moldado *in loco* estão coerentes com o valor por m² definido por Caldas et al. (2016). Eles obtiveram maior valor de energia primária para a parede de bloco cerâmico e menor para a de concreto moldado *in loco*. Para a emissão de CO₂eq, a parede de bloco de concreto apresentou o maior valor. As paredes de *light steel framing* utilizadas por Caldas et al. (2016) e neste estudo não podem ser comparadas, pois não apresentam os mesmos elementos de vedação.

O conjunto de parede de bloco de concreto com laje foi o único que obteve, para o consumo energético de operação, menos da metade do valor de impacto, 47%. Ele apresentou valor de consumo energético similar ao conjunto de parede de bloco cerâmico com laje, no entanto para a parede e para o transporte a emissão de CO₂eq foi ligeiramente maior.

As Figuras 47 e 48 apresentam a análise de contribuição dos materiais de cada sistema construtivo para o consumo de energia primária e as emissões de gases do efeito estufa. Para o forro de madeira houve grande variação entre as duas categorias, com destaque para a madeira. Para a laje maciça, o aço apresentou maior contribuição, seguido pelo cimento.

Figura 47- Contribuição dos materiais das coberturas para a energia primária e emissão de gases do efeito estufa.

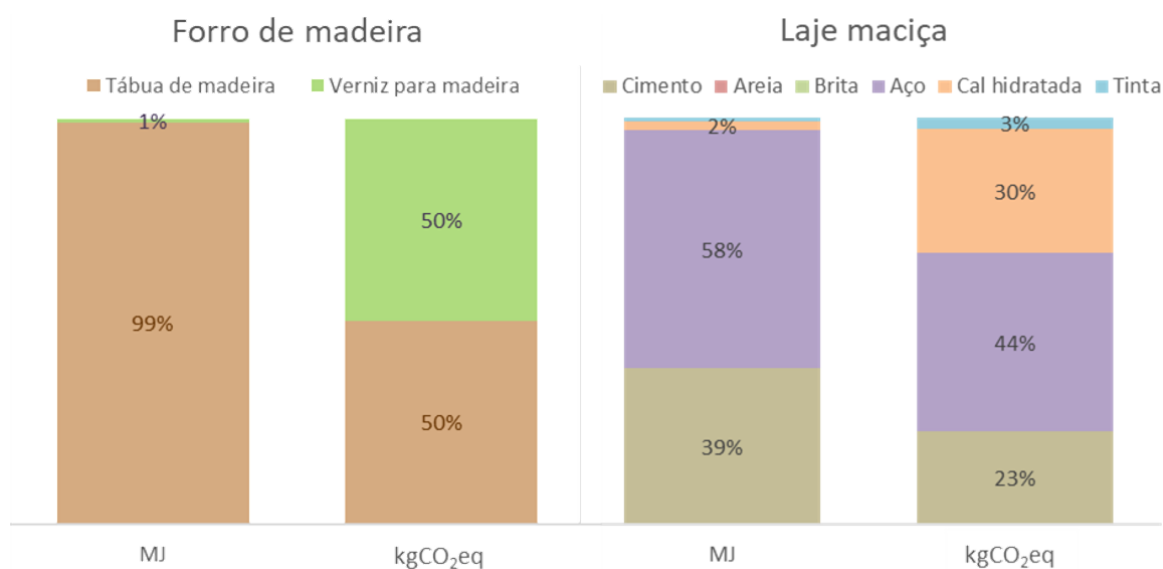
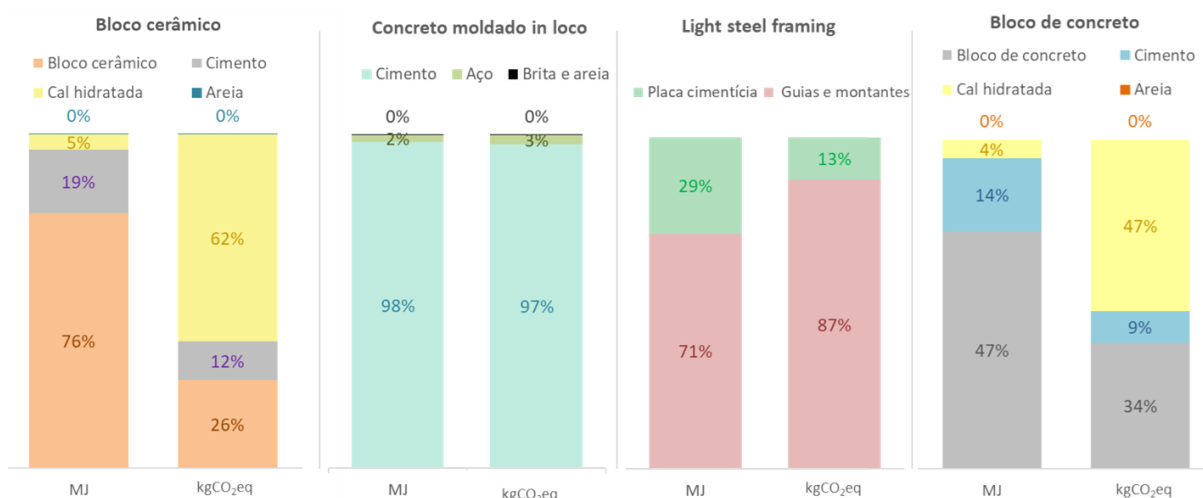


Figura 48- Contribuição dos materiais das paredes para a energia primária e emissão de gases do efeito estufa.



A parede de bloco cerâmico e a de bloco de concreto apresentaram maior contribuição para os blocos quando considerado o consumo de energia primária. Entretanto, para a emissão de gases do efeito estufa, a cal hidratada obteve a maior influência.

A parede de concreto moldado *in loco* teve maior contribuição do cimento para as duas categorias, representando quase todo o potencial de impacto. A parede de *light steel framing* teve a maior contribuição para o aço utilizado na estrutura dos guias e montantes.

4.2.2. Interpretação do ciclo de vida energético

Para a última fase da ACVE, foram consideradas três etapas de análise para conclusão do estudo:

- Identificação das questões significativas;
- Avaliação do estudo;
- Conclusões, limitações e recomendações.

As análises desenvolvidas seguiram o método especificado na seção 3.4.4 e os resultados estão apresentados a seguir.

4.2.2.1. Identificação das questões significativas

A etapa de identificação das questões significativas considerou a análise das diferentes fases englobadas no ciclo de vida, de pré-uso, operacional e de fim da vida.

Devido aos resultados obtidos na análise de sensibilidade, a identificação das questões significativas também foi desenvolvida para a categoria de impacto de emissão de gases do efeito estufa e para os diferentes cenários considerados para o comportamento do usuário e para as zonas bioclimáticas.

As Figuras 49 e 50 apresentam os percentuais de contribuição para cada fase da ACVE para o consumo de energia primária e a emissão de gases do efeito estufa. Os resultados pelas diferentes zonas bioclimáticas e comportamento do usuário estão apresentadas no Apêndice F.

Figura 49 – Percentual de contribuição de cada fase do ciclo de vida para a energia primária.

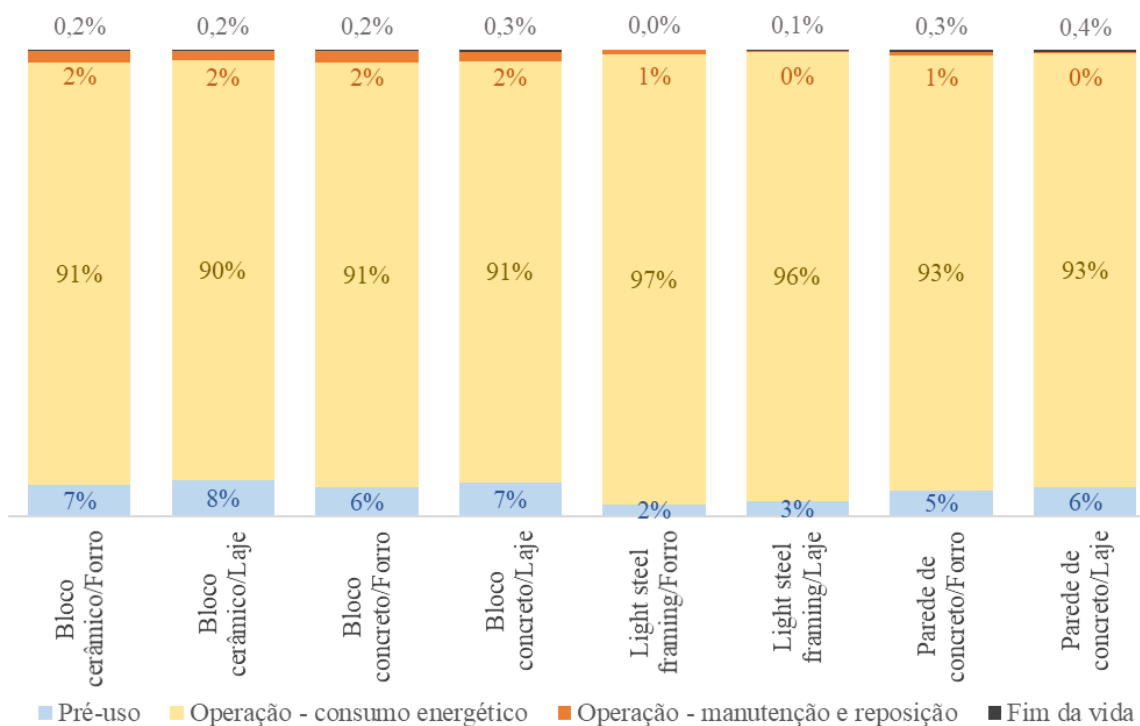
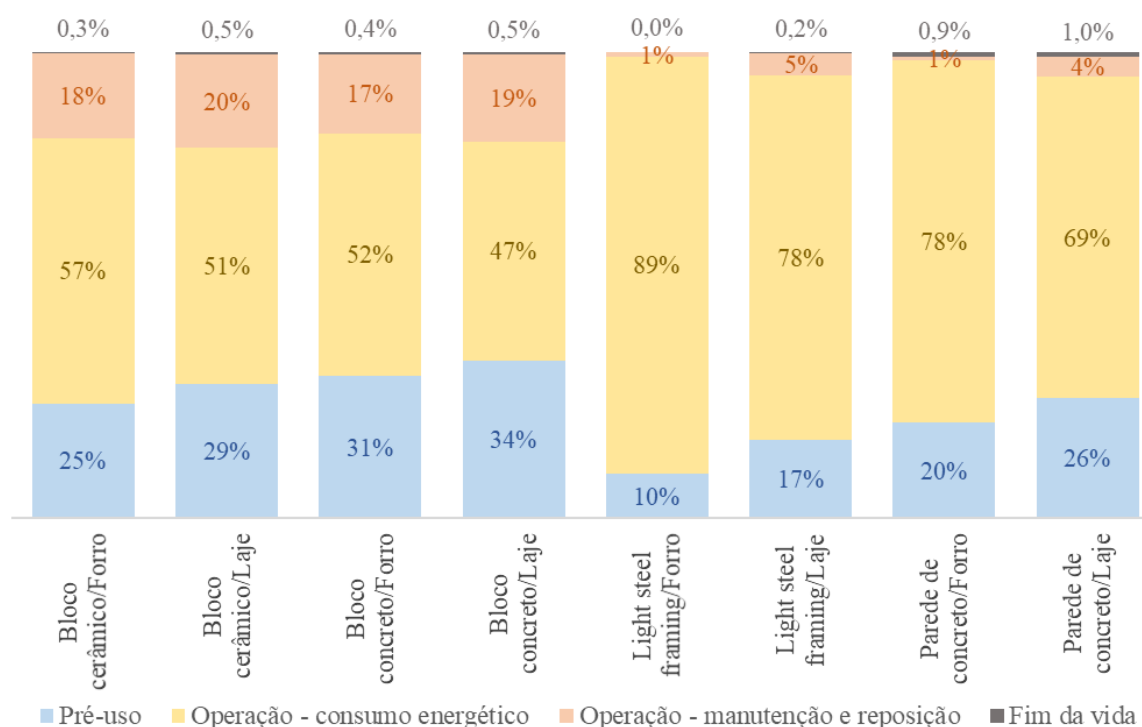


Figura 50 – Percentual de contribuição de cada fase do ciclo de vida para a emissão de gases do efeito estufa.



Para o consumo de energia primária, a fase de operação foi a mais influente para todos os casos analisados. Esse resultado está relacionado ao consumo energético, que representou, em média, 93% de toda a energia primária do ciclo de vida.

O caso que apresentou o maior valor foi o conjunto de parede de *light steel framing* com forro de madeira quando considerado na cidade do Rio de Janeiro, com um total de 97,6%. A menor contribuição foi para o conjunto de parede de bloco cerâmico com laje maciça quando considerada a temperatura limite de início do resfriamento de 26°C, representando 89,3% de todo o valor do ciclo de vida.

O valor total da energia embutida, para todas as fases do ciclo de vida, variou de 2,4% a 10,7%. Entretanto, é necessário ressaltar que não foram considerados todos os sistemas construtivos da edificação, somente as paredes e a cobertura. A fase de pré-uso variou de 2% a 8%, estando dentro dos limites encontrados por Dixit (2017), que cita a variação entre 0,2% e 37%. De modo geral, a manutenção e reposição dos materiais apresentou pouca influência, variando de 0,2% a 2,7%. O conjunto de parede de concreto com o uso de laje maciça foi o que apresentou o menor valor.

A fase de fim da vida, que considera somente o transporte dos materiais da edificação para o aterro, foi a que apresentou a menor contribuição, variando de 0,01% a 0,46%. Dessa forma, essa fase pode ser considerada desprezível para a ACVE desenvolvida.

Para a emissão de gases do efeito estufa, a fase de operação também foi a mais representativa, entretanto, o consumo energético variou de 44,6% a 91,8%, apresentando média de 66%, inferior ao resultado encontrado para a energia primária.

O conjunto com a maior contribuição relacionada ao consumo energético durante a fase de operação foi o mesmo para as duas categorias de impacto. Entretanto, o de menor valor variou, com o conjunto de parede de bloco de concreto com laje maciça representando a menor influência para o CO₂eq.

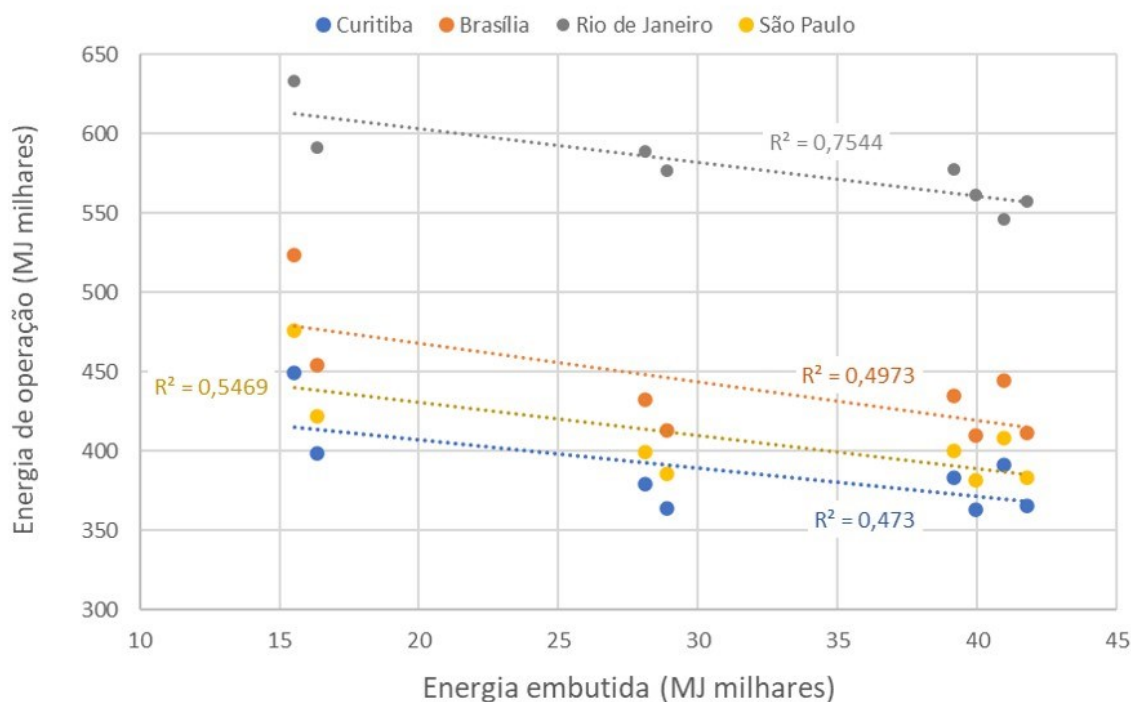
A manutenção e reposição dos materiais apresentou valor mais significativo para o CO₂eq. Os resultados variaram de 0,5% até 21,0%. O fim da vida útil também não apresentou influência significativa para o ciclo de vida de CO₂eq.

O resultado obtido com a identificação das questões significativas reforçou a variação da influência de cada fase do ciclo de vida para as duas categorias de impacto analisadas. Como as duas apresentam comportamento independente entre si, é fundamental analisá-las de forma conjunta para escolha dos casos com menor impacto ambiental.

Caldas et al. (2016) obtiveram o mesmo resultado diverso entre as categorias ao analisar quatro sistemas de fachadas semelhantes aos que foram considerados neste estudo. A variação entre as ACVE e a ACVCO₂eq não permitiu a conclusão de um sistema com menor potencial de impacto por m².

Para a ACVE também foi analisada a relação da energia embutida com a energia de operação. A Figura 51 apresenta o resultado da análise.

Figura 51 – Correlação da energia embutida com a energia de operação.



O resultado foi considerado separadamente para cada zona bioclimática. Observou-se uma relação linear entre a energia embutida e a energia de operação para todas as cidades, indicando, para os casos analisados, que o aumento da energia embutida levou à redução do consumo de energia operacional.

Esta tendência de aumento da energia embutida e diminuição da energia operacional também foi identificada por Sartori e Hestnes (2007) e Chastas, Theodosiou e Bikas (2016).

4.2.2.2. Conclusões, limitações e recomendações

O objetivo principal da ACVE desenvolvida é comparar o consumo de energia primária do ciclo de vida de uma habitação de interesse social com o uso de diferentes envoltórias.

A principal limitação do estudo é a inexistência de um banco de dados padronizado voltado para a realidade brasileira com as informações de energia e emissão de gases do efeito estufa embutidos. Ressalta-se que os valores utilizados foram definidos por meio de revisão da literatura, considerando somente valores definidos por meio do método híbrido. Entretanto, diferentes fontes podem apresentar valores distintos, alterando os resultados obtidos.

O processo de avaliação do ciclo de vida é iterativo, e alguns estudos para validação do método precisam ser desenvolvidos. A análise de sensibilidade para as categorias de impacto apresentou resultados distintos entre a emissão de gases do efeito estufa e a energia primária. Com isso, a ACVCO_{2eq} foi inserida na análise.

Para as categorias de impacto, a parede de concreto moldado *in loco* foi a que apresentou o menor valor. Este resultado foi o mesmo obtido por Caldas et al. (2016). Entretanto, a cobertura variou entre as categorias, com a laje apresentando menor impacto para a energia primária e o forro o menor valor para a emissão de gases do efeito estufa.

A análise de sensibilidade resultou em grande variação dos resultados com a consideração ou não do uso de aparelhos de ar-condicionado para refrigeração. Com isso, ressalta-se que a avaliação desenvolvida considera o uso de sistema de refrigeração artificial em toda a fase de operação da edificação.

A análise de contribuição e a identificação das questões significativas apresentaram destaque para o consumo energético durante a fase de operação. Entretanto, os resultados variaram bastante entre as duas categorias de impacto. Para a ACVE, a menor contribuição do consumo energético foi de 90%. No entanto, para a ACVCO_{2eq} o maior valor foi de 89%.

Em relação aos materiais, o Quadro 7 apresenta aos principais destaques para cada sistema construtivo.

Quadro 7 – Materiais de maior influência para cada sistema construtivo por categoria de impacto.

Sistema	ACVE	ACVCO _{2eq}
Forro de madeira	Madeira	Madeira/verniz
Laje maciça	Aço	Aço
Parede <i>light steel framing</i>	Aço	Aço
Prede de bloco cerâmico	Bloco cerâmico	Cal hidratada
Prede de bloco de concreto	Bloco concreto	Cal hidratada
Parede de concreto moldado <i>in loco</i>	Cimento	Cimento

Para os sistemas de laje, parede de *light steel framing* e parede de concreto moldado *in loco* os materiais com maior contribuição foram os mesmos entre as categorias de impacto. Entretanto, os outros sistemas apresentaram materiais distintos. Para as emissões de gases do

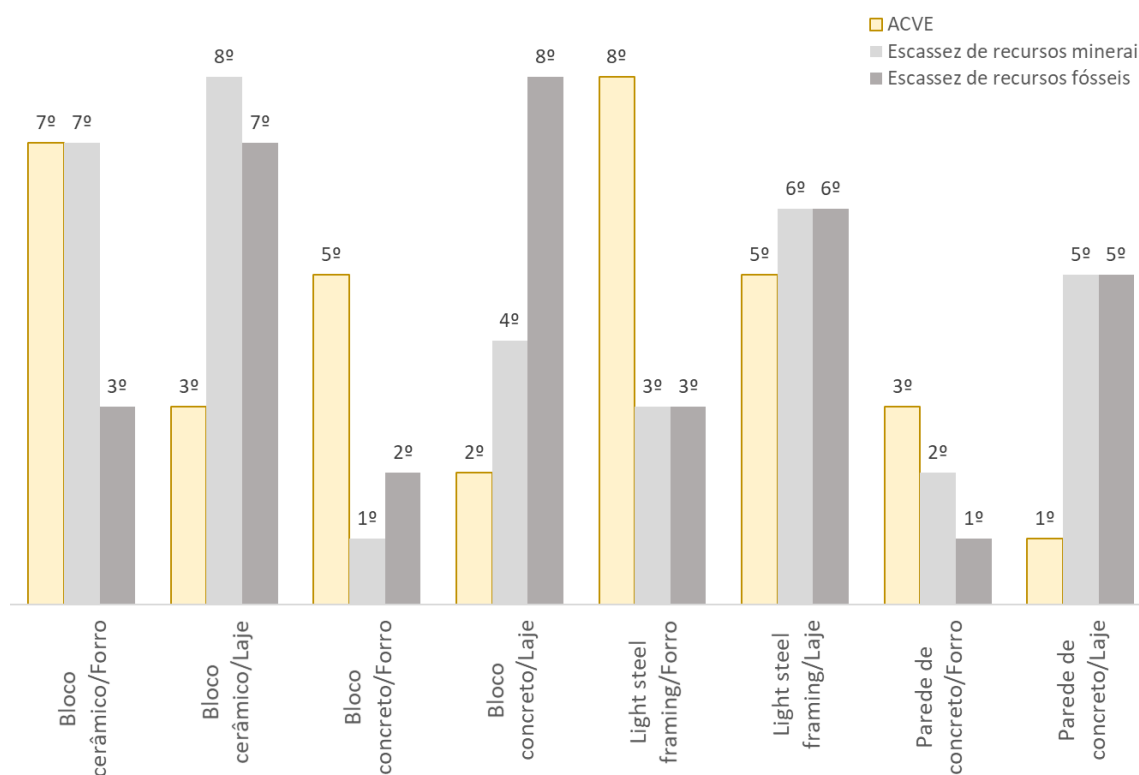
efeito estufa, os dois materiais do forro de madeira apresentaram o mesmo percentual de contribuição.

A consideração da ACVE em conjunto com a ACVCO₂eq não permitiu definir um conjunto com menor potencial de impacto, visto que os resultados foram divergentes. Entretanto, para as duas categorias, a parede de concreto moldado *in loco* foi a que obteve menor valor.

4.3. Comparação da ACV, ACVE e ACVCO₂eq

Para comparação da ACV, ACVE e ACVCO₂eq como técnicas de tomada de decisão, inicialmente, as posições dos diferentes casos analisados para as categorias de impacto da ACV foram comparadas com o valor obtido para a ACVE e a ACVCO₂eq. Para isso, as categorias de impacto da ACV foram analisadas de forma agrupada conforme a categoria de dano à qual pertencem. A Figura 52 apresenta o grupo da categoria de dano de recursos em relação à ACVE.

Figura 52 – Comparação da ACVE com a categoria de dano de recursos.



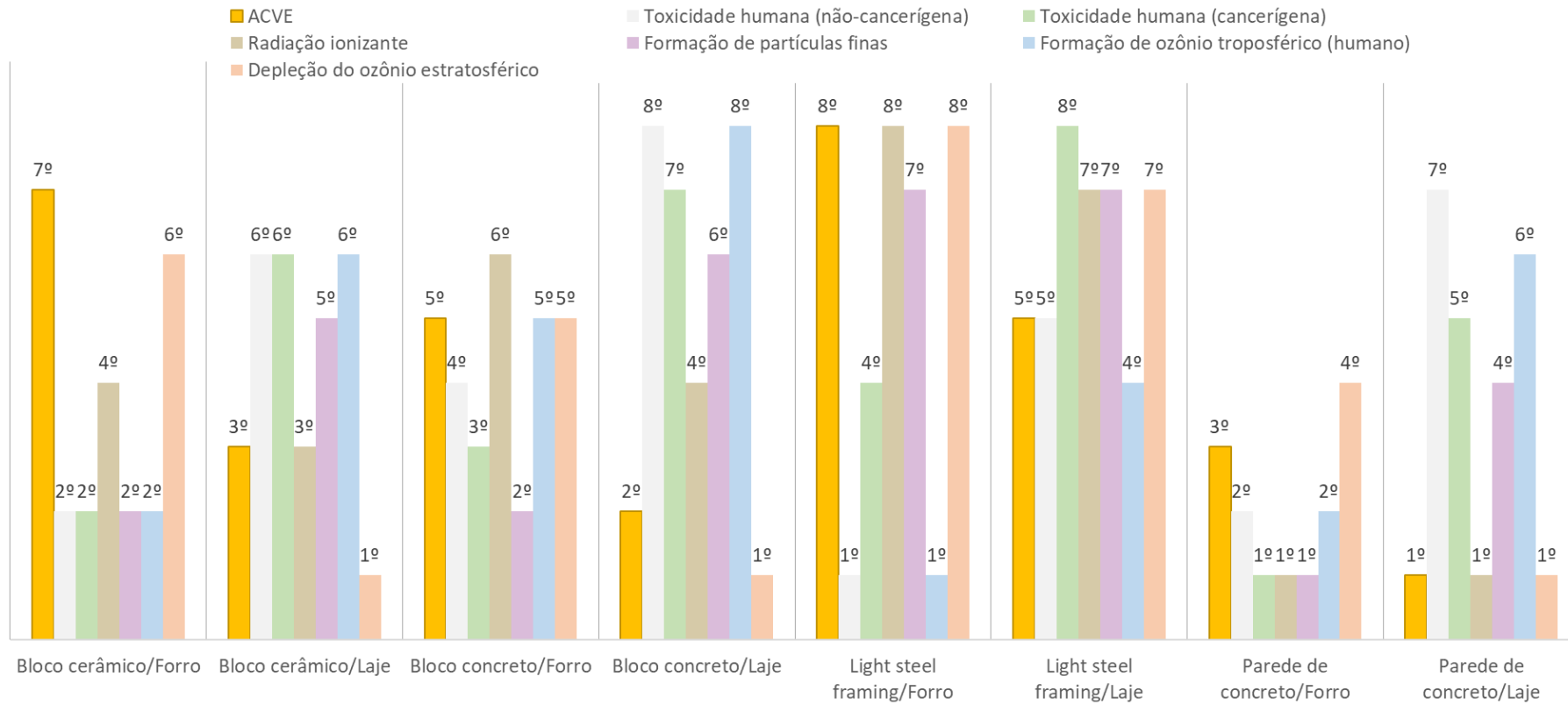
A categoria de dano de recursos está relacionada com a concentração do material no mundo e também com a extração futura esperada (HUIJBREGTS, 2017). As categorias de impacto de escassez de recursos minerais e fósseis apresentaram resultados diversos entre si e também em relação à energia primária.

Os resultados obtidos confirmam que o consumo de energia primária, considerado pela técnica da ACVE, não engloba, de forma direta ou indireta, a escassez dos materiais utilizados para a construção da edificação. O conjunto de parede de concreto com laje representou o menor valor de impacto para ACVE, entretanto, foi o quinto com maior impacto para as duas categorias de escassez de recursos.

O uso da laje maciça representou redução do impacto para a ACVE. Entretanto, para a escassez de recursos, devido aos materiais utilizados para sua construção, o uso da laje aumentou o potencial de impacto de forma significativa.

A Figura 53 apresenta a comparação da categoria de dano de saúde humana com a ACVE. Essa categoria de dano representa os anos de vida perdidos na população humana em decorrência dos impactos considerados (HUIJBREGTS, 2017).

Figura 53 – Comparação da ACVE com a categoria de dano de saúde humana.



Apesar das categorias de impacto de aquecimento global, uso de água e formação de ozônio troposférico (ecossistema) também pertencerem à categoria de dano de saúde humana, elas foram consideradas somente para a categoria de dano do ecossistema.

Para as categorias de impacto de depleção do ozônio estratosférico e radiação ionizante, os casos de menor e de maior impacto potencial coincidiram com os obtidos por meio da ACVE. Entretanto, para os outros conjuntos analisados não foi observada equivalência. Apesar disso, obteve-se semelhança na redução do impacto para o uso de laje.

Em relação às categorias de toxicidade humana (não-cancerígena) e formação de ozônio troposférico, o conjunto de parede de *light steel framing* e forro de madeira foi o que apresentou menor potencial de impacto, sendo este o conjunto com maior impacto para a ACVE. Além disso, o uso do tipo de cobertura apresentou relação inversa entre essas categorias da ACV e a energia primária. Com isso, apesar de algumas semelhanças observadas, não foi possível definir relação entre a energia primária e a categoria de dano de saúde humana.

As Figuras 54 e 55 apresentam a comparação da ACVE com a categoria de dano do ecossistema. Essa categoria representa o número de espécies perdidas ao longo do tempo em decorrência das categorias de impacto consideradas (HUIJBREGTS, 2017).

Os casos de maior e menor impacto para as categorias de uso de água e transformação/ocupação da terra foram os mesmos obtidos para a ACVE. Essas categorias também foram as únicas do dano ao ecossistema que tiveram o aumento do impacto com o uso do forro. Entretanto, os demais conjuntos analisados não apresentaram semelhança com a ACVE nessas categorias para a ordem de classificação do impacto.

Figura 54 – Comparação da ACVE com a categoria de dano do ecossistema – Parte 1.

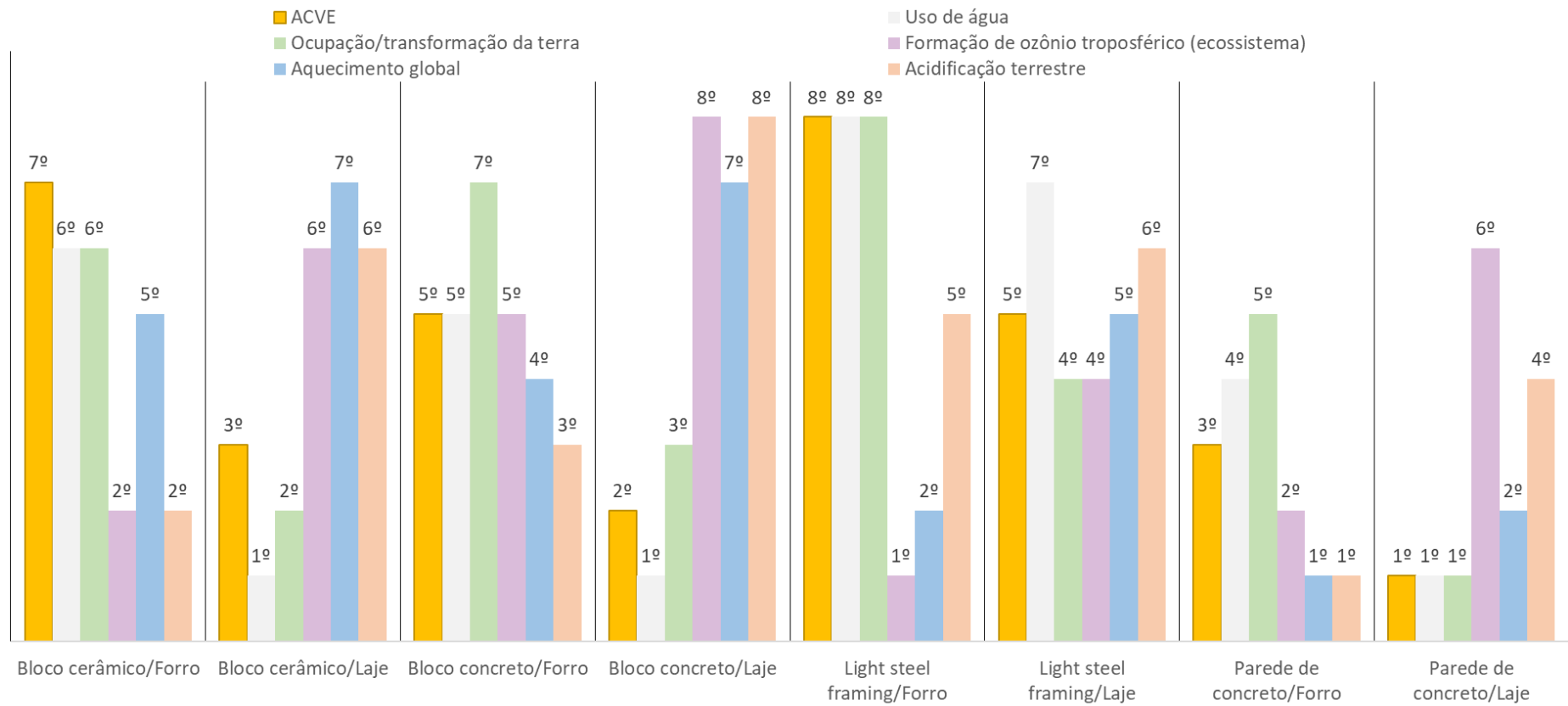
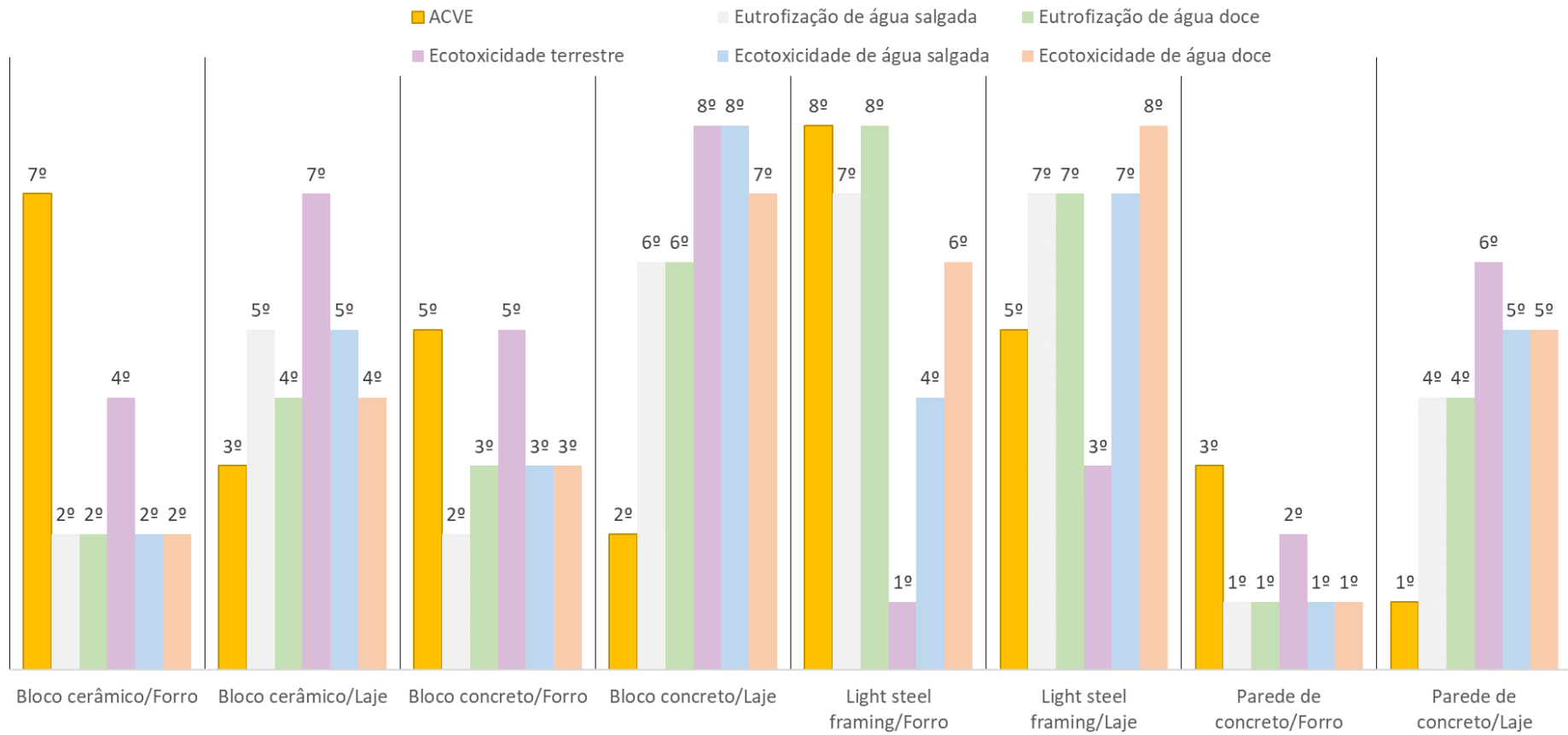
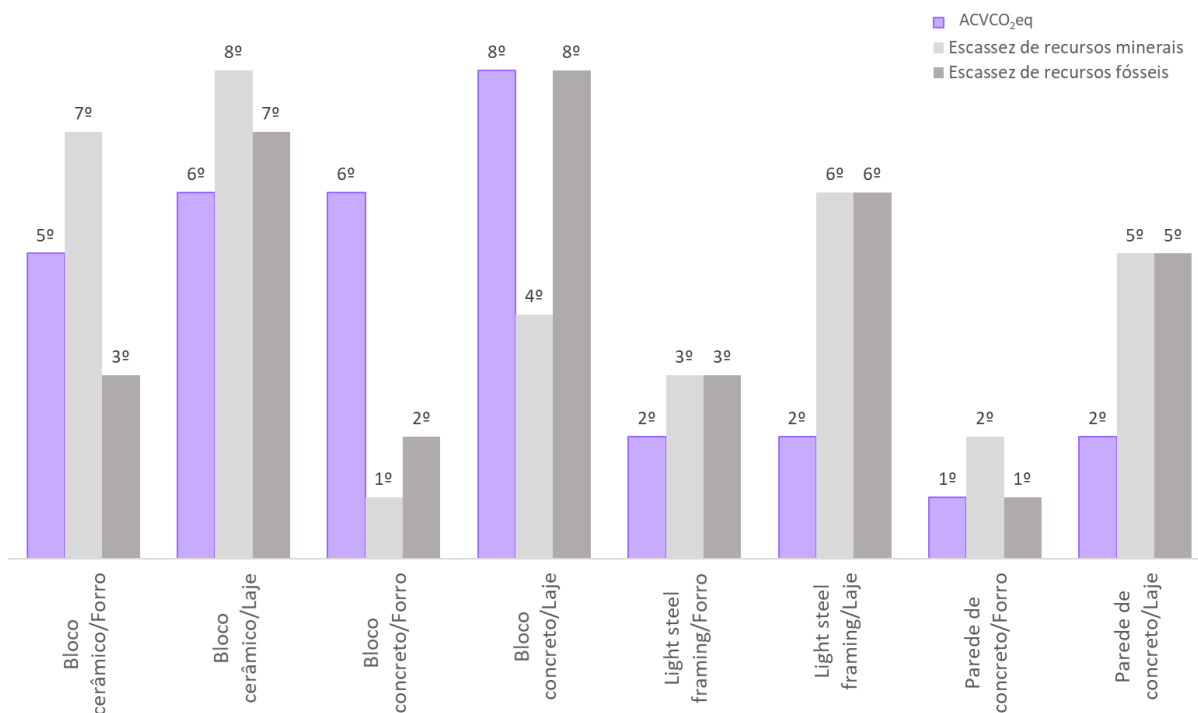


Figura 55 – Comparação da ACVE com a categoria de dano do ecossistema – Parte 2.



Em relação à emissão de gases do efeito estufa, a Figura 56 apresenta a comparação com a categoria de dano de recursos. As demais categorias estão apresentadas no Apêndice G.

Figura 56 - Comparação da ACVCO₂eq com a categoria de dano de recursos.



Os conjuntos de maior e menor impacto foram os mesmos para a emissão de gases do efeito estufa e para a categoria de impacto de recursos fósseis. Entretanto, os casos intermediários variaram a posição.

Ao contrário do resultado obtido para a ACVE, o uso de laje maciça representou aumento do impacto potencial para as três categorias, com menor intensidade para a emissão de gases do efeito estufa.

De modo geral, para a categoria de dano de saúde humana, a radiação ionizante e a depleção do ozônio estratosférico foram as categorias de impacto que apresentaram maior variação em relação à emissão de gases do efeito estufa. Essas duas categorias foram as que apresentaram mais similaridade com a ACVE, reforçando a necessidade de consideração de ACVE e ACVCO₂eq de forma conjunta.

Para a categoria de dano do ecossistema, as categorias de impacto de uso de água e ocupação/transformação da terra foram as que apresentaram maior diferença em comparação com a ACVCO_{2eq}.

Conforme os resultados apresentados, considerando a posição relativa de cada caso analisado, o Quadro 8 expõe quais das técnicas (ACVE ou ACVCO_{2eq}) obtiveram maior similaridade com cada categoria de impacto da ACV.

Quadro 8 – Relação de similaridade entre as categorias de impacto da ACV e as técnicas de ACVE e ACVCO_{2eq}.

Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Categorias de Dano (<i>endpoint</i>)		
	Saúde humana	Ecossistema	Recursos
Formação de partículas finas	ACVCO _{2eq}		
Radiação ionizante	ACVE		
Depleção do ozônio estratosférico	ACVE		
Toxicidade humana (cancerígena)	ACVCO _{2eq}		
Toxicidade humana (não-cancerígena)			
Formação de ozônio troposférico (humano)			
Aquecimento global	ACVCO _{2eq}	ACVCO _{2eq}	
Uso de água	ACVE	ACVE	
Formação de ozônio troposférico (ecossistema)			
Ecotoxicidade de água doce		ACVCO _{2eq}	
Eutrofização de água doce		ACVCO _{2eq}	
Ecotoxicidade terrestre			
Acidificação terrestre		ACVCO _{2eq}	
Ocupação/transformação da terra			
Ecotoxicidade de água salgada		ACVCO _{2eq}	
Eutrofização de água salgada		ACVCO _{2eq}	
Escassez de recursos minerais			
Escassez de recursos fósseis			ACVCO _{2eq}

A análise de contribuição desenvolvida para as duas técnicas permitiu identificar os elementos e os materiais que apresentaram maior influência no valor de impacto final de cada caso.

Para a ACV, os sistemas de parede e cobertura, o consumo energético e o transporte apresentaram grande variação no percentual de contribuição conforme a categoria de impacto considerada. Entretanto, de modo geral, o consumo energético se destacou. Para a ACVE, apesar da variação entre a energia primária e a emissão de gases do efeito estufa, o consumo energético durante a fase de operação também apresentou o maior percentual de contribuição.

Para a análise dos materiais de maior influência, foram considerados os sistemas de cobertura e parede individualmente. O Quadro 9 apresenta o resumo dos materiais de destaque de cada sistema para as três técnicas analisadas.

Quadro 9 – Comparação do material de maior contribuição de cada sistema construtivo para cada técnica aplicada.

Sistema	ACV	ACVE	ACVCO _{2eq}
Forro de madeira	Madeira	Madeira	Madeira/verniz
Laje maciça	Aço	Aço	Aço
Parede <i>light steel framing</i>	Placa cimentícia	Aço	Aço
Prede de bloco cerâmico	Bloco cerâmico/ Cal hidratada	Bloco cerâmico	Cal hidratada
Prede de bloco de concreto	Bloco de concreto/ Cal hidratada	Bloco concreto	Cal hidratada
Parede de concreto moldado <i>in loco</i>	Cimento	Cimento	Cimento

O resultado encontrado para a análise de contribuição dos materiais foi similar entre as três técnicas. Entretanto, para a parede de *light steel framing*, o material de maior influência da ACV não foi o mesmo obtido por meio da ACVE e da ACVCO_{2eq}.

Ressalta-se que, para as paredes de bloco cerâmico e bloco de concreto o destaque obtido para a cal hidratada só foi identificado por meio da consideração da emissão dos gases de efeito estufa. Caso a análise fosse feita somente para a energia primária, esse material não seria tão representativo.

Da mesma forma, a contribuição do transporte apresentou padrões diferentes entre as três técnicas. Para a ACV e ACVCO_{2eq}, seu impacto foi significativo, apresentando valores de até 65%. Entretanto, para a ACVE, seu maior valor de contribuição foi de 3%.

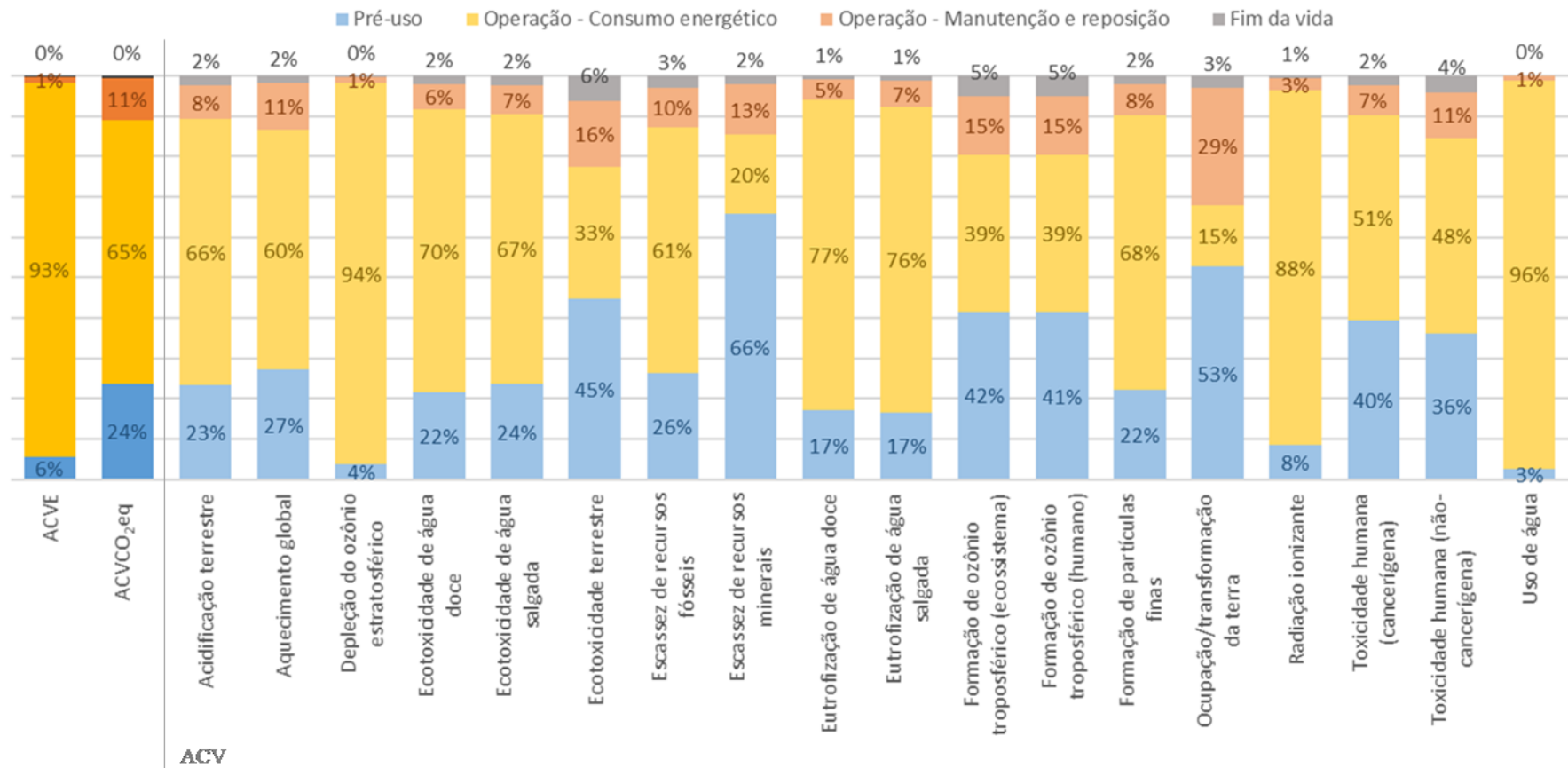
Para facilitar o entendimento das variações encontradas para cada categoria de impacto, a Figura 57 apresenta as médias de contribuição para cada fase do ciclo de vida de cada categoria

de impacto. Tanto para a ACVE como para a ACVCO₂eq o consumo energético durante a fase de operação representou a maior média de contribuição. No entanto, entre as duas categorias houve grande diferença do valor percentual, sendo 93% para a energia primária e 65% para a emissão de gases do efeito estufa.

Para a ACV, as categorias de depleção do ozônio estratosférico, radiação ionizante e uso de água foram as que apresentaram as médias de contribuição por fase do ciclo de vida mais próximas da ACVE. Essas foram as categorias identificadas anteriormente com o resultado mais semelhante com a energia primária.

As demais categorias apresentaram resultado mais próximo ao encontrado pela emissão de gases do efeito estufa. Entretanto, ressalta-se que as categorias de ecotoxicidade terrestre, escassez dos recursos minerais, formação de ozônio troposférico (ecossistema e humano), ocupação/transformação da terra e toxicidade humana (não-cancerígena) obtiveram resultados diferentes do encontrado tanto para a ACVE como para a ACVCO₂eq. Essas categorias apresentaram a maior contribuição do impacto durante a fase de pré-uso, relacionada à produção dos materiais da edificação.

Figura 57 – Comparação das médias de contribuição por fase do ciclo de vida para as 18 categorias de impacto da ACV, a ACVE e a ACVCO₂eq.



Por fim, para a ACV, o conjunto que apresentou o menor potencial de impacto com maior frequência entre as categorias foi o de parede de concreto moldado *in loco* com o uso de forro de madeira. Para a ACVCO₂eq, esse também foi o conjunto de menor impacto. Entretanto, para a ACVE, o conjunto de menor consumo de energia primária ao longo de todo o ciclo de vida foi o de parede de concreto moldado *in loco* com laje maciça.

O conjunto que apresentou tendência de maior impacto potencial para a ACV foi o de parede de bloco de concreto com o uso de laje. Esse foi o mesmo conjunto obtido para a emissão de gases do efeito estufa. Entretanto, para a ACVE o conjunto que apresentou o maior impacto foi o mesmo que obteve o maior consumo energético durante a fase de operação, composto pela parede de *light steel framing* e forro de madeira.

A comparação dos resultados obtidos por meio da aplicação das técnicas de ACV, ACVE e ACVCO₂eq destacou as diferenças de resultados encontrados para cada uma delas. As principais tendências mostraram maior proximidade dos resultados da emissão dos gases do efeito estufa com a ACV do que o consumo de energia primária. Entretanto, os três métodos não podem ser considerados equivalentes.

Ressalta-se, ainda, que a ACVE apresentou tendência a favorecer a escolha dos casos que obtiveram menor consumo de energia de operação, enquanto a ACVCO₂eq apresentou maior equilíbrio entre o impacto do consumo energético e dos materiais utilizados.

Com isso, conclui-se que, apesar da facilidade de aplicação, a ACVE não deve ser utilizada como técnica de decisão para escolha de envoltórias com menor impacto ambiental, visto que seus resultados não representam a complexidade de impactos oriundos do ciclo de vida de uma habitação.

5. Conclusões

Este estudo avaliou a ACV e a ACVE e a ACVCO₂eq como técnicas de tomada de decisão para a escolha dos sistemas construtivos da envoltória de uma habitação de interesse social com o menor impacto ambiental. O projeto analisado considerou uma edificação de 41,16m² com vida útil de 40 anos localizada na cidade de São Paulo, ocupada por quatro moradores com o uso de aparelhos de ar-condicionado para resfriamento ao longo de toda sua operação.

A comparação entre as três técnicas permitiu identificar as principais tendências de cada uma. De modo geral, a ACVE tende a favorecer os casos que apresentam menor consumo de energia durante a fase de operação da edificação. A consideração da emissão dos gases do efeito estufa apresentou menor sensibilidade ao impacto do consumo de energia, apresentando resultados mais próximos aos encontrados para a ACV.

Dentre os sistemas construtivos considerados neste estudo, a parede de concreto moldada *in loco* apresentou o menor valor de impacto para as três técnicas, considerando a mesma importância para todas as categorias de impacto consideradas para a ACV. Em relação à cobertura, para a ACV e a ACVCO₂eq o forro de madeira obteve o menor valor de impacto ao longo de todo o ciclo de vida. No entanto, para a ACVE o uso da laje maciça apresentou redução do consumo de energia primária, devido principalmente à redução do consumo energético durante a fase de operação.

Ressalta-se que, devido à não exigência de equivalência no desempenho térmico dos casos analisados para desenvolvimento dos estudos de ACV, os sistemas não foram avaliados em relação ao cumprimento das condições mínimas de desempenho térmico estabelecidas pela ABNT NBR 15575-1. Caso essa condição fosse aplicada, o sistema definido com o uso de parede de *light steel framing* deveria ser considerado com isolamento das paredes e coberturas. Essa medida reduziria o consumo energético desse sistema ao longo da fase de operação. Entretanto, haveria aumento do impacto embutido devido à adição de novos materiais.

Em relação à contribuição de cada fase do ciclo de vida da edificação, a energia consumida durante a fase de operação apresentou destaque para as três técnicas. Entretanto, os percentuais de contribuição variaram de forma significativa entre as diferentes categorias de impacto da ACV. Destaca-se, também, que não foram considerados todos os sistemas da edificação, intensificando a diferença de impacto entre o consumo energético e os materiais utilizados. O

transporte considerado em todas as fases do ciclo de vida apresentou valor significativo, não podendo ser desconsiderado.

Para a ACVE, foi avaliada a consideração conjunta da categoria de impacto de gases do efeito estufa. A energia primária e o CO₂eq apresentaram resultados distintos entre si, não sendo possível definir um caso de menor impacto. Com isso, torna-se fundamental a consideração dessas categorias em conjunto quando há interesse em avaliar o impacto do ciclo de vida de habitações, visto que seus resultados se mostraram independentes entre si. Além disso, é necessário avaliar a necessidade da consideração de outras categorias de impacto, como a pegada hídrica, quando são utilizadas técnicas simplificadas para avaliação do ciclo de vida de edificações.

Com isso, conclui-se que a ACV, a ACVE e a ACVCO₂eq não podem ser utilizadas de forma equivalente para definição da envoltória de uma HIS de menor impacto ambiental a ser construída no Brasil. Destaca-se que ainda é necessário encontrar um equilíbrio entre a simplificação das técnicas e a precisão dos resultados obtidos para a definição de projetos de habitação com menor impacto ambiental.

Além disso, torna-se necessário o entendimento dos resultados obtidos por meio da aplicação de cada técnica para que suas conclusões sejam condizentes com o objetivo do estudo. Dessa forma, ressalta-se que a ACVE não pode ser considerada como uma técnica para avaliar o impacto ambiental de habitações de interesse social, e que sua aplicação avalia especificamente o fluxo de energia no ciclo de vida.

5.1. Limitações do trabalho

Os objetivos definidos para o trabalho foram alcançados. Contudo, algumas limitações foram encontradas e estão listadas a seguir.

Origem dos dados: apesar do método de ACV ser definido por meio da ISO NBR 14040, a inexistência de um banco de dados padronizado para os três métodos utilizados que considere a realidade brasileira pode acarretar em diferentes conclusões, principalmente para os métodos de ACVE e ACVCO₂eq.

Amostragem: É importante ressaltar que complexidade e forma de apresentação dos resultados por meio da ACV limita o número de variantes da tipologia da edificação e dos materiais analisados, visto que seus resultados são apresentados em múltiplos valores e não podem ser aglomerados. Com isso, a consideração de um número elevado de casos pode resultar na impossibilidade de conclusão da ACV.

Falta de padronização: A simulação computacional desenvolvida não apresenta um método único de modelagem, e pode apresentar variações nos resultados obtidos conforme o padrão definido. Devido à relevância do consumo de energia durante a fase operacional, resultados diversos da simulação computacional podem acarretar alterações nas conclusões dos três métodos de avaliação do ciclo de vida considerados.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

São sugeridos outros possíveis temas para discussão de trabalhos futuros:

- Avaliação do ciclo de vida: sugere-se o desenvolvimento da ACV para diferentes tipologias de edificações, analisando as tendências obtidas com os principais materiais utilizados para a construção no Brasil;
- Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de gases do efeito estufa: recomenda-se a consideração de outras categorias de impacto, como a pegada hídrica e ecológica, para comparação dos resultados obtidos com a ACV;
- Avaliação do ciclo de vida energético: sugere-se a comparação dos resultados obtidos com os três métodos utilizados para a estimativa da energia embutida (ACV baseada em processos, ACV baseada em entrada-saída econômica e ACV híbrida) e a análise da sua proximidade com resultados obtidos por meio da ACV;
- Para as três técnicas de avaliação do ciclo de vida, sugere-se o desenvolvimento da análise de sensibilidade utilizando outras variáveis além daquelas consideradas nesse estudo, como a variação da distância de distribuição e do processo de fabricação dos materiais;
- Sistemas construtivos: recomenda-se o desenvolvimento do estudo comparando as variações dos resultados obtidos entre as três técnicas de avaliação do ciclo de vida aplicando alterações nos sistemas considerados, como o uso do isolamento na cobertura e na parede para os conjuntos com parede de *light steel framing*;

- Operação da edificação: indica-se a variação do método de estimativa da energia consumida durante a operação da edificação, considerando alterações tecnológicas, do clima e da matriz energética brasileira ao longo do tempo de vida útil da edificação;
- Desenvolvimento de dados: indica-se a padronização e ampliação dos dados utilizados para os três métodos estudados por meio da criação de um banco de dados voltado para a realidade brasileira.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ANSI (Approved American National Standard), 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2**: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte2: Parâmetros de conforto térmico. 01 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:2009**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:2009**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 46 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 01 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. 04 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a. 71 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. 04 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b. 63 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. 04 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013c. 73 p.
- AZARI, Rahman; ABBASABADI, Narjes. Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. **Energy and Buildings**, v. 168, p.225-235, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.003>.
- BERNARDES, Marina et al. Comparativo econômico da aplicação do Sistema Light Steel Framing em habitação de interesse social. **Revista de Arquitetura da IMED**, Passo Fundo, v. 1, n. 1, p. 31-40, jun. 2012.
- BRANDÃO, Raphael Pinto; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolônio; DURANTE, Luciane Cleonice. Habitações vernaculares e de interesse social contemporâneas: investigação sobre a

qualidade ambiental e sustentabilidade dos sistemas construtivos: investigação sobre a qualidade ambiental e sustentabilidade dos sistemas construtivos. **GeoAraguaia**, Barra do Garças, v. 9, n. 1, p. 106-131, abr. 2019.

- BRE, Building Research Establishment. **Assessing the environmental impacts of construction**: Understanding European Standards and their implications. Reino Unido: BRE Trust, 2016.
- BUENO, Cristiane; HAUSCHILD, Michael Zwicky; ROSSIGNOLO, João Adriano; OMETTO, Aldo Roberto; MENDES, Natália Crespo. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. : a case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208-2220, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.006>.
- CABEZA, Luisa F.; RINCÓN, Lúdia; VILARIÑO, Virginia; PÉREZ, Gabriel; CASTELL, Albert. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394-416, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.
- CALDAS, Lucas Rosse; LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro; MELO, Pedro Corrêa de; SPOSTO, Rosa Maria. Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasília: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 71-85, jul. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300163>.
- CALDAS, Lucas Rosse; LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro; SPOSTO, Rosa Maria. Avaliação do Ciclo de Vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. **Lalca**: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, Brasília, v. 1, n. 1, p. 138-167, 18 jul. 2017. IBICT. <http://dx.doi.org/10.18225/lalca.v1i1>.
- CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria; PIRES, Armando Caldeira; PAULSEN, Jacob Silva. Sustentabilidade na Construção Civil. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 7, n. 2, p.238-256, 23 nov. 2016. Editora de Livros IABS. <http://dx.doi.org/10.18472/sustdeb.v7n2.2016.15913>.
- CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios em alvenaria estrutural**. Publicação do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – NEPAE. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.
- CAMPOS, Érica Ferraz de. **Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia**: o caso da exploração convencional. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

- CARRARO, C. L.; DIAS, J. F. Diretrizes para prevenção de manifestações patológicas em Habitações de Interesse Social. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 125-139, abr./jun. 2014.
- CHASTAS, Panagiotis; THEODOSIOU, Theodoros; BIKAS, Dimitrios. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: a literature review. **Building And Environment**, v. 105, p. 267-282, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040>.
- CHAU, C.k.; LEUNG, T.m.; NG, W.y.. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, [s.l.], v. 143, p.395-413, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>.
- COLTRO, Leda; GARCIA, Eloísa E. C.; QUEIROZ, Guilherme de C.. Life cycle inventory for electric energy system in Brazil. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 290-296, set. 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02978921>.
- CRAWFORD, Robert H.. **Post-occupancy life cycle energy assessment of a residential building in Australia**. **Architectural Science Review**, v. 57, n. 2, p.114-124, 2 ago. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2013.819556>.
- DIXIT, Manish K.. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 79, p.390-413, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>.
- DULAC, John; ABERGEL, Thibaut; DELMASTRO, Chiara. **Tracking Buildings**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/building-envelopes#abstract>>. Acesso em: 19 jan. 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia (Brasil). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional: BEN 2021**. Brasília: EPE, 2021. 77 p.
- FERREIRA, Camila Carvalho. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575, para as diversas zonas bioclimáticas. In: XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012. **Anais**. Juiz de Fora: ENTAC, 2012. p. 3590-3595.
- GHISI, Eneidir; VIEIRA, Abel Silva; ROSA, Aline Schaefer da; MARINOSKI, Ana Kelly; SILVA, Arthur Santos; BALVEDI, Bruna Faitão; ALMEIDA, Laiane Susan Silva. **Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social: Volume 1— Hábitos e indicadores de consumo de água e energia**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LABEEE, 2015. 82 p.

- GRAF, Helena Fernanda. **Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12721**. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- HUMBERT, Sébastien ; SCHRYVER, An De; BENGGOA, Xavier; MARGNI, Manuele; JOLLIET, Olivier. **IMPACT 2002+**: User guide. Quantis, 2012. 40 p.
- HUIJBREGTS. Ministry Of Health. **ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization**. Bilthoven: National Institute For Public Health And The Environment, 2017.
- IEA, International Energy Agency. **Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential**. 2019a. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/buildings>>. Acesso em: 19 jan. 2020.
- IEA. International Energy Agency. **Building envelopes**. 2019b. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/building-envelopes>>. Acesso em: 19 jan. 2020.
- ISLAM, Samantha; PONNAMBALAM, S.g.; LAM, Hon Loong. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. **Journal of Cleaner Production**, Malaysia, n. 136, p.266-278, maio 2016.
- MENEZES, Juliana; TIBIRIÇÁ, Antônio; CARVALHO, Aline; MURAT, Melissa; HOSKEN, Carlos. Uso da NBR 15575: 2013 na avaliação técnico-construtiva de um conjunto habitacional do programa minha casa minha vida. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 2197-2205, 11 nov. 2014. Marketing Aumentado. <http://dx.doi.org/10.17012/entac2014.538>.
- MONCASTER, A.M.; SYMONS, K.E.. A method and tool for ‘cradle to grave’ embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards. **Energy and Buildings**, Cambridge, v. 66, p.514-523, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.046>.
- MONTES, María Andrea Triana. **Abordagem Integrada no Ciclo de Vida de Habitações de Interesse Social considerando Mudanças Climáticas**. 2016. 573 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- MORAGA, Gustavo; BALDAUF, Juliana; KIRCHHEIM, Ana Paula; PASSUELLO, Ana Paula. Avaliação do ciclo de vida de paredes de blocos de concreto para empreendimentos habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida. **V CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA**, Fortaleza, 2016. p. 2-7. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/307601462>. Acesso em: 15 maio 2021.

- OEDKOOP, Mark et al. **ReCiPe 2008**: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Holanda: Ruimte em Milieu, 2013. 126 p.
- PALACIO, Cristian David Uribe. **Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico**: estudo de caso com utilização do light steel frame no entorno do df. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- PAULSEN, Jacob Silva; SPOSTO, Rosa Maria. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, Brasil, v. 57, p.95-102, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.014>.
- RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K.k. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p.1592-1600, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>.
- RODRIGUES, Thiago T.; OLIVEIRA, Carla de; CARLO, Joyce. Níveis de eficiência da envoltória de unidades habitacionais do programa minha casa minha vida em zonas bioclimáticas de 5 a 8. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2015, Campinas. **Anais**. Campinas: ENCAC/ELACAC, 2015. p. 1-10.
- SAADE, Marcella Ruschi Mendes; SILVA, Maristela G. da; GOMES, Vanessa; FRANCO, Hawllynsgton Gumez; SCHWAMBACK, Dimaghi; LAVOR, Blandina. Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. **Smart And Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 54-71, maio 2014. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/sasbe-04-2013-0024>.
- SARTORI, I.; HESTNES, A.g.. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, Trondheim, v. 39, n. 3, p.249-257, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.
- SILVA, Adriana Terezinha da et al. Parâmetros de sustentabilidade e empreendimentos de habitação de interesse social. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 1., 2010, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: CHIS, 2010. p. 1-7.
- SOUZA, Danielle Maia de; LAFONTAINE, Mia; CHARRON-DOUCET, François; BENGGOA, Xavier; CHAPPERT, Benoit; DUARTE, Fernanda; LIMA, Luis. Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal Of Cleaner Production**, v. 89, p. 165-173, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.029>.

- SOUZA, Danielle Maia de; LAFONTAINE, Mia; CHARRON-DOUCET, François; CHAPPERT, Benoit; KICAK, Karine; DUARTE, Fernanda; LIMA, Luis. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal Of Cleaner Production**, v. 137, p. 70-82, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>.
- SPOSTO, Rosa Maria; PAULSEN, Jacob Silva. Energia incorporada em habitações de interesse social na fase de pré-uso: o caso do programa minha casa minha vida. : o caso do Programa Minha Casa Minha Vida. *Oculum Ensaios*, Campinas, v. 11, p. 39-50, ago. 2013.
- TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TCPO, **Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos**. - 13 ed. - São Paulo: Pini, 2010. ISBN 978-85-7266-201-7.
- WEBER, F.S.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LABEEE, 2017. 52p. [<http://www.labeee.ufsc.br/node/714>]
- Weidema B P, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C O, Wernet G. **Overview and methodology**: data quality guideline for the ecoinvent database version 3. St. Gallen: The Ecoinvent Centre, 2013. 169 p.

ANEXO A – Rotinas de operação da edificação

Tabela 20 – Taxa de ocupação dos cômodos de longa permanência para o verão.

Hora	Verão						
	Cozinha			Sala		Dormitórios	
	DS	FS	DS	Sábado	Domingo	DS	FS
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,9
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,9
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8
9	0,5	0,5	0,0	0,2	0,4	0,3	0,5
10	0,4	0,5	0,0	0,2	0,4	0,2	0,4
11	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3
12	0,2	0,4	0,0	0,5	0,2	0,0	0,2
13	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
14	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,1	0,1
15	0,4	0,5	0,0	0,5	0,5	0,1	0,1
16	0,4	0,0	0,0	0,5	0,5	0,1	0,1
17	0,4	0,0	0,0	0,5	0,5	0,1	0,0
18	0,0	0,0	0,4	0,5	0,5	0,0	0,0
19	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
20	0,5	0,5	0,9	1,0	1,0	0,0	0,0
21	0,4	0,4	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,8	1,0	1,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,4	0,5	0,5	0,3	0,5
24	0,0	0,0	0,1	0,3	0,3	0,7	0,8

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 21 – Taxa de ocupação dos cômodos de longa permanência para o inverno.

Hora	Inverno						
	Cozinha			Sala		Dormitórios	
	DS	FS	DS	Sábado	Domingo	DS	FS
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,8
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,7
9	0,4	0,5	0,0	0,4	0,4	0,2	0,4
10	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3
11	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0
12	0,5	0,5	0,2	0,2	0,4	0,0	0,0
13	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,0	0,0
14	0,5	0,5	0,2	0,3	0,4	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,4	0,5	0,5	0,0	0,1
16	0,0	0,0	0,4	0,5	0,5	0,0	0,0
17	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,4	0,5	0,5	0,0	0,0
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
20	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
21	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2
22	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3
23	0,0	0,0	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,5

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 22 – Rotinas de abertura das esquadrias para os cômodos de longa permanência.

Hora	Verão						Inverno						
	Cozinha		Sala		Dormitórios		Cozinha		Sala		Dormitórios		
	Porta	Janela	Porta	Janela	Porta	Janela	Porta	Janela	Porta	Janela	Porta	Janela	
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
6	0,0	0,5	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
7	0,0	0,5	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
8	0,5	0,8	0,4	0,4	1,0	0,5	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,4	0,5
9	0,5	0,9	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
10	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
11	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
12	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
13	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
14	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
15	0,9	1,0	0,9	0,5	1,0	1,0	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
16	0,9	1,0	0,9	0,5	1,0	1,0	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
17	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
18	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
19	0,9	1,0	0,5	0,5	1,0	0,9	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,4
20	0,5	0,8	0,5	0,4	1,0	0,5	0,0	0,5	0,0	0,3	0,5	0,5	0,3
21	0,5	0,5	0,5	0,4	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,2
22	0,5	0,5	0,5	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 23 – Rotinas de uso do sistema de iluminação por cômodo de longa permanência.

Hora	Fração de uso		
	Cozinha	Dormitório	Sala
1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0
18	0,5	0,0	0,5
19	1,0	0,2	0,5
20	0,8	0,3	0,5
21	0,5	0,4	0,5
22	0,3	0,3	0,0
23	0,0	0,1	0,0
24	0,0	0,1	0,0

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 24 – Rotinas de uso de equipamentos por cômodo de longa permanência.

Hora	Fração de uso			
	Cozinha	Dormitório	Sala	Banheiro*
1	0,1	0,1	0,0	0,0
2	0,1	0,1	0,0	0,0
3	0,1	0,1	0,0	0,0
4	0,1	0,1	0,0	0,0
5	0,1	0,1	0,0	0,0
6	0,1	0,1	0,0	0,0
7	0,2	0,1	0,1	0,1
8	0,2	0,0	0,1	0,0
9	0,1	0,1	0,2	0,0
10	0,1	0,1	0,2	0,0
11	0,2	0,1	0,1	0,0
12	0,2	0,1	0,1	0,0
13	0,1	0,1	0,2	0,0
14	0,1	0,1	0,1	0,0
15	0,1	0,2	0,2	0,0
16	0,1	0,2	0,2	0,0
17	0,1	0,2	0,3	0,0
18	0,1	0,2	0,2	0,0
19	0,1	0,3	0,1	0,1
20	0,1	0,3	0,2	0,0
21	0,1	0,3	0,2	0,0
22	0,1	0,3	0,2	0,0
23	0,1	0,3	0,2	0,0
24	0,1	0,2	0,1	0,0

*considerado somente chuveiro

Fonte: Baseado em Ghisi et al. (2015).

Tabela 25 – Nível de atividade metabólica conforme atividade desenvolvida por cômodo.

Ambiente	Nível de atividade metabólica		
	Cozinha	Dormitório	Sala
Categoria	<i>Cooking</i>	<i>Seated, quiet</i>	<i>Seated, quiet</i>
W/m ² .pessoa	105	60	60
W/pessoa	189	108	108

Área da pele considerada: 1,80 m²

Fonte: Baseado em ABNT (2008) e ASHRAE (2013).

APÊNDICE A – Inventário da ACV

Tabela 26 – Quantitativo dos materiais para o forro de madeira.

Forro de madeira					
Construção					
Material	Fator de desperdício	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)	
Tábua de madeira	0,05	0,37	m ³	56,39	
Verniz para madeira	0,15 ¹	4,01	1	1,05	
Reposição/Manutenção					
Material	Frs	Frm	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Tábua de madeira	1	0	0,37	m ³	56,39
Verniz para madeira	1	5	22,73	1	5,93
Disposição final					
Material	Quantidade	Unidade		Transporte (tKm)	
Tábua de madeira	0,35	m ³		10,29	
Verniz para madeira	3,49	1		0,17	

Fonte:
1 - Paulsen e Sposto (2013).

Tabela 27 – Quantitativo dos materiais para a laje maciça.

(CONTINUA)

Laje maciça					
Construção					
Descrição	Material	Fator de desperdício ¹		Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto traço 1:4:5	Cimento	0,06		443,59	115,78
	Areia	0,06		2070,10	540,30
	Brita	0,06		3142,11	820,09
Aço	Aço	0,06		277,25	72,36
Reboco traço 1:2:9	Cimento	0,30		113,34	29,58
	Cal hidratada	0,30		321,13	83,81
	Areia	0,30		1190,06	310,61
Chapisco traço 1:3	Cimento	0,30		13,60	3,55
	Areia	0,30		47,60	12,42
Pintura	Tinta	0,15		4,01	1,05
Reposição/Manutenção					
Descrição	Material	Frs	Frm	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto traço 1:4:5	Cimento	0	0	0,00	0,00
	Areia	0	0	0,00	0,00
	Brita	0	0	0,00	0,00
Aço	Aço	0	0	0,00	0,00
Reboco traço 1:2:9	Cimento	1,00	2	170,01	44,37
	Cal hidratada	1,00	2	481,69	125,72
	Areia	1,00	2	1785,09	465,91
Chapisco traço 1:3	Cimento	1,00	2	20,40	5,32
	Areia	1,00	2	71,40	18,64
Pintura	Tinta	1,00	4,7	13,37	3,49

Tabela 27 – Quantitativo dos materiais para a laje maciça.

(CONCLUSÃO)

Laje maciça			
Disposição final			
Descrição	Material	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto traço 1:4:5	Cimento	418,48	20,92
	Areia	1952,92	97,65
	Brita	2964,26	148,21
Aço	Aço	261,55	13,08
Reboco traço 1:2:9	Cimento	87,18	4,36
	Cal hidratada	247,02	12,35
	Areia	915,43	45,77
Chapisco traço 1:3	Cimento	10,46	0,52
	Areia	36,62	1,83
Pintura	Tinta	3,49	0,17

Legenda:
1 – Caldas et al. (2016)

Tabela 28 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco de concreto.

(CONTINUA)

Parede de bloco de concreto					
Construção					
Descrição	Material	Fator de desperdício ¹	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco de concreto 9x19x39	0,03	1380,69	Bloco	3243,23
Argamassa de assentamento traço 1:2:9	Cimento	0,3	91,78	Kg	23,96
	Cal hidratada	0,3	260,05	Kg	67,87
	Areia	0,3	963,71	Kg	251,53
Reboco traço 1:2:9	Cimento	0,3	636,48	Kg	166,12
	Cal hidratada	0,3	1803,37	Kg	470,68
	Areia	0,3	6683,07	Kg	1744,28
Chapisco traço 1:3	Cimento	0,3	76,38	Kg	19,93
	Areia	0,3	267,32	Kg	69,77

Tabela 28 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco de concreto.

(CONCLUSÃO)

Parede de bloco de concreto						
Reposição/Manutenção						
Descrição	Material	FRs	FRm	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco de concreto 9x19x39	0	0	0,00	Bloco	0,00
Argamassa de assentamento traço 1:2:9 ²	Cimento	0	0	0,00	Kg	0,00
	Cal hidratada	0	0	0,00	Kg	0,00
	Areia	0	0	0,00	Kg	0,00
Reboco traço 1:2:9 ²	Cimento	1,00	2	954,72	Kg	249,18
	Cal hidratada	1,00	2	2705,05	Kg	706,02
	Areia	1,00	2	10024,61	Kg	2616,42
Chapisco traço 1:3 ²	Cimento	1,00	2	114,57	Kg	29,90
	Areia	1,00	2	400,98	Kg	104,66
Disposição final						
Descrição	Material	Quantidade		Unidade	Transporte (tKm)	
Bloco	Bloco de concreto 9x19x39	1340,47		Bloco	603,21	
Argamassa de assentamento traço 1:2:9 ²	Cimento	70,60		Kg	3,53	
	Cal hidratada	200,04		Kg	10,00	
	Areia	741,32		Kg	37,07	
Reboco traço 1:2:9 ²	Cimento	489,60		Kg	24,48	
	Cal hidratada	1387,21		Kg	69,36	
	Areia	5140,83		Kg	257,04	
Chapisco traço 1:3 ²	Cimento	58,75		Kg	2,94	
	Areia	205,63		Kg	10,28	

Legenda:
1 – Caldas et al. (2016)
2 – TCPO (2010)

Tabela 29 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco cerâmico.

(CONTINUA)

Parede de bloco cerâmico						
Construção						
Descrição	Material	Fator de desperdício ¹		Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco cerâmico 9x19x39	0,05		1407,50	Bloco	1726,58
Argamassa de assentamento traço 1:2:9 ²	Cimento	0,3		91,78	Kg	23,96
	Cal hidratada	0,3		260,05	Kg	67,87
	Areia	0,3		963,71	Kg	251,53
Reboco traço 1:2:9 ²	Cimento	0,3		636,48	Kg	166,12
	Cal hidratada	0,3		1803,37	Kg	470,68
	Areia	0,3		6683,07	Kg	1744,28
Chapisco traço 1:3 ²	Cimento	0,3		76,38	Kg	19,93
	Areia	0,3		267,32	Kg	69,77
Reposição/Manutenção						
Descrição	Material	FRs	FRm	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco cerâmico 9x19x39	0	0	0,00	Bloco	0,00
Argamassa de assentamento traço 1:2:9 ²	Cimento	0	0	0,00	Kg	0,00
	Cal hidratada	0	0	0,00	Kg	0,00
	Areia	0	0	0,00	Kg	0,00
	Água	0	0	0,00	Kg	0,00
Reboco traço 1:2:9 ²	Cimento	1,00	2	954,72	Kg	249,18
	Cal hidratada	1,00	2	2705,05	Kg	706,02
	Areia	1,00	2	10024,61	Kg	2616,42
	Água	1,00	2	1909,45	Kg	498,37
Chapisco traço 1:3 ²	Cimento	1,00	2	114,57	Kg	29,90
	Areia	1,00	2	400,98	Kg	104,66
	Água	1,00	2	72,56	Kg	18,94

Tabela 29 – Quantitativo dos materiais para a parede de bloco cerâmico.

(CONCLUSÃO)

Parede de bloco cerâmico				
Disposição final				
Descrição	Material	Quantidade	Unidade	Transporte (tKm)
Bloco	Bloco cerâmico 9x19x39	1340,47	Bloco	315,01
Argamassa de assentamento traço 1:2:9 ²	Cimento	70,60	Kg	3,53
	Cal hidratada	200,04	Kg	10,00
	Areia	741,32	Kg	37,07
Reboco traço 1:2:9 ²	Cimento	489,60	Kg	24,48
	Cal hidratada	1387,21	Kg	69,36
	Areia	5140,83	Kg	257,04
Chapisco traço 1:3 ²	Cimento	58,75	Kg	2,94
	Areia	205,63	Kg	10,28

Fonte:
1 - Caldas et al. (2016)
2 – TCPO (2010)

Tabela 30 – Quantitativo dos materiais para a parede de *light steel framing*.

Parede de <i>light steel framing</i>					
Construção					
Descrição	Material	Fator de desperdício ¹	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)	
Aço	Guias e montantes	0,1	556,14	145,15	
Revestimento	Placa cimentícia	0,09	312,20	81,48	
Reposição/Manutenção					
Descrição	Material	FRs	FRm	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Aço	Guias e montantes	0	0	0,00	0,00
Revestimento	Placa cimentícia	0	0	0,00	0,00
Disposição final					
Descrição	Material	Quantidade (Kg)		Transporte (tKm)	
Aço	Guias e montantes	505,58		25,28	
Revestimento	Placa cimentícia	286,42		14,32	

Fonte
1 - Caldas et al. (2017)

Tabela 31 - Quantitativo dos materiais para a parede de concreto moldado *in loco*.

Parede de concreto moldado <i>in loco</i>					
Construção					
Descrição	Material	Fator de desperdício ¹	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)	
Concreto	Cimento	0,09	4222,48	1102,07	
	Brita	0,09	13252,08	3458,79	
	Areia	0,09	14551,30	3797,89	
Estrutura	Aço	0,1	23,21	6,06	
Reposição/Manutenção					
Descrição	Material	FRs	FRm	Quantidade (Kg)	Transporte (tKm)
Concreto	Cimento	-0,20	0	0,00	0,00
	Brita	-0,20	0	0,00	0,00
	Areia	-0,20	0	0,00	0,00
Estrutura	Aço	-0,20	0	0,00	0,00
Disposição final					
Descrição	Material	Quantidade (Kg)		Transporte (tKm)	
Concreto	Cimento	3873,83		193,69	
	Brita	12157,87		607,89	
	Areia	13349,82		667,49	
Estrutura	Aço	21,10		1,05	

Fonte:
1 – Caldas et al. (2016)

Tabela 32 – Consumo energético para limite de resfriamento de 25°C.

Conjunto	Média mensal (kWh)	Consumo energético anual (kWh)	Consumo energético fase de operação (kWh)
Curitiba			
Bloco cerâmico/Forro	130	1.556	62.233
Bloco cerâmico/Laje	122	1.463	58.534
Bloco concreto/Forro	127	1.526	61.023
Bloco concreto/Laje	121	1.454	58.156
Parede de concreto/Forro	126	1.508	60.311
Parede de concreto/Laje	121	1.456	58.223
<i>Light steel framing</i> /Forro	147	1.769	70.774
<i>Light steel framing</i> /Laje	132	1.582	63.270
São Paulo			
Bloco cerâmico/Forro	134	1.607	64.280
Bloco cerâmico/Laje	126	1.515	60.606
Bloco concreto/Forro	131	1.576	63.036
Bloco concreto/Laje	126	1.507	60.280
Parede de concreto/Forro	131	1.568	62.737
Parede de concreto/Laje	127	1.519	60.765
<i>Light steel framing</i> /Forro	155	1.865	74.599
<i>Light steel framing</i> /Laje	138	1.660	66.391
Brasília			
Bloco cerâmico/Forro	143	1.721	68.849
Bloco cerâmico/Laje	132	1.585	63.395
Bloco concreto/Forro	140	1.680	67.185
Bloco concreto/Laje	131	1.573	62.908
Parede de concreto/Forro	139	1.663	66.503
Parede de concreto/Laje	132	1.581	63.224
<i>Light steel framing</i> /Forro	170	2.034	81.362
<i>Light steel framing</i> /Laje	147	1.759	70.353
Rio de Janeiro			
Bloco cerâmico/Forro	172	2.068	82.713
Bloco cerâmico/Laje	173	2.081	83.221
Bloco concreto/Forro	180	2.163	86.528
Bloco concreto/Laje	174	2.089	83.547
Parede de concreto/Forro	183	2.192	87.699
Parede de concreto/Laje	178	2.136	85.432
<i>Light steel framing</i> /Forro	200	2.402	96.072
<i>Light steel framing</i> /Laje	185	2.219	88.778

Tabela 33 – Consumo energético para limite de resfriamento de 26°C.

Conjunto	Média mensal (kWh)	Consumo energético anual (kWh)	Consumo energético fase de operação (kWh)
Curitiba			
Bloco cerâmico/Forro	125	1.500	60.019
Bloco cerâmico/Laje	119	1.424	56.965
Bloco concreto/Forro	123	1.474	58.956
Bloco concreto/Laje	118	1.416	56.657
Parede de concreto/Forro	121	1.457	58.296
Parede de concreto/Laje	118	1.417	56.678
<i>Light steel framing</i> /Forro	141	1.689	67.575
<i>Light steel framing</i> /Laje	127	1.524	60.942
São Paulo			
Bloco cerâmico/Forro	127	1.527	61.099
Bloco cerâmico/Laje	121	1.448	57.910
Bloco concreto/Forro	125	1.499	59.964
Bloco concreto/Laje	120	1.438	57.534
Parede de concreto/Forro	123	1.479	59.170
Parede de concreto/Laje	120	1.436	57.440
<i>Light steel framing</i> /Forro	143	1.716	68.629
<i>Light steel framing</i> /Laje	129	1.548	61.915
Brasília			
Bloco cerâmico/Forro	135	1.623	64.908
Bloco cerâmico/Laje	125	1.496	59.842
Bloco concreto/Forro	132	1.582	63.283
Bloco concreto/Laje	124	1.484	59.354
Parede de concreto/Forro	130	1.563	62.538
Parede de concreto/Laje	124	1.489	59.563
<i>Light steel framing</i> /Forro	160	1.915	76.602
<i>Light steel framing</i> /Laje	138	1.659	66.340
Rio de Janeiro			
Bloco cerâmico/Forro	159	1.907	76.263
Bloco cerâmico/Laje	158	1.894	75.748
Bloco concreto/Forro	164	1.974	78.946
Bloco concreto/Laje	158	1.896	75.852
Parede de concreto/Forro	166	1.990	79.581
Parede de concreto/Laje	161	1.930	77.206
<i>Light steel framing</i> /Forro	185	2.223	88.903
<i>Light steel framing</i> /Laje	169	2.029	81.151

APÊNDICE B – Categorias de impacto da ACV

Figura 58 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de formação de ozônio troposférico (humano e ecossistema), formação de partículas finas, acidificação terrestre e eutrofização de água doce.

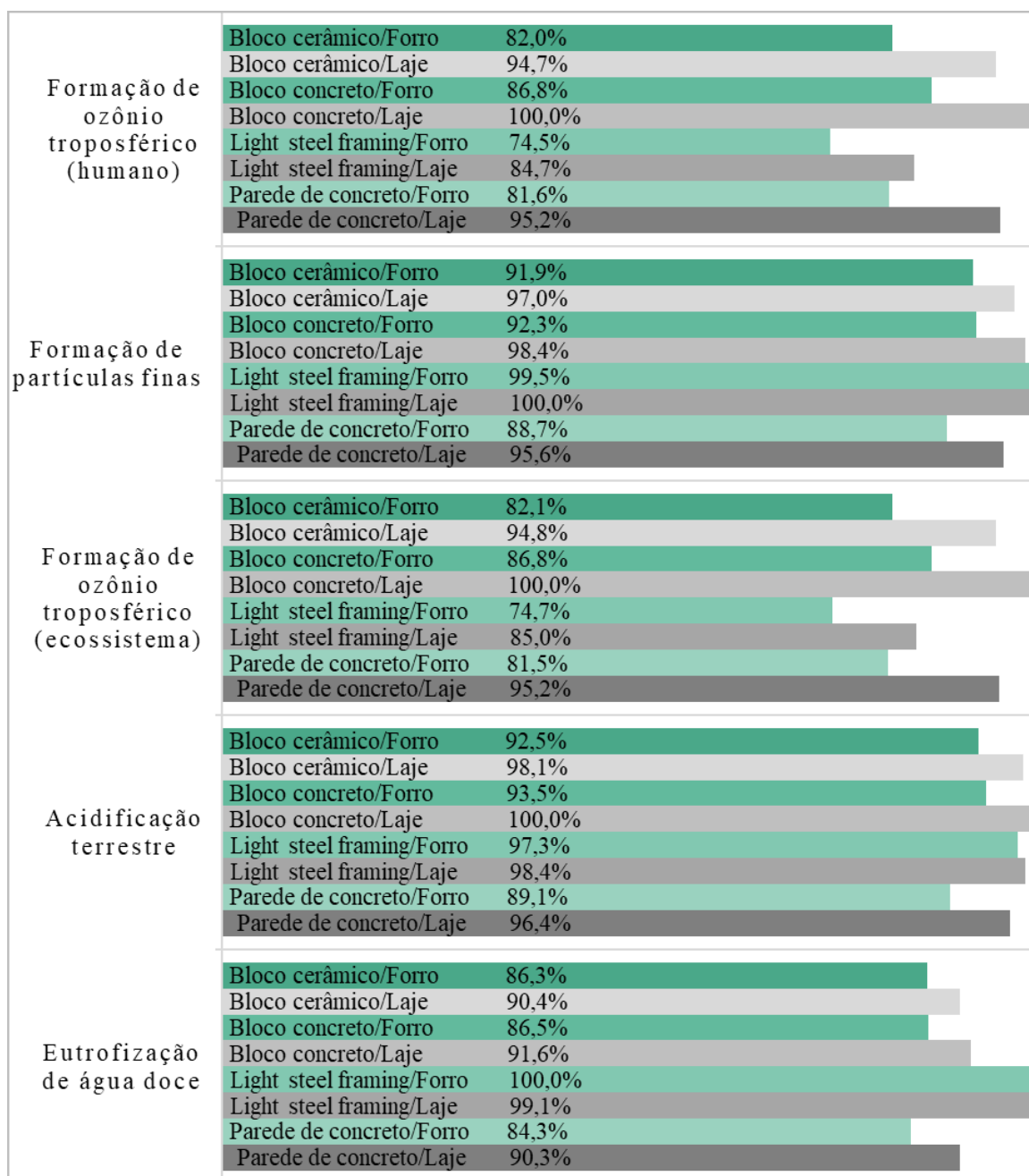


Figura 59 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de eutrofização de água salgada, ecotoxicidade (terrestre, de água doce e de água salgada) e toxicidade humana cancerígena.

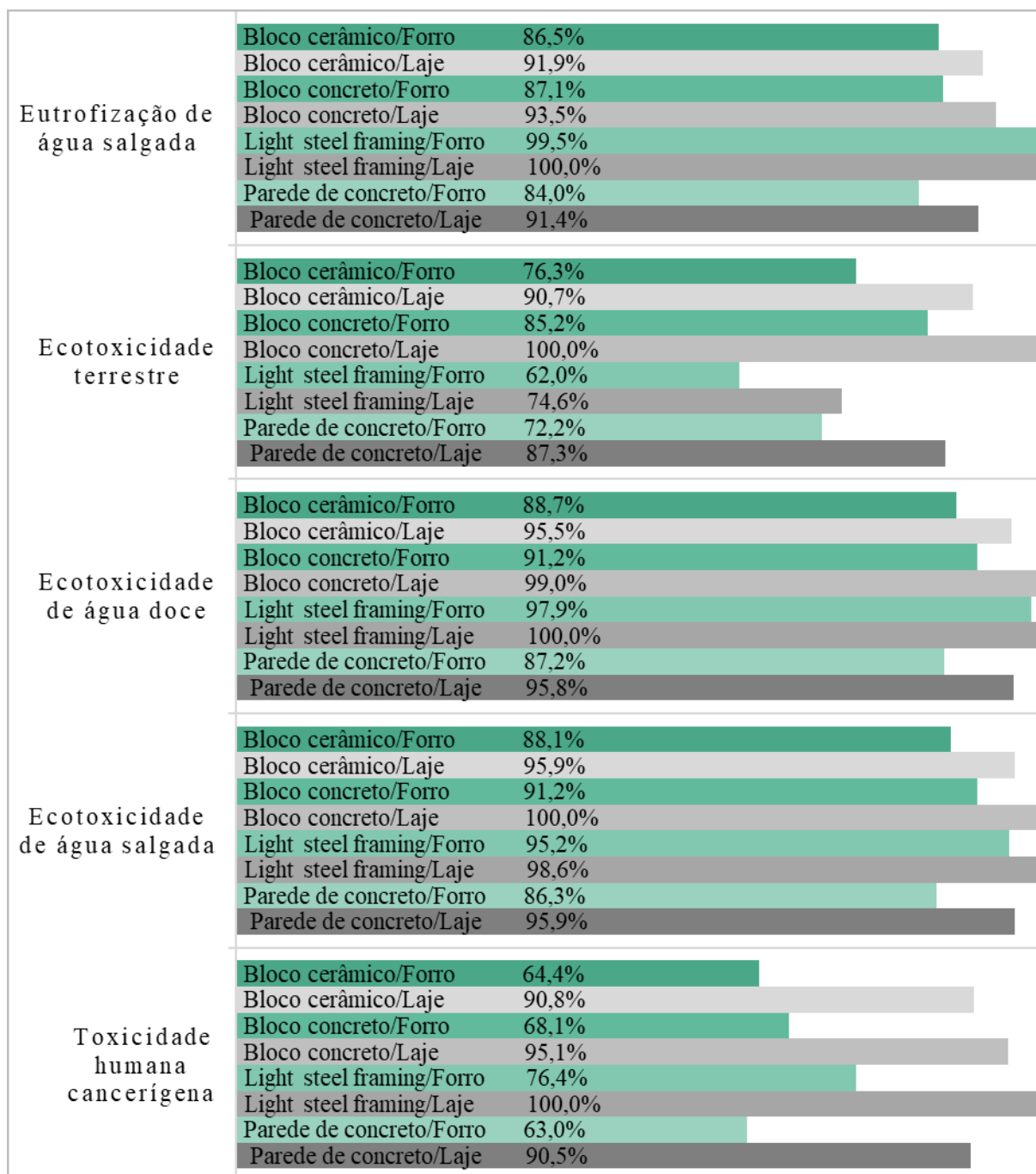


Figura 60 – Resultados normalizados da ACV para as categorias de impacto de toxicidade humana não cancerígena, ocupação/transformação da terra, escassez de recursos (minerais e fósseis) e uso de água.

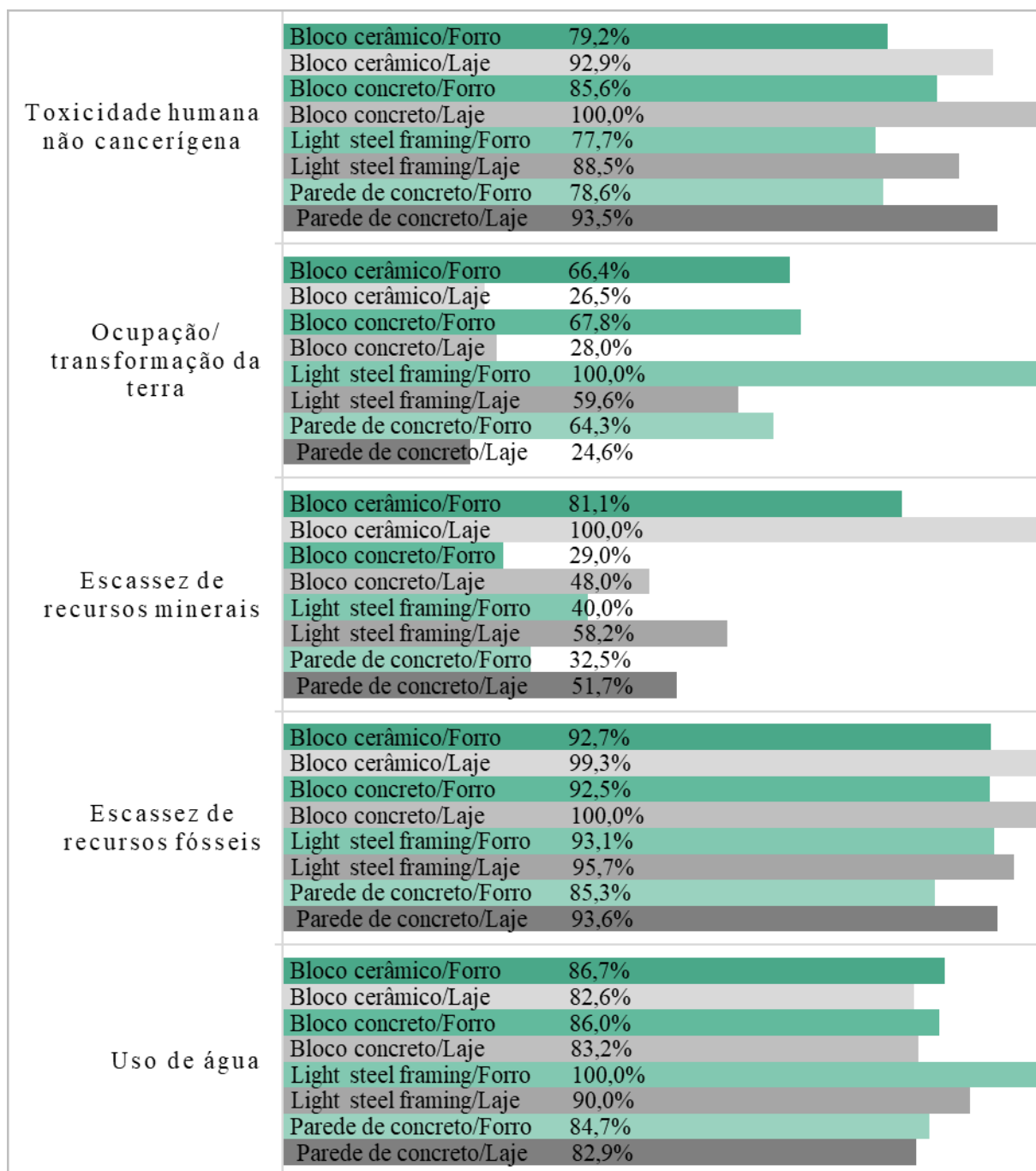


Tabela 34 – Resultado por categoria de impacto dos conjuntos com parede de bloco cerâmico e parede de bloco de concreto.

Conjunto	Bloco cerâmico/Forro	Bloco cerâmico/Laje	Bloco concreto/Forro	Bloco concreto/Laje
Aquecimento global (kgCO ₂ eq)	31.321,24	33.760,96	31.119,11	33.839,29
Depleção do ozônio estratosférico (kg CFC11 eq)	0,051	0,049	0,050	0,049
Radiação ionizante (kBq Co-60 eq)	1.786,71	1.743,30	1.813,64	1.794,40
Formação de ozônio, saúde humana (kg NO _x eq)	65,42	75,53	69,26	79,77
Formação de partículas finas (kg PM _{2,5} eq)	40,63	42,88	40,82	43,50
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (kg NO _x eq)	66,56	76,87	70,40	81,11
Acidificação terrestre (kg SO ₂ eq)	88,83	94,13	89,78	96,00
Eutrofização de água doce (kg P eq)	5,91	6,19	5,93	6,28
Eutrofização de água salgada (kg N eq)	0,41	0,43	0,41	0,44
Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DCB)	75.542,57	89.810,19	84.336,27	98.988,77
Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4-DCB)	573,87	617,62	590,19	640,40
Ecotoxicidade de água salgada (kg 1,4-DCB)	790,27	860,52	818,50	897,24
Toxicidade humana cancerígena (kg 1,4-DCB)	629,67	887,83	665,37	929,41
Toxicidade humana não cancerígena (kg 1,4-DCB)	11.083,55	13.007,11	11.985,11	13.996,92
Uso da terra (m ² a crop eq)	974,43	388,79	995,13	410,99
Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	137,07	168,99	48,99	81,14
Escassez de recursos fósseis (kg oil eq)	6.908,61	7.404,20	6.893,08	7.453,07
Consumo de água (m ³)	1.740,71	1.658,90	1.726,55	1.670,19

Tabela 35 – Resultado por categoria de impacto dos conjuntos com parede de *light steel framing* e parede de concreto moldado *in loco*.

Conjunto	<i>Light steel framing</i> /Forro	<i>Light steel framing</i> /Laje	Parede de concreto/Forro	Parede de concreto/Laje
Aquecimento global (kgCO ₂ eq)	30.409,82	31.531,79	27.622,67	30.581,75
Depleção do ozônio estratosférico (kg CFC11 eq)	0,059	0,053	0,050	0,049
Radiação ionizante (kBq Co-60 eq)	2.037,72	1.880,74	1.724,11	1.725,46
Formação de ozônio, saúde humana (kg NO _x eq)	59,40	67,61	65,10	75,96
Formação de partículas finas (kg PM _{2,5} eq)	44,01	44,22	39,22	42,27
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (kg NO _x eq)	60,60	68,97	66,12	77,19
Acidificação terrestre (kg SO ₂ eq)	93,43	94,44	85,58	92,57
Eutrofização de água doce (kg P eq)	6,85	6,79	5,77	6,18
Eutrofização de água salgada (kg N eq)	0,47	0,47	0,40	0,43
Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DCB)	61.402,93	73.862,13	71.439,26	86.419,63
Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4-DCB)	633,40	646,81	563,77	619,48
Ecotoxicidade de água salgada (kg 1,4-DCB)	854,07	884,46	774,24	860,21
Toxicidade humana cancerígena (kg 1,4-DCB)	747,15	977,76	615,71	884,74
Toxicidade humana não cancerígena (kg 1,4-DCB)	10.873,37	12.382,30	11.004,59	13.091,57
Uso da terra (m ² a crop eq)	1.467,79	875,12	943,76	360,89
Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	67,61	98,43	54,98	87,33
Escassez de recursos fósseis (kg oil eq)	6.942,51	7.135,45	6.358,49	6.973,36
Consumo de água (m ³)	2.007,90	1.806,55	1.700,17	1.665,47

APÊNDICE C – Análise de sensibilidade da ACV

Vida útil

Figura 61 - Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação da vida útil da edificação.

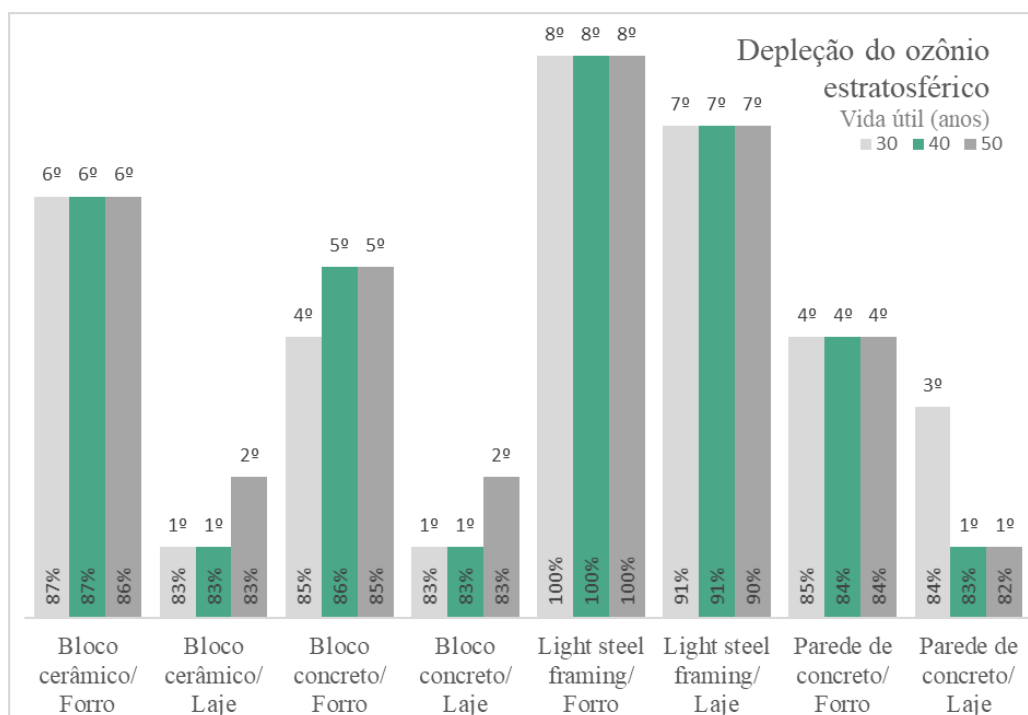


Figura 62 - Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação da vida útil da edificação.

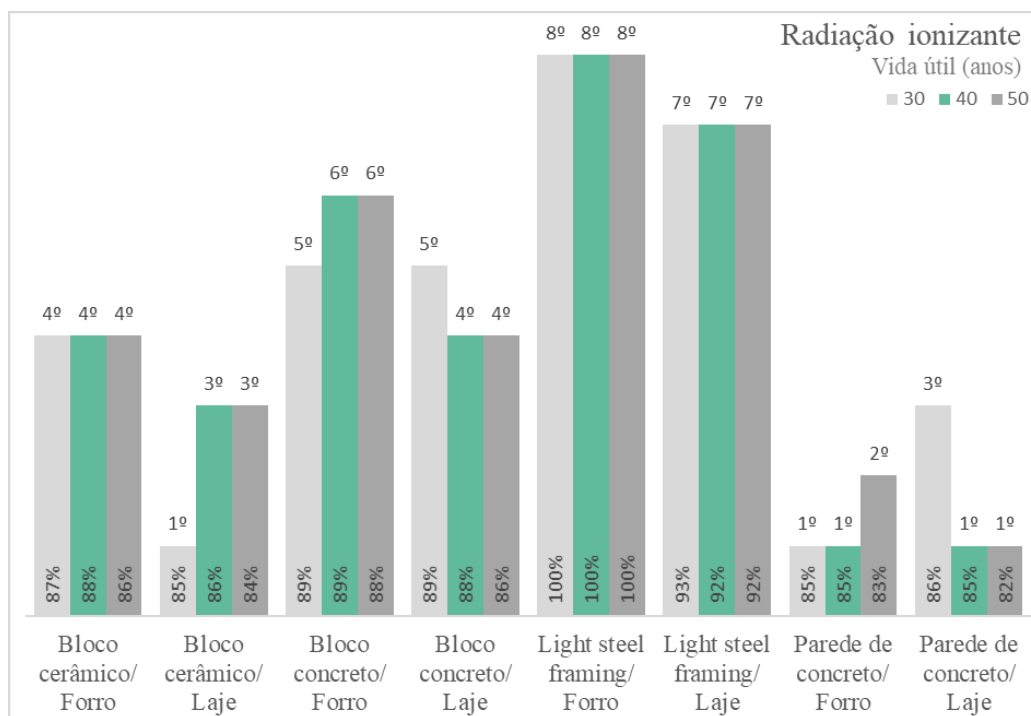


Figura 63 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação da vida útil da edificação.

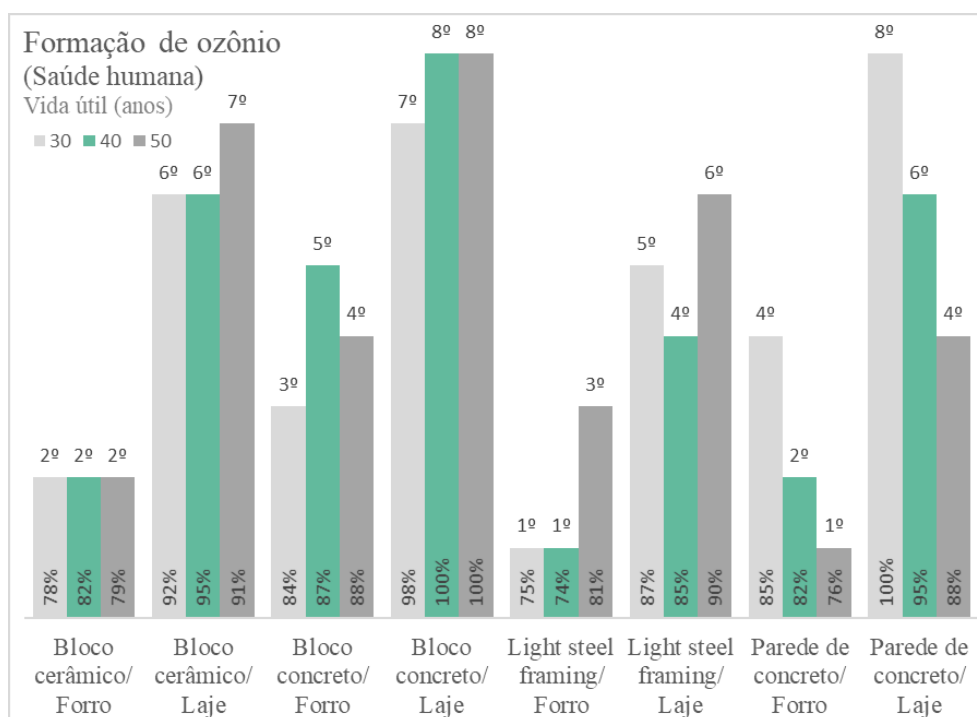


Figura 64 - Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação da vida útil da edificação.

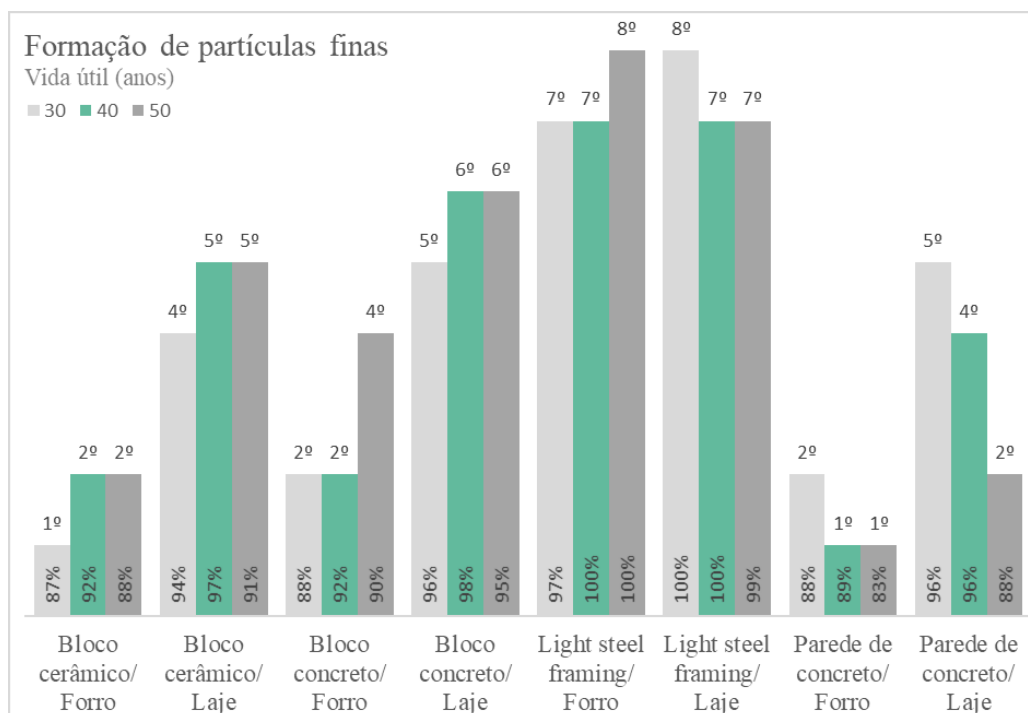


Figura 65 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação da vida útil da edificação.

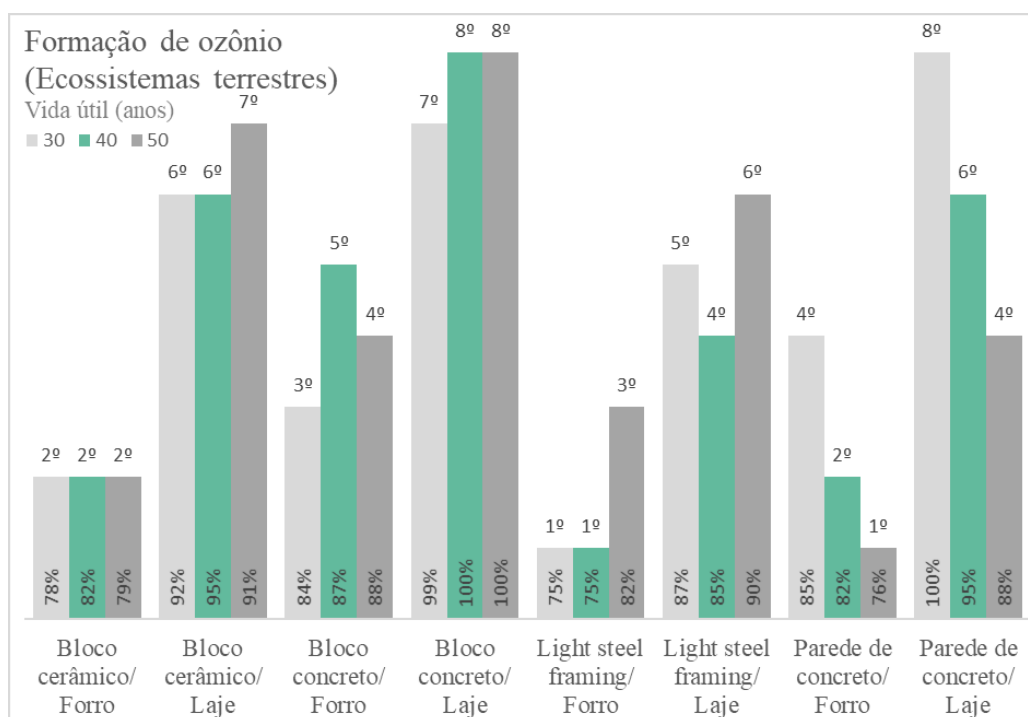


Figura 66 - Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação da vida útil da edificação.

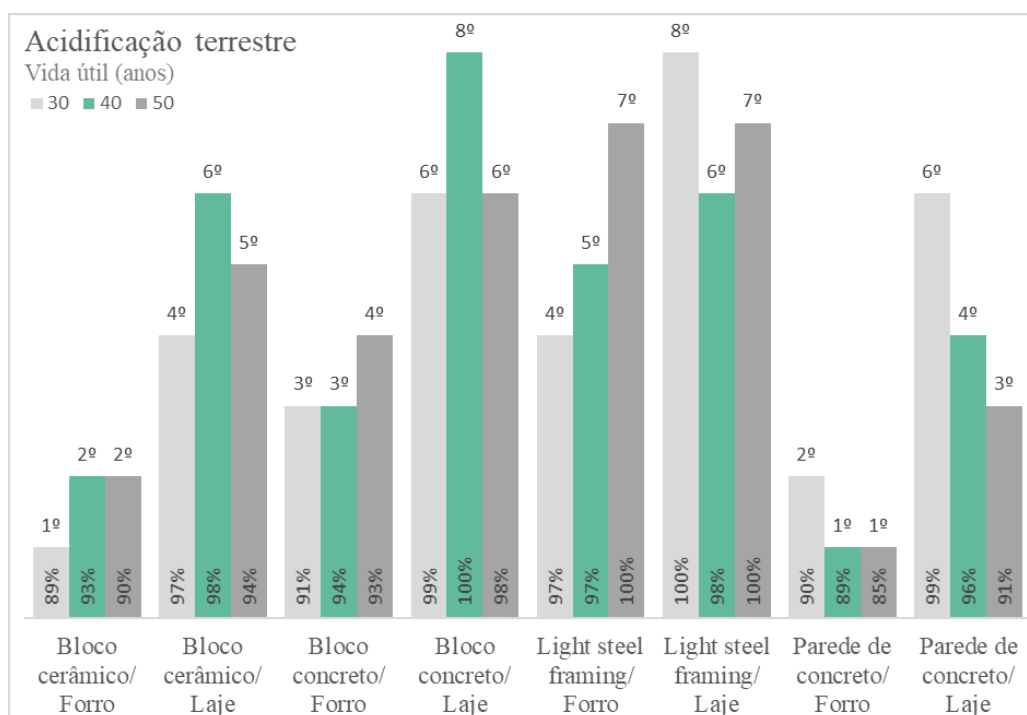


Figura 67 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação da vida útil da edificação.

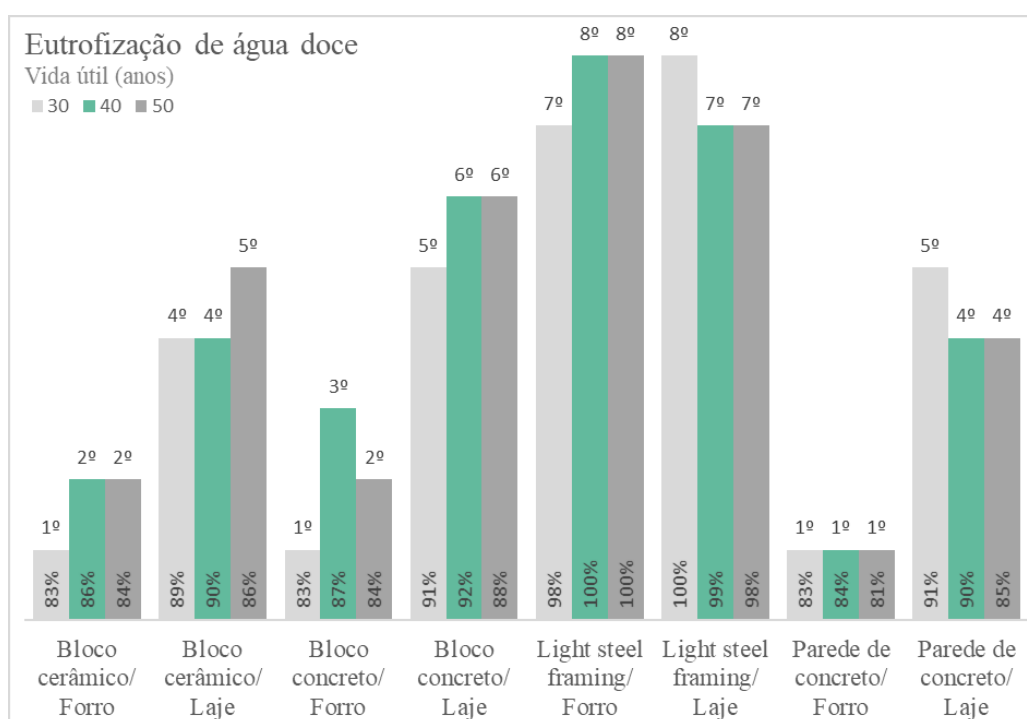


Figura 68 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação da vida útil da edificação.

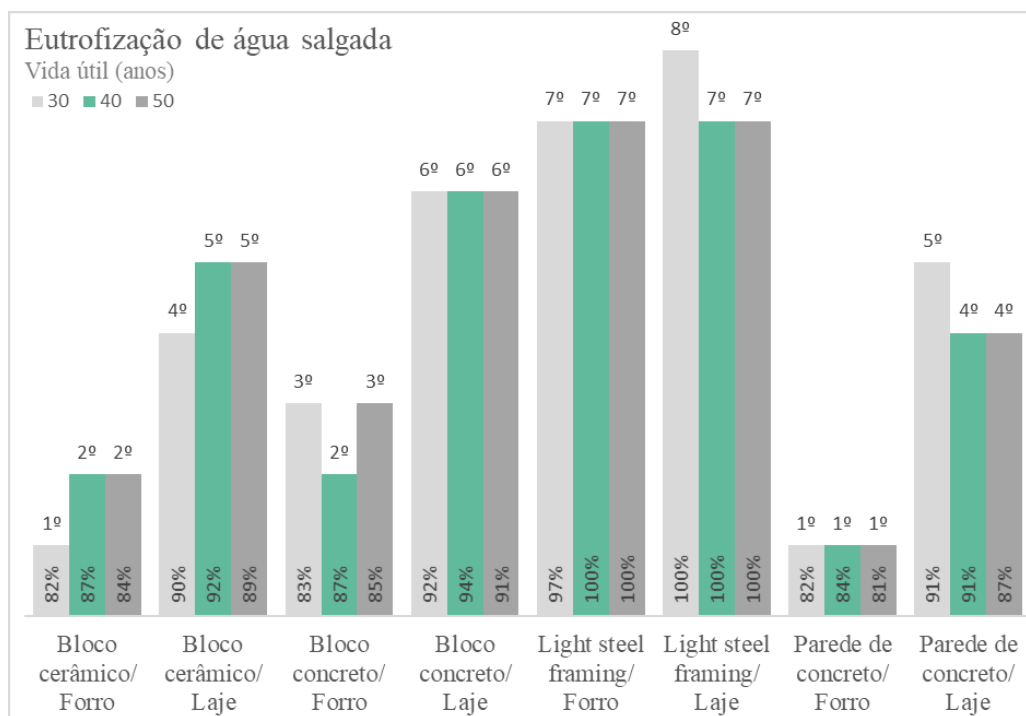


Figura 69 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação da vida útil da edificação.

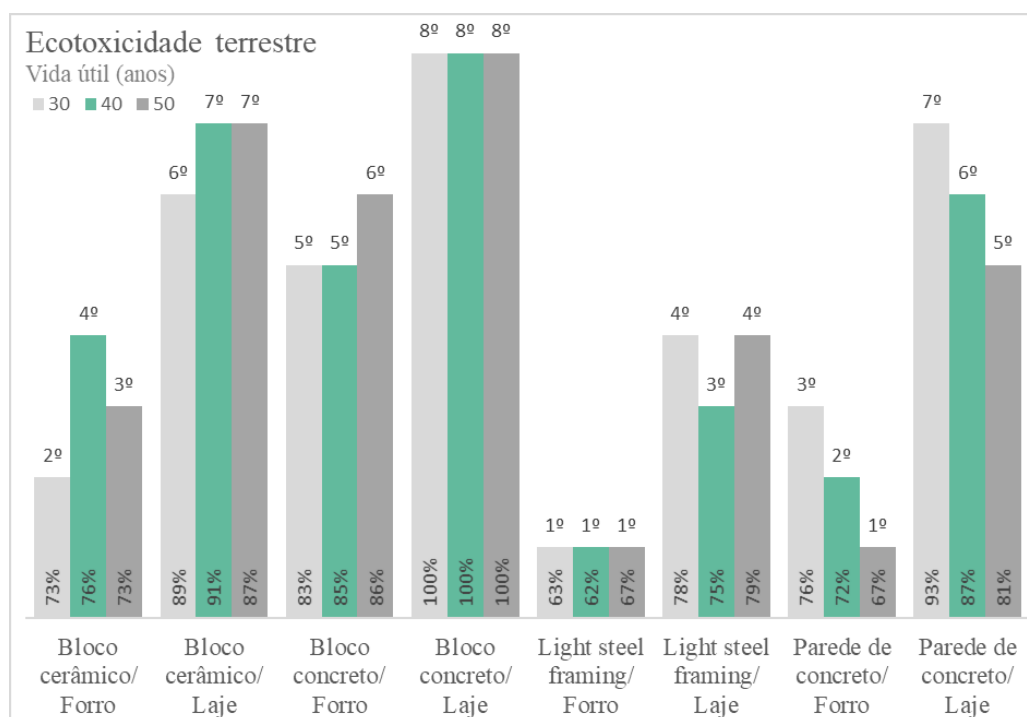


Figura 70 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação da vida útil da edificação.

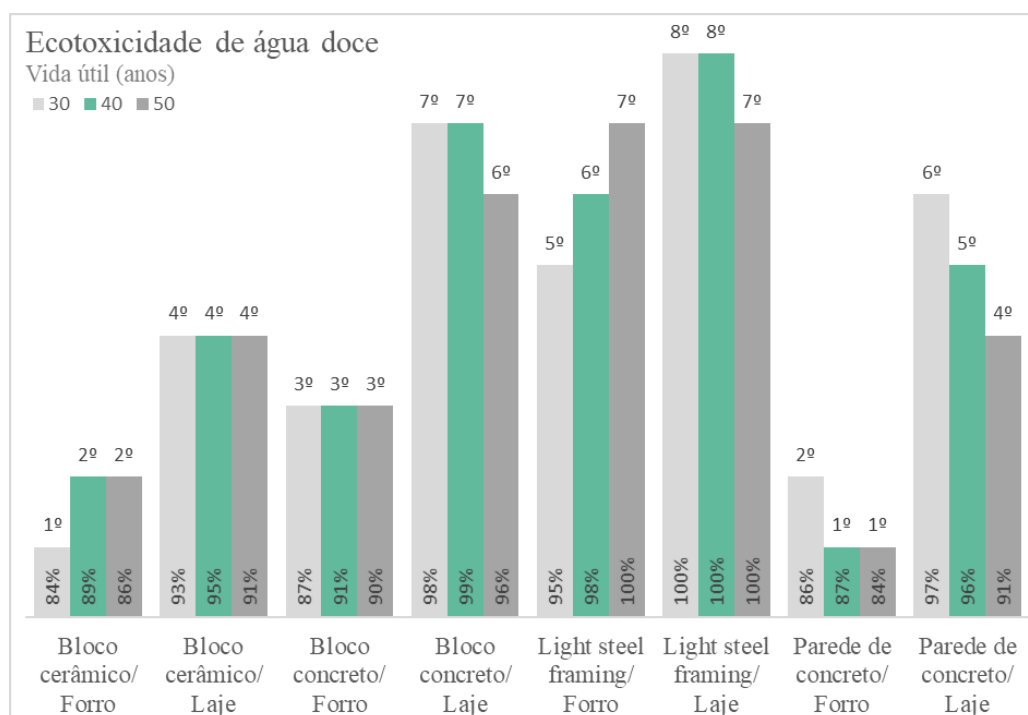


Figura 71 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação da vida útil da edificação.

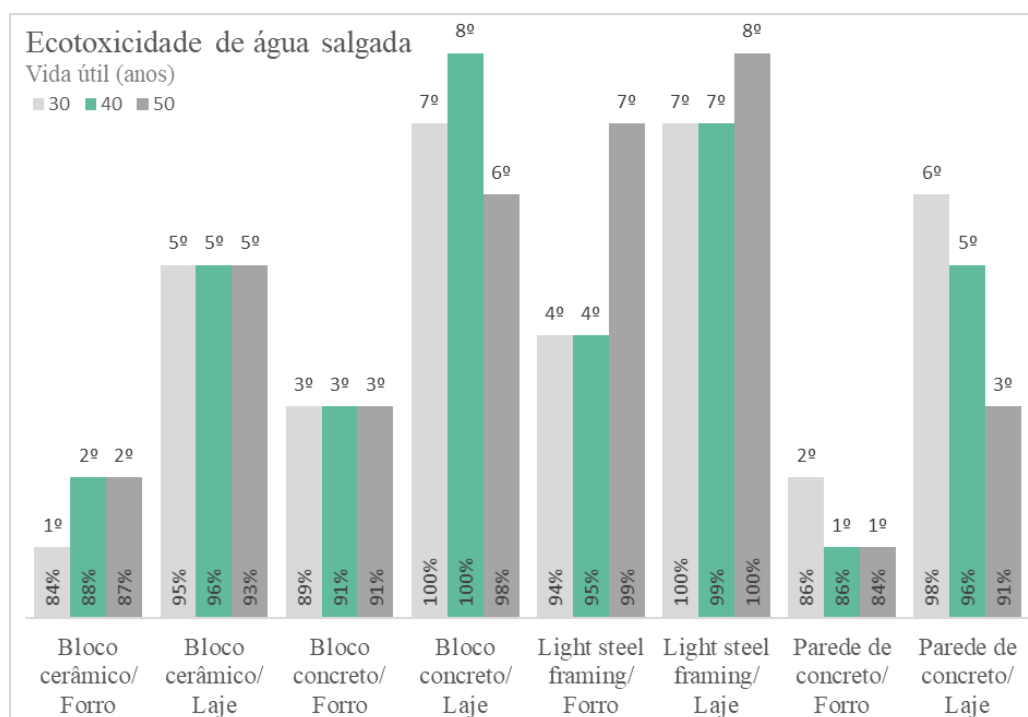


Figura 72 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação da vida útil da edificação.

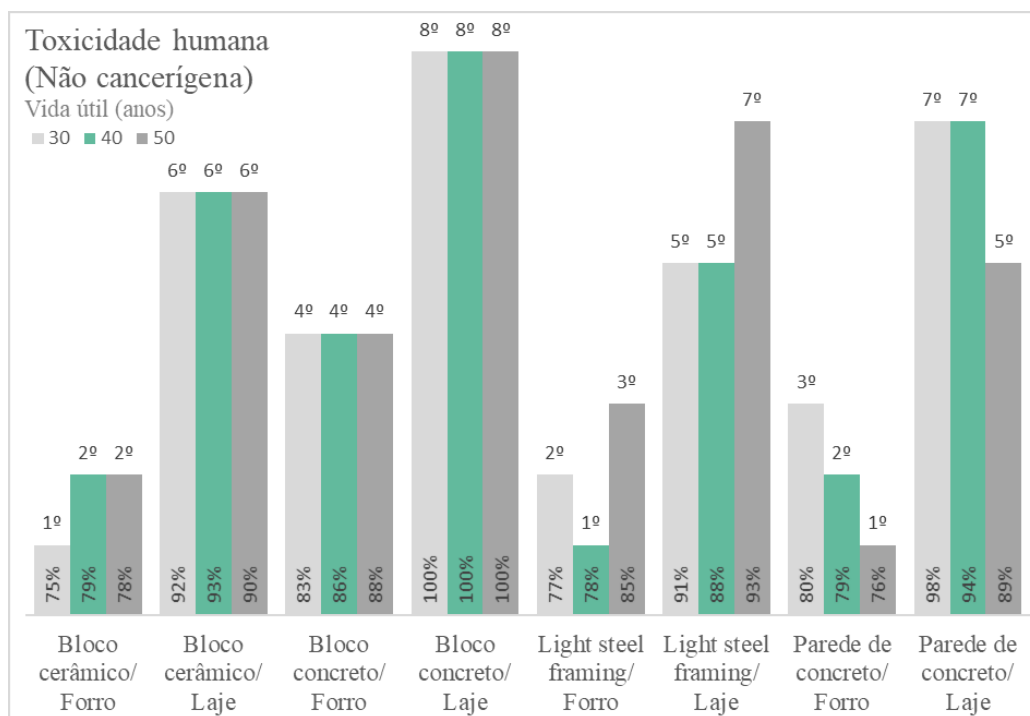


Figura 73 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação da vida útil da edificação.

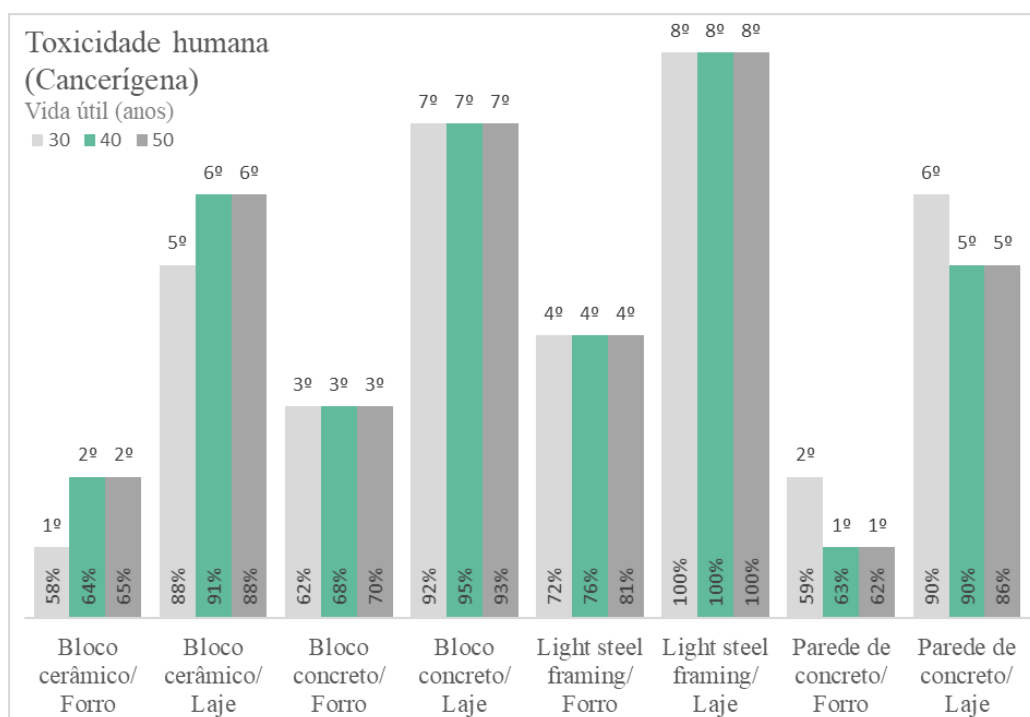


Figura 74 - Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação da vida útil da edificação.

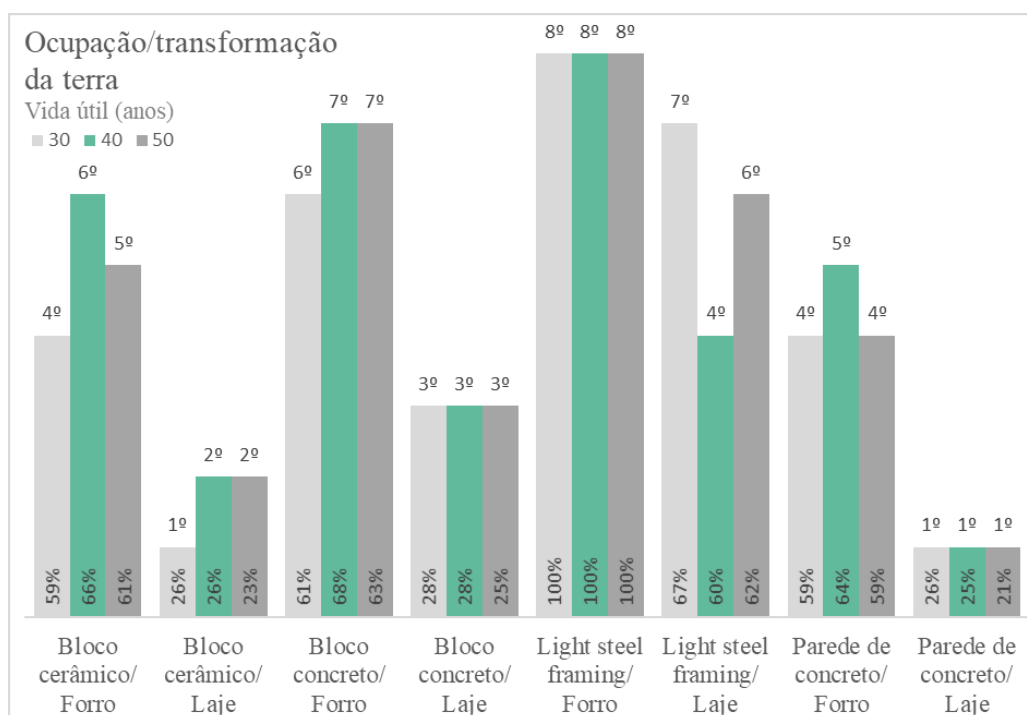


Figura 75 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação da vida útil da edificação.

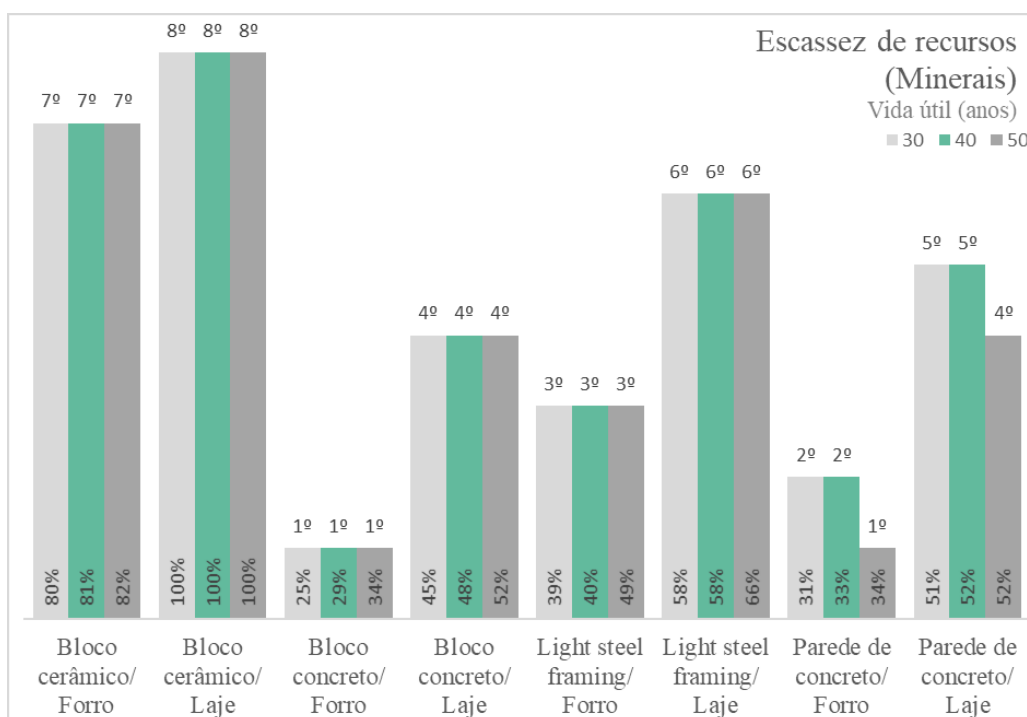


Figura 76 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação da vida útil da edificação.

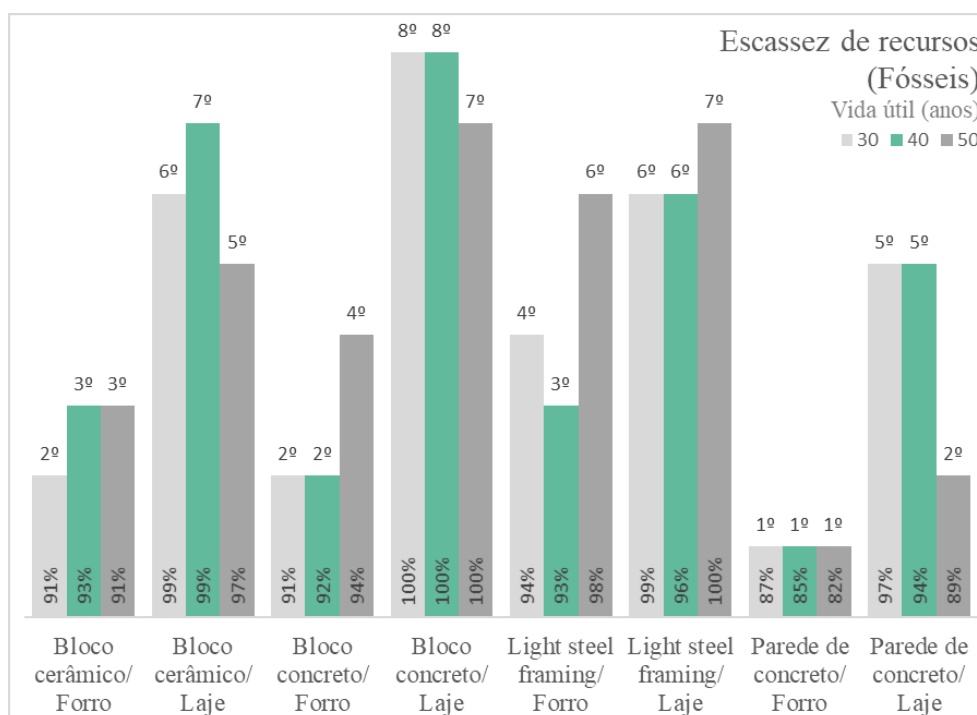
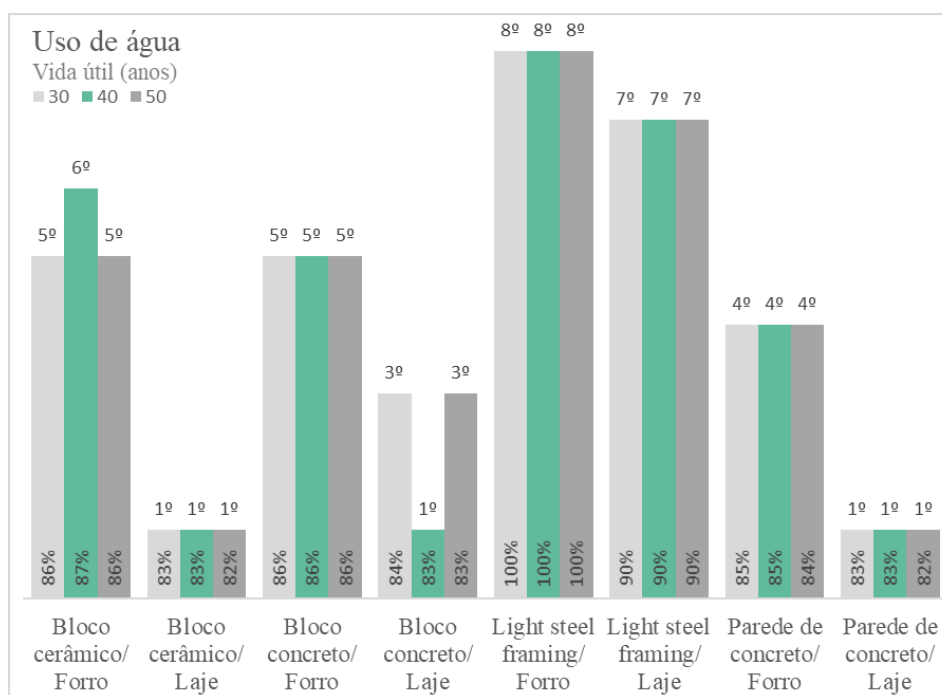


Figura 77 - Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação da vida útil da edificação.



Comportamento do usuário

Figura 78 - Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação do comportamento do usuário.

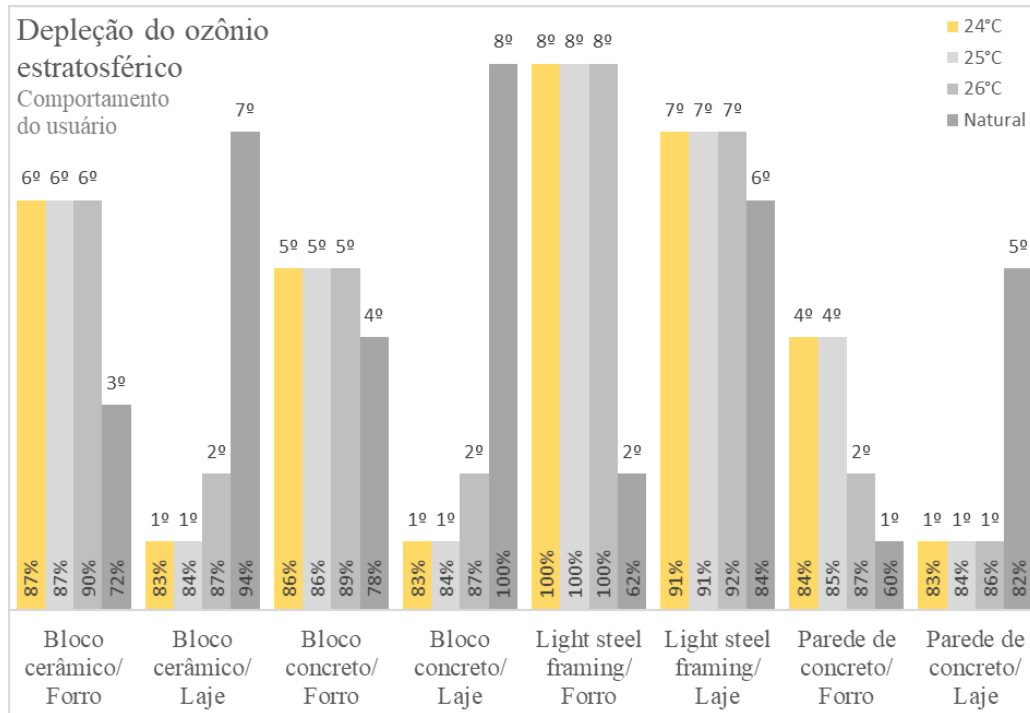


Figura 79 - Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação do comportamento do usuário.

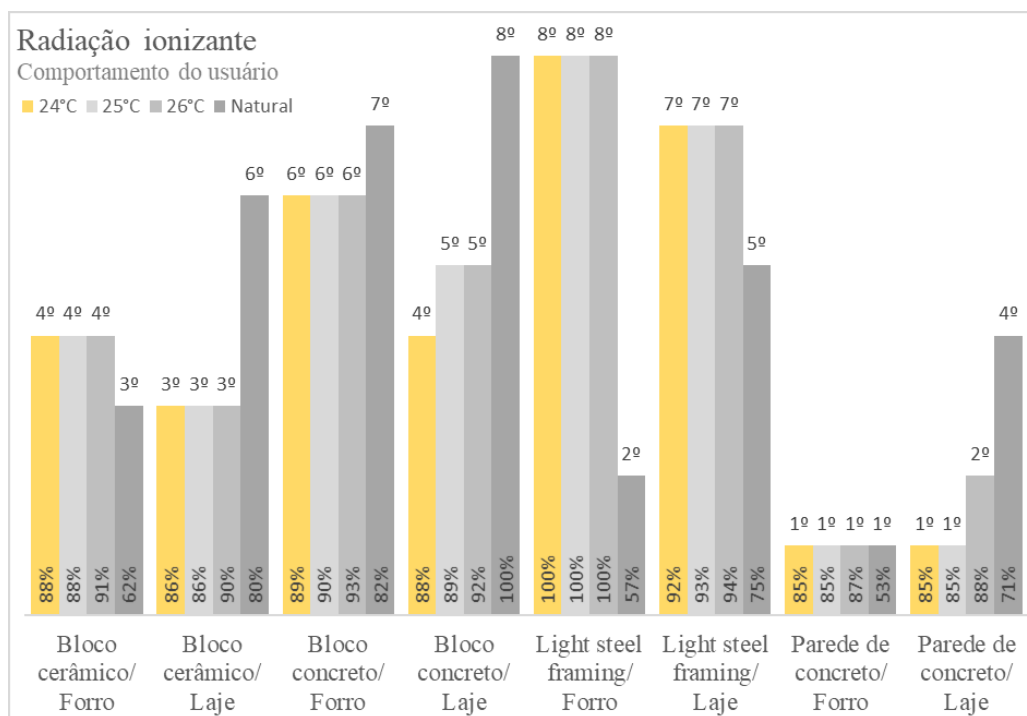


Figura 80 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação do comportamento do usuário.

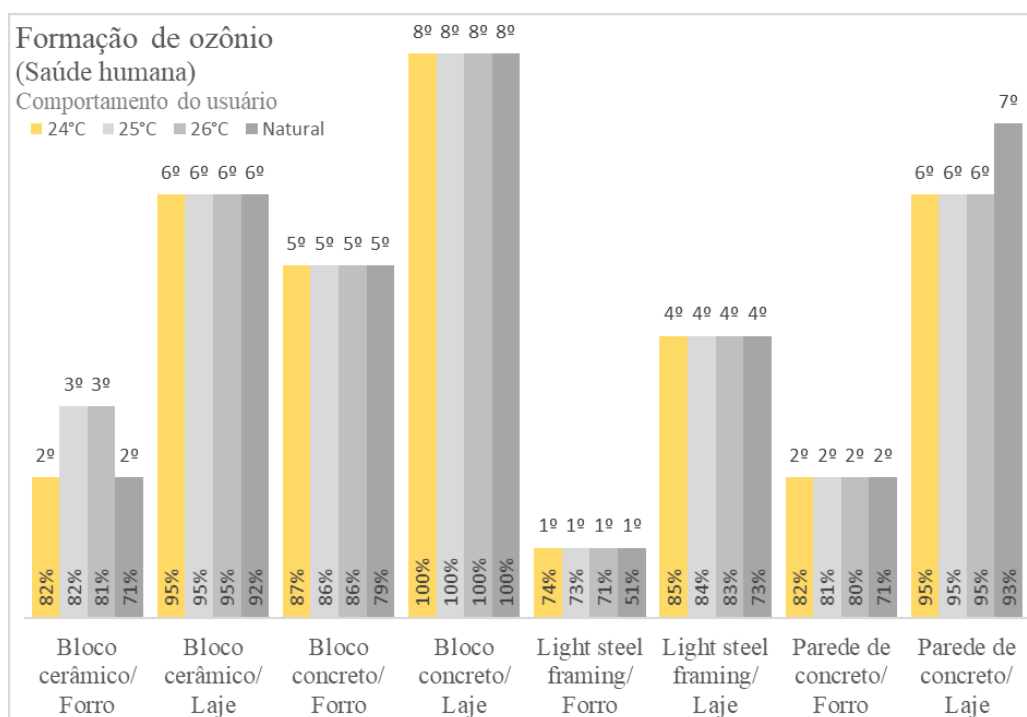


Figura 81 - Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação do comportamento do usuário.

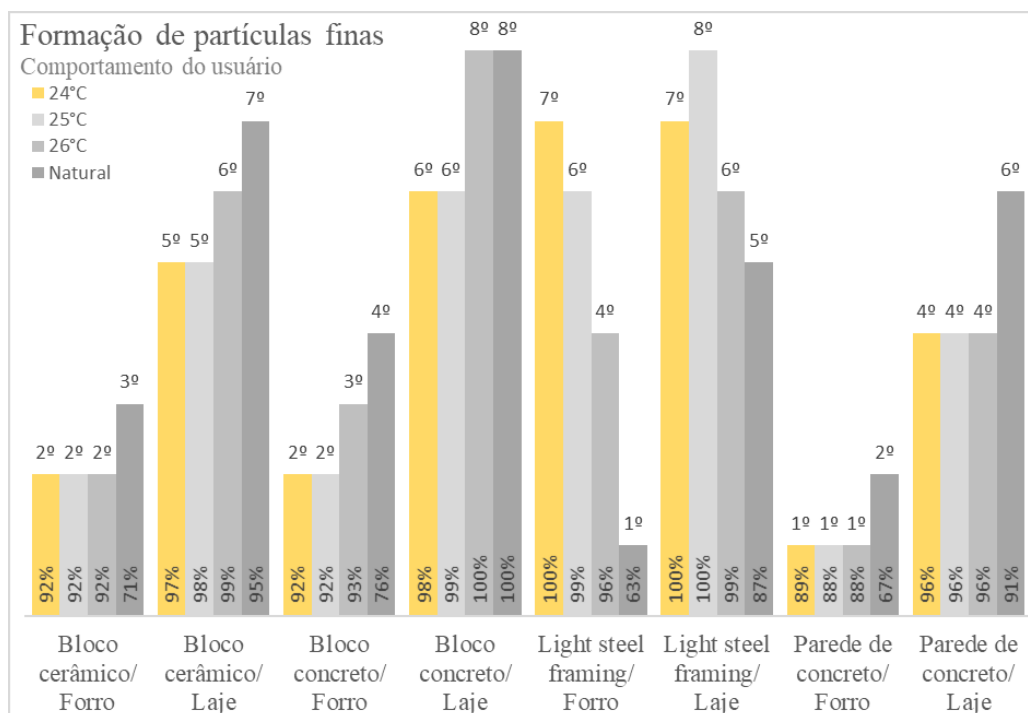


Figura 82 - Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação do comportamento do usuário.

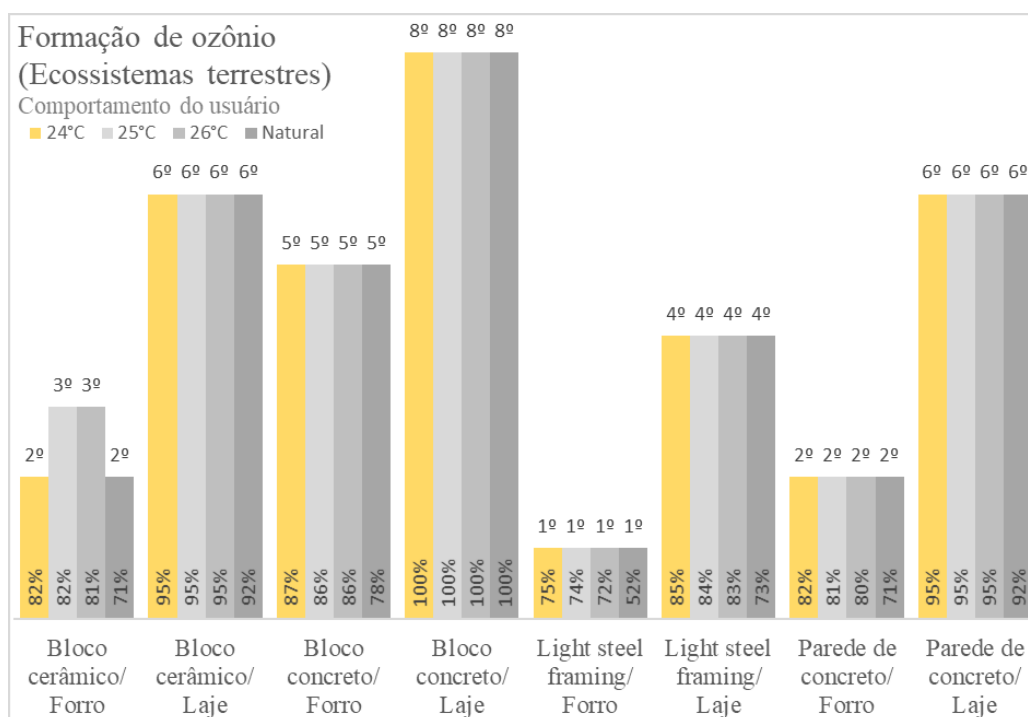


Figura 83 - Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação do comportamento do usuário.

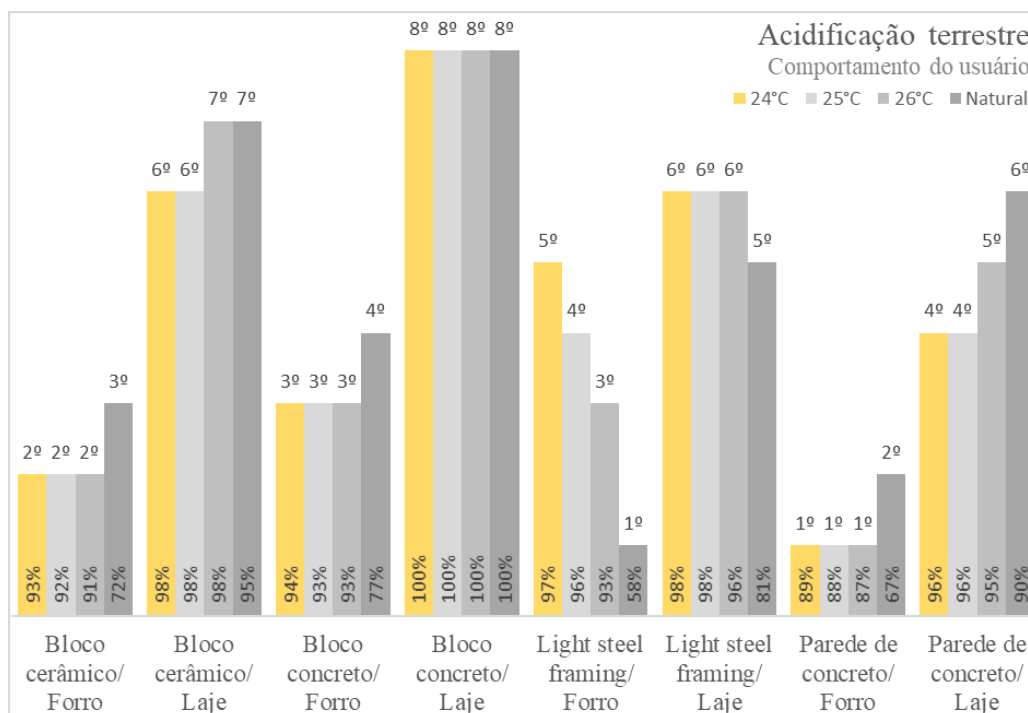


Figura 84 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação do comportamento do usuário.

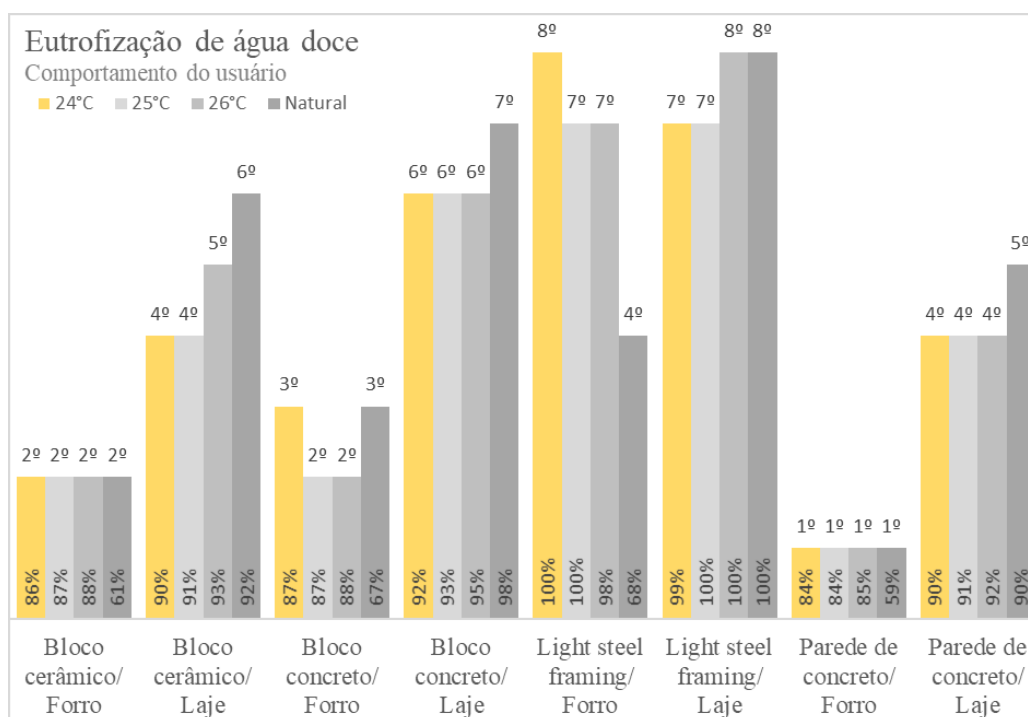


Figura 85 - Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação do comportamento do usuário.

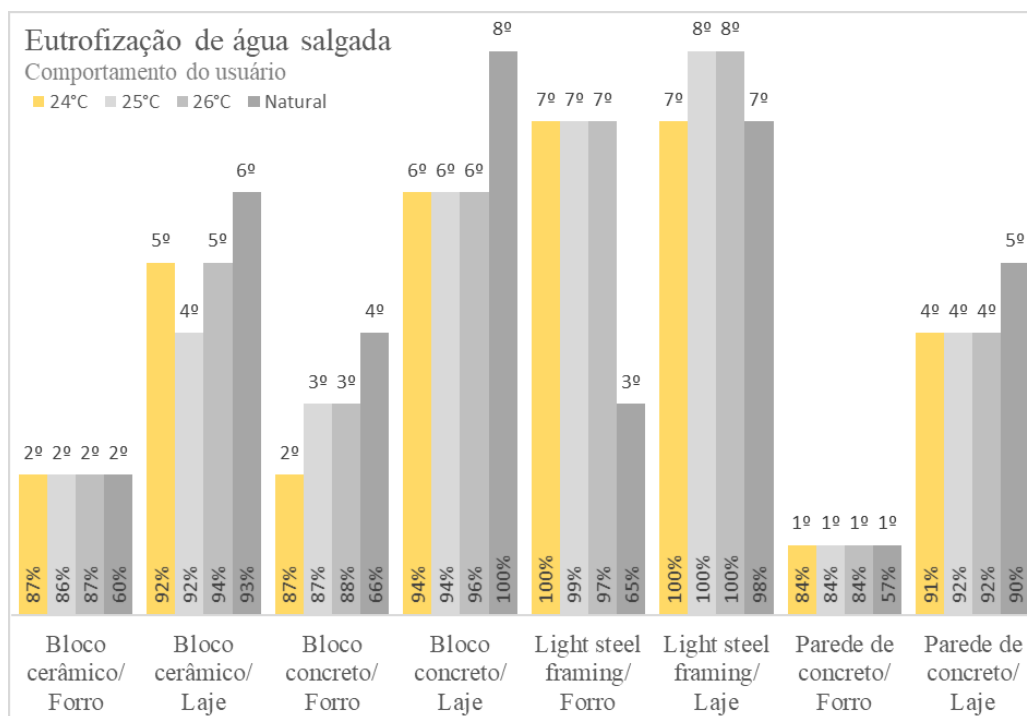


Figura 86 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação do comportamento do usuário.

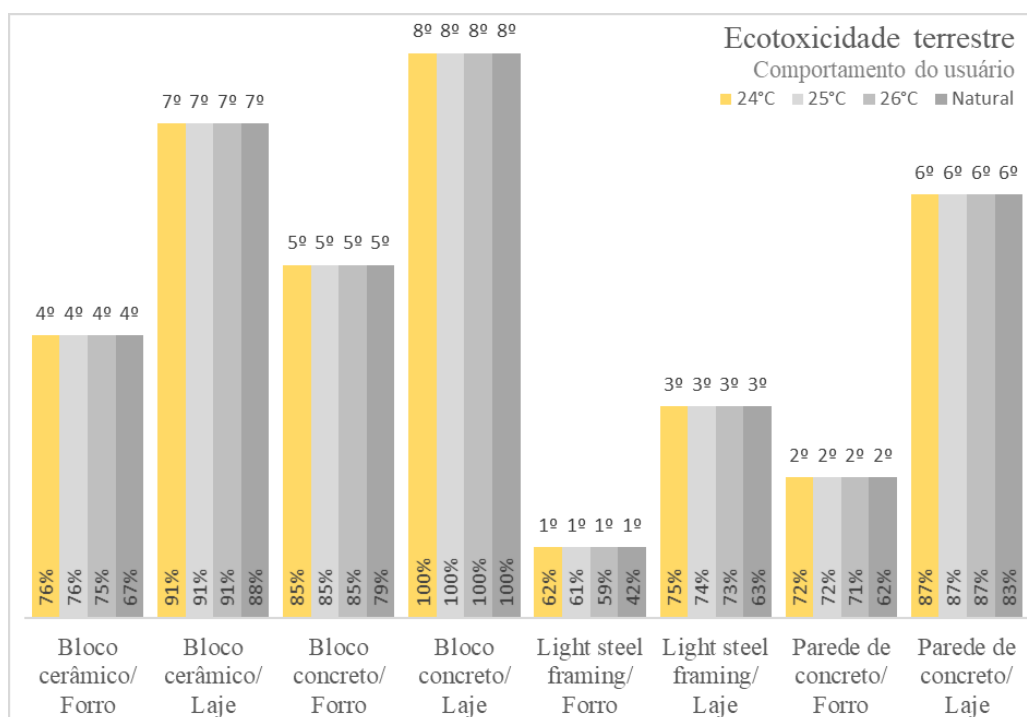


Figura 87 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação do comportamento do usuário.

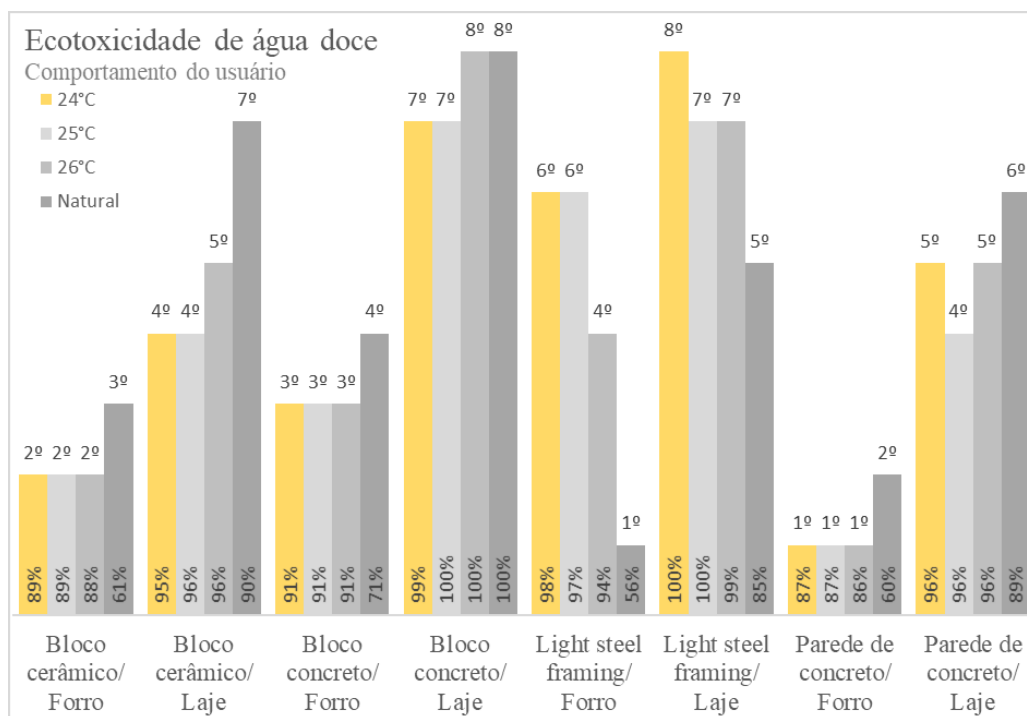


Figura 88 - Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação do comportamento do usuário.

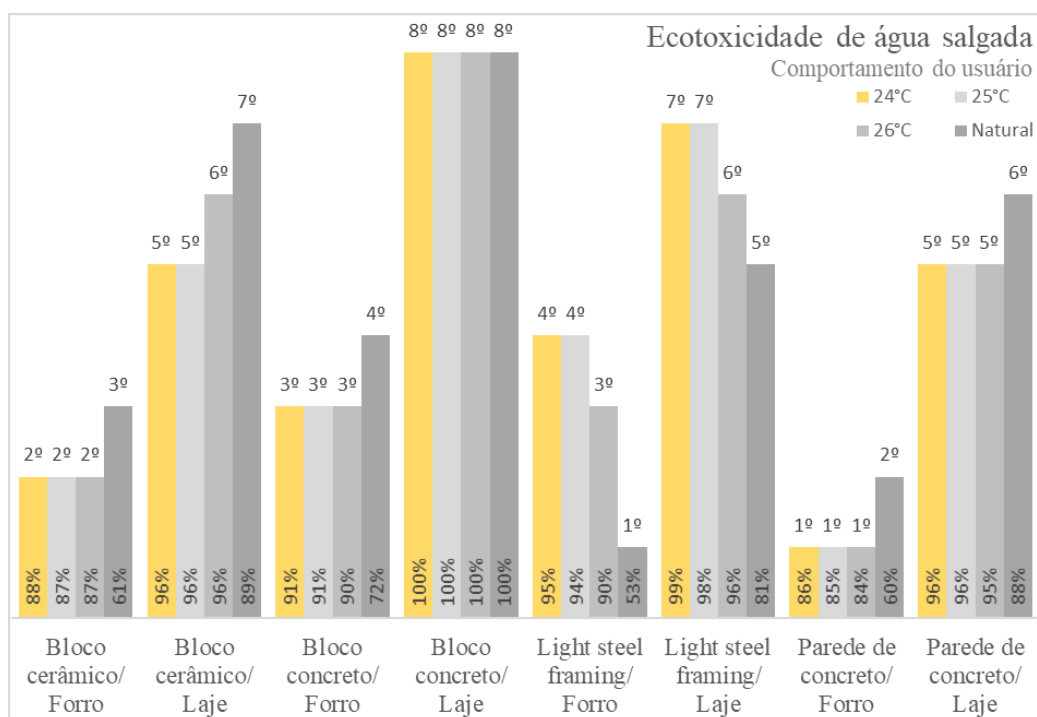


Figura 89 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação do comportamento do usuário.

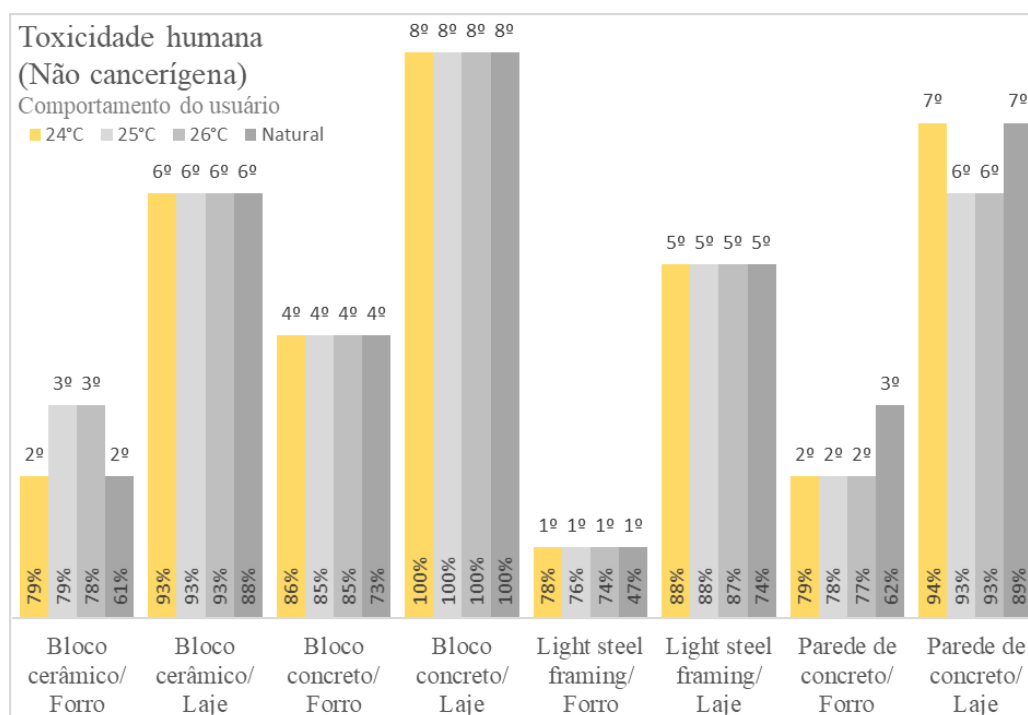


Figura 90 - Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação do comportamento do usuário.

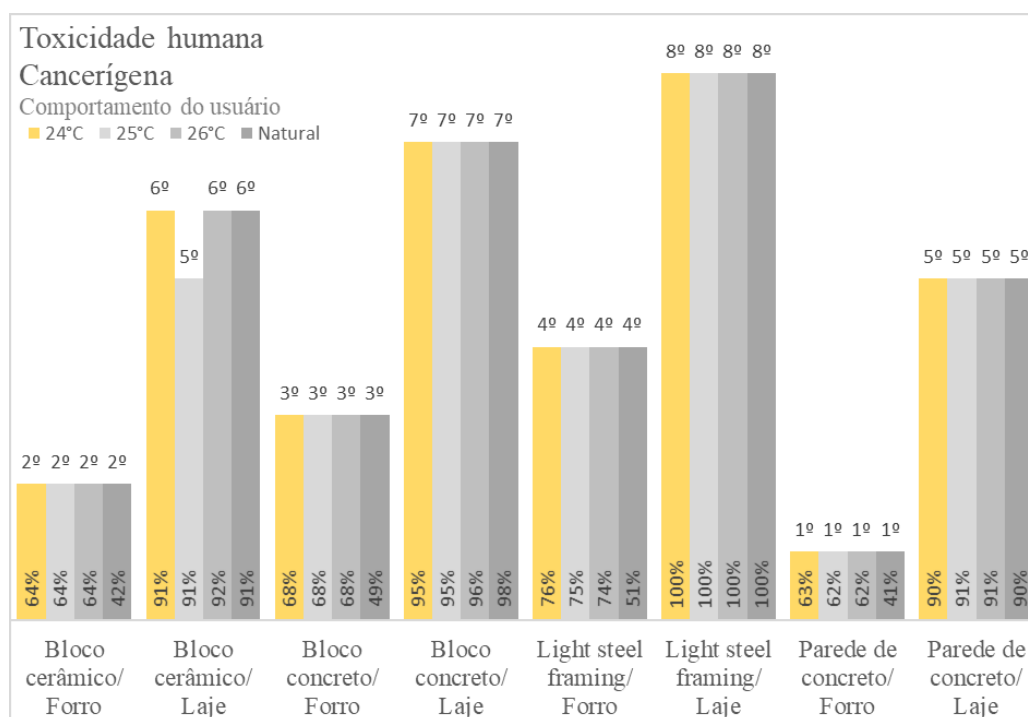


Figura 91 - Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação do comportamento do usuário.

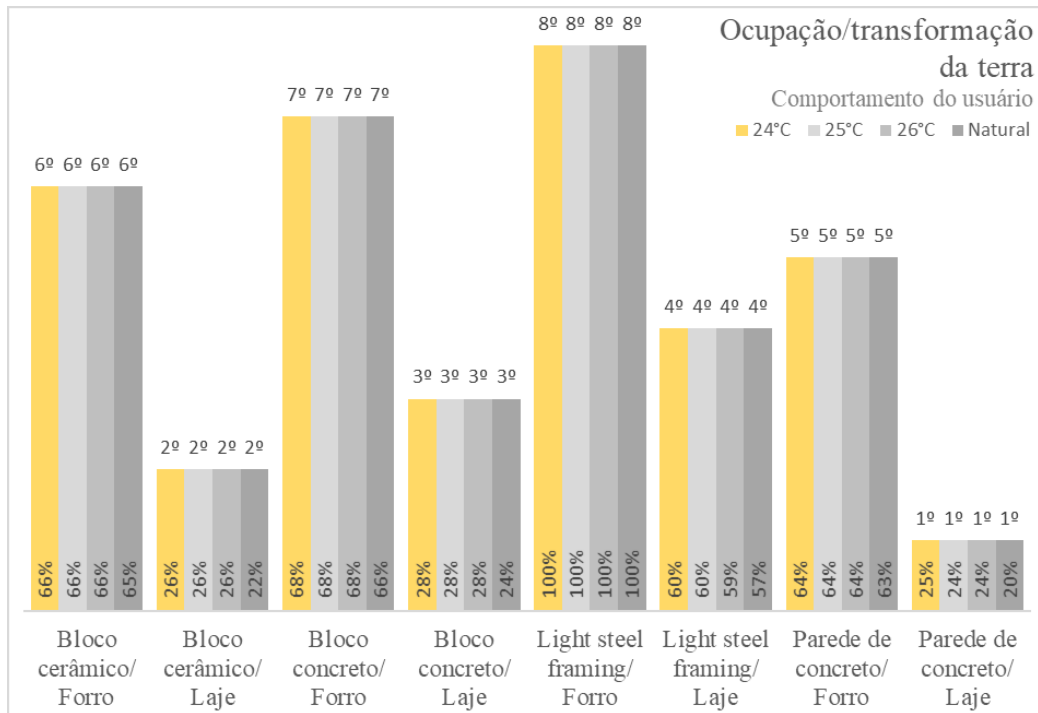


Figura 92 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação do comportamento do usuário.

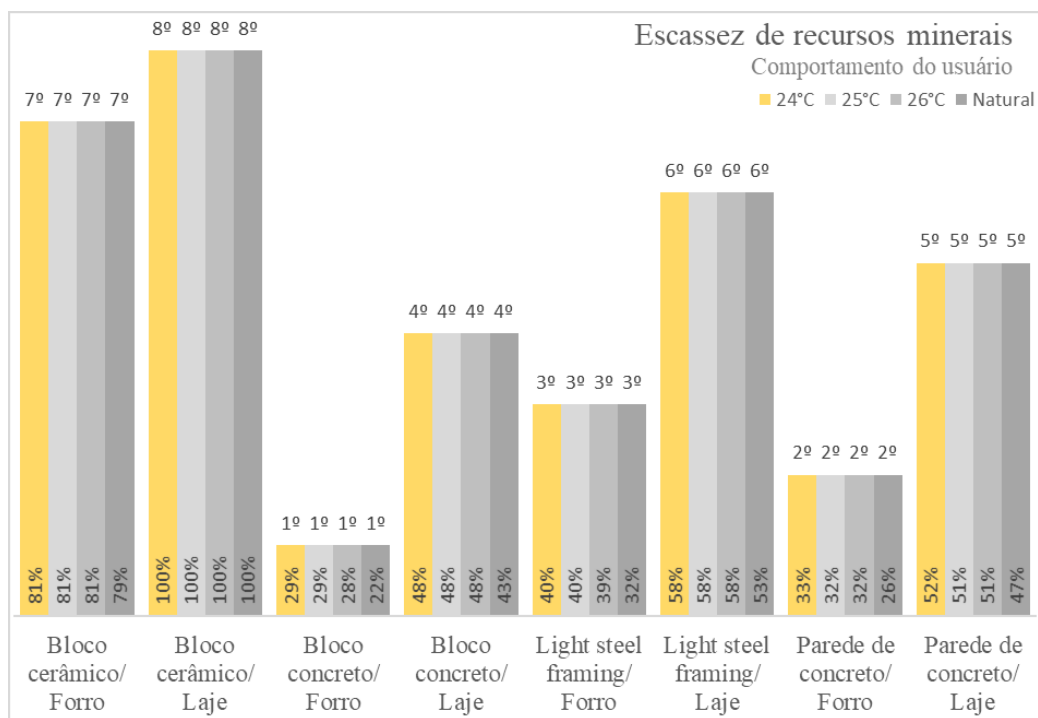


Figura 93 - Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação do comportamento do usuário.

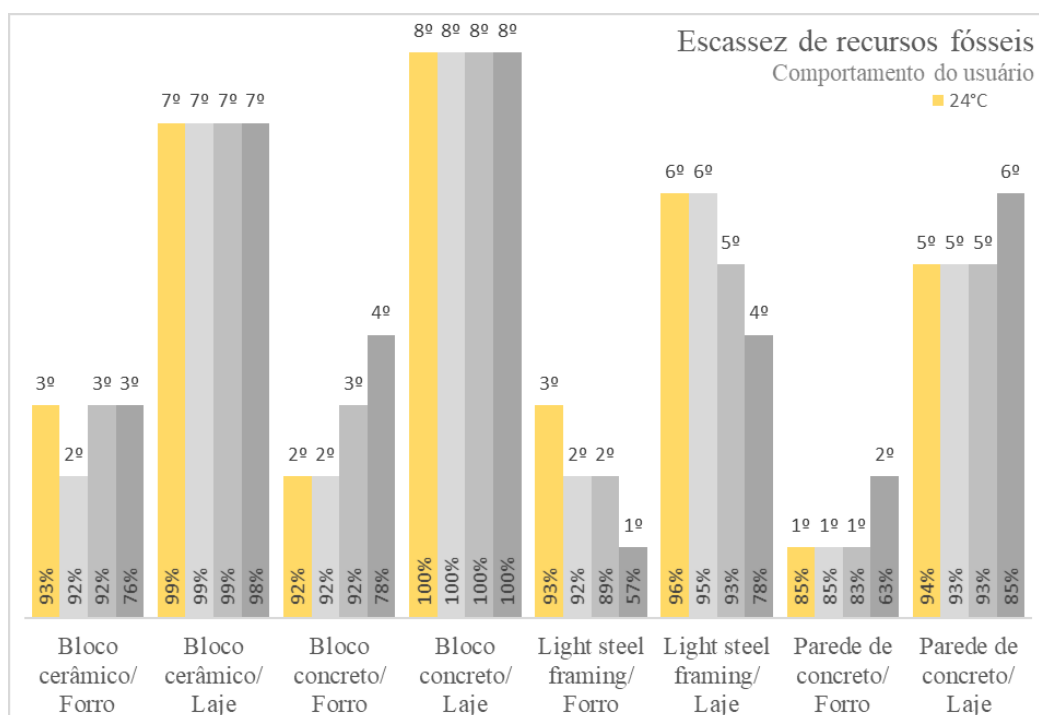
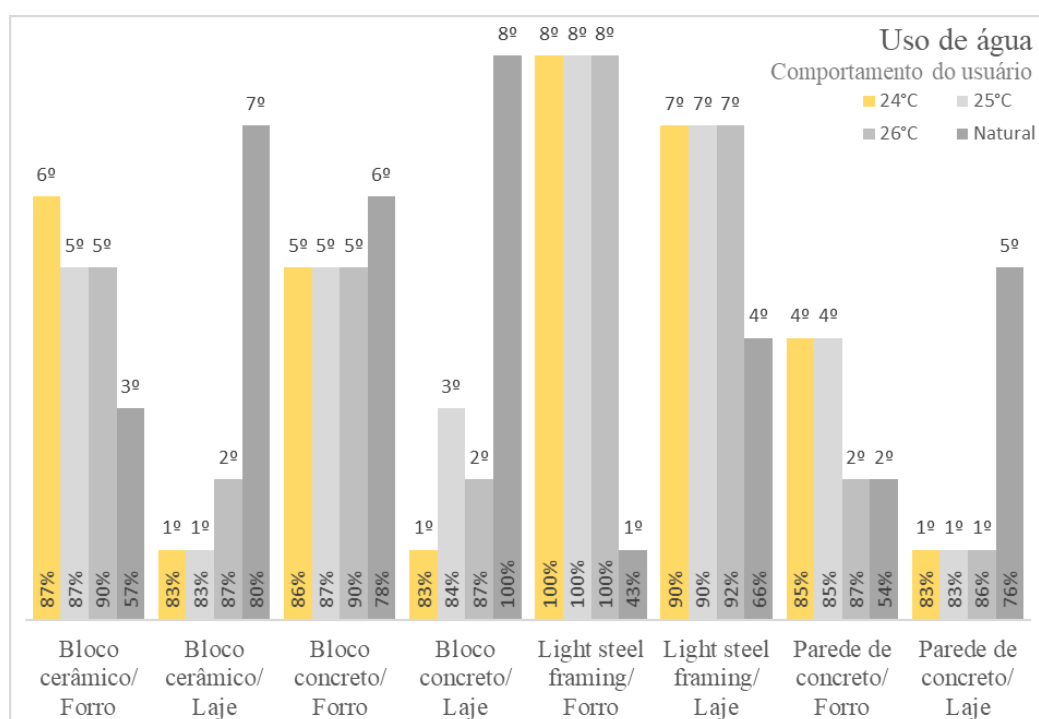


Figura 94 - Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação do comportamento do usuário.



Zona bioclimática

Figura 95 – Perfil de impacto para a categoria de depleção do ozônio estratosférico com variação da zona bioclimática.

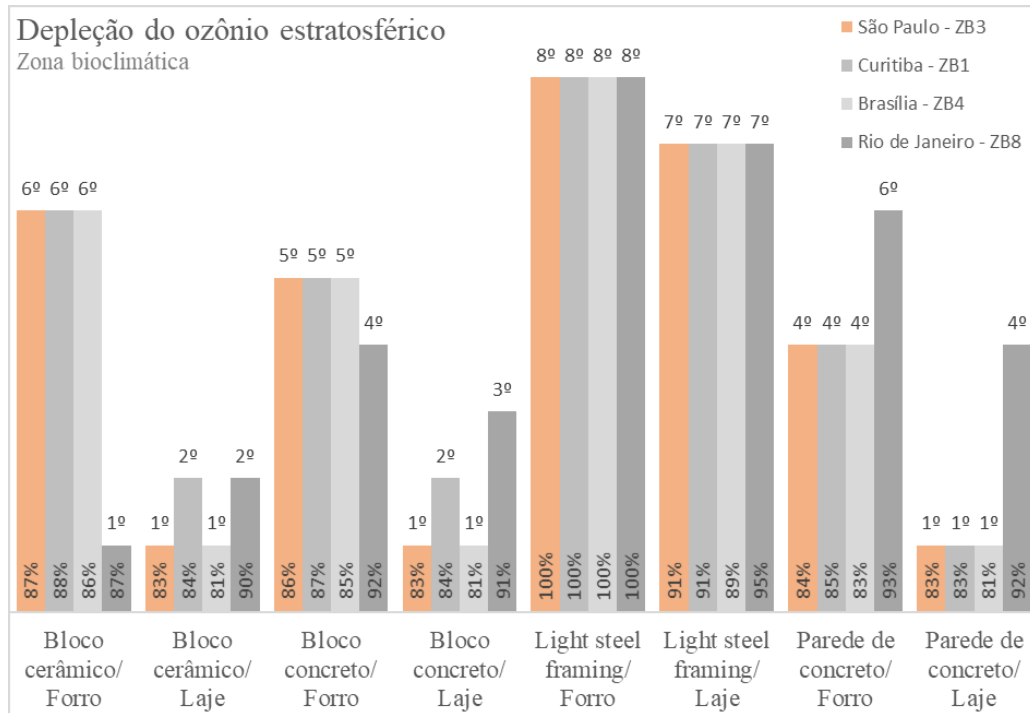


Figura 96 – Perfil de impacto para a categoria de radiação ionizante com variação da zona bioclimática.

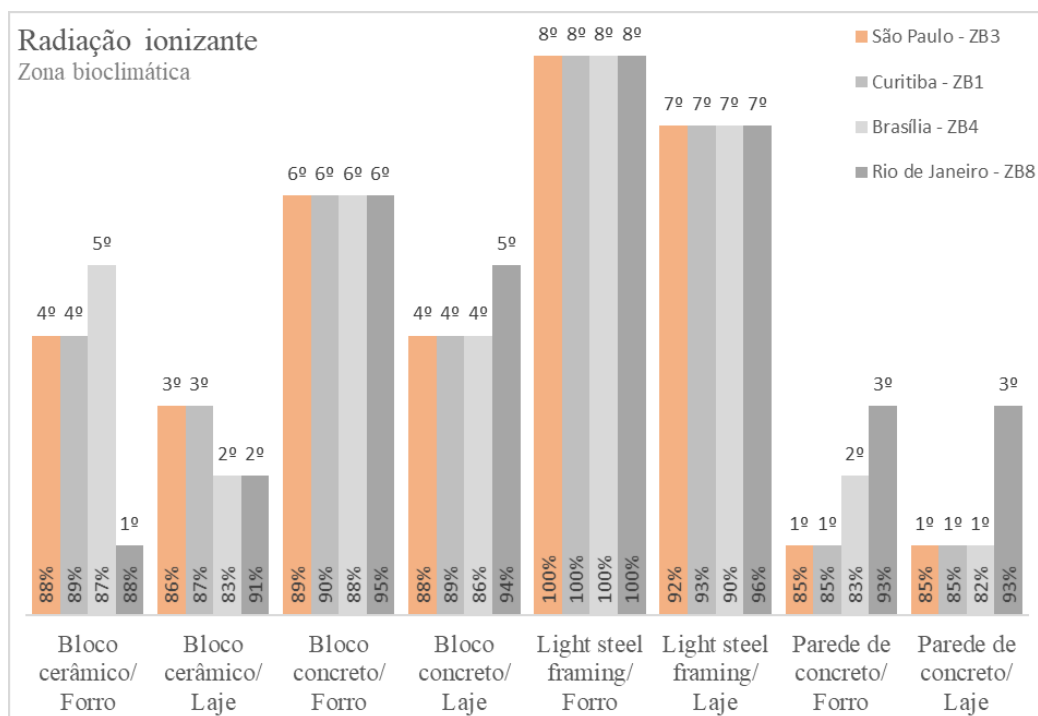


Figura 97 – Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (saúde humana) com variação da zona bioclimática.

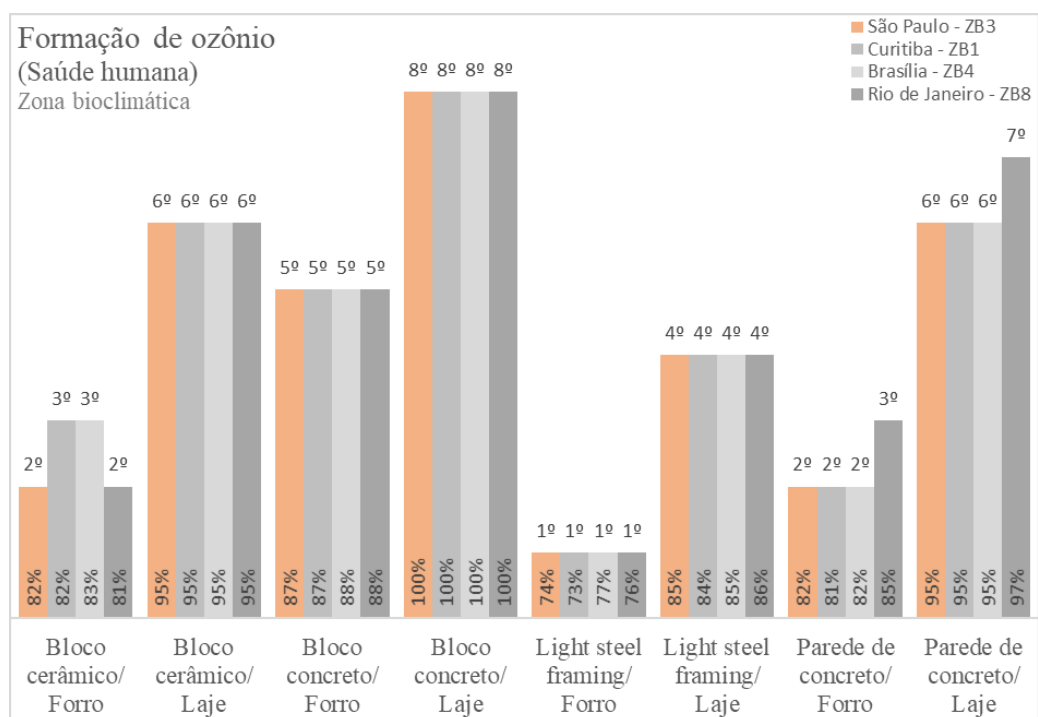


Figura 98 – Perfil de impacto para a categoria de formação de partículas finas com variação da zona bioclimática.

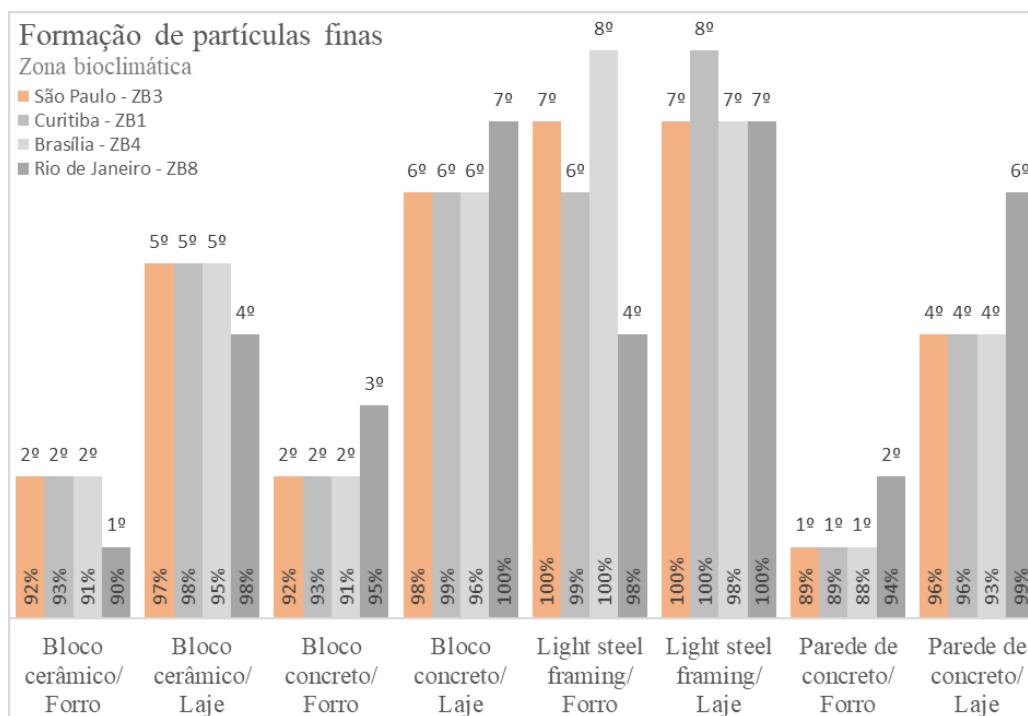


Figura 99 – Perfil de impacto para a categoria de formação de ozônio (ecossistemas terrestres) com variação da zona bioclimática.

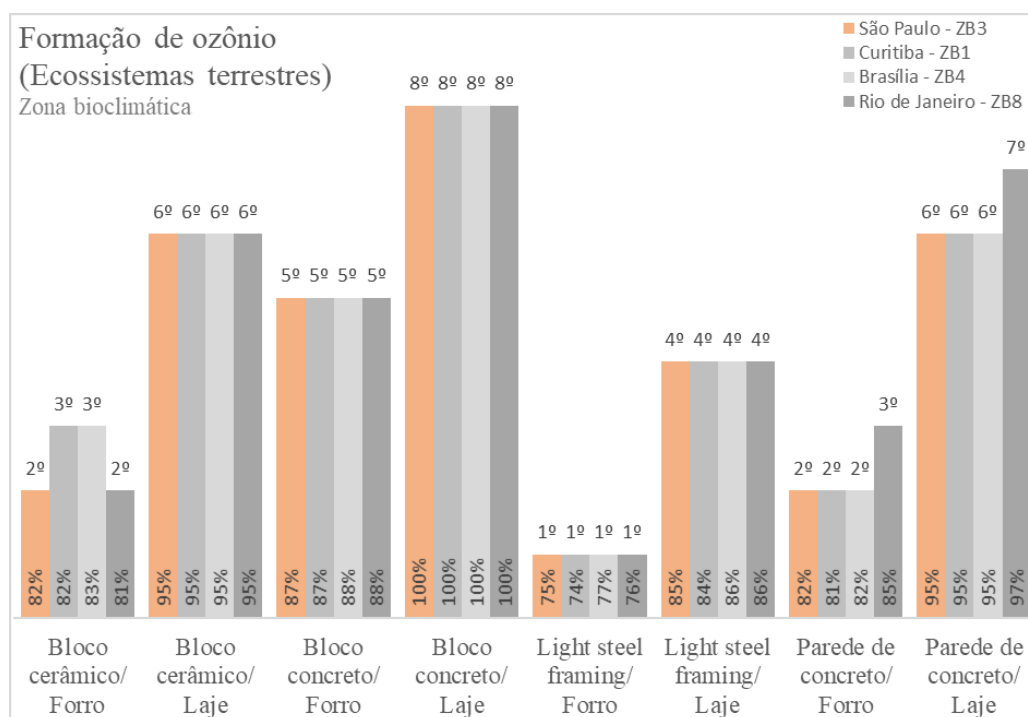


Figura 100 – Perfil de impacto para a categoria de acidificação terrestre com variação da zona bioclimática.

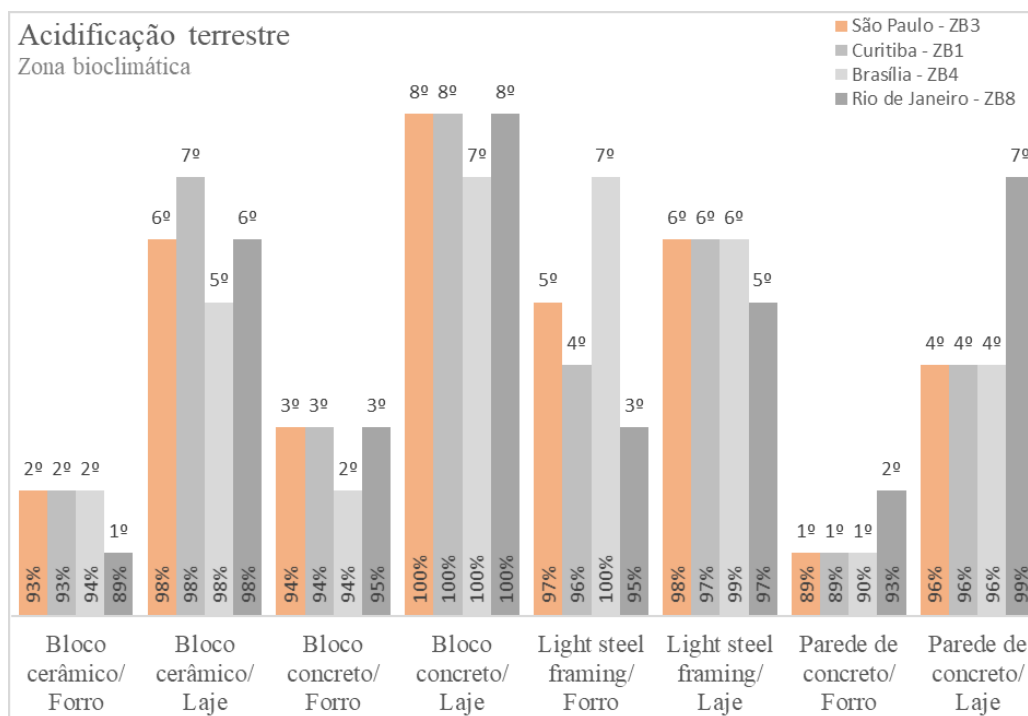


Figura 101 – Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água doce com variação da zona bioclimática.

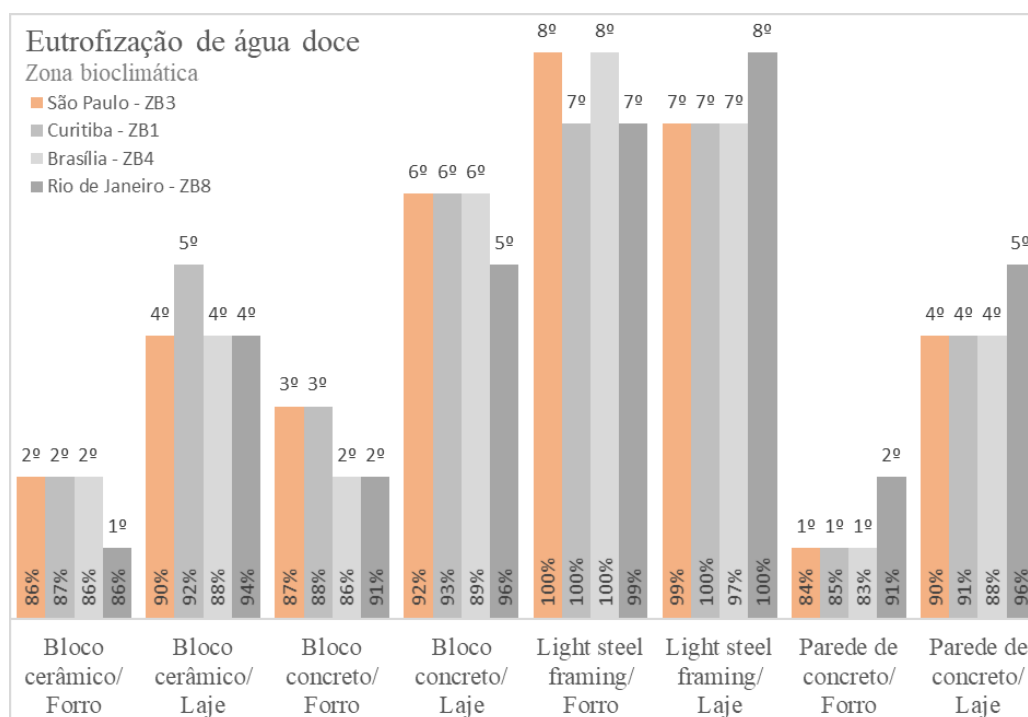


Figura 102 – Perfil de impacto para a categoria de eutrofização de água salgada com variação da zona bioclimática.

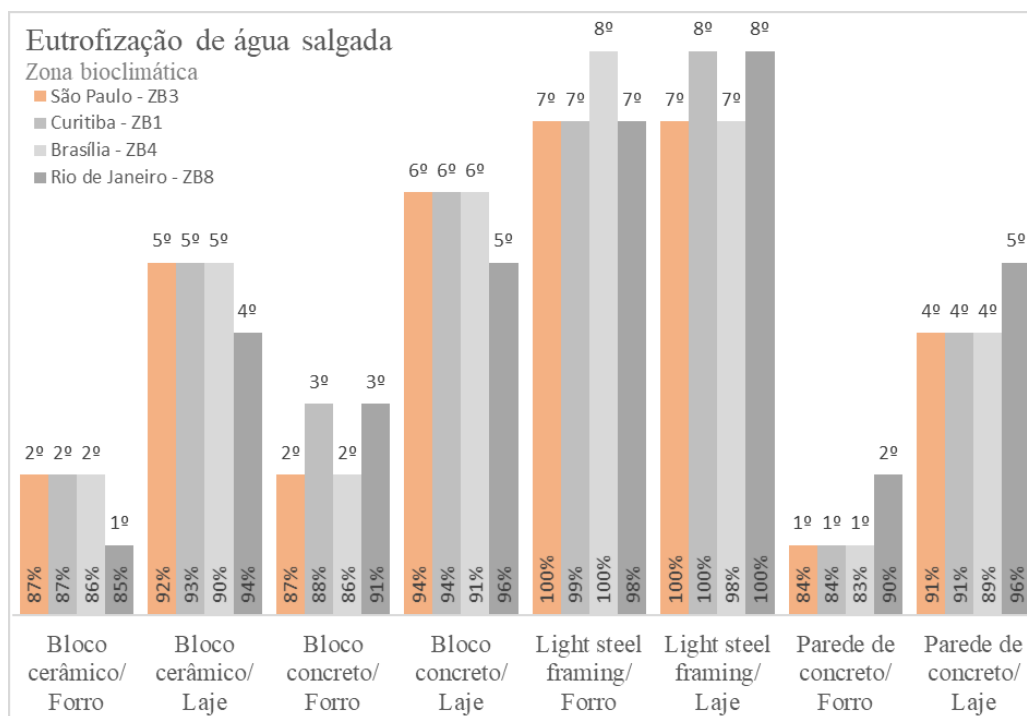


Figura 103 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade terrestre com variação da zona bioclimática.

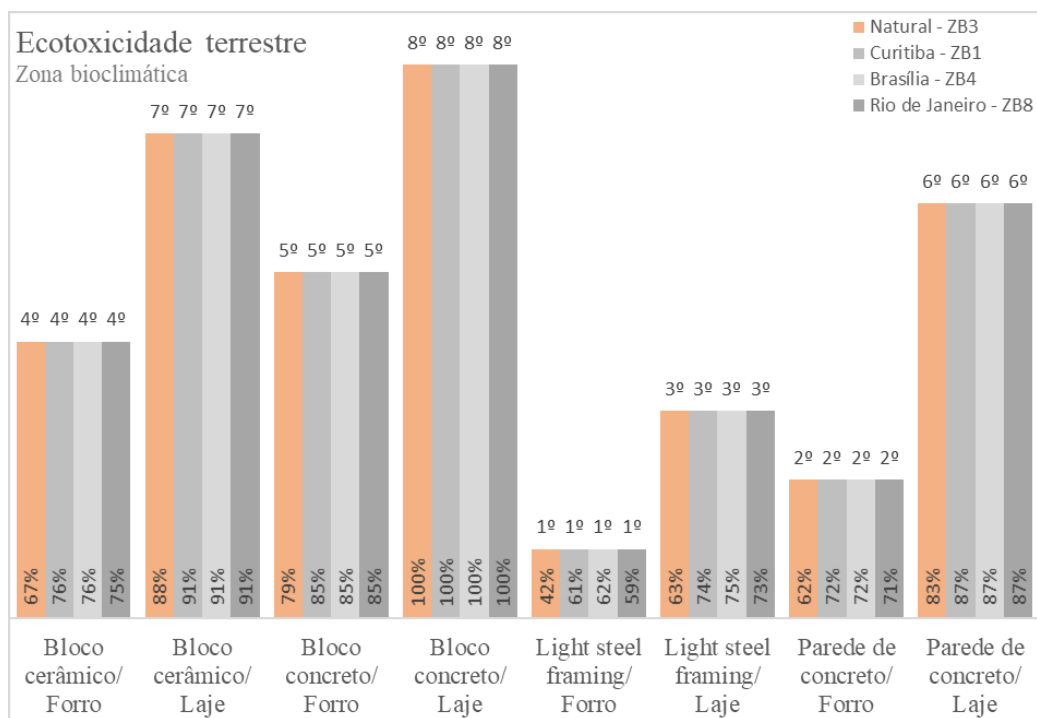


Figura 104 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água doce com variação da zona bioclimática.

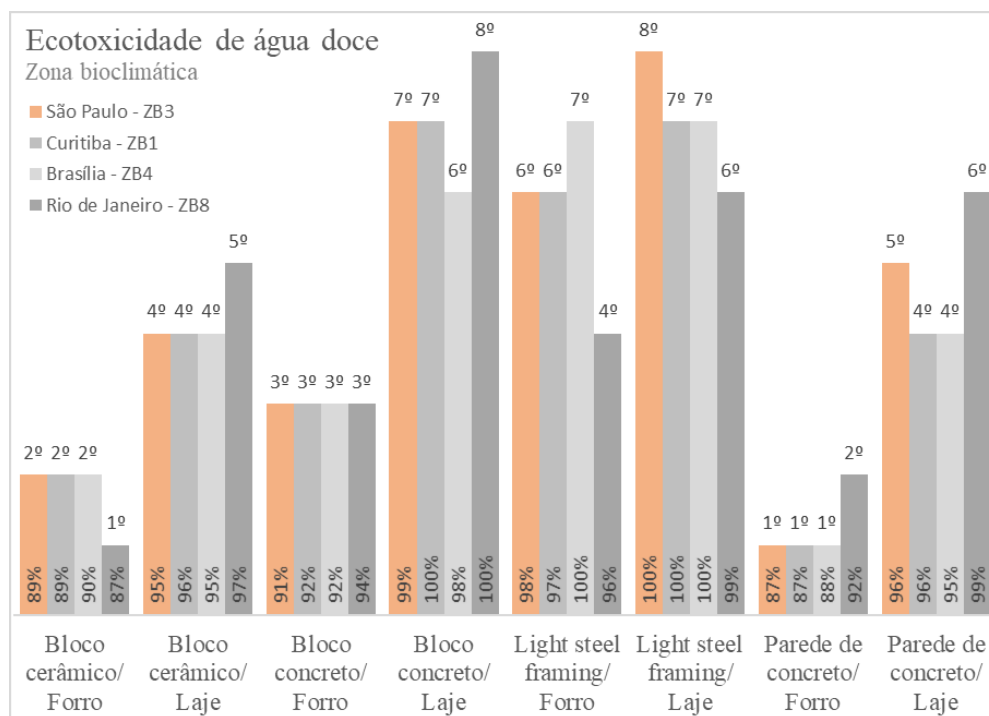


Figura 105 – Perfil de impacto para a categoria de ecotoxicidade de água salgada com variação da zona bioclimática.

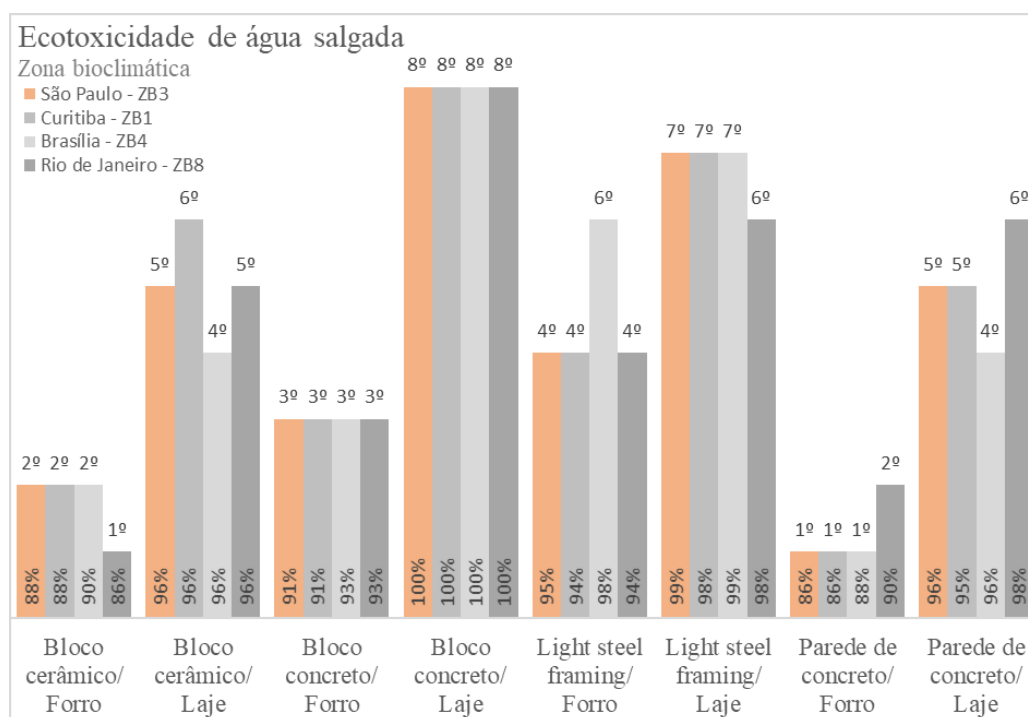


Figura 106 – Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana cancerígena com variação da zona bioclimática.

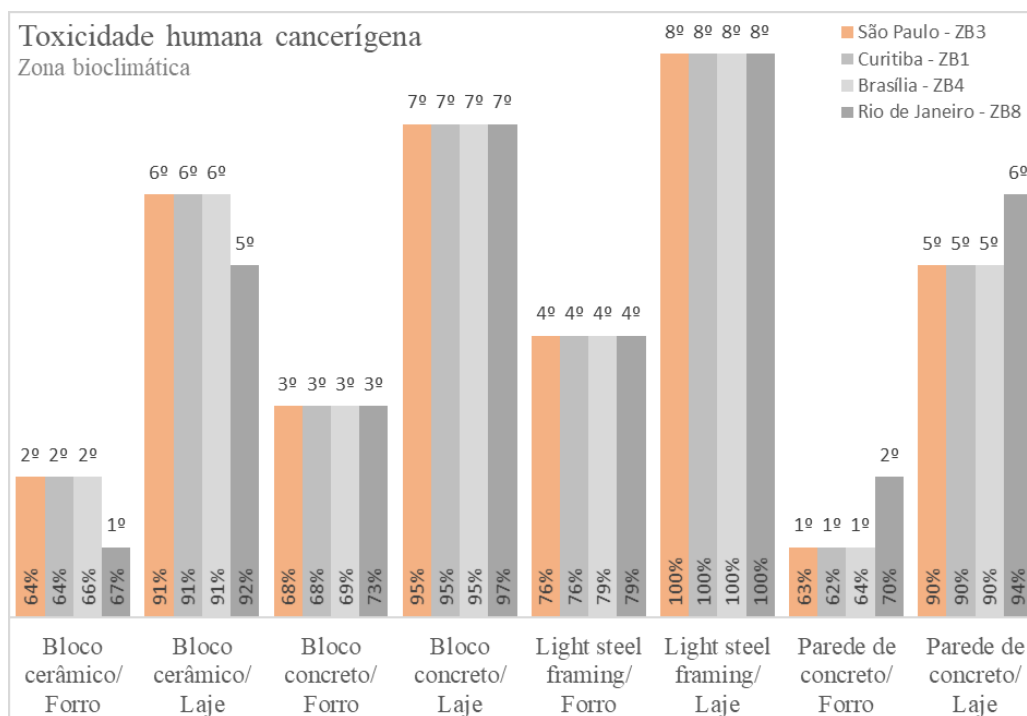


Figura 107 – Perfil de impacto para a categoria de toxicidade humana não cancerígena com variação da zona bioclimática.

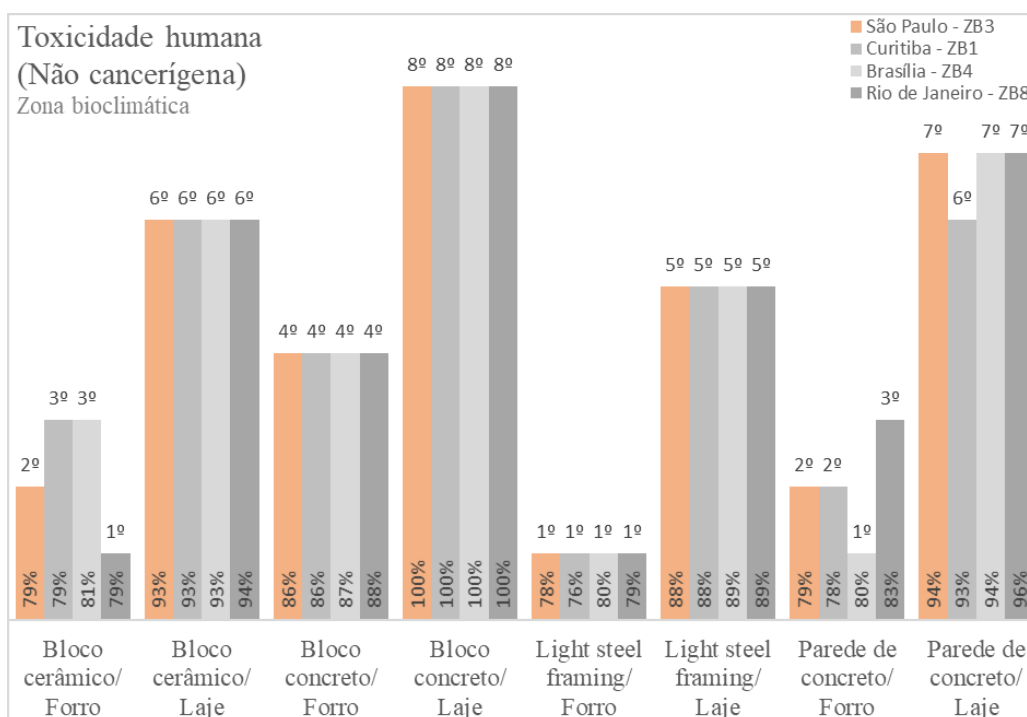


Figura 108 – Perfil de impacto para a categoria de ocupação/transformação da terra com variação da zona bioclimática.

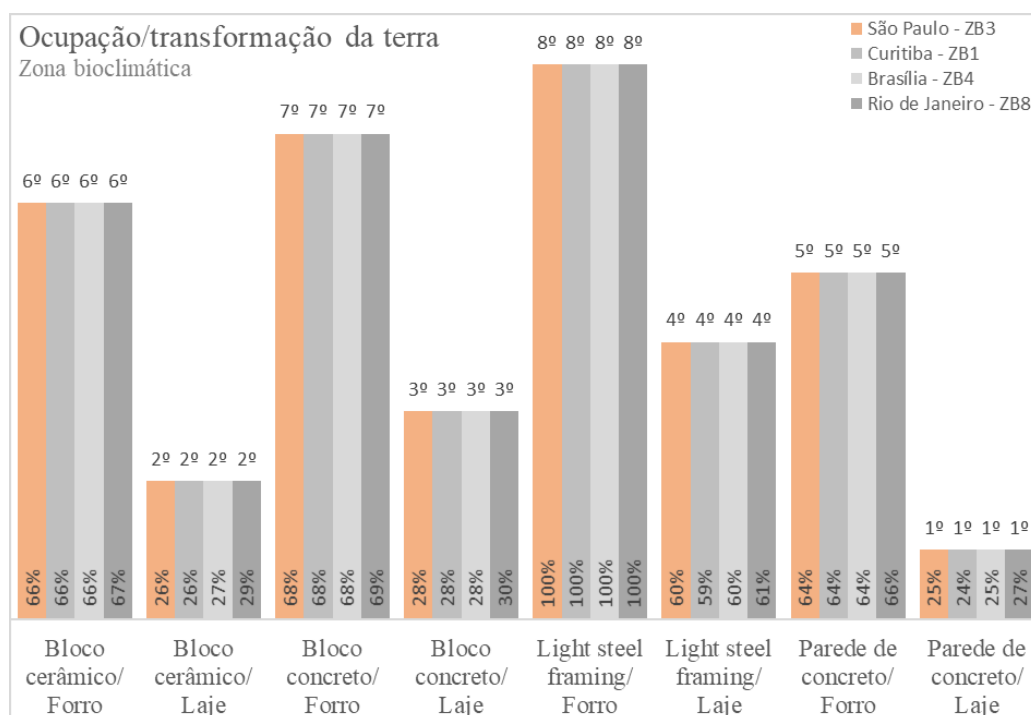


Figura 109 – Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos minerais com variação da zona bioclimática.

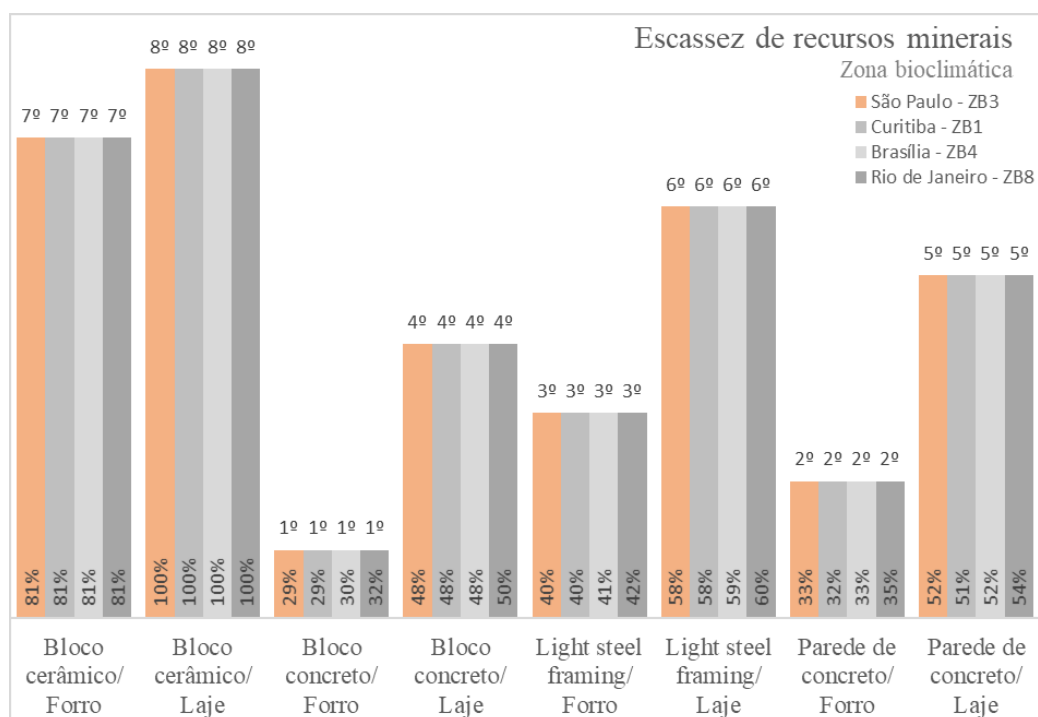


Figura 110 – Perfil de impacto para a categoria de escassez de recursos fósseis com variação da zona bioclimática.

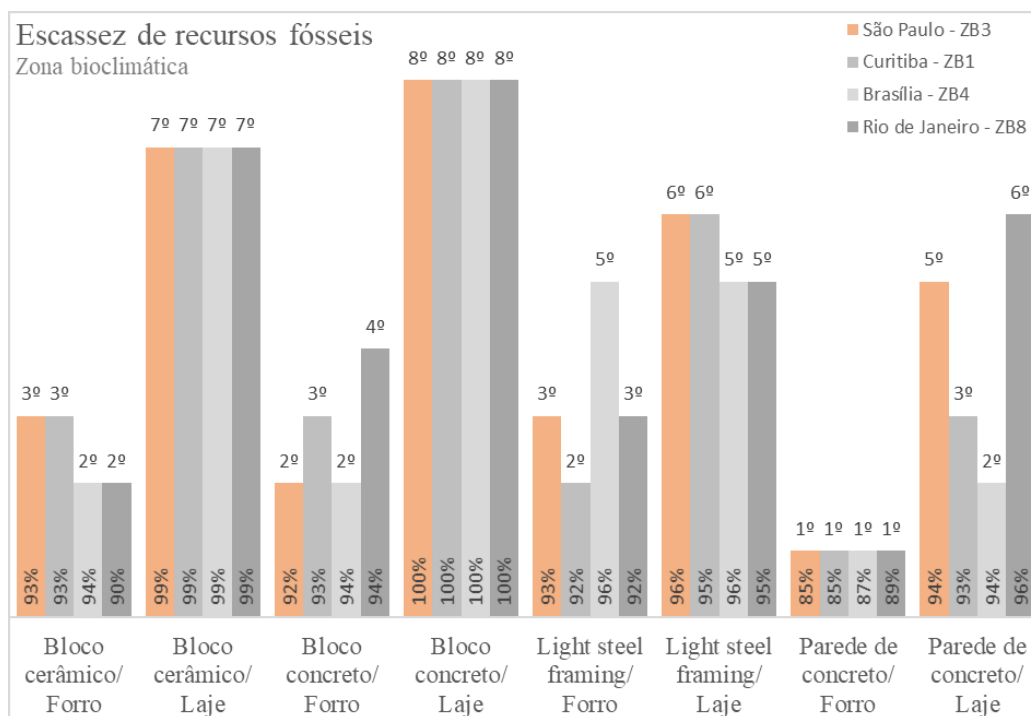
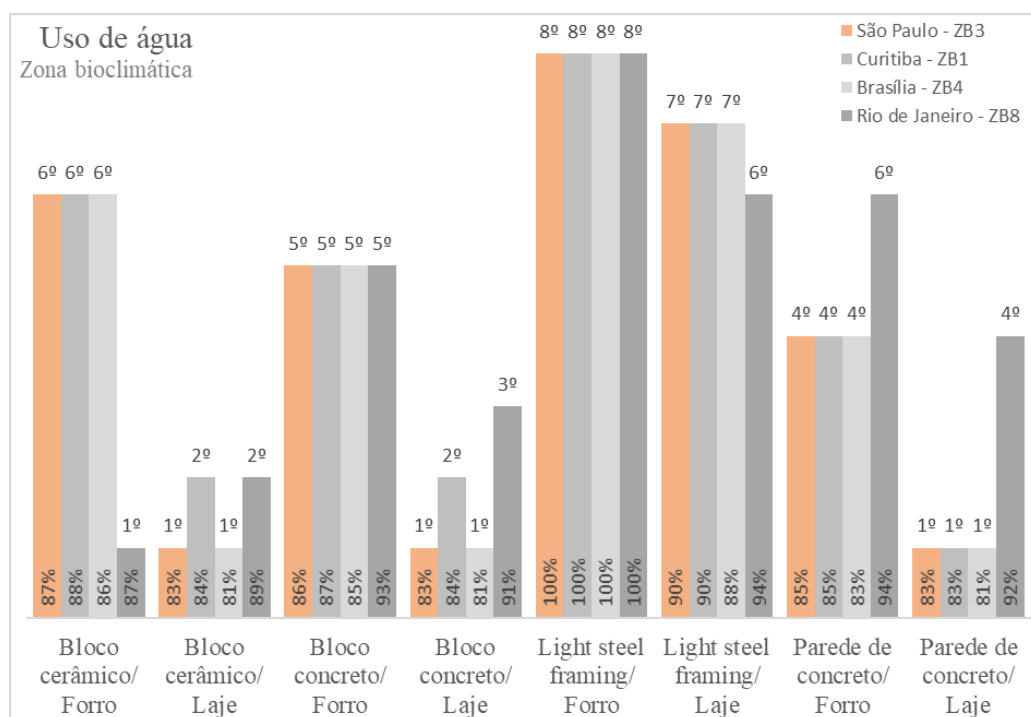


Figura 111 – Perfil de impacto para a categoria de uso de água com variação da zona bioclimática.



Método de AICV

Figura 112 – Resultados normalizados do método *Impact 2002+* para as categorias de impacto de cancerígenos, não cancerígenos, inorgânicos respiráveis e energia não renovável.

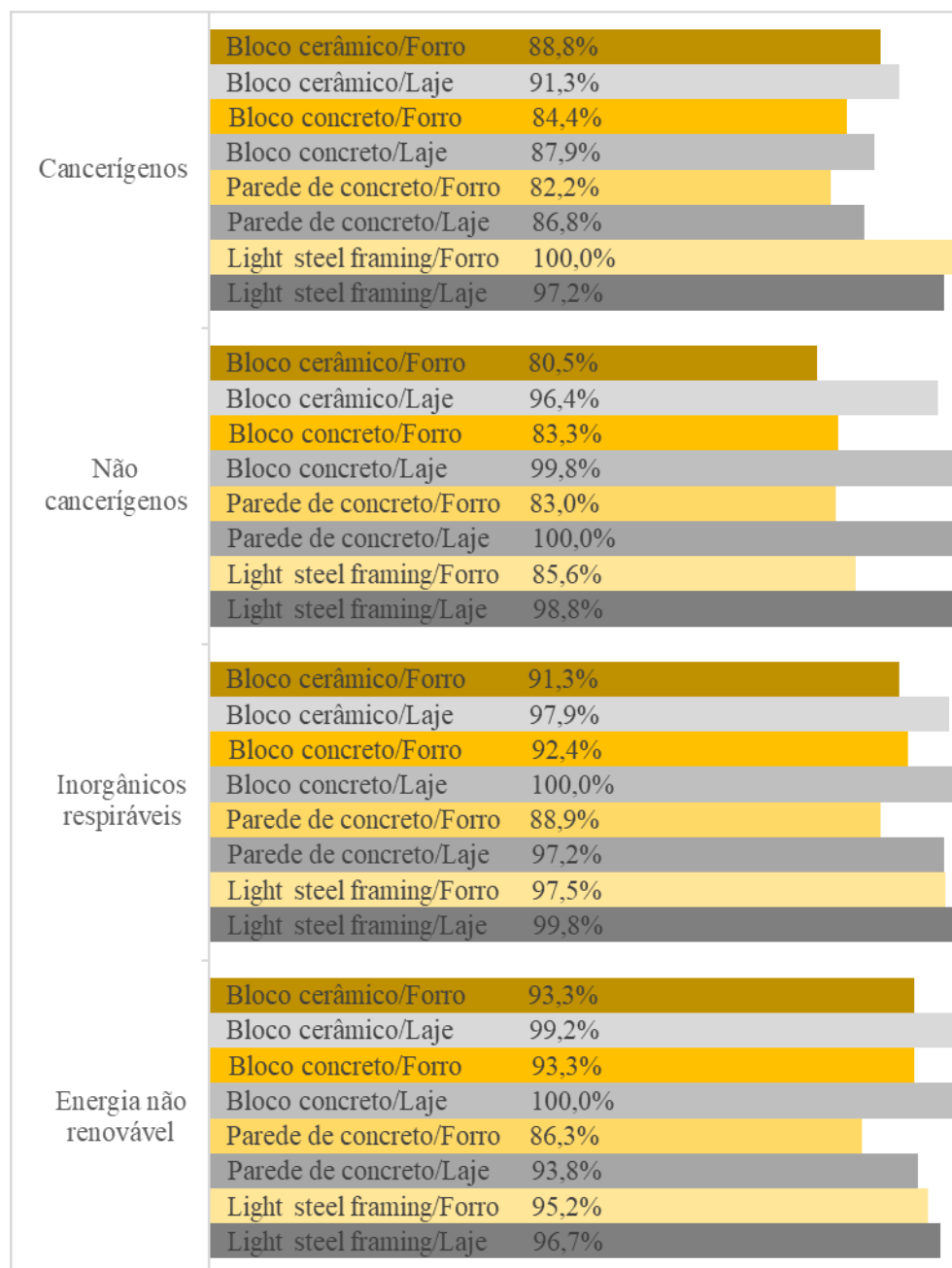


Figura 113 – Resultados normalizados do método *Impact 2002+* para as categorias de impacto de depleção da camada de ozônio, orgânicos respiráveis e ecotoxicidade (aquática e terrestre).

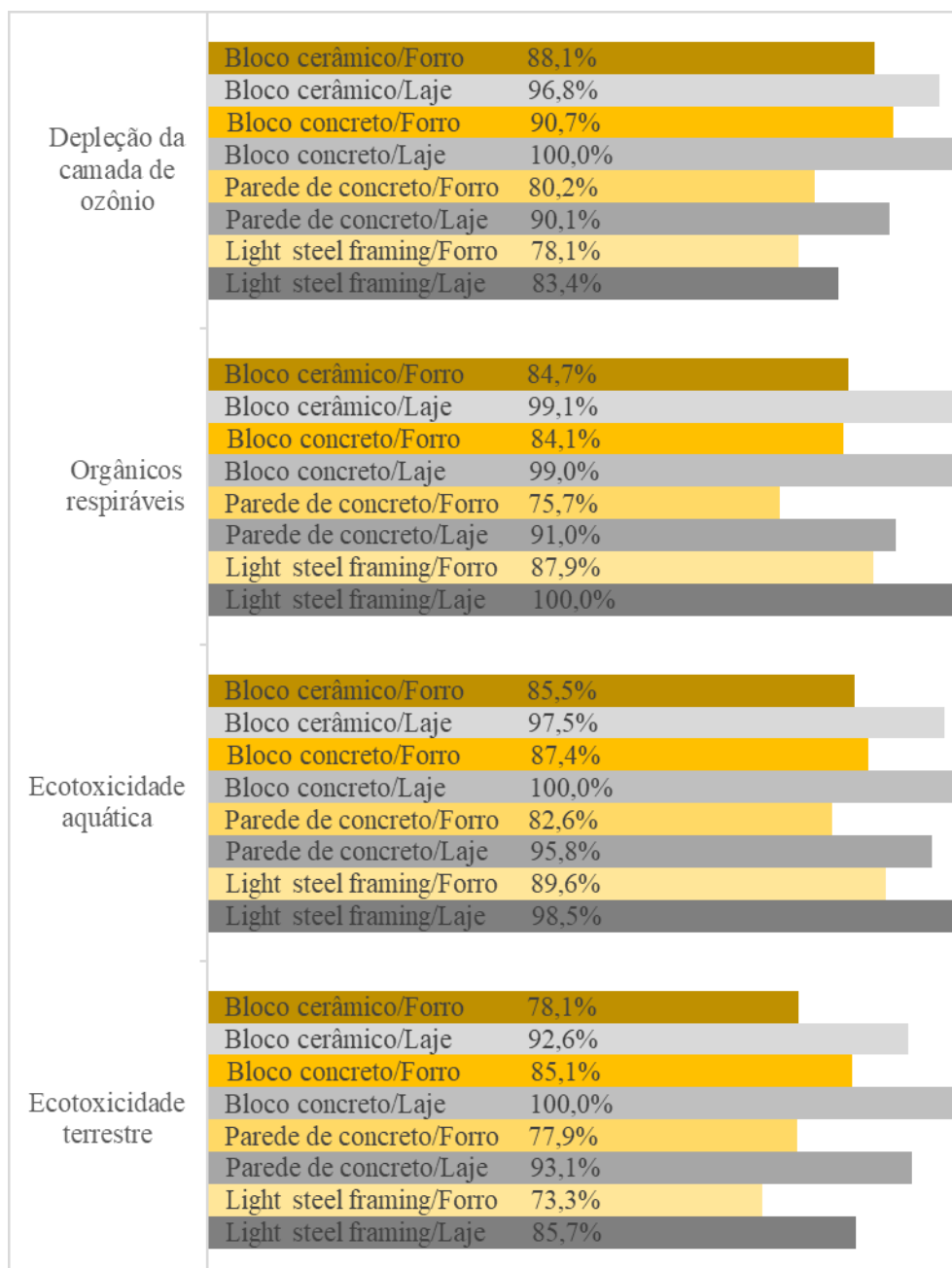
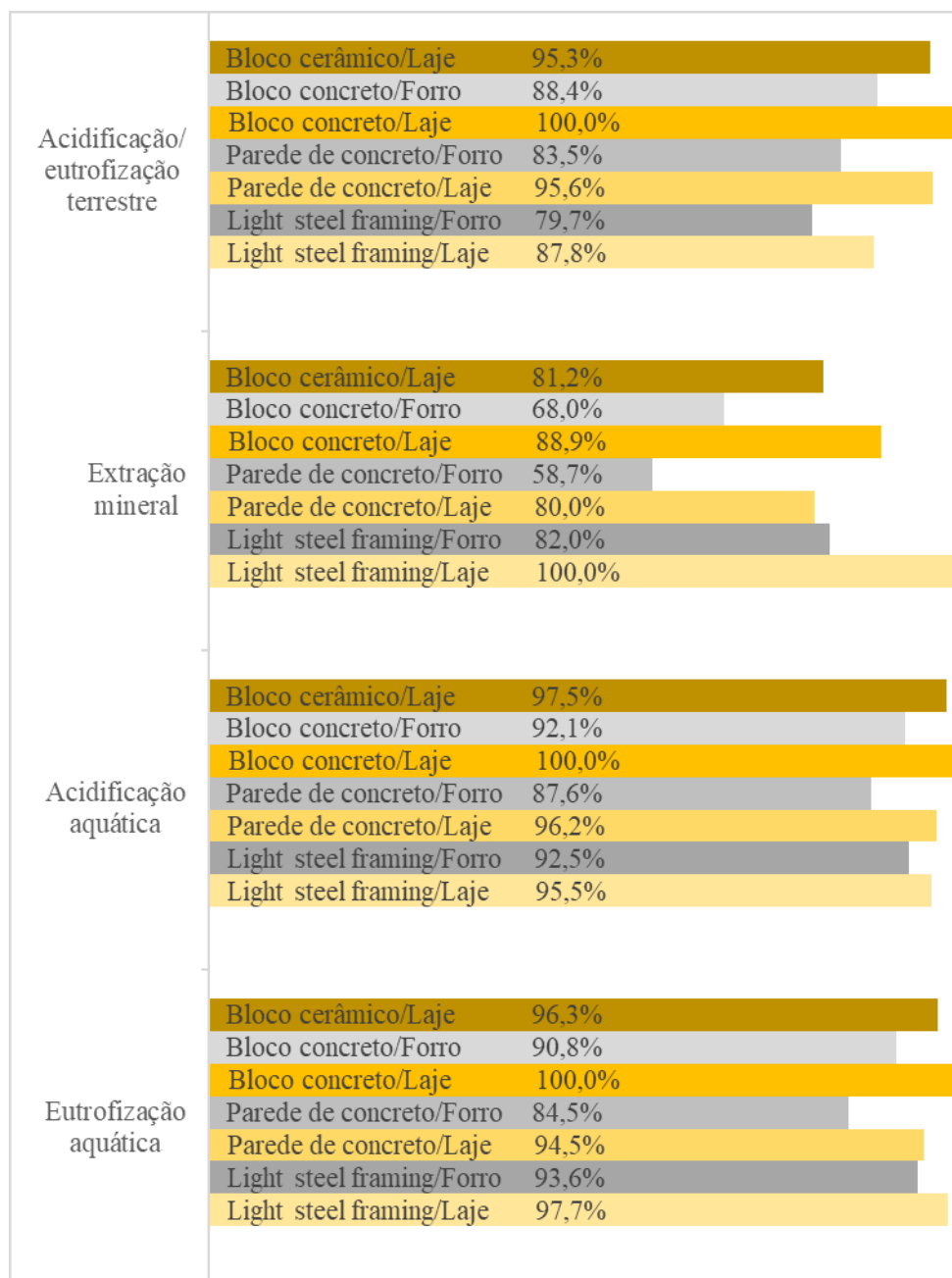


Figura 114 – Resultados normalizados do método *Impact 2002+* para as categorias de impacto de acidificação/eutrofização terrestre, extração mineral, acidificação aquática e eutrofização aquática.



APÊNDICE D – Análise de contribuição para a ACV

Figura 115- Análise de contribuição para a categoria de impacto de acidificação terrestre.

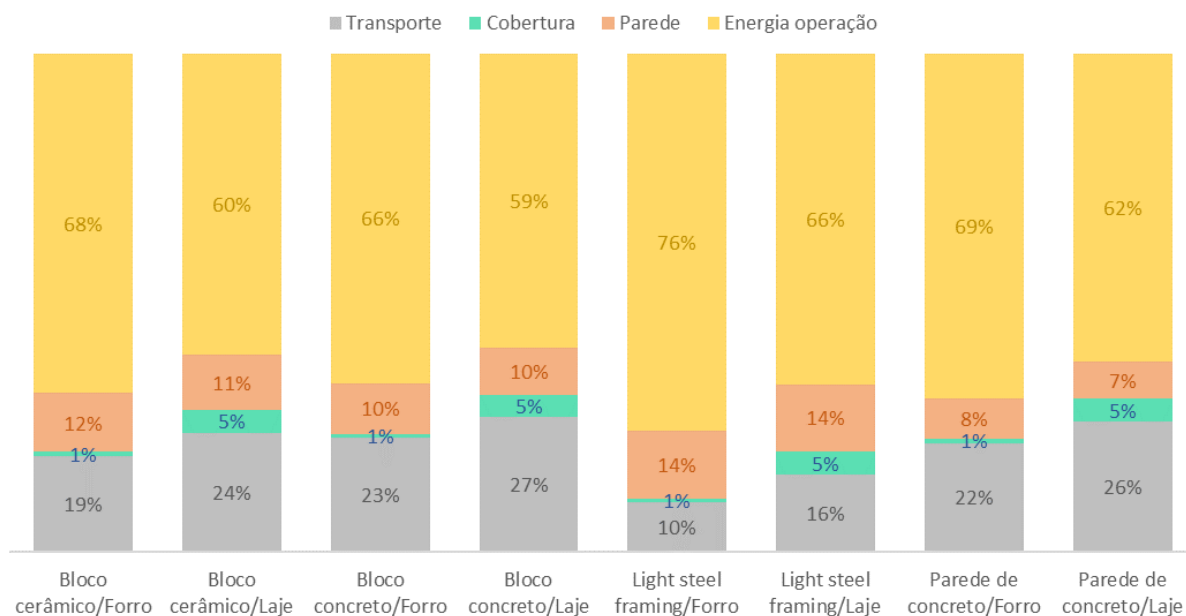


Figura 116- Análise de contribuição para a categoria de impacto de depleção do ozônio estratosférico.

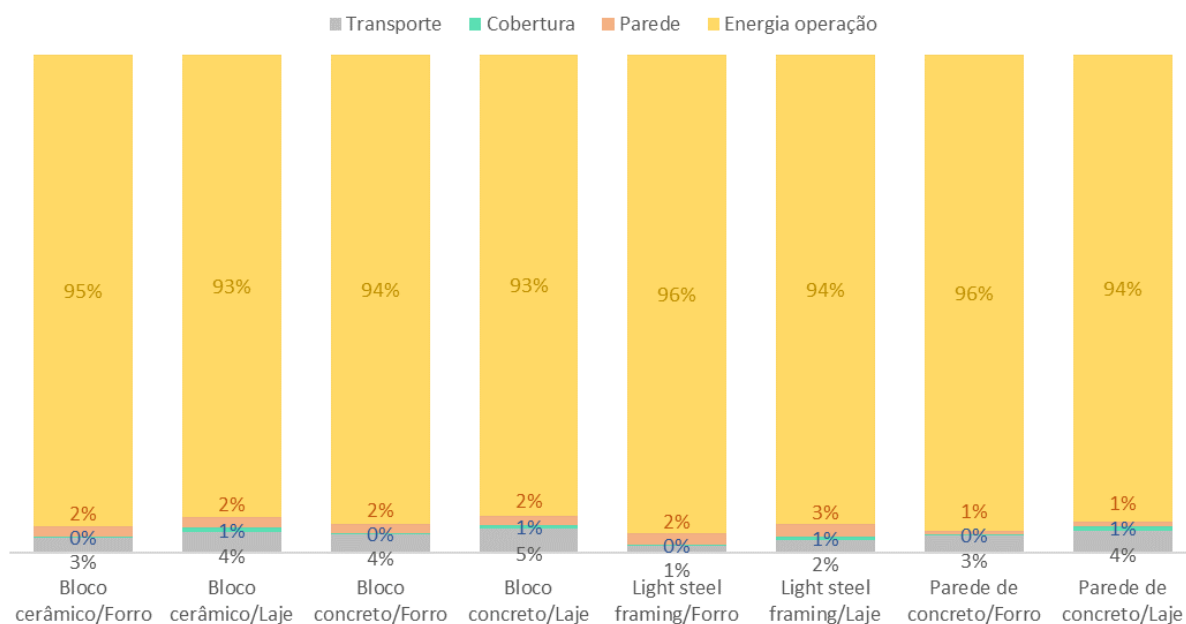


Figura 117- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade de água doce.

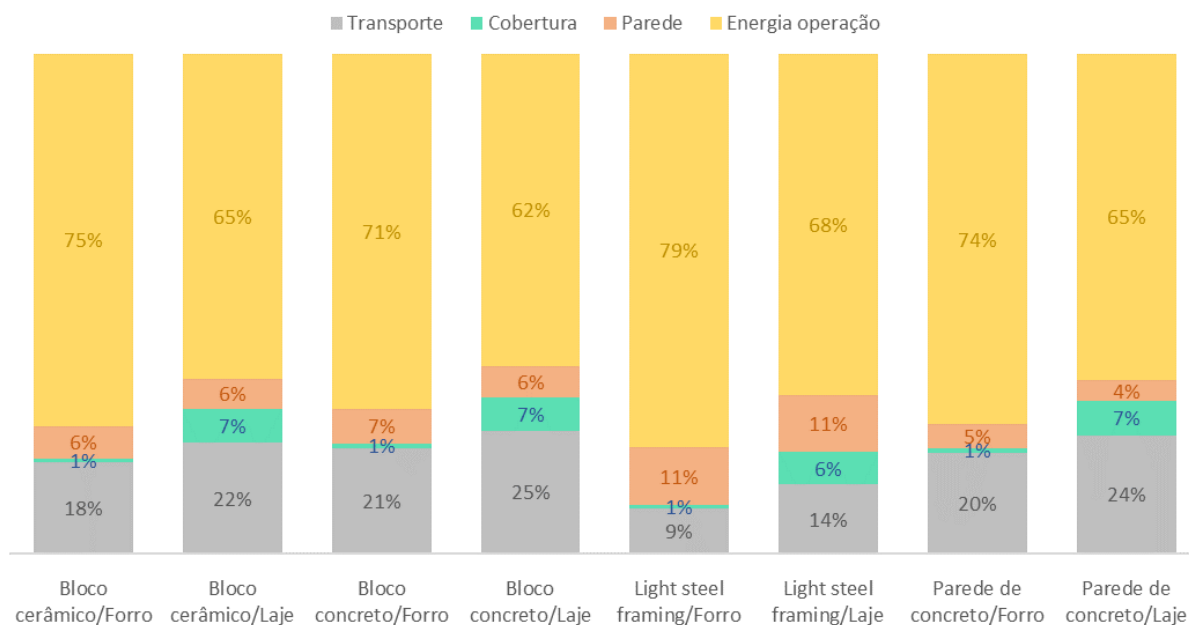


Figura 118- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade de água salgada.

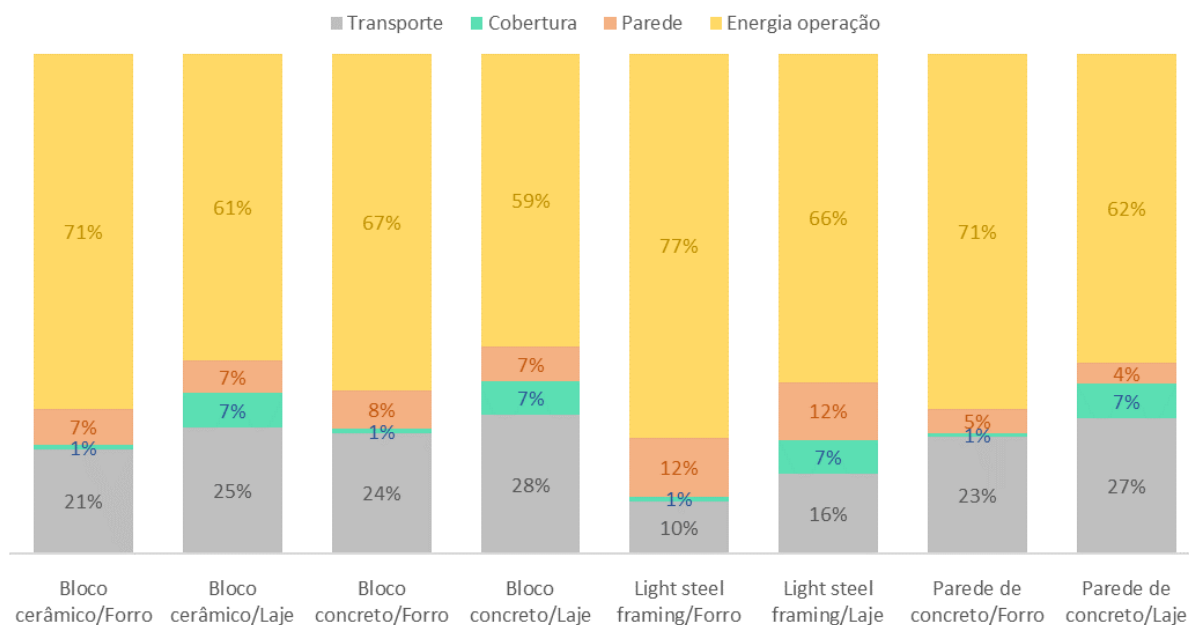


Figura 119- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ecotoxicidade terrestre.

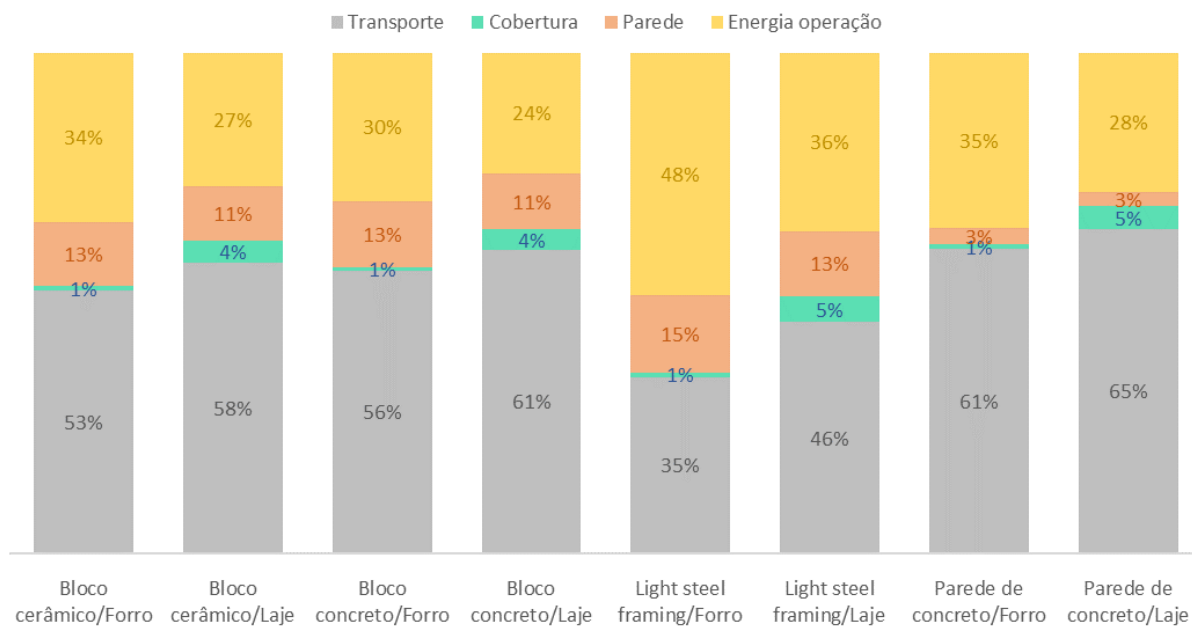


Figura 120- Análise de contribuição para a categoria de impacto de escassez de recursos fósseis.

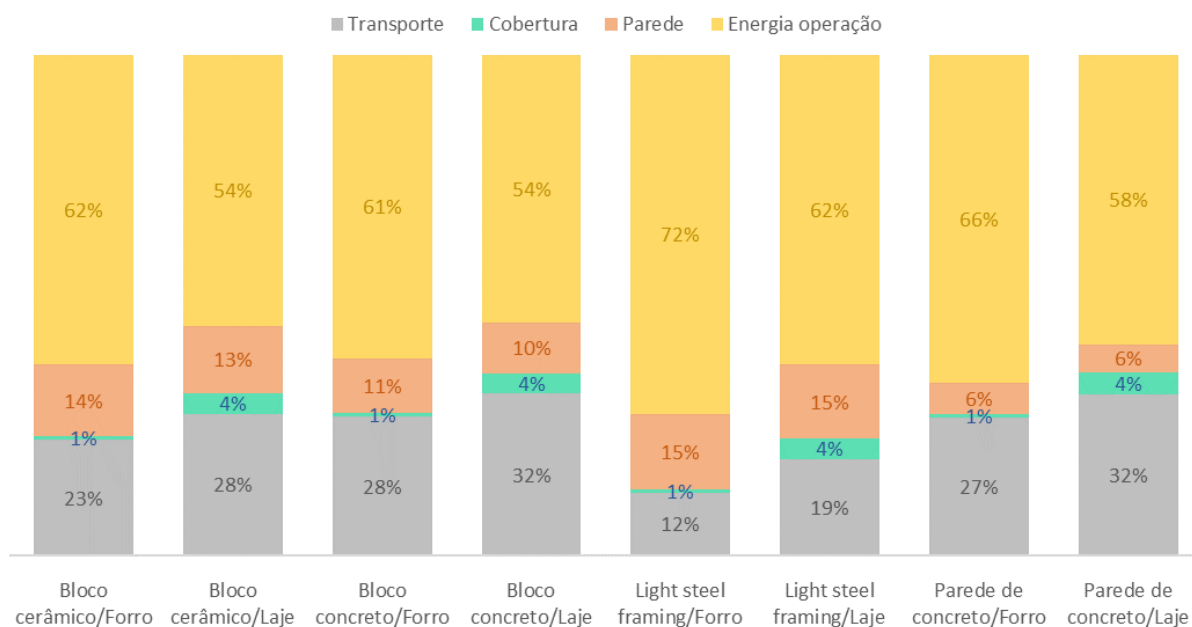


Figura 121- Análise de contribuição para a categoria de impacto de eutrofização de água doce.

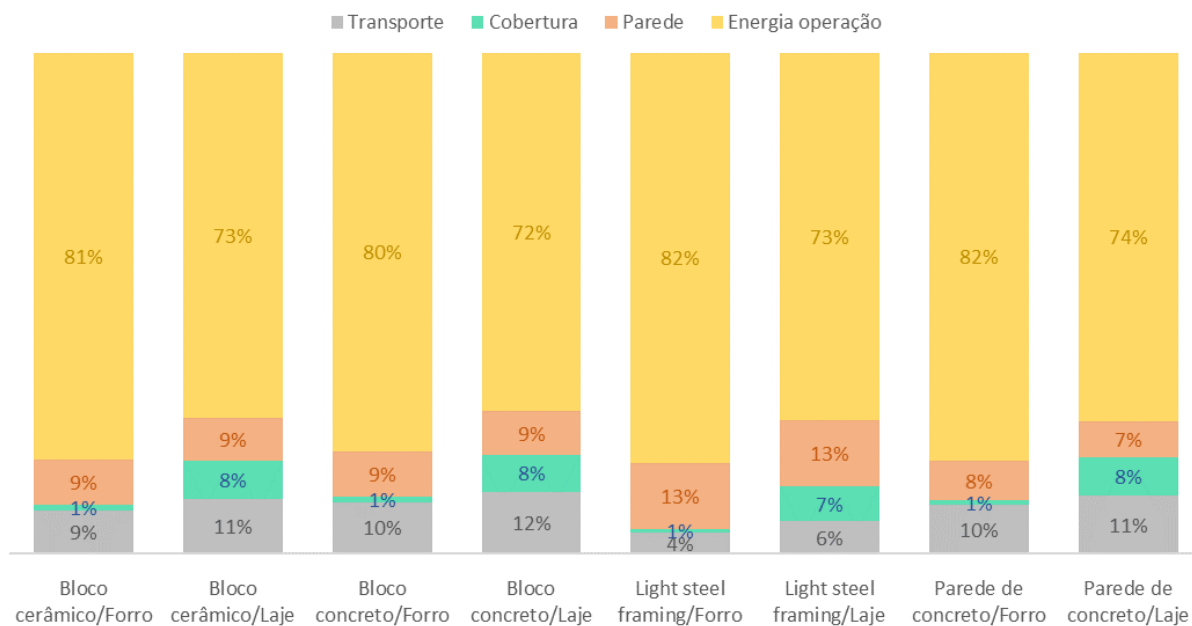


Figura 122- Análise de contribuição para a categoria de impacto de eutrofização de água salgada.

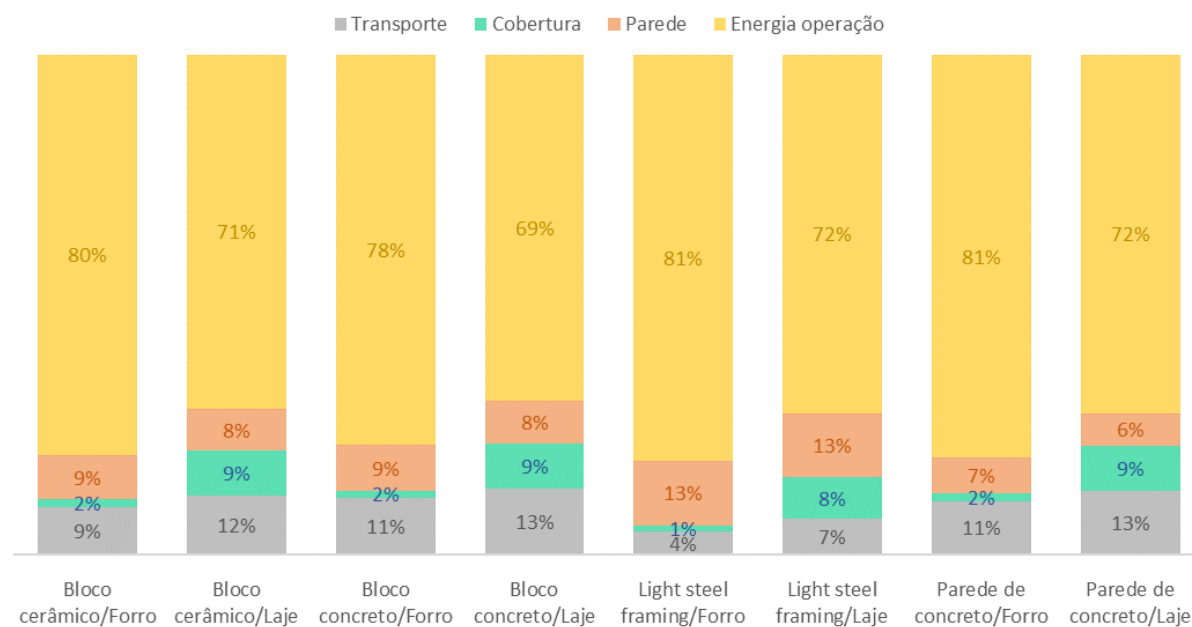


Figura 123- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de ozônio troposférico (ecossistema).

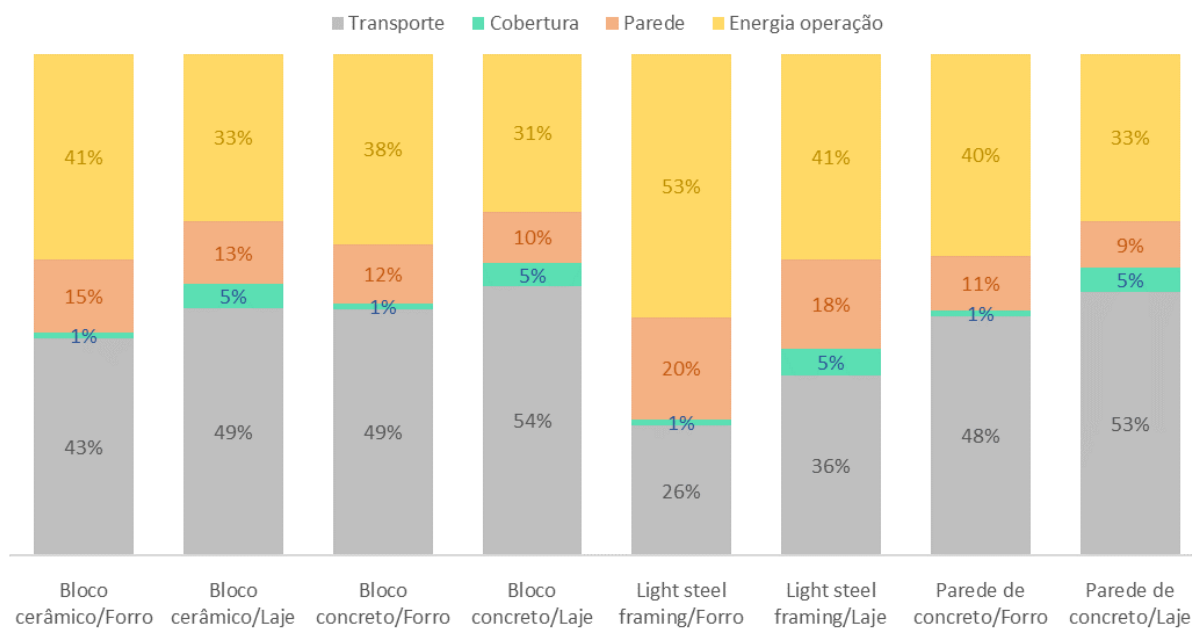


Figura 124- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de ozônio troposférico (humano).

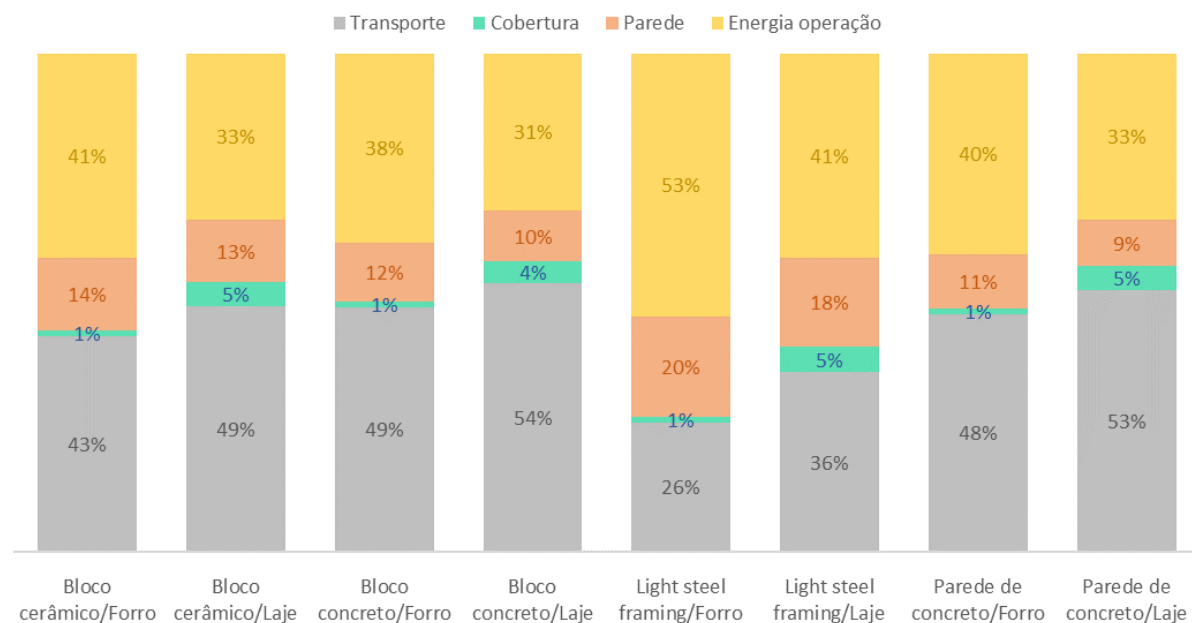


Figura 125- Análise de contribuição para a categoria de impacto de formação de partículas finas.

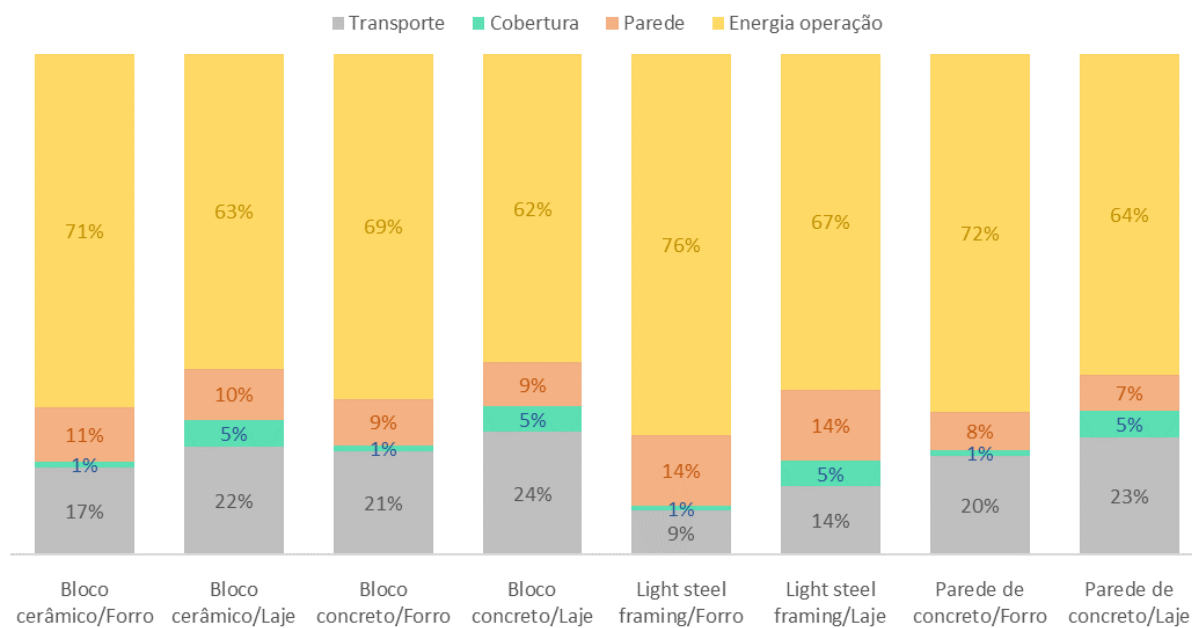


Figura 126- Análise de contribuição para a categoria de impacto de ocupação/transformação da terra.

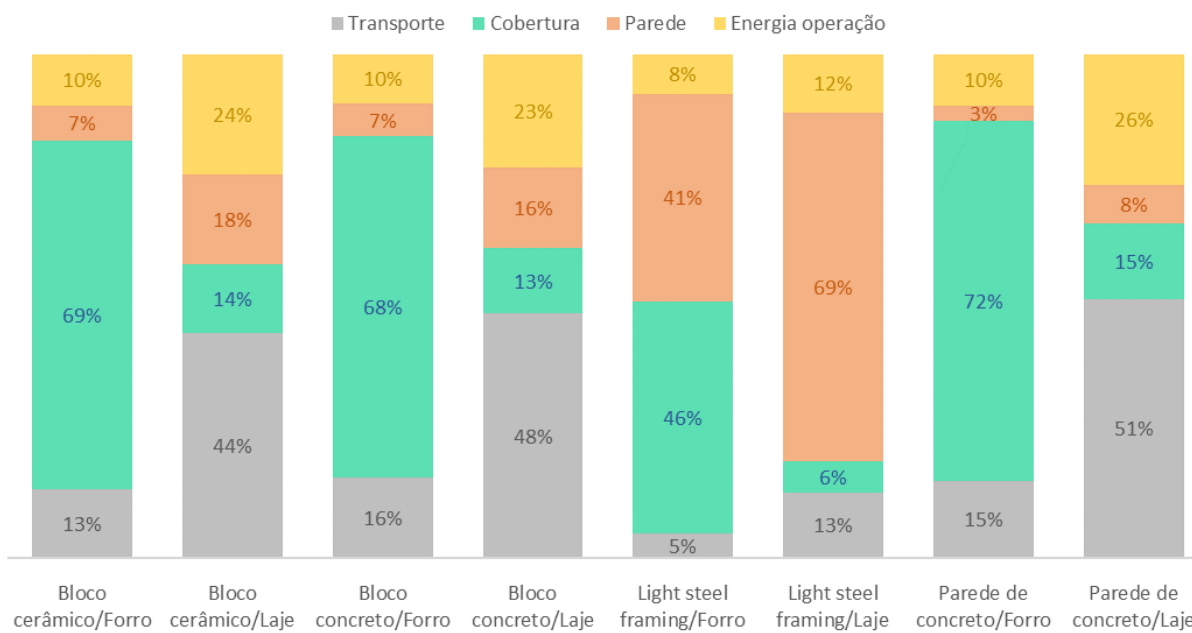


Figura 127- Análise de contribuição para a categoria de impacto de radiação ionizante.

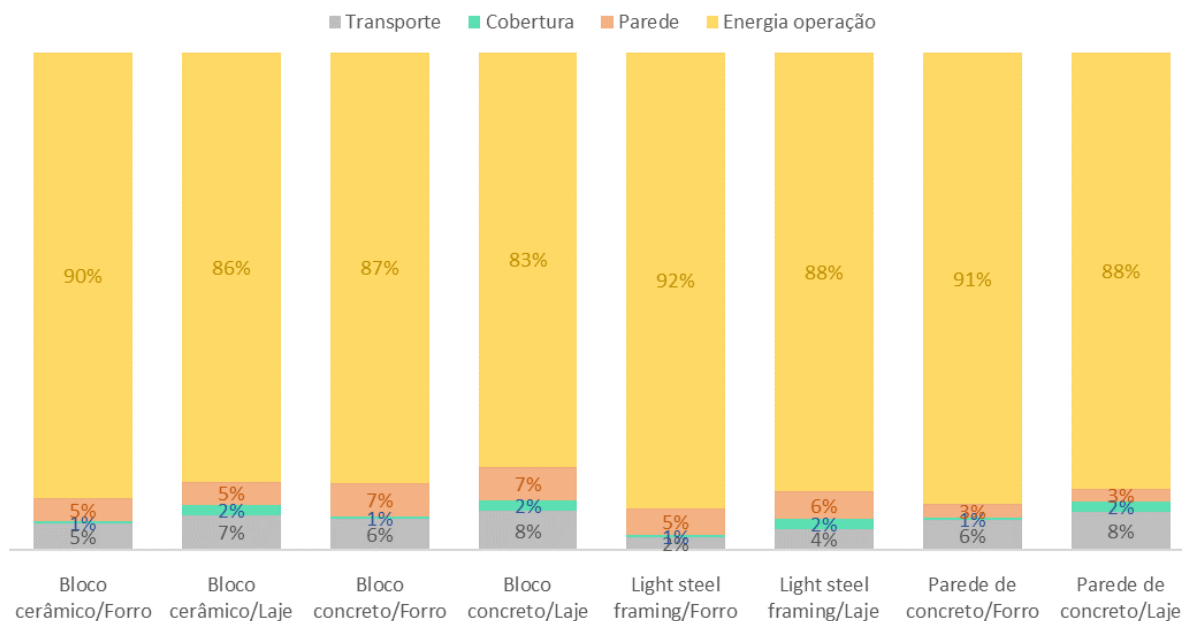


Figura 128- Análise de contribuição para a categoria de impacto de toxicidade humana (cancerígena).

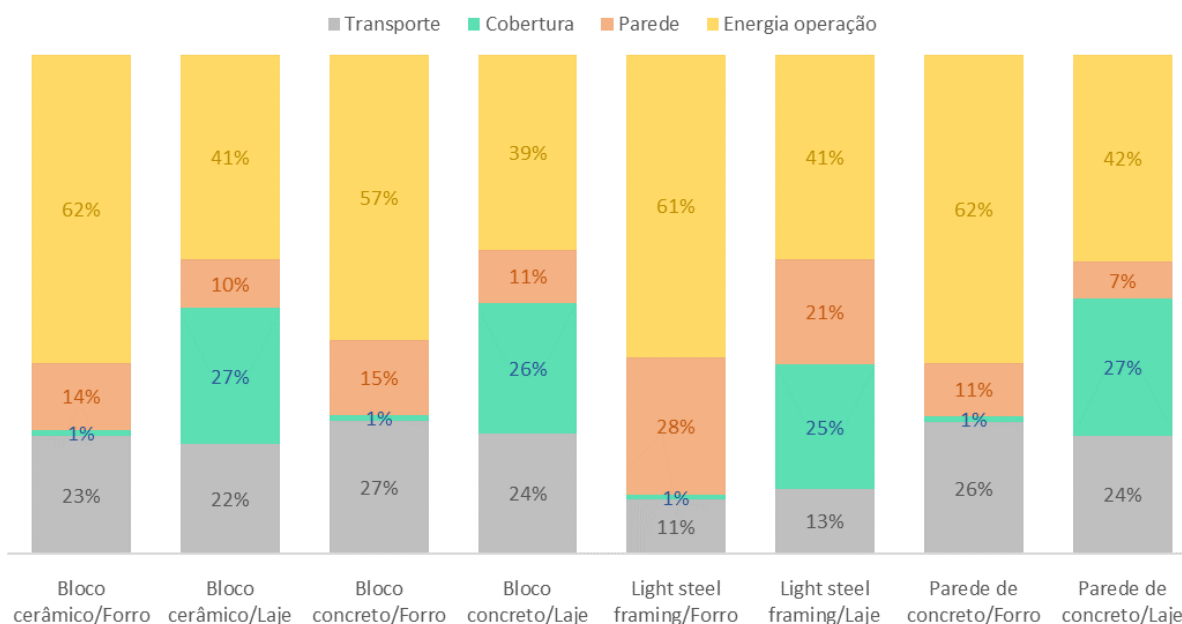


Figura 129- Análise de contribuição para a categoria de impacto de toxicidade humana (não-cancerígena).

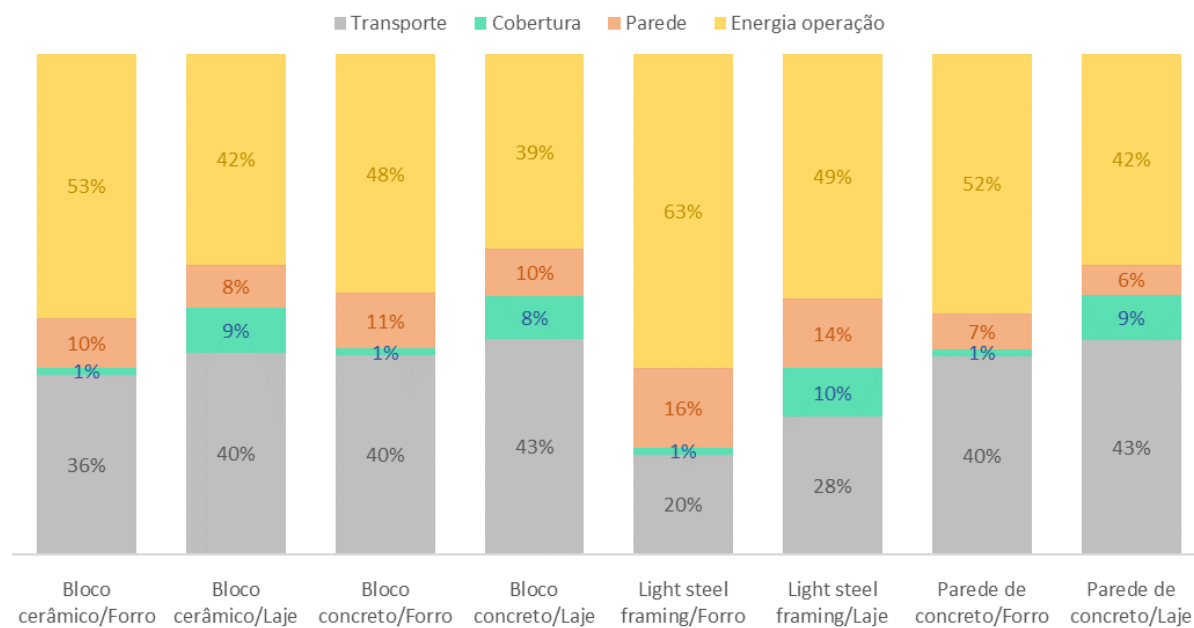
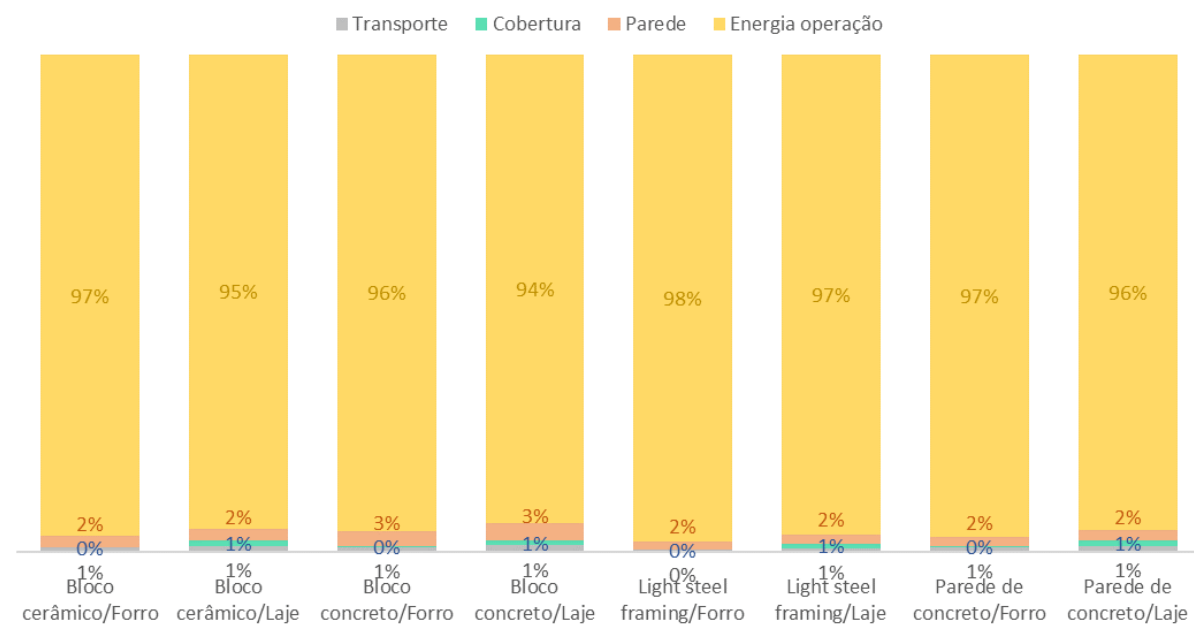


Figura 130- Análise de contribuição para a categoria de impacto de uso de água.



APÊNDICE E – Identificação das questões significativas para a ACV

Figura 131 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a radiação ionizante.

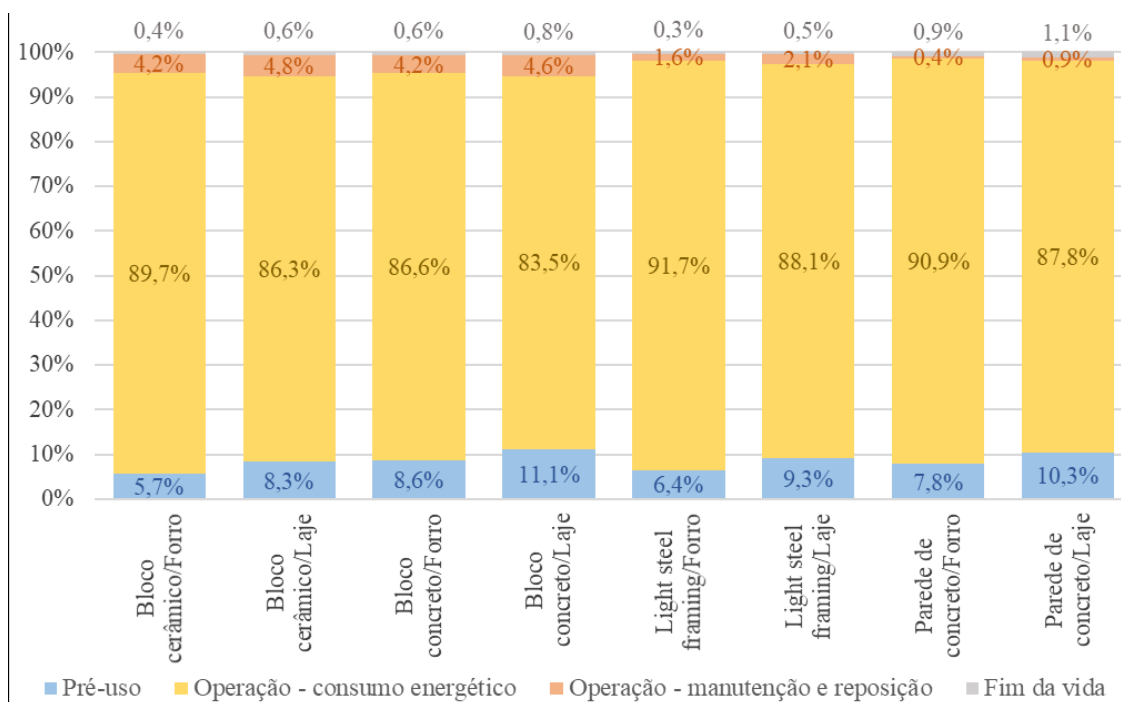


Figura 132 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para depleção do ozônio estratosférico.

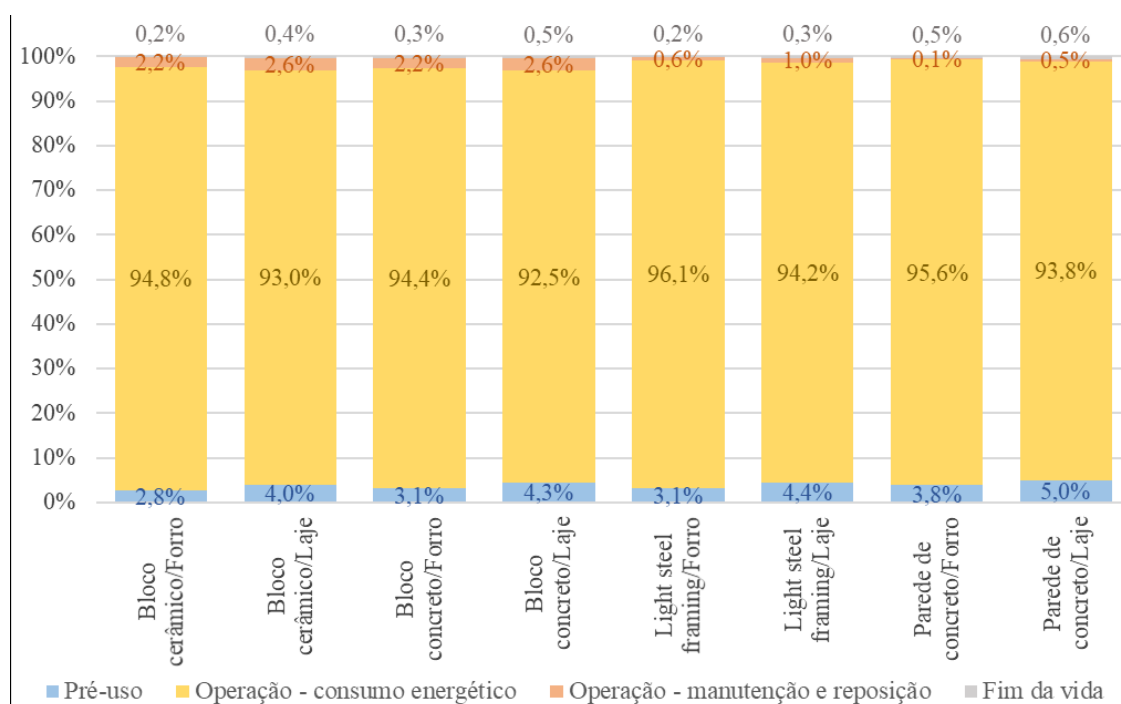


Figura 133 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de ozônio troposférico (humano).

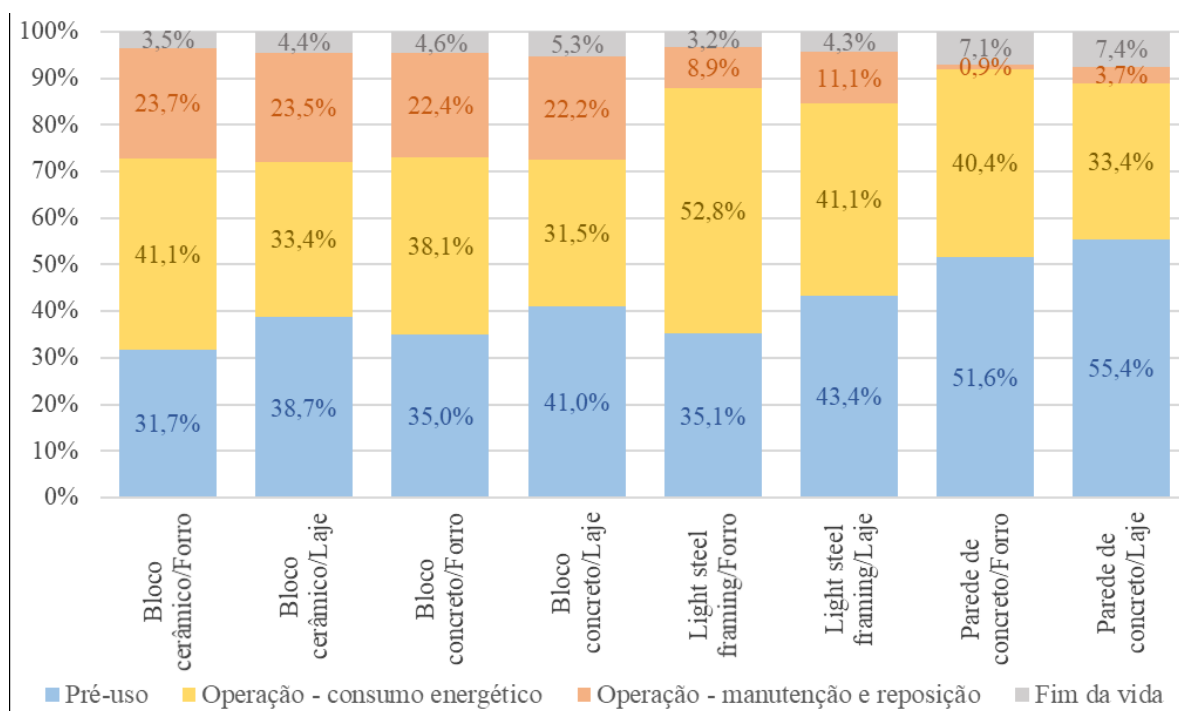


Figura 134 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de partículas finas.

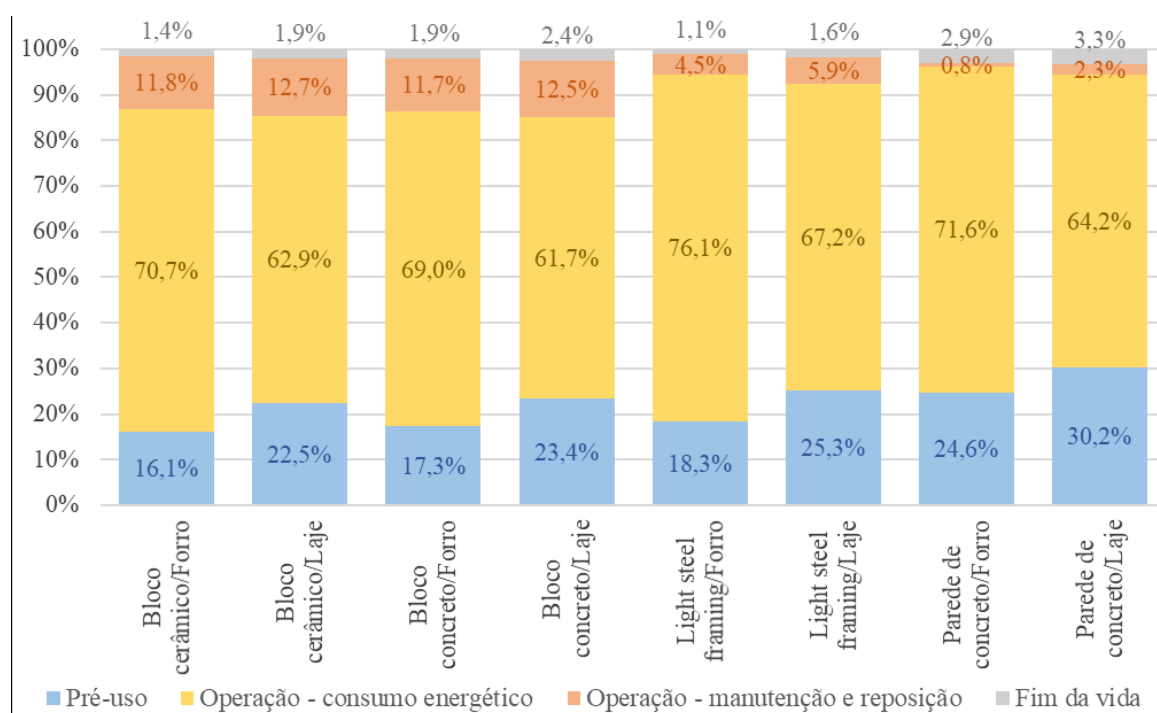


Figura 135 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para a formação de ozônio troposférico (ecossistema).

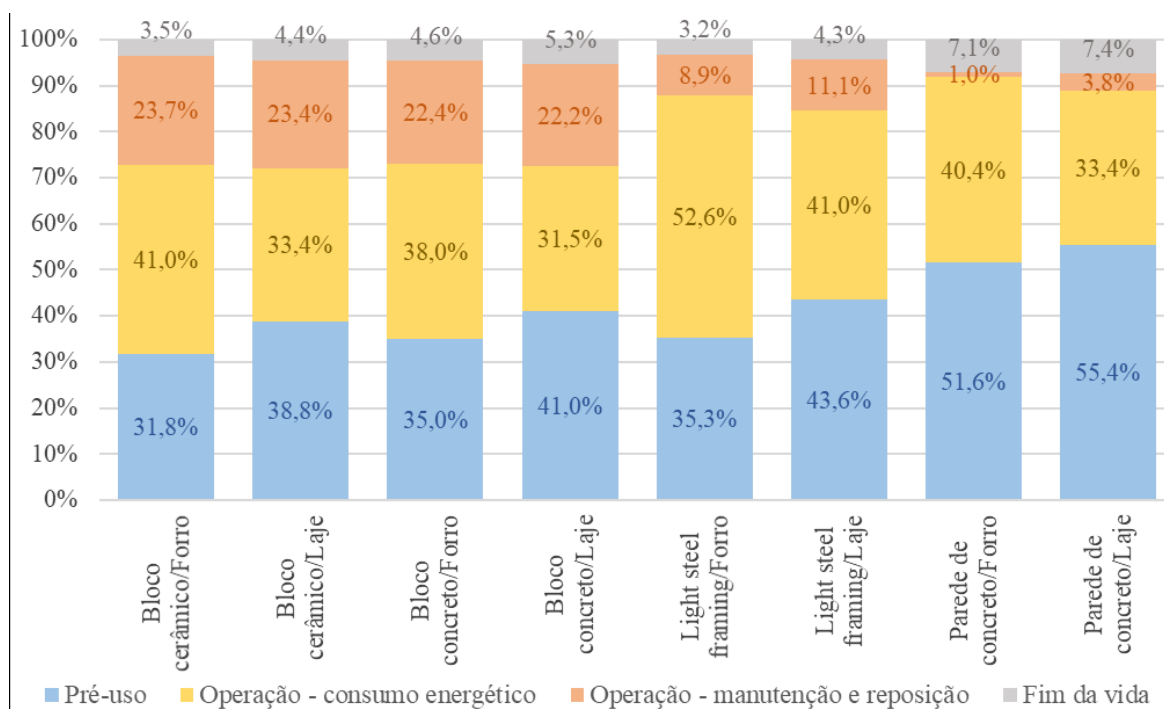


Figura 136 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para acidificação terrestre.

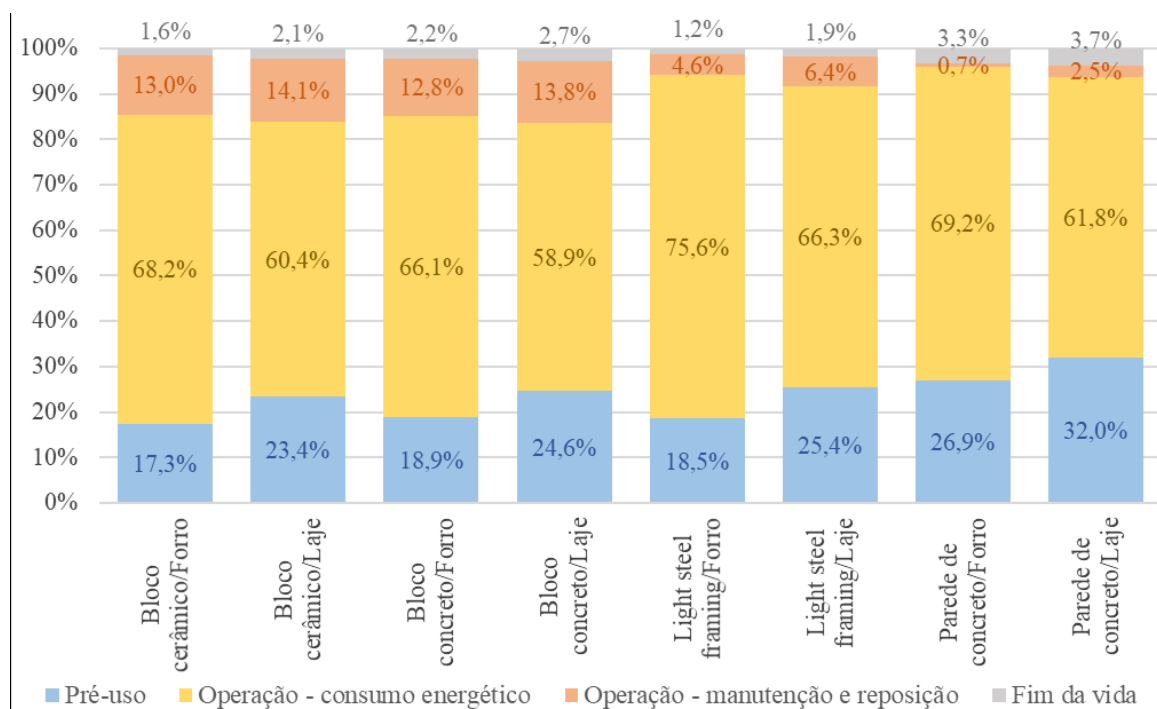


Figura 137 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para eutrofização de água doce.

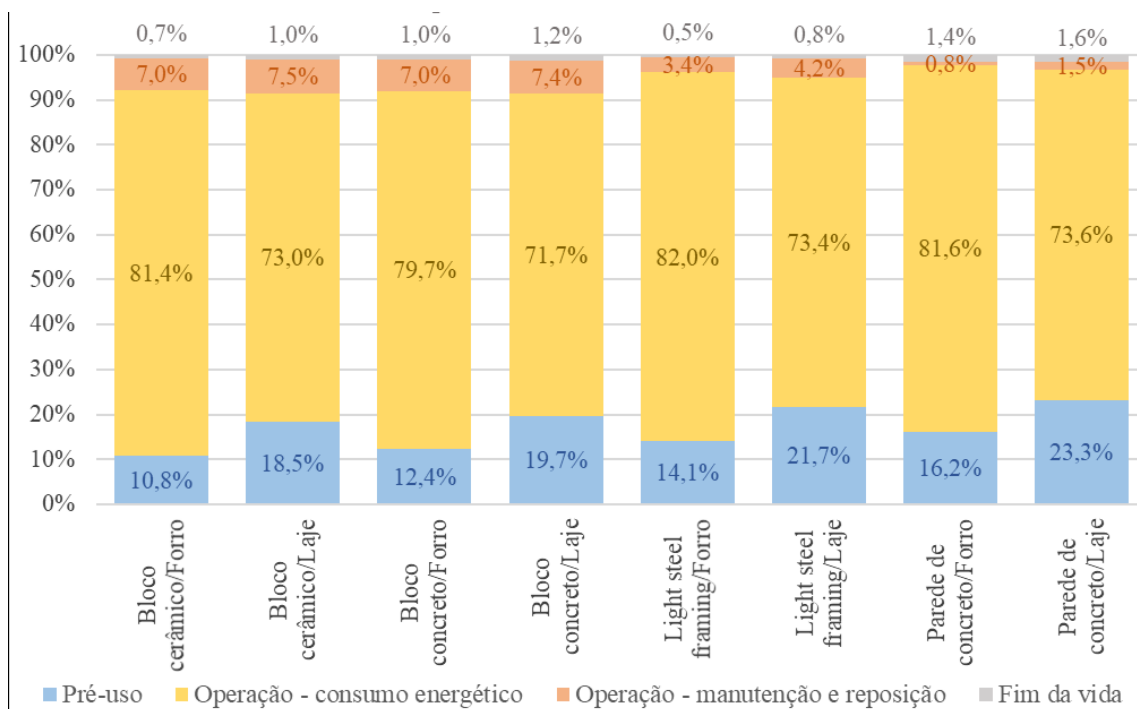


Figura 138 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para eutrofização de água salgada.

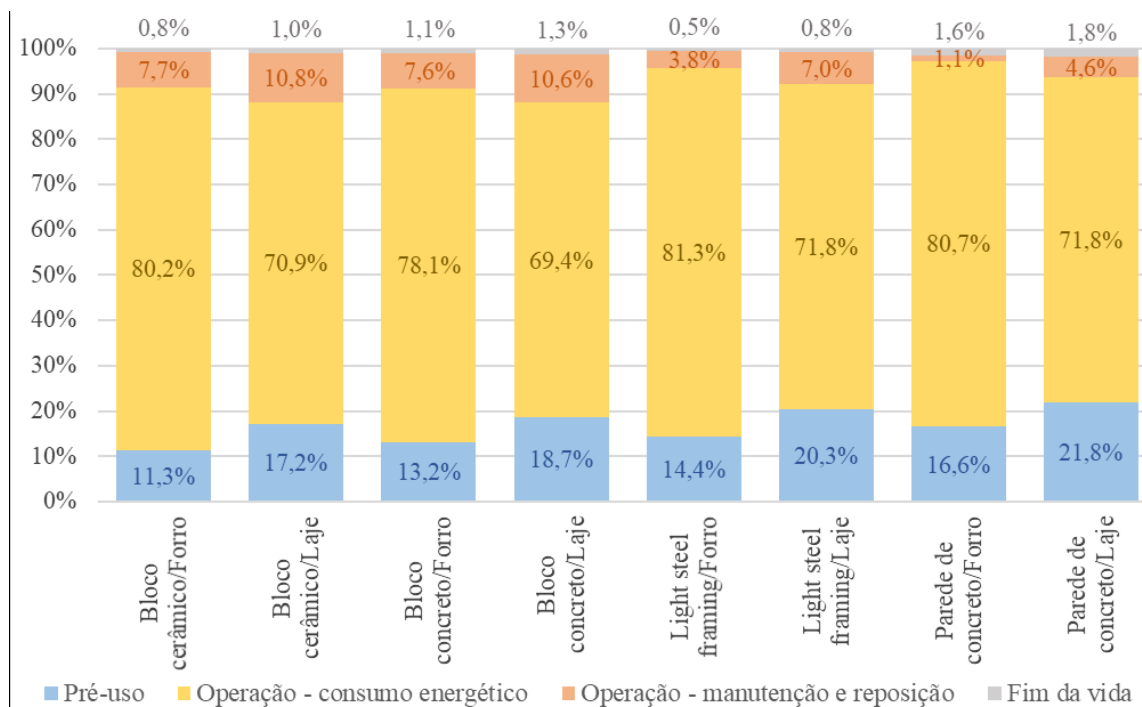


Figura 139 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade terrestre.

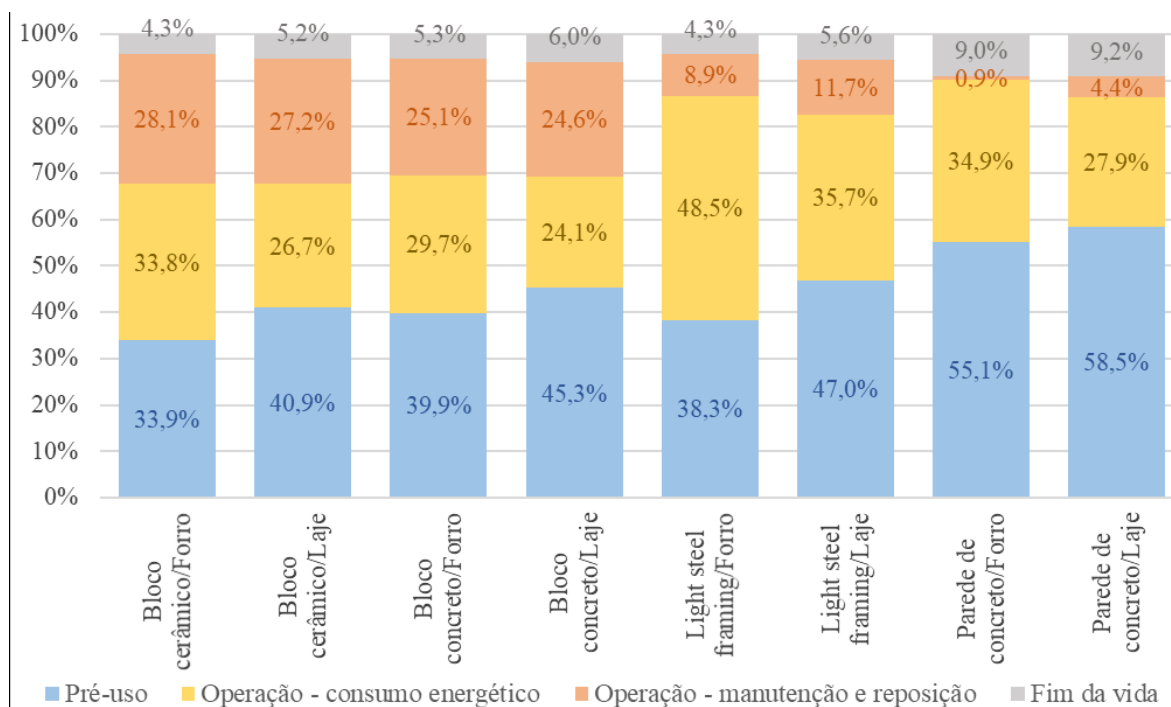


Figura 140 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade de água doce.

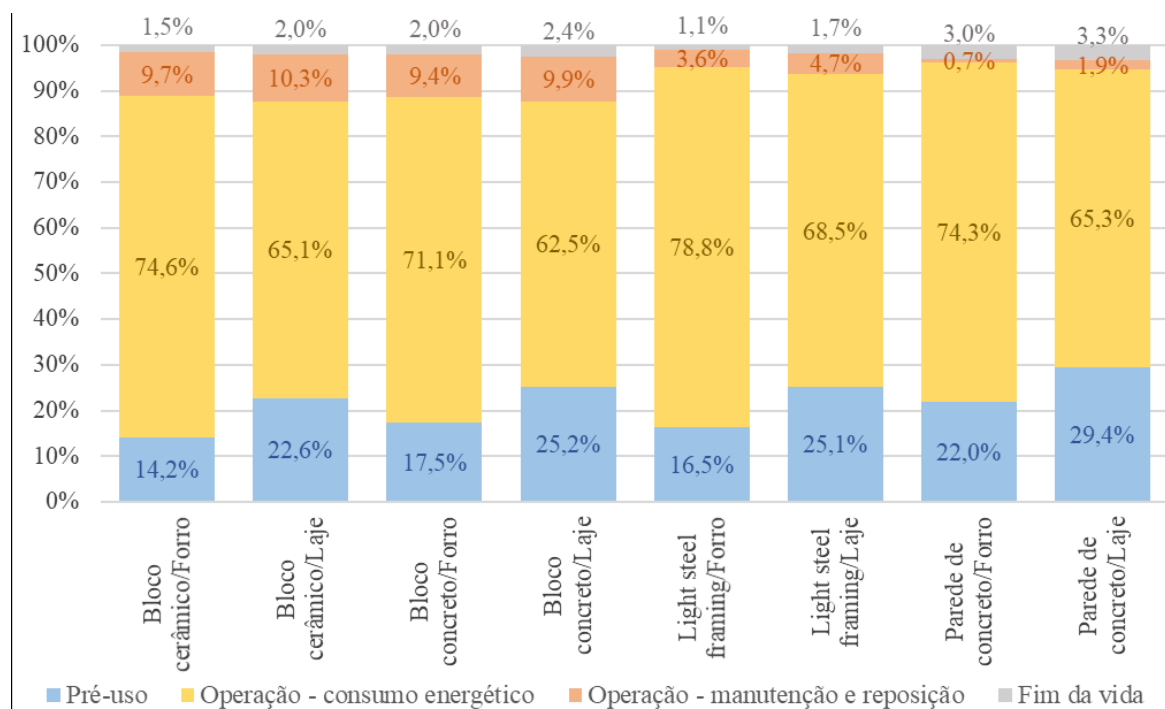


Figura 141 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ecotoxicidade de água salgada.

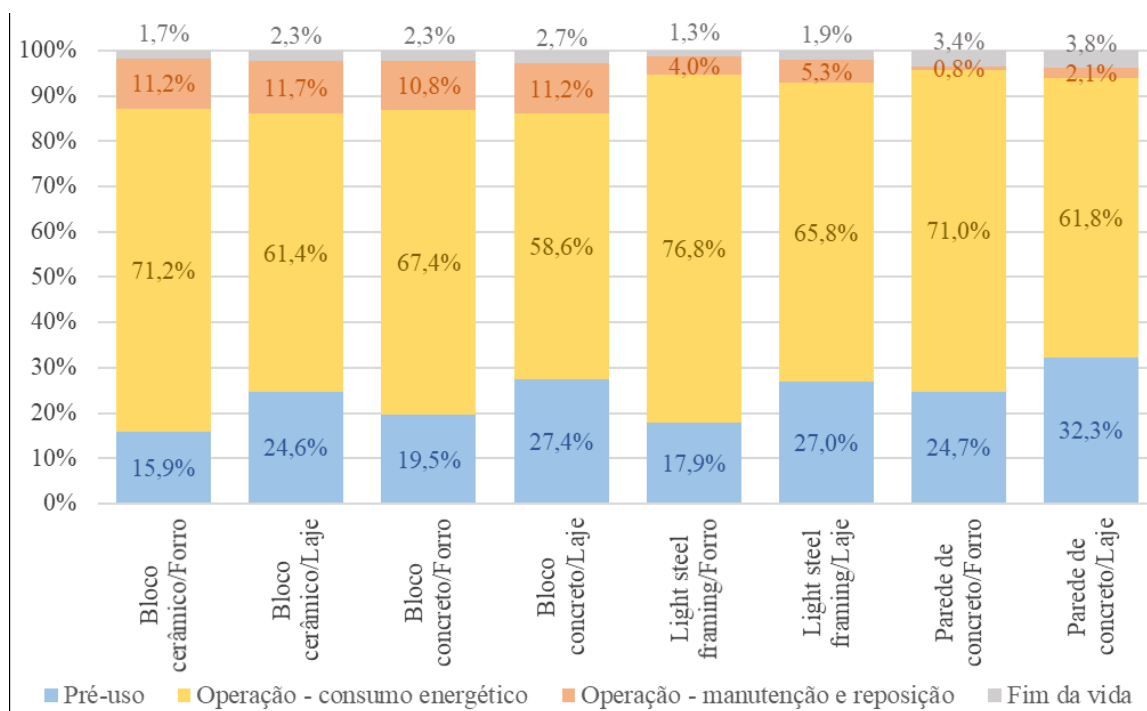


Figura 142 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para toxicidade humana (cancerígena).

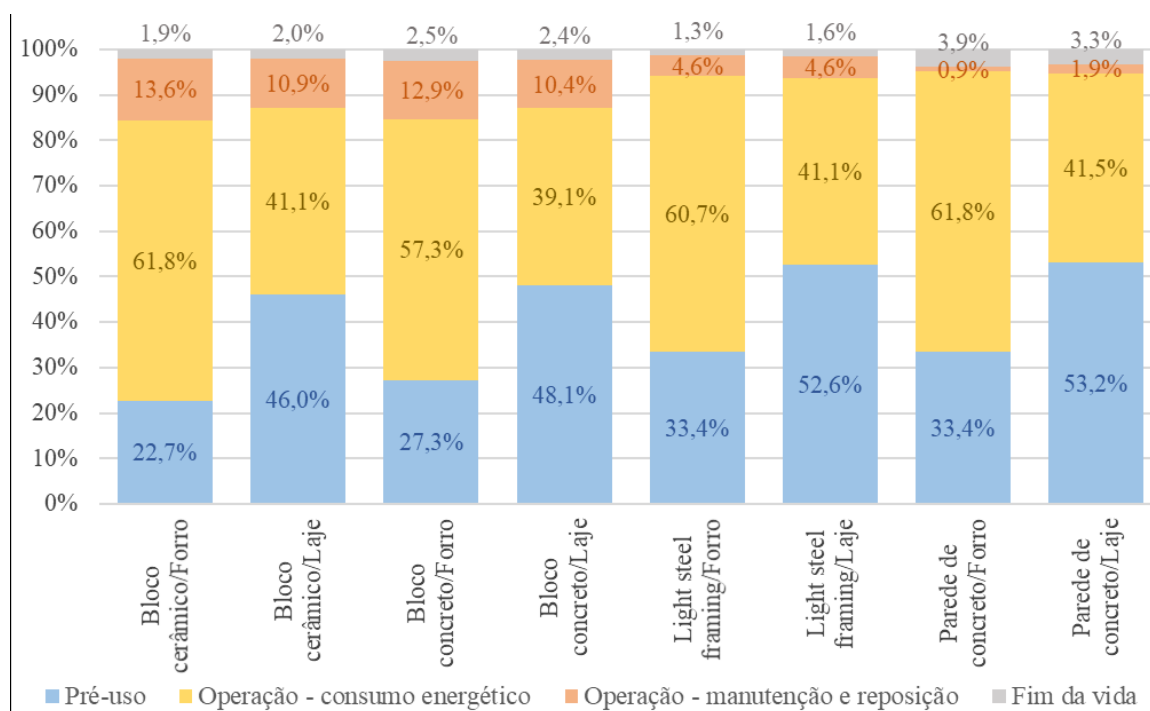


Figura 143 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para toxicidade humana (não-cancerígena).

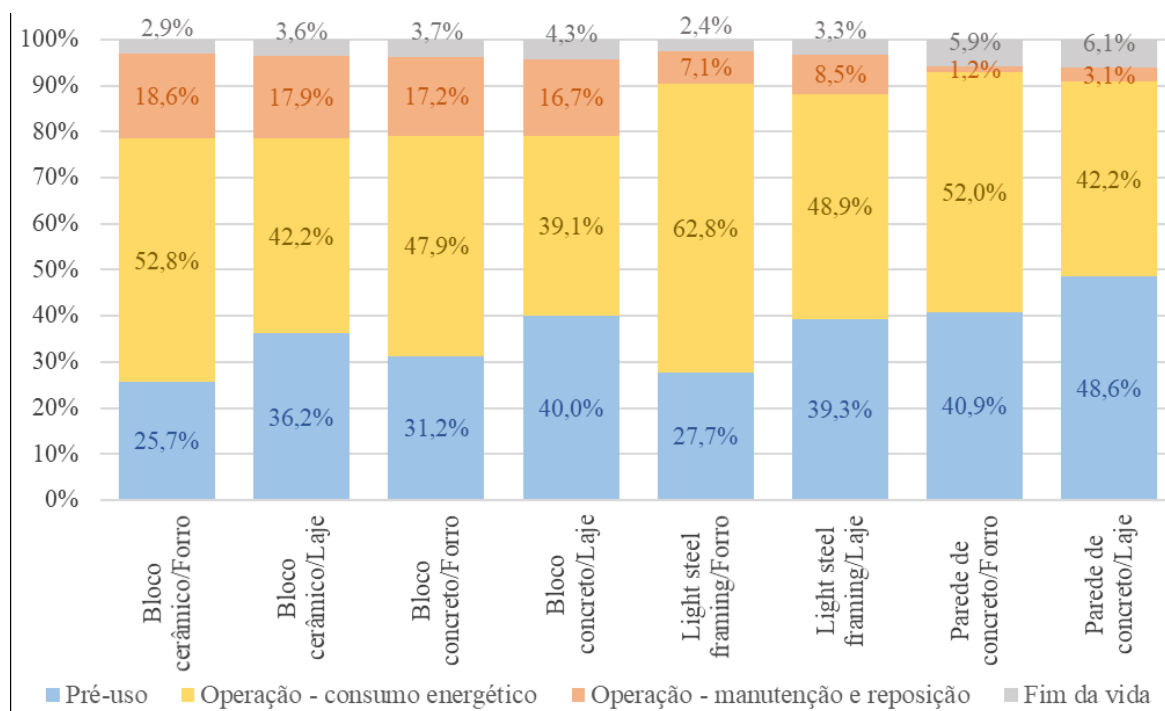


Figura 144 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para ocupação/transformação da terra.

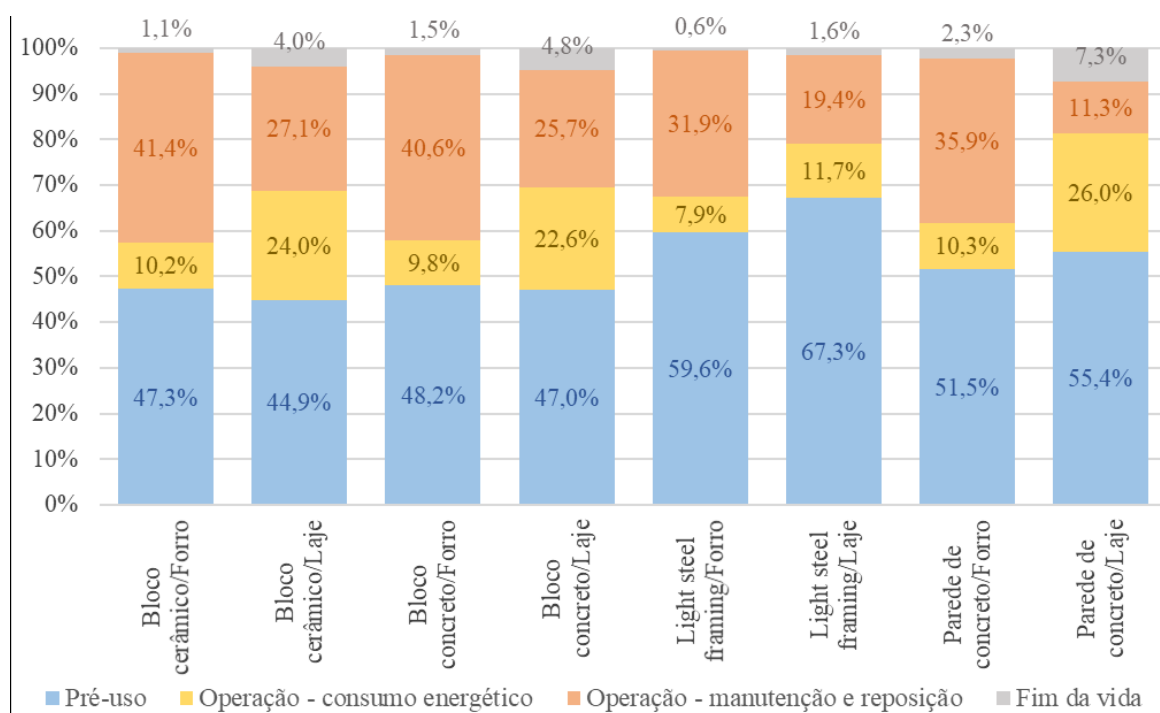


Figura 145 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para escassez de recursos fósseis.

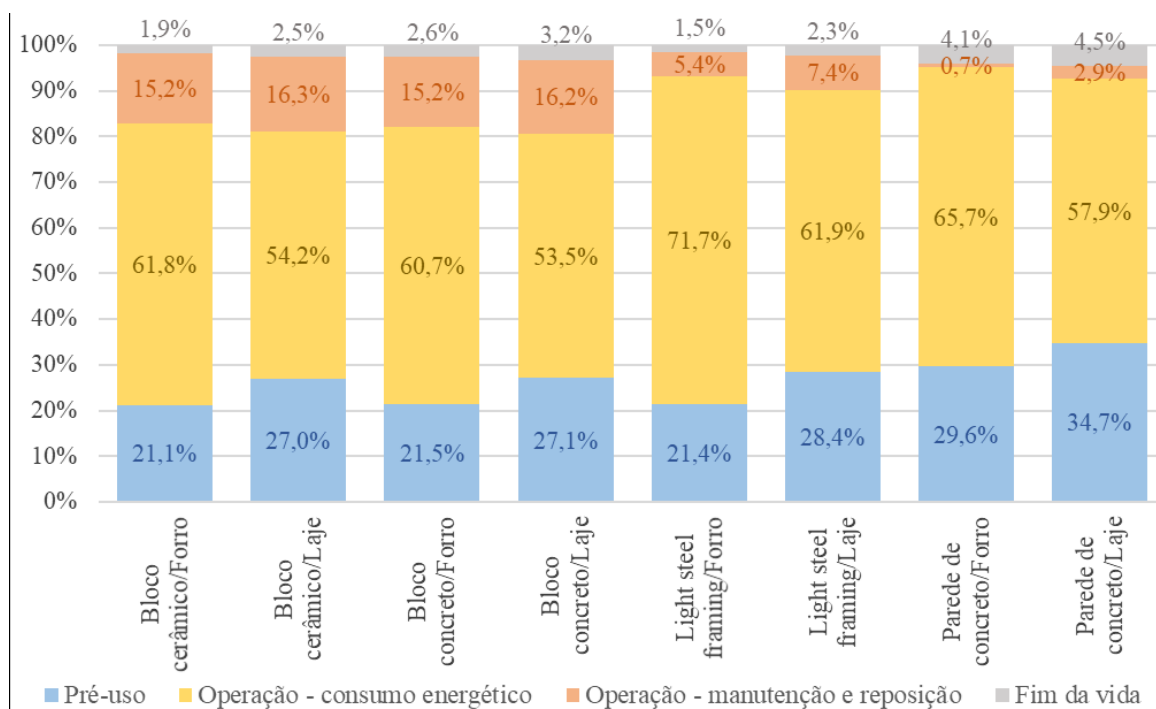
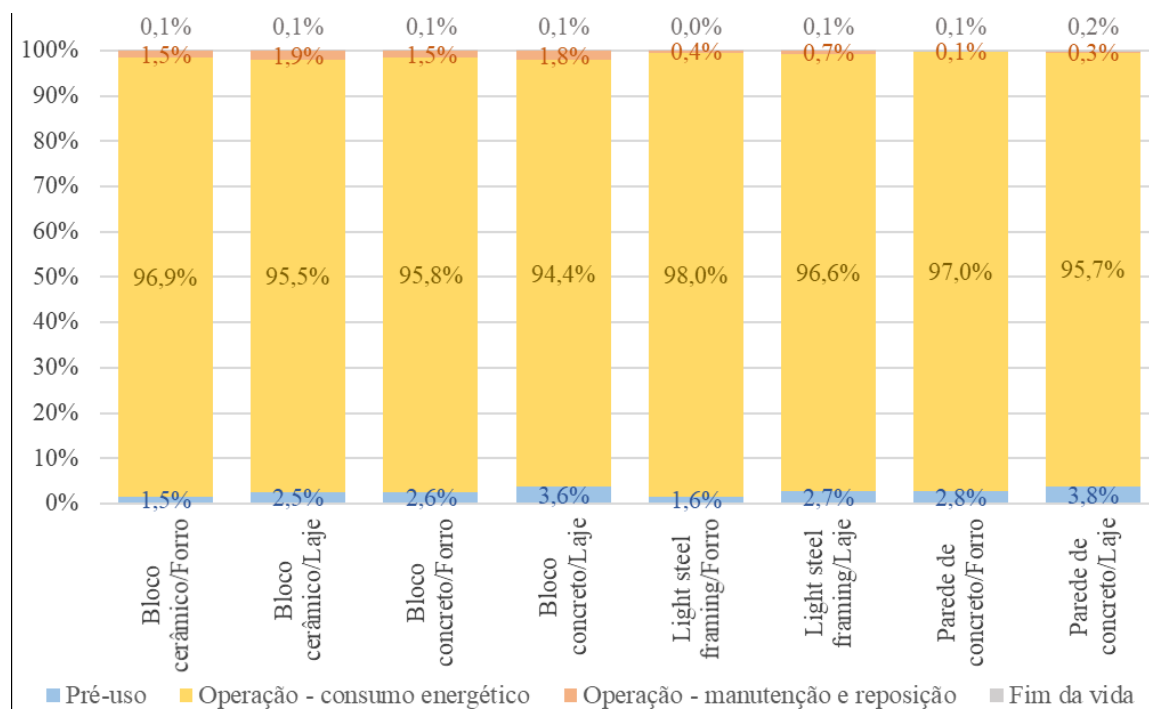


Figura 146 - Percentual de contribuição de cada fase da ACV para uso de água.



APÊNDICE F – Identificação das questões significativas para a ACVE

Figura 147 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 1.

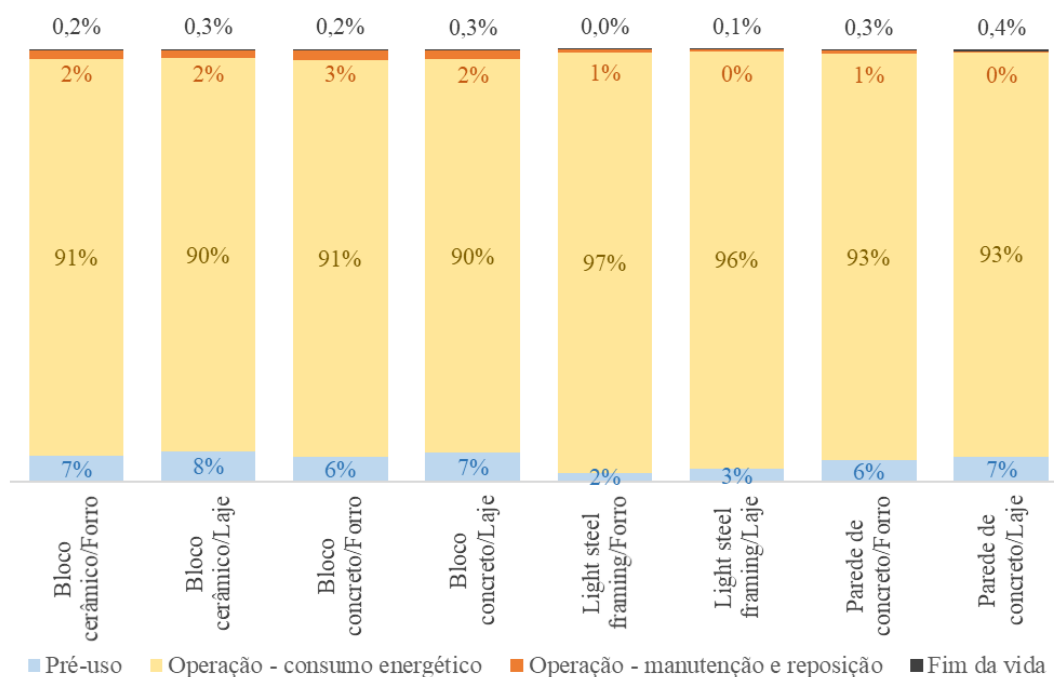


Figura 148 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 1.

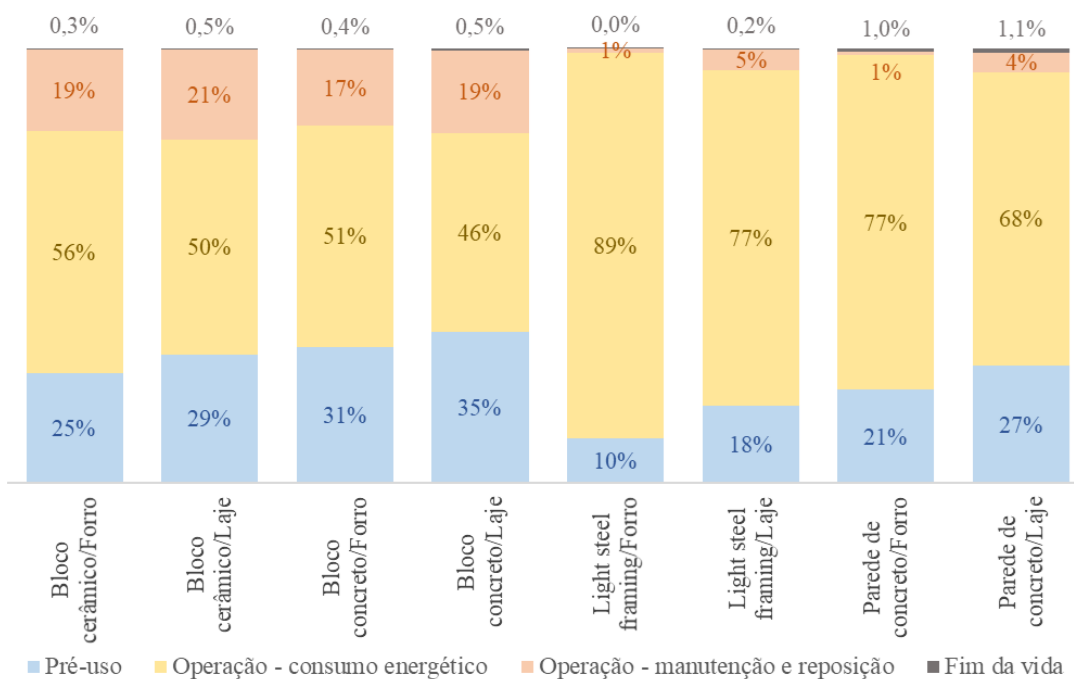


Figura 149 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 4.

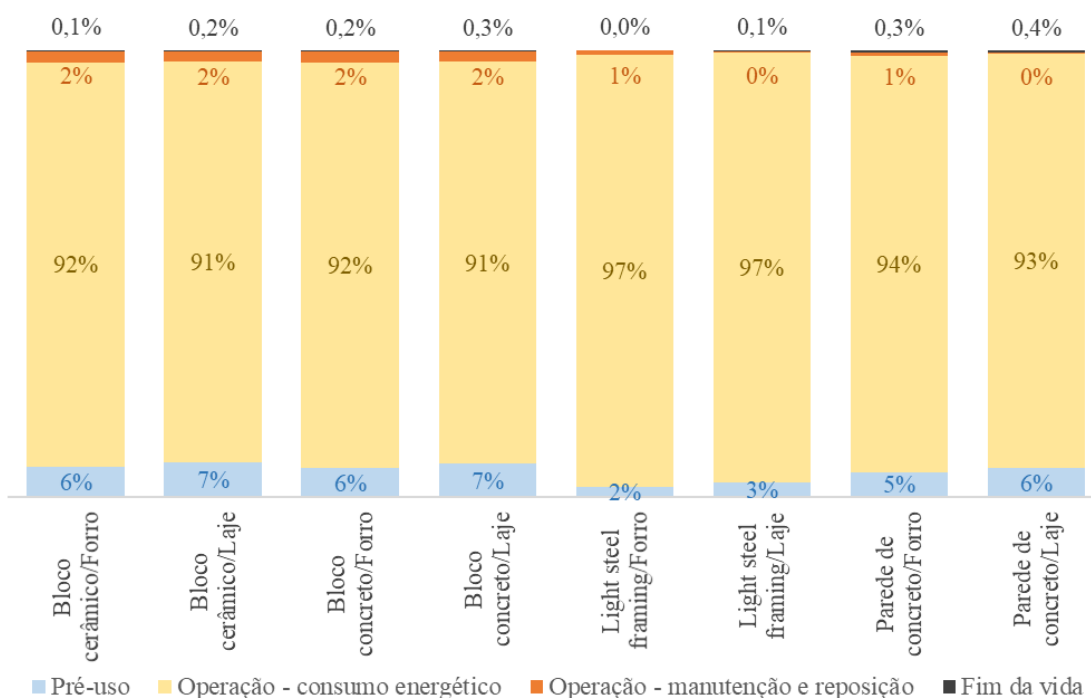


Figura 150 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 4.

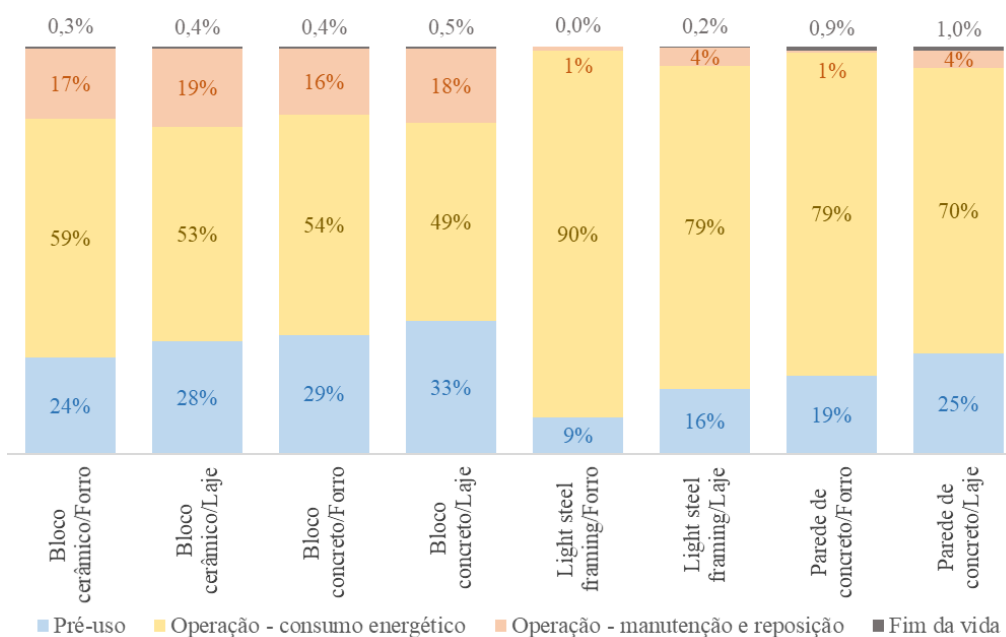


Figura 151 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 8.

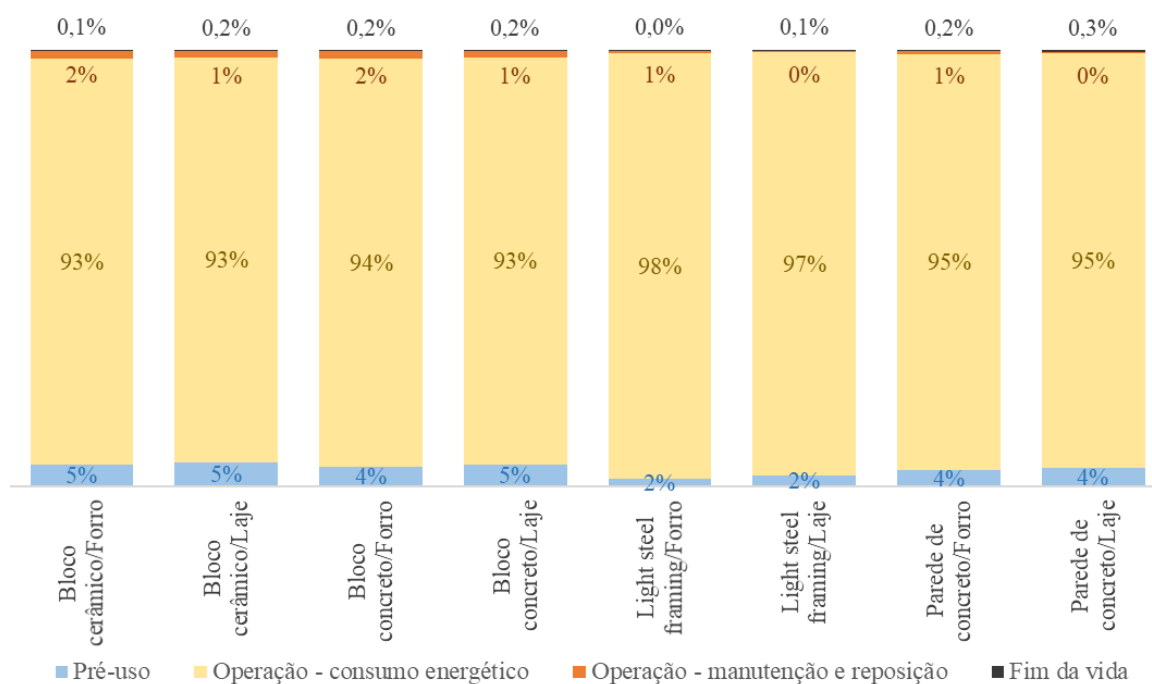


Figura 152 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a zona bioclimática 8.

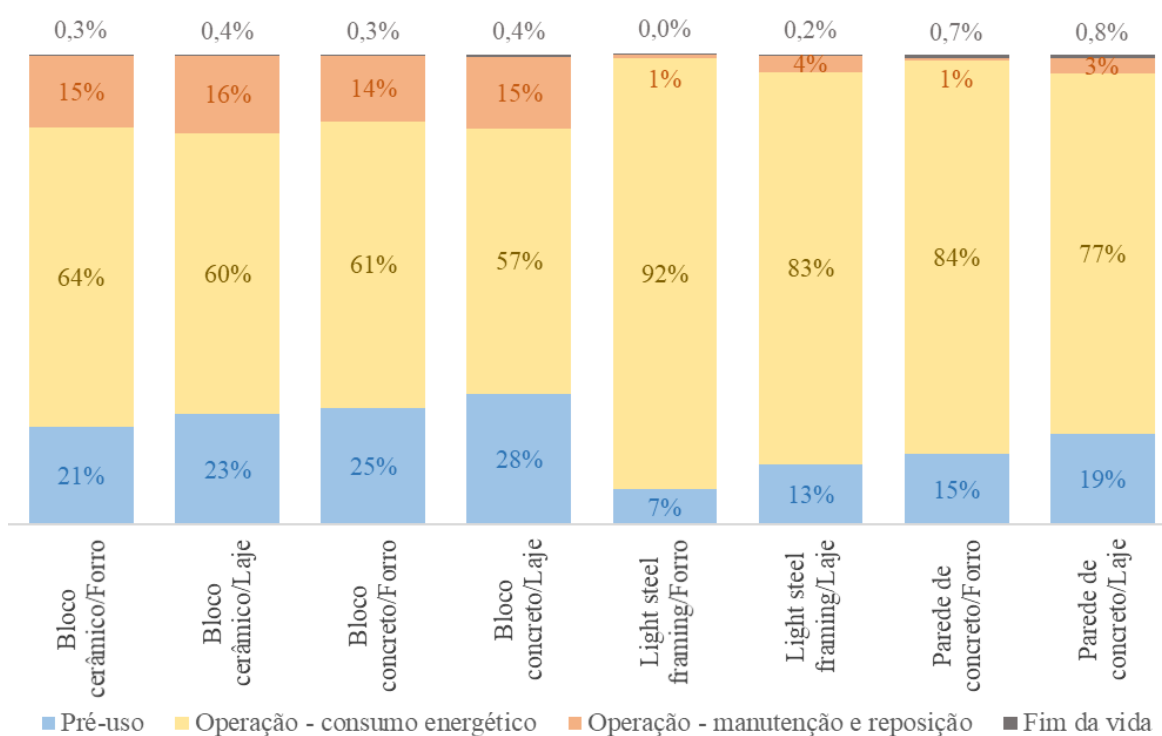


Figura 153 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 25°C.

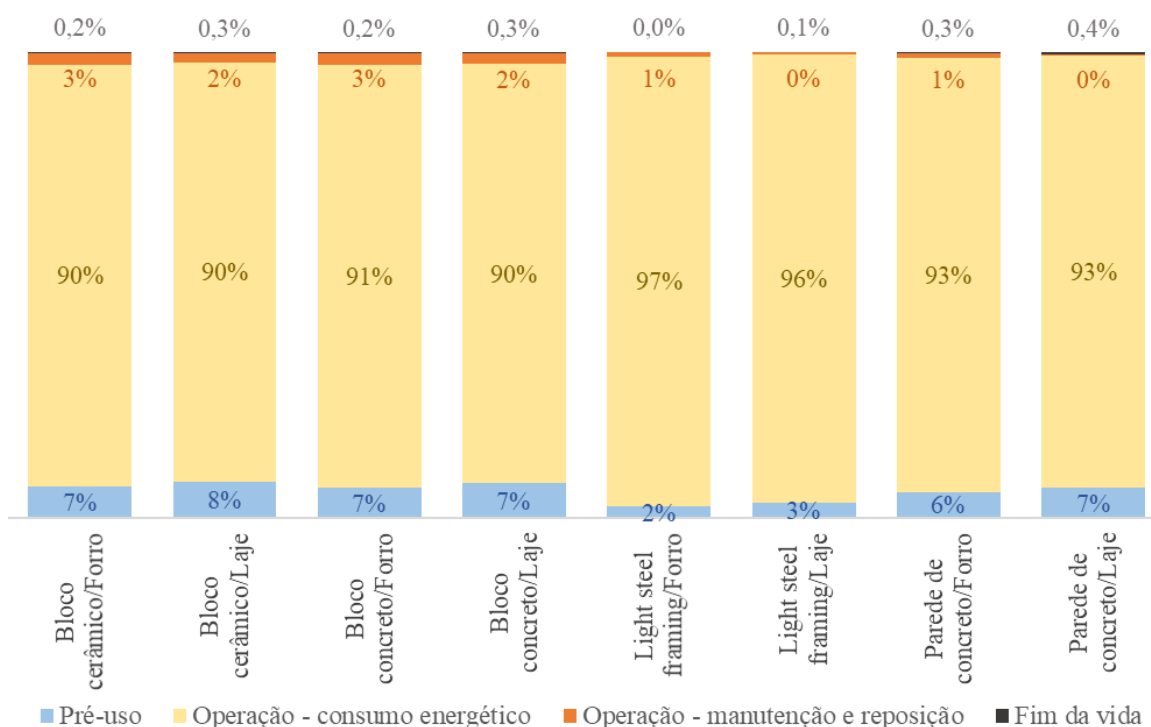


Figura 154 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 25°C.

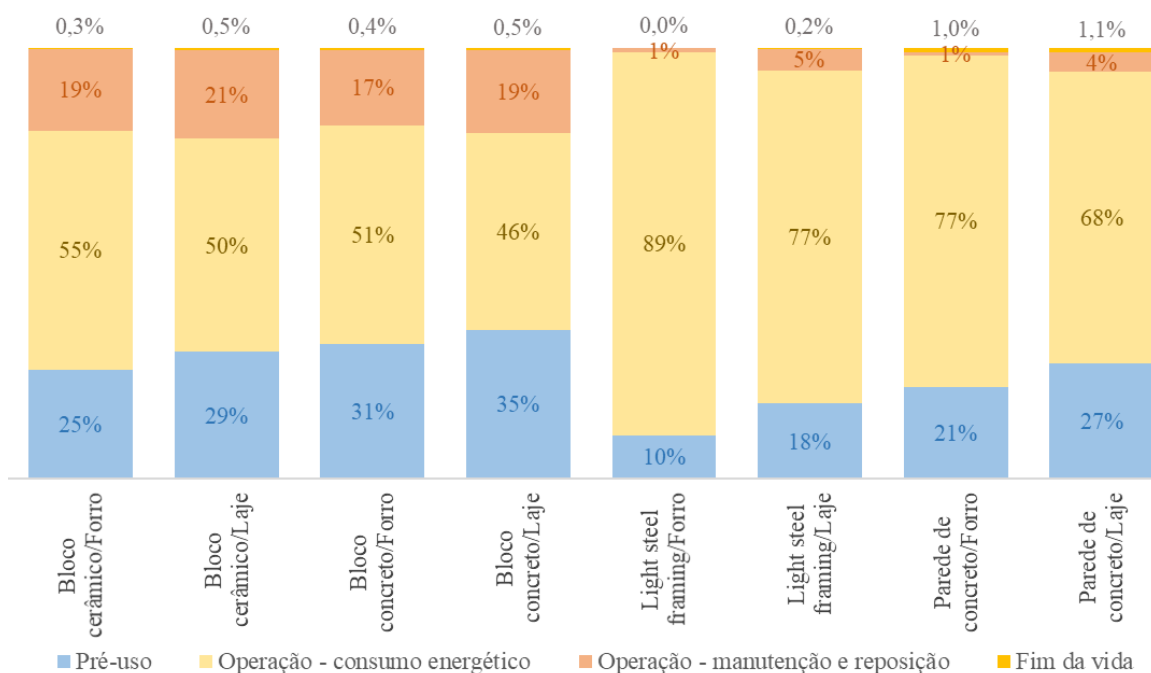


Figura 155 - Percentual de contribuição para a energia primária de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 26°C.

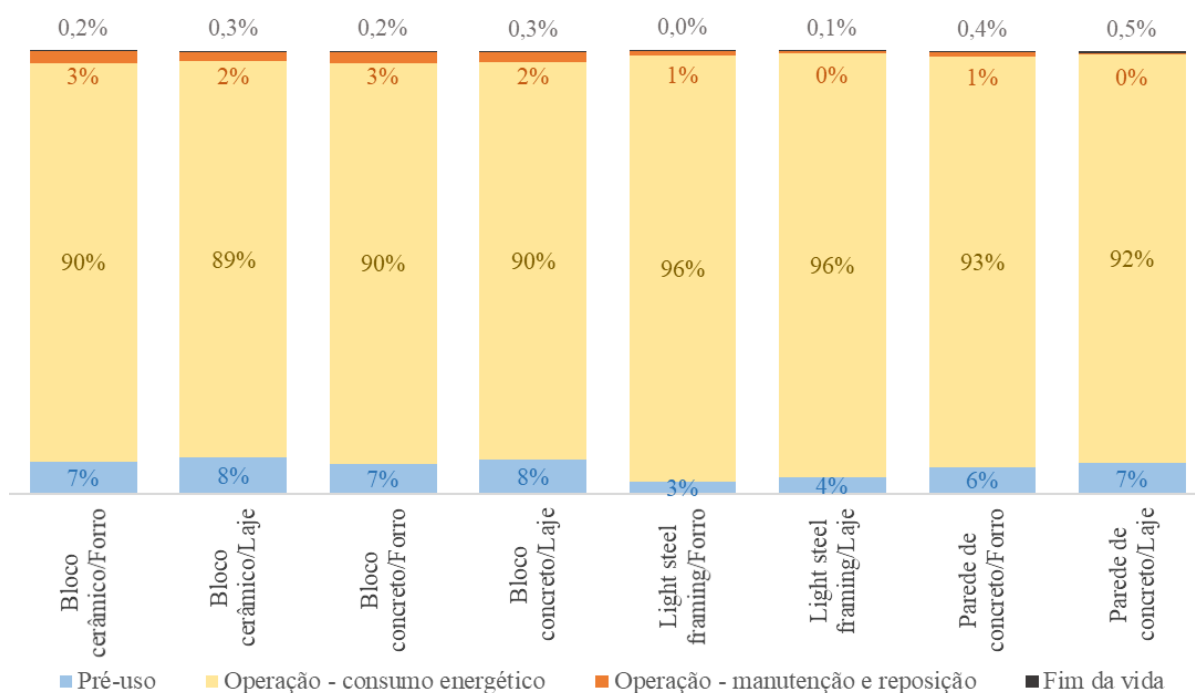
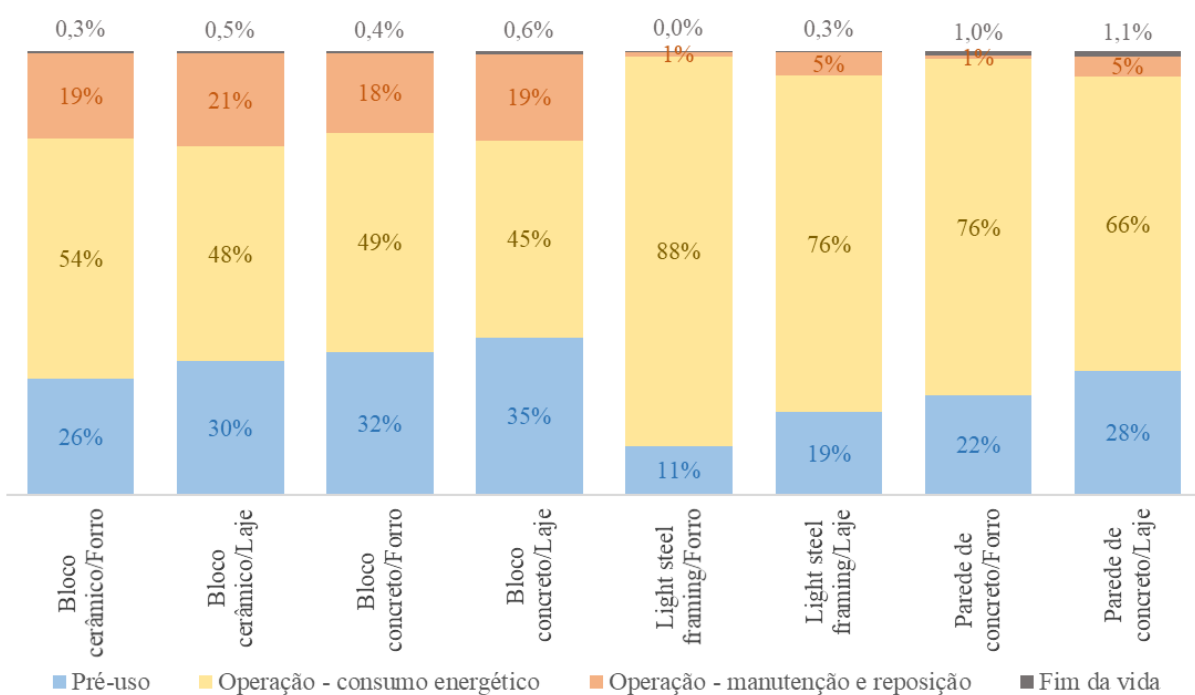


Figura 156 - Percentual de contribuição para a emissão de gases do efeito estufa de cada fase do ciclo de vida considerando a temperatura limite para início do resfriamento de 26°C.



APÊNDICE G – Comparação da ACV e ACVCO₂eq

Figura 157 – Comparação da ACVCO₂eq com a categoria de dano de saúde humana.

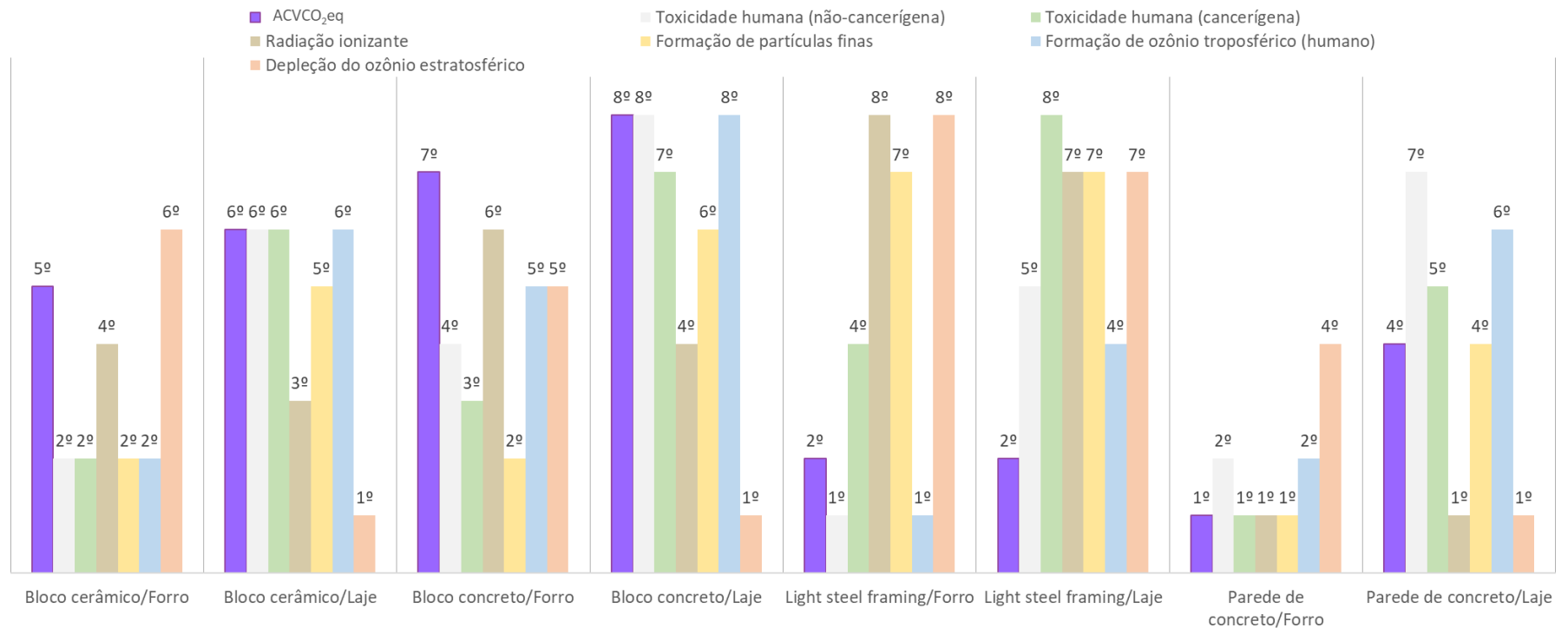


Figura 158 – Comparação da ACVCO_{2eq} com a categoria de dano do ecossistema – Parte 1.

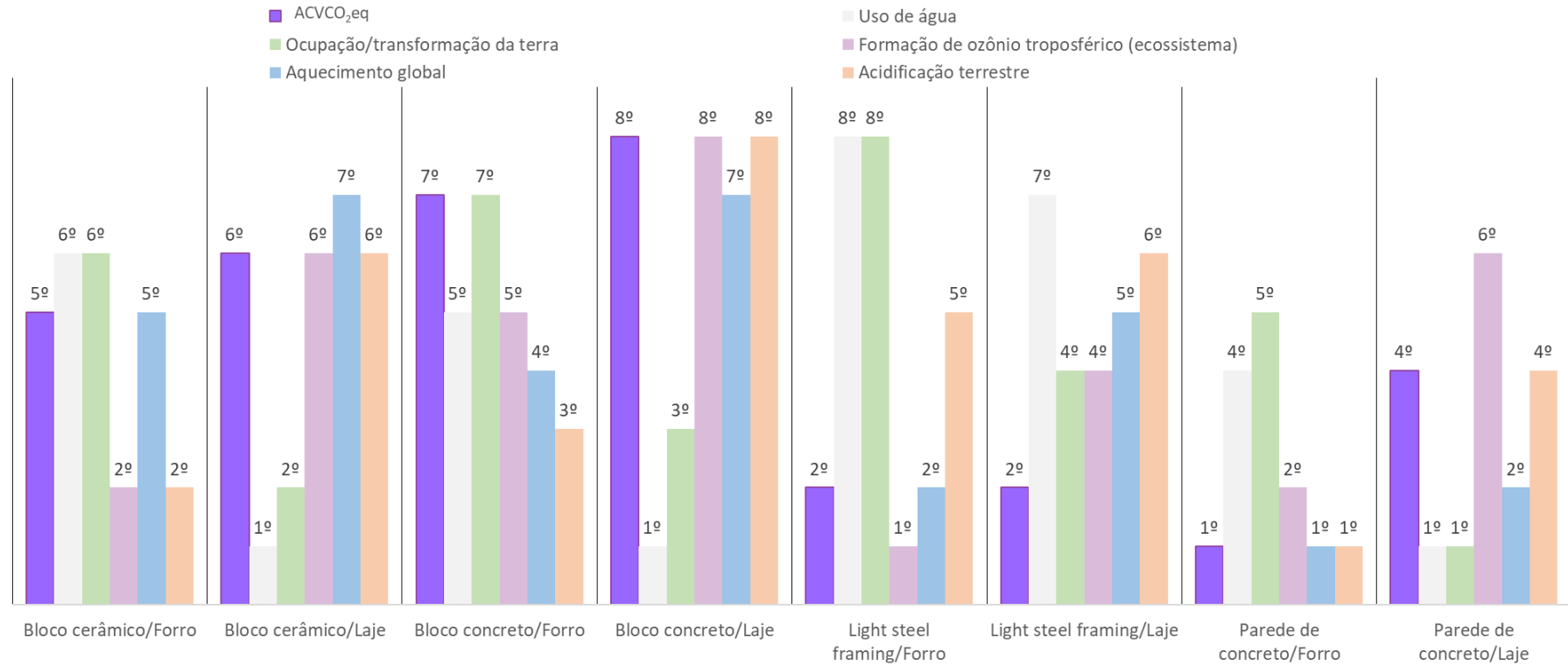


Figura 159 – Comparação da ACVCO_{2eq} com a categoria de dano do ecossistema – Parte 2.

