

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

AVALIAÇÃO DE PROJETOS PARA HABITAÇÃO DE  
INTERESSE SOCIAL COM FOCO NA  
SUSTENTABILIDADE

Paulo Cezar Vitorio Junior

Passo Fundo

2020



**PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DE PROJETOS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE  
SOCIAL COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Infraestrutura Sustentável

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

---

V845a Vitorio Junior, Paulo Cezar  
Avaliação de projetos para habitação de interesse social em foco na sustentabilidade [recurso eletrônico] / Paulo Cezar Vitorio Junior. – 2020.  
4.4 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.  
Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2020.

1. Habitação popular. 2. Engenharia sustentável.  
3. Desenvolvimento social. 4. Construção civil – Ciclos de vida. I. Kripka, Moacir, orientador. II. Título.

CDU: 624

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

**PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DE PROJETOS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE  
SOCIAL COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Data da Defesa: 18/09/2020

Membros componentes da banca examinadora:

Professor Doutor Moacir Kripka

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Orientador

Professor Doutor Víctor Yepes

Universidade Politécnica de Valência (UPV – Espanha)

Professor Doutor Gray Farias Moita

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG)

Professora Doutora Vera Maria Cartana Fernandes

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Dedico esta tese à minha esposa, Tais Conte Vitorio, que segurou a minha mão em todas as etapas deste trabalho, tornando a jornada mais alegre e cheia de vida.

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a Deus pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida. Obrigado, Senhor, pela vida, saúde e proteção concedidos para a construção desta tese.

À minha família, minha avó Natalina (*in memoriam*), minha mãe Su, meu pai Paulão, minha tia Fá e meu irmão Lucas, pelo incentivo, esforço e oportunidades proporcionados ao longo de toda a minha vida.

À minha esposa, Tais, por estar comigo em todos os momentos deste doutorado. Por me apoiar desde o momento do processo seletivo, por ser paciente na minha ausência devido às viagens realizadas, por ser compreensiva nos meus momentos de introspecção, por ser positiva nos meus momentos de dúvidas e incertezas, por tornar essa jornada mais alegre e cheia de vida.

À minha turma e meu cachorro, Menino, pela diversão e risadas.

Ao meu orientador, Moacir, pela orientação, pela amizade, pelo voto de confiança a mim depositado.

Ao colega Cleovir, pela amizade estreitada ao longo das viagens à Passo Fundo, pela discussão de ideias e conceitos, conversas aleatórias sobre a vida, auxílio com o software SimaPro.

Aos colegas do grupo de pesquisa, pela troca de conhecimento, conversas e risadas.

Ao colega Jaylton, de Curitiba, pela ajuda fornecida via e-mail: indicação e envio de materiais, discussão e esclarecimento de conceitos, auxílio na manipulação dos dados sociais.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aos colegas do Departamento Acadêmico de Construção Civil, pelo apoio, incentivo e liberação das minhas atividades acadêmicas para realização deste doutorado.

À Universidade de Passo Fundo e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Aos professores, que me ajudaram a visualizar um novo horizonte de conhecimento. À secretária, Cris, por ser sempre atenciosa e profissional nas demandas dos alunos.

Aos Professores Víctor Yepes, Gray Farias Moita, Vera Maria Cartana Fernandes e Zacarias Martin Chamberlain Pravia pelas contribuições dadas na avaliação dessa tese.

À Capes e à Universidade de Passo Fundo, pelo apoio financeiro concedidos para custear as taxas escolares.

A todos que ao longo do processo enviaram energias positivas para que tudo corresse bem. Meu sincero, muito obrigado!

“Irmão, você não percebeu que você é o único representante do seu sonho na face da Terra? Se isso não fizer você correr, chapa, eu não sei o que vai!”

(Emicida)

## RESUMO

---

VITORIO JUNIOR, Paulo Cezar. **Avaliação de projetos para Habitação de Interesse Social com foco na sustentabilidade**. 2020. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

Dada a importância do desenvolvimento de ferramentas que subsidiem a tomada de decisão dos projetistas, o objetivo desta tese é propor um modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social sob a ótica do Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) e do Processo Analítico Hierárquico (AHP), a ser validado por meio do estudo de duas tipologias construtivas. O Projeto Habitacional A (PHA) e o Projeto Habitacional B (PHB) são avaliados e os resultados mostram que, na dimensão ambiental, o PHA apresentou maiores impactos ambientais e maiores danos à saúde humana e à disponibilidade dos ecossistemas e de recursos. Na dimensão social, verificou-se que existem diferenças entre os salários pagos pela cadeia de suprimentos da construção e o PHB tem melhores características sociais do que o PHA. A dimensão econômica apontou que o PHB é, economicamente, mais atrativo. Relacionando os resultados das dimensões ambiental, social e econômica, por meio da combinação do PCV e do AHP, constatou-se que o PHB apresenta uma combinação de características mais sustentáveis do que o PHA na maioria absoluta dos resultados gerados. Entre as implicações do estudo dessa tese está o avanço da sustentabilidade aplicada à construção de projetos de habitação de interesse social. O modelo proposto serve de base para a inclusão das dimensões da sustentabilidade na construção e permite gerar cenários de tomada de decisão sustentável envolvendo medidas de concepção e dimensionamento dos projetos.

**Frases-chave:** Pensamento do Ciclo de Vida (PCV). Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACVS). Custo do Ciclo de Vida (CCV). Processo Analítico Hierárquico (AHP). Potencial Salário Justo Ponderado (PSJP). Sustentabilidade. Habitação de Interesse Social (HIS)

## ABSTRACT

---

VITORIO JUNIOR, Paulo Cezar. **Project evaluation for Social Housing with a focus on sustainability**. 2020. 136 p. Thesis (Doctorate in Engineering) – Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo.

Considering importance of developing tools that support designers' decision-making, the objective of this thesis is to propose a model aimed to the identification the most sustainable alternative in single-family housing projects of social interest from the perspective of Life Cycle Thinking (LCT) and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to be validated through the study of two projects. Project A and Project B are evaluated and, in the environmental dimension, the results show that Project A had greater environmental impacts and greater damage to the human health and to the availability of ecosystems and resources. In the social dimension, it was found that there are differences between the salaries paid by the construction supply chain and the Project B has better social characteristics than the Project A. The economic dimension pointed out that Project B is, economically, more attractive. Relating the results of the environmental, social and economic dimensions, through the combination of LCT and AHP, it was found that the Project B presents a combination of more sustainable characteristics than the Project A in the absolute majority of the results that were generated. Among the implications of the study carried out here is the advancement of sustainability applied to the construction of housing projects of social interest. The model presented here serves the basis for discussions about inclusion of the sustainability dimensions in construction and it shows to future professionals in the construction sector how the sustainability is relevant in the design of new structures. Finally, the proposed model aggregates data from the sustainability dimensions and allows the generation of sustainable decision-making scenarios involving measures of design and dimensioning of projects.

**Key-phrases:** Life Cycle Thinking (LCT). Life Cycle Assessment (LCA). Social Life Cycle Assessment (S-LCA). Life Cycle Cost (LCC). Analytic Hierarchy Process (AHP). Weighted Fair Wage Potential (WFWP). Sustainability. Social Housing.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Estágios do ciclo de vida de um produto. ....	28
Figura 2 – Evolução temporal das publicações que aplicam o PCV à construção. ....	42
Figura 3 – Distribuição geográfica: artigos por país, foco geográfico e continente. ....	45
Figura 4 – Afiliação dos autores. ....	46
Figura 5 – Tipo de estudo. ....	46
Figura 6 – Campo de aplicação. ....	47
Figura 7 – Fluxograma geral do método AHP. ....	49
Figura 8 – Estrutura hierárquica do método AHP. ....	50
Figura 9 – Evolução temporal das publicações que aplicam o AHP à construção. ....	55
Figura 10 – Distribuição geográfica: artigos por país e continente. ....	56
Figura 11 – Afiliação dos autores. ....	56
Figura 12 – Tipo de estudo. ....	57
Figura 13 – Campo de aplicação. ....	58
Figura 14 – Planta baixa do PHA. ....	60
Figura 15 – Planta baixa do PHB. ....	61
Figura 16 – Sistema de produto e fronteira do sistema de estudo. ....	63
Figura 17 – Estrutura hierárquica da tese. ....	71
Figura 18 – Esquema geral de funcionamento da Avaliação do Ciclo de Vida. ....	73
Figura 19 – Análise global: impactos ambientais normalizados do PHA e do PHB. ....	77
Figura 20 – Análise global: impactos ambientais por material – PHA. ....	78
Figura 21 – Análise global: impactos ambientais por material – PHB. ....	78
Figura 22 – Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à saúde humana. ....	81
Figura 23 – Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade dos ecossistemas. ....	82
Figura 24 – Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade de recursos. ....	83
Figura 25 – Danos normalizados do PHA e do PHB. ....	84
Figura 26 – Dano ambiental por fase da construção – PHA. ....	85
Figura 27 – Dano ambiental por fase da construção – PHB. ....	86
Figura 28 – Esquema geral de funcionamento da Avaliação Social do Ciclo de Vida. ....	87
Figura 29 – Potencial Salário Justo por setor. ....	88
Figura 30 – Potencial Salário Justo por sexo. ....	90

Figura 31 – Potencial Salário Justo por raça/cor.....	91
Figura 32 – Potencial Salário Justo por associativismo.....	92
Figura 33 – Potencial Salário Justo por formalidade.....	93
Figura 34 – Salário mínimo vigente no Brasil × Salário mínimo segundo DIEESE.....	95
Figura 35 – Potencial Salário Justo por setor: salário mínimo necessário calculado pelo DIEESE.....	96
Figura 36 – Potencial Salário Justo Ponderado Global.....	98
Figura 37 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Infraestrutura.....	99
Figura 38 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Superestrutura.....	99
Figura 39 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Vedação.....	100
Figura 40 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Cobertura.....	101
Figura 41 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Revestimento.....	102
Figura 42 – Esquema geral de funcionamento do Custo do Ciclo de Vida.....	102
Figura 43 – Análise de custos PHA e PHB.....	103
Figura 44 – Esquema geral de funcionamento do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.....	106

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – ICV do PHA para a unidade funcional definida (Continua).....	74
Tabela 2 – ICV do PHB para a unidade funcional definida (Continua).....	75
Tabela 3 – Análise global: impactos ambientais por m <sup>2</sup> de construção. ....	76
Tabela 4 – Análise global: danos ambientais por m <sup>2</sup> de construção.....	84
Tabela 5 – Valores médios de 2002 a 2015.....	89
Tabela 6 – Perspectiva hierárquica: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade. .....	107
Tabela 7 – Perspectiva hierárquica: sustentabilidade.....	108
Tabela 8 – Perspectiva igualitária: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade. .....	109
Tabela 9 – Perspectiva igualitária: sustentabilidade.....	109
Tabela 10 – Perspectiva individualista: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade. ....	110
Tabela 11 – Perspectiva individualista: sustentabilidade.....	111
Tabela 12 – Perspectiva de pesos iguais: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade. ....	112
Tabela 13 – Perspectiva de pesos iguais: sustentabilidade.....	112
Tabela 14 – Análise alternativa por fase da construção: sustentabilidade .....	113
Tabela 15 – Análise alternativa por categoria social: sustentabilidade.....	114
Tabela 16 – Análise alternativa por dimensão da sustentabilidade: análises ambiental, social e econômica.....	115

## LISTA DE QUADROS

---

Quadro 1 – Categorias de impacto de ponto médio ( <i>midpoint</i> ) <i>ReCiPe 2016</i> .....	32
Quadro 2 – Categorias de impacto de ponto final ( <i>endpoint</i> ) <i>ReCiPe 2016</i> .....	32
Quadro 3 – Categorias de partes interessadas e subcategorias de impacto.....	34
Quadro 4 – Palavras-chave e <i>string</i> de busca. ....	41
Quadro 5 – Critérios de inclusão e exclusão.....	41
Quadro 6 – Escala Fundamental. ....	51
Quadro 7 – Índice Randômico (IR).....	53
Quadro 8 – Palavras-chave e <i>string</i> de busca. ....	54
Quadro 9 – Critérios de inclusão e exclusão.....	54
Quadro 10 – Descrição do sistema geral do PHA.....	60
Quadro 11 – Descrição do sistema geral do PHB.....	62
Quadro 12 – Materiais analisados. ....	64
Quadro 13 – Materiais e processos SimaPro. ....	65
Quadro 14 – Salário Mínimo Vigente e Índice de Gini – Brasil.....	68
Quadro 15 – Ponderação das perspectivas de análise do modelo. ....	72
Quadro 16 – Tomadas de decisão (Continua).....	72
Quadro 17 – Avaliação da dimensão ambiental.....	74
Quadro 18 – Análise global: materiais que causaram os maiores impactos por projeto (Continua). ....	79
Quadro 19 – Avaliação da dimensão social. ....	88
Quadro 20 – Massa Equivalente dos Setores. ....	96
Quadro 21 – Melhor opção de acordo com o impacto: global e por fase de construção. ....	104
Quadro 22 – Melhor opção de acordo com o dano: global e por fase da construção. ....	104
Quadro 23 – Melhor opção de acordo com o PSJP 2015: global e por fase da construção...	105
Quadro 24 – Melhor opção de acordo com o custo: total e por fase da construção. ....	105
Quadro 25 – Quadro resumo do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade sob a ótica do PCV e do AHP. ....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação Social do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ASCV	Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida
CA	Custo de Aquisição
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CE	Critério de Exclusão
CEF	Caixa Econômica Federal
CI	Critério de Inclusão
CIB	<i>The International Council for Research and Innovation in Building and Construction</i>
CI	Custo de Instalação
CO	Custo Operacional
CP	Custo da Produção
CR	Custo de Reposição
DIEESE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos
ED	Danos à diversidade dos ecossistemas
Electre	<i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>
EOFP	Formação de ozônio fotoquímico - ecossistemas terrestres
$FC_{SJ}$	Fator de Caracterização de Salário Justo
$FD_n$	Fator de Desigualdade
FEP	Eutrofização em água doce
FETP	Ecotoxicidade em água doce
FFP	Depleção de combustíveis fósseis
GWP	Mudanças climáticas
HH	Danos à saúde humana
HIS	Habitacão de Interesse Social
HTPc	Toxicidade humana – cancerígena
HTPnc	Toxicidade humana – não cancerígena

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IETC	<i>International Environmental Technology Centre</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IR	Índice Randômico
IRP	Radiação ionizante
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCSD	<i>Life Cycle Sustainability Dashboard</i>
LCST	<i>Life Cycle Sustainability Triangle</i>
LOP	Ocupação do solo
MEP	Eutrofização marinha
$MES_n$	Massa Equivalente do Setor
METP	Ecotoxicidade marinha
$NS$	Número de Setores
ODP	Depleção do ozônio estratosférico
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
PAIC	Pesquisa Anual da Indústria da Construção
PCV	Pensamento do Ciclo de Vida
PHA	Projeto Habitacional A
PHB	Projeto Habitacional B
PHC	Projeto Habitacional C
PMFP	Formação de material particulado
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PSJ	Potencial Salário Justo
PSJP	Potencial Salário Justo Ponderado
RA	Danos à disponibilidade de recursos
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SimaPro	<i>System for Integrated Environmental Assessment of Products</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil
$SMV_n$	Salário Mínimo de Vida
SOP	Depleção de recursos minerais

$SR_n$	Salário Real Médio
TAP	Acidificação terrestre
TETP	Ecotoxicidade terrestre
$TRT_n$	Tempo Real de Trabalho
$TTC_n$	Tempo de Trabalho Contratado
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
VP	Valor Presente
VR	Valor Residual

# SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA .....	21
1.2	OBJETIVOS DA TESE .....	22
1.2.1	Objetivo Geral.....	22
1.2.2	Objetivos Específicos.....	22
1.3	JUSTIFICATIVAS .....	23
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	26
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>28</b>
2.1	PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA.....	28
2.1.1	Avaliação do Ciclo de Vida .....	29
2.1.1.1	Definição de objetivo e escopo.....	30
2.1.1.2	Inventário do Ciclo de Vida.....	30
2.1.1.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	31
2.1.1.4	Interpretação .....	33
2.1.2	Avaliação Social do Ciclo de Vida .....	33
2.1.2.1	Categorias de partes interessadas e subcategorias de impacto .....	34
2.1.2.2	Potencial Salário Justo.....	35
2.1.3	Custo do Ciclo de Vida .....	38
2.1.3.1	Definição do objeto de estudo .....	38
2.1.3.2	Estimativa do ciclo de vida.....	39
2.1.3.3	Elaboração do inventário do ciclo de vida.....	39
2.1.3.4	Atualização financeira e composição dos custos totais .....	39
2.1.4	O Pensamento do Ciclo de Vida aplicado à construção.....	40
2.2	PROCESSOS DE TOMADA DE DECISÃO.....	47
2.2.1	Análise de decisão multicritério.....	47
2.2.2	Processo Analítico Hierárquico .....	48

2.2.3	O Processo Analítico Hierárquico aplicado à construção .....	53
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>59</b>
3.1	FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DOS PROJETOS .....	59
3.1.1	Projeto Habitacional A (PHA).....	59
3.1.2	Projeto Habitacional B (PHB).....	61
3.2	FASE 2 – PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA .....	62
3.2.1	Condução da Avaliação do Ciclo de Vida.....	62
3.2.1.1	Definição do objetivo e escopo.....	62
3.2.1.2	Inventário do Ciclo de Vida.....	64
3.2.1.3	Análise do Inventário do Ciclo de Vida.....	64
3.2.1.4	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	66
3.2.1.5	Interpretação.....	66
3.2.2	Condução da Avaliação Social do Ciclo de Vida.....	66
3.2.2.1	Definição do objetivo e escopo.....	66
3.2.2.2	Inventário Social do Ciclo de Vida.....	66
3.2.2.3	Potencial Salário Justo .....	67
3.2.2.4	Potencial Salário Justo Ponderado .....	68
3.2.3	Condução do Custo do Ciclo de Vida .....	69
3.2.3.1	Definição do objeto de estudo.....	69
3.2.3.2	Estimativa do ciclo de vida .....	69
3.2.3.3	Elaboração do inventário do ciclo de vida .....	70
3.2.3.4	Atualização financeira e composição dos custos totais .....	70
3.3	FASE 3 – AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE .....	70
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>73</b>
4.1	PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA .....	73
4.1.1	Avaliação do Ciclo de Vida.....	73
4.1.1.1	Inventário do Ciclo de Vida.....	74
4.1.1.2	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida e Interpretação .....	76
4.1.1.2.1	Abordagem de ponto médio ( <i>midpoint</i> ) – ReCiPe 2016.....	76
4.1.1.2.2	Abordagem de ponto final ( <i>endpoint</i> ) – ReCiPe 2016.....	81

4.1.2	Avaliação Social do Ciclo de Vida .....	87
4.1.2.1	Potencial Salário Justo.....	88
4.1.2.1.1	Potencial Salário Justo – Trabalhadores por categoria.....	89
4.1.2.1.2	Análise de sensibilidade do potencial salário justo .....	94
4.1.2.2	Potencial Salário Justo Ponderado.....	96
4.1.2.2.1	Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção.....	98
4.1.3	Custos do Ciclo de Vida.....	102
4.1.3.1	Composição de custos totais.....	102
4.1.4	Resumo dos resultados do PCV .....	103
4.2	<b>AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE.....</b>	<b>105</b>
4.2.1	Perspectiva hierárquica .....	107
4.2.2	Perspectiva igualitária .....	108
4.2.3	Perspectiva individualista .....	110
4.2.4	Perspectivas de pesos iguais .....	111
4.2.5	Análises alternativas .....	113
4.2.5.1	Análise por fase da construção .....	113
4.2.5.2	Análise por categoria social do trabalhador .....	114
4.2.5.3	Análises por dimensão da sustentabilidade .....	115
4.2.6	Resumo dos resultados.....	116
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>118</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>

## 1 INTRODUÇÃO

---

O ambiente construído constitui um dos principais suportes para o desenvolvimento econômico e bem estar social (ABD RASHID; IDRIS; YUSOFF, 2017; ASIF; MUNEEER; KELLEY, 2007). A construção é um amplo processo para a realização de assentamentos humanos e a criação de infraestrutura para o desenvolvimento das atividades produtivas (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012; GLASS et al., 2013; KOFOWOROLA; GHEEWALA, 2008; PLESSIS, 2002).

A construção está associada à promoção do desenvolvimento social, com destaque ao acesso à infraestrutura básica, renda e melhoria da qualidade de vida (IBGE, 2016). De acordo com a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2016, a atividade de construção totalizou R\$ 318,7 bilhões em incorporações, obras e serviços da construção. O gasto com salários e outras remunerações atingiu o valor de R\$ 58,5 bilhões (CARVALHO, 2009; IBGE, 2016).

Apesar dos benefícios, os impactos gerados pela construção (BILEC; RIES; MATTHEWS, 2010; DE LASSIO et al., 2016; GONÇALVES DE LASSIO; NAKED HADDAD, 2016; SINGH et al., 2011) colocam pressão nas indústrias e nos profissionais da área, incentivando a migração dos sistemas tradicionais para sistemas sustentáveis (BARBA; GOMES; LACERDA, 2015; BISSOLI-DALVI, 2014).

De acordo com a definição clássica da sustentabilidade, a modificação do ambiente natural deve ser capaz de suprir as necessidades atuais, devendo apresentar impactos negativos mínimos para as futuras gerações (WCED, 1987). Acredita-se que isso possa ser alcançado por meio de um modelo de desenvolvimento que busque o bem estar por meio de três dimensões: ambiental, social e econômica (DINIZ; BERMAN, 2012; MOTTA; AGUILAR, 2009; NASCIMENTO, 2012).

Para a construção, o desenvolvimento sustentável pode ser inserido por meio de novas práticas em todas as fases do ciclo de vida da edificação (MOTTA; AGUILAR, 2009). Além dos aspectos técnicos, um projeto sustentável deve atender às dimensões ambiental, social e econômica. Diante disso, é crescente a busca por ferramentas que auxiliem no entendimento do ciclo de vida dos projetos atuais e forneçam subsídios para o desenvolvimento de projetos sustentáveis. Uma das metodologias disponíveis que pode contribuir para esse fim é o Pensamento do Ciclo de Vida (PCV).

O PCV avalia os impactos de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, indo além do foco tradicional, centrado no local de produção e nos processos de fabricação. Os principais objetivos da PCV são reduzir o uso de recursos e das emissões de produtos, bem como melhorar o desempenho socioeconômico ao longo do seu ciclo de vida (ANDREWS et al., 2009). O PCV propõe uma forma de pensar que agrega os sistemas, preservando as suas inter-relações, de maneira a compreender a totalidade dos sistemas produtivos e identificar os pontos críticos em seus subsistemas, processos e fluxos (IBICT, 2019). As abordagens do PCV podem ser usadas em todos os setores e oferecem a possibilidade de examinar uma série de categorias e indicadores-chave de impacto, avaliando os impactos ambientais, econômicos e sociais, bem como seus efeitos finais sobre as dimensões da sustentabilidade (REMMEN; JENSEN; FRYDENDAL, 2007). Dentre as abordagens possíveis para o PCV estão: a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACVS) e o Custo do Ciclo de Vida (CCV).

A ACV fornece informações sobre o impacto ambiental global, a demanda de energia e o impacto ambiental envolvido em todos os processos da edificação. Uma ACV que abrange todo o ciclo de vida de um produto é denominada “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), esta vai da extração das matérias-primas até a destinação final do produto. A abordagem “do berço ao berço” (*cradle-to-cradle*) vai além do ciclo de vida do produto e inclui os estágios de reúso e reciclagem de materiais e componentes. Nas análises menos abrangentes encontram-se a abordagem “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*) que elimina a fase de uso e destino final do produto; a abordagem “do portão ao portão” (*gate-to-gate*) que define pontos específicos dentro do ciclo de vida dentro de uma fábrica; e, a abordagem “do portão do túmulo” (*gate-to-grave*) que considera da fase de uso ao descarte (PIEKARSKI, 2015).

A ACVS identifica, comunica e relata os potenciais impactos sociais e as condições sociais de um produto. A dimensão social é menos estudada que as outras dimensões. Muitos fatores dificultam a quantificação e avaliação dos impactos sociais, tais como: falta de metodologia bem desenvolvidas; dificuldades na escolha dos indicadores sociais e categorias de impacto corretos; dificuldades com a coleta de dados; resultados difíceis de serem entendidos pelos tomadores de decisão; e, o desafio de conectar a dimensão social às outras dimensões (BORK; BARBA JUNIOR; GOMES, 2015; HOSSAIN et al., 2018; KLOEPFFER, 2008; MCKENZIE, 2004).

O CCV avalia e resume o custo total de propriedade da instalação; leva em consideração todos os custos de aquisição, posse e descarte de um produto para fornecer uma decisão no

campo financeiro (CABEZA et al., 2014; KLOEPFFER, 2008; VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013).

Mesmo com uso do PCV, quanto maior a complexidade do empreendimento, maior é a dificuldade de realização de escolhas do projetista. A tomada de decisão pode ser influenciada por fatores como: limitações cognitivas dos profissionais; falta de clareza das questões a serem decididas; diversidade de interpretações possíveis; possibilidade de haver dados incompletos ou inexistentes; incerteza na definição dos critérios de escolha; e, limitação de tempo e energia disponíveis para a escolha (MAIA; PIRES, 2011). Nesse contexto, os métodos de tomada de decisão são cruciais, especialmente, quando há necessidade de convergir diferentes critérios (SCHAMNE; NAGALLI, 2018). Dentre os métodos de tomada de decisão, o Processo Analítico Hierárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process) é uma ferramenta de tomada de decisão apropriada para dimensionar questões ambientais, sociais e econômicas (RASLANAS; KLIUKAS; STASIUKYNAS, 2016), pois este é um método capaz de tratar problemas com multifatores qualitativos e quantitativos nos quais se tem que fazer uma escolha entre várias alternativas (GIUNTA, 2004).

Diante do cenário apresentado, verifica-se a importância do desenvolvimento de ferramentas que subsidiem a tomada de decisão dos projetistas para a escolha de qual alternativa de projeto é mais sustentável.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O ciclo de vida de uma edificação engloba: idealização do empreendimento; concepção, projeto e construção; uso e manutenção do edifício; demolição e disposição final dos resíduos. As etapas de idealização, concepção, projeto e construção são as fases onde o projetista tem maior capacidade de intervenção, podendo apontar alternativas para que todo o ciclo de vida da edificação torne-se mais sustentável.

A abordagem científica do PCV, por meio da aplicação dos métodos ACV, ACVS e CCV, fornece suporte à decisão quanto à sustentabilidade do ciclo de vida dos produtos (ABD RASHID; YUSOFF, 2015; BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; ERLANDSSON; BORG, 2003; MALMQVIST et al., 2011; SINGH et al., 2011; ZABALZA BRIBIÁN; ARANDA USÓN; SCARPELLINI, 2009).

O estudo proposto por esta tese investiga projetos de habitação unifamiliar de interesse social, considerando a abordagem “do berço ao portão”, a fim de responder:

- Qual das alternativas apresenta ciclo de vida com menor impacto ambiental?

- Qual das alternativas apresenta ciclo de vida com maior impacto social positivo?
- Qual das alternativas apresenta ciclo de vida com custos mais vantajosos?
- Considerando os ciclos de vida ambiental, social e econômico, qual alternativa é mais sustentável?

Baseado nisso, define-se como problema da tese a seguinte pergunta: *Como empregar os resultados provenientes da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), da Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACVS) e do Custo do Ciclo de Vida (CCV) conjuntamente ao Processo Analítico Hierárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process) para apoiar o projetista na identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social?*

## **1.2 OBJETIVOS DA TESE**

Dada a problemática apresentada, foram estabelecidos os objetivos, geral e específico, da tese.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Propor um modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social, sob a ótica do Pensamento do Ciclo de Vida (Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACVS) e Custo do Ciclo de Vida (CCV)) e do Processo Analítico Hierárquico (*AHP – Analytic Hierarchy Process*), que será validado por meio do estudo de duas tipologias construtivas

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos que compõem o objetivo geral são:

- Selecionar projetos de habitação unifamiliar de interesse social de diferentes tipologias construtivas;
- Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida dos projetos de habitação unifamiliar de interesse social;
- Realizar a Avaliação Social do Ciclo de Vida dos projetos de habitação unifamiliar de interesse social por meio da criação de um indicador que relacione os dados sociais dos setores avaliados aos dados de projeto;

- Realizar o cálculo do Custo do Ciclo de Vida dos projetos de habitação unifamiliar de interesse social por meio do levantamento de custos relacionados aos projetos;
- Aplicar o Processo Analítico Hierárquico (AHP), utilizando como critérios os resultados obtidos na ACV, ACVS e CCV, a fim de gerar o modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social, bem como;
- Identificar os principais fatores causadores de impactos ao longo do ciclo de vida dos projetos de habitação unifamiliar de interesse social.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS

A indústria da construção está relacionada a impactos significativos (BILEC; RIES; MATTHEWS, 2010; DE LASSIO et al., 2016; GONÇALVES DE LASSIO; NAKED HADDAD, 2016; SINGH et al., 2011) respondendo, em 2010, por 32% do uso final de energia e 8,8 GtCO<sub>2</sub> de emissões, incluindo emissões diretas e indiretas (CBIC, 2017; IPCC, 2015). As emissões de gases de efeito estufa do setor da construção mais que dobraram desde 1970, representando 19% das emissões globais em 2010. O setor também é responsável por aproximadamente um terço das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia, dois terços do halocarbono e 25-33% das emissões de carbono preto (GEA, 2012; IPCC, 2014). A construção também tem influência no consumo de recursos naturais (ABD RASHID; IDRIS; YUSOFF, 2017; ASIF; MUNEEER; KELLEY, 2007; CABEZA et al., 2014), representa grande quantidade de uso da água (GERVASIO; DIMOVA; PINTO, 2018; PEUPORTIER, 2008) e consumo intensivo de recursos (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012; GONG et al., 2015; VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013). Além disso, a construção apresenta impactos sociais relevantes; existem questões relacionadas à injustiças trabalhistas, baixos salários, trabalho infantil, trabalho forçado, tempo excessivo de trabalho, pobreza, trabalho migrante, corrupção, discriminação de gênero e assédio sexual (DANSO, 2018; PLESSIS, 2002, 2007; SALA, 2020). Esses impactos afetam o meio ambiente e as partes interessadas ao longo do ciclo de vida da construção e exigem a substituição das técnicas tradicionais por sistemas de construção mais sustentáveis (AL-GHAMDI; BILEC, 2017; BARBA; GOMES; LACERDA, 2015; PLESSIS, 2002).

Ainda não há uma resposta absoluta para solucionar todos os problemas destacados; no entanto, as abordagens do PCV fornecem uma estrutura para integrar políticas ambientais e

estratégias de desenvolvimento (BUYTAERT et al., 2011; GHADIMI et al., 2013; REMMEN; JENSEN; FRYDENDAL, 2007). Entretanto, o estudo completo do ciclo de vida de uma edificação não é um processo simples, pois os edifícios contém muitos componentes; possuem extensa vida útil; apresentam várias funções; e, passam por manutenções frequentes (ABD RASHID; YUSOFF, 2015; AKTAS; BILEC, 2012; VAN OOTEGHEM; XU, 2012; ZABALZA BRIBIÁN; ARANDA USÓN; SCARPELLINI, 2009). Além disso, a implementação da sustentabilidade em projetos por meio do PCV exige uma quantidade extensa de dados e informações. Os projetistas envolvidos nos estágios iniciais do projeto são prejudicados por essa complexidade (SOUST-VERDAGUER; LLATAS; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2016). Para mitigar essa dificuldade, a aplicação do AHP pode contribuir para resolver e analisar problemas complexos de maneira mais estruturada e organizada, pois fornece uma abordagem que decompõe o problema em unidades e níveis hierárquicos (YOUSSEF; PRADHAN; TARABEES, 2011). Os projetistas podem se beneficiar desse método em situações de tomada de decisão que exigem seleção, priorização e alocação de recursos, como é o caso da consideração da sustentabilidade em projetos de edificações (YOUSSEF; PRADHAN; TARABEES, 2011; ZOLFAGHARIAN; IRIZARRY, 2017).

Na combinação das abordagens do PCV e do AHP, foram identificados poucos trabalhos que realizam a avaliação da sustentabilidade no setor da construção (KAMALI; HEWAGE; SADIQ, 2019; KIM et al., 2013; REZA; SADIQ; HEWAGE, 2011). Verificou-se que, ao longo dos anos, tornou-se comum a implementação da sustentabilidade ambiental como a melhor solução sustentável, ou seja, parte significativa das aplicações envolve apenas a aplicação da ACV. Entretanto, em uma construção sustentável, além da dimensão ambiental, os aspectos econômicos e sociais devem ser analisados e incluídos na avaliação (RASLANAS; STASIUKYNAS; JURGELAITYTĖ, 2013). Verifica-se então uma oportunidade para avanço científico que agregue o conhecimento à construção por meio da combinação das abordagens do PCV e do AHP, a fim de realizar a avaliação completa da sustentabilidade do ciclo de vida dos projetos (CIROTH et al., 2011).

Além disso, destacam-se as aplicações a serem estudadas. Os projetos selecionados são residências unifamiliares e tratam-se de projetos de Habitação de Interesse Social (HIS). Quanto a sua complexidade, os projetos de HIS apresentam reduzida quantidade de componentes e materiais de construção, o que auxilia o desenvolvimento do modelo proposto e facilita a análise dos resultados.

A moradia é uma das necessidades fundamentais do ser humano e é uma componente importante para o desenvolvimento sustentável de uma comunidade (IBGE, 2016). O

desenvolvimento proposto tem papel relevante na estrutura socioeconômica e na redução do déficit habitacional. Os últimos resultados obtidos no Brasil mostram que em 2015, o déficit habitacional brasileiro estimado correspondia a 6,355 milhões de domicílios (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2018). Verifica-se, então, uma oportunidade de apontar melhorias nos projetos de HIS em um país que carece de moradias em muitas regiões.

Com os avanços tecnológicos em diversas áreas, os projetos de Engenharia têm evoluído, novas técnicas e materiais são empregados na construção. Verificou-se que existem projetos de HIS classificados como sustentáveis em função das soluções tecnológicas disponíveis e aplicáveis aos mesmos. Alguns exemplos são: aquecimento solar de água, energia fotovoltaica, equipamentos e eletrodomésticos eficientes e aproveitamento de água pluvial. Embora diversas soluções de sustentabilidade já tenham sido implantadas em HIS no Brasil, ainda é possível verificar muitas barreiras para a implantação das mesmas, tais como:

- Custos: tanto o custo de implantação quanto o custo de manutenção das tecnologias são maiores do que as tecnologias convencionais;
- Falta de capacitação técnica: há falta de profissionais qualificados tanto para o desenvolvimento de projetos quanto para a implantação das tecnologias sustentáveis no Brasil;
- Falta de treinamento educacional do usuário: a falta de conhecimento e educação ambiental por parte dos usuários faz com que haja pouca preservação dos equipamentos e reduz o desempenho dos mesmos;
- Tendência para desenvolver soluções generalistas: as soluções não privilegiam os aspectos particulares de cada projeto (JOHN et al., 2010a, 2010b, 2010c).

Em função disso, a combinação das abordagens do PCV e do AHP aqui proposta tem o objetivo de apoiar profissionais e empresas na identificação de fragilidades no ciclo de vida em projetos convencionais. Muitas das medidas relevantes para o aumento da sustentabilidade podem ser realizadas sem impactos diretos significativos no custo de construção da habitação, pois envolvem medidas de projeto, gerenciais ou equipamentos de baixo custo ou até de custo negativo (JOHN et al., 2010a, 2010b, 2010c). Isso apoia os tomadores de decisão na seleção de estratégias e na priorização de recursos e investimentos (DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017; PEUPORTIER, 2008). Pode, ainda, promover a conscientização dos atores da cadeia de valor sobre questões de sustentabilidade e auxiliar o consumidor final a escolher produtos que sejam mais sustentáveis.

Pode-se destacar, também, a importância dessa pesquisa quanto ao avanço científico na área de verificação e melhoria na sustentabilidade em projetos de construção e à difusão do conhecimento para a comunidade acadêmica, empresas públicas e privadas. Deste modo, o desenvolvimento de metodologias que analisem e executem os projetos considerando as três dimensões da sustentabilidade torna-se altamente relevante.

Quanto ao ineditismo e a originalidade, este trabalho destaca-se por sua proposta. O presente estudo é inédito, pois desenvolve uma ferramenta que combina as abordagens do PCV e do AHP para a avaliação da sustentabilidade de projetos de HIS, onde os critérios empregados são as dimensões da sustentabilidade calculadas pelo pensamento do ciclo de vida (ACV, ACVS e CCV). Além disso, essa tese propõe um indicador social para a Avaliação Social do Ciclo de Vida. Os estudos sociais realizados por meio do Potencial Salário Justo não admitem a relação direta entre os dados sociais coletados e a unidade funcional do problema (NEUGEBAUER et al., 2017). Com o objetivo de preencher essa lacuna, esta tese propõe um indicador que relaciona os dados sociais dos setores avaliados à unidade funcional delimitada nos projetos.

Essa tese pode ainda ser justificada pela integração dos trabalhos desenvolvidos pela linha de pesquisa Infraestrutura Sustentável do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, ou seja, este trabalho complementa e agrega aos resultados obtidos por Santoro (2015) e Milani (2020).

#### **1.4 ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese está organizada da seguinte maneira. O Capítulo 1, no qual este item se insere, contempla a introdução do problema da pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa. Finaliza-se apresentando a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico. Este trata os principais conceitos relacionados ao Pensamento do Ciclo de Vida, destacando as principais características da Avaliação do Ciclo de Vida, Avaliação Social do Ciclo de Vida, Custo do Ciclo de Vida e também a evolução da aplicação do Pensamento do Ciclo de Vida à construção. Este capítulo apresenta ainda os processos de tomada de decisão explicitando os conceitos, a formulação do Processo Analítico Hierárquico e a evolução da aplicação do Processo Analítico Hierárquico à construção.

O Capítulo 3 contém os procedimentos metodológicos do estudo proposto. A tese foi dividida em três fases: (i) identificação dos projetos; (ii) pensamento do ciclo de vida; e, (iii)

avaliação da sustentabilidade. Este capítulo aborda separadamente as particularidades de cada uma dessas fases.

O Capítulo 4 mostra os resultados e as discussões pertinentes à Avaliação do Ciclo de Vida, à Avaliação Social do Ciclo de Vida, ao Custo do Ciclo de Vida e à avaliação da sustentabilidade por meio do AHP obtidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

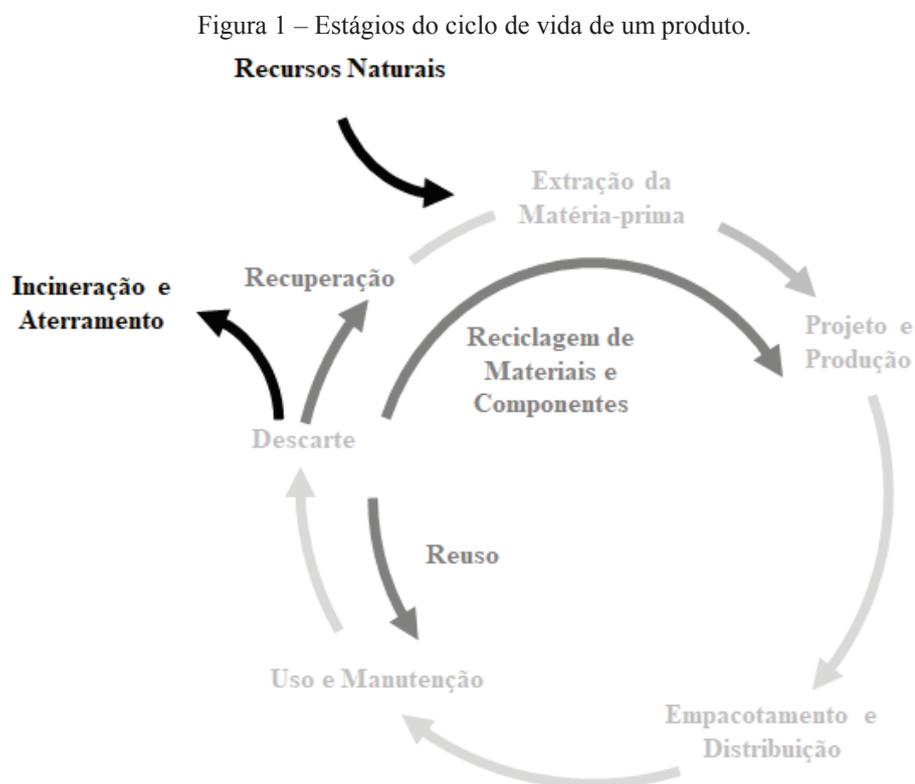
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

---

Este capítulo aborda os conceitos considerados importantes para a fundamentação teórica da tese. A Seção 2.1 apresenta o Pensamento do Ciclo de Vida; destaca as principais características da Avaliação do Ciclo de Vida, da Avaliação Social do Ciclo de Vida e do Custo do Ciclo de Vida; e, aborda a evolução da aplicação do Pensamento do Ciclo de Vida à construção. A Seção 2.2 trata sobre os processos de tomada de decisão explicitando os conceitos e formulação do Processo Analítico Hierárquico e apresenta a evolução da aplicação do Processo Analítico Hierárquico à construção.

### 2.1 PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA

O Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) expande o conceito estabelecido de produção mais limpa para incluir o ciclo de vida completo do produto e sua sustentabilidade. A Figura 1 apresenta os estágios do ciclo de vida de um produto. Cada estágio do ciclo de vida tem o potencial para reduzir recursos, consumos e melhorar o desempenho dos produtos (ANDREWS et al., 2009; CIROTH et al., 2011; REMMEN; JENSEN; FRYDENDAL, 2007).



Fonte: O Autor, com base em Remmen, Jensen and Frydendal (2007).

Os principais objetivos do PCV aplicado a um produto são reduzir o uso de recursos naturais e as emissões para o meio ambiente, além de melhorar seu desempenho socioeconômico ao longo do seu ciclo de vida. Isso pode facilitar os vínculos entre as dimensões econômica, social e ambiental dentro de uma organização e em toda a sua cadeia de valor. As ferramentas de PCV foram desenvolvidas e podem ser aplicadas ao setor público e privado, estimulando a transição para o desenvolvimento sustentável por meio da avaliação dos impactos ambientais, econômicos e sociais (REMMEN; JENSEN; FRYDENDAL, 2007). Na avaliação objetiva da sustentabilidade por intermédio do PCV, destacam-se: a Avaliação do Ciclo de Vida, a Avaliação Social do Ciclo de Vida e o Custo do Ciclo de Vida (HOSSAIN et al., 2018; VITALE; ARENA, 2018).

### **2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estima os possíveis impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto (ALLACKER; SOUZA; SALA, 2014; ASDRUBALI; BALDASSARRI; FTHENAKIS, 2013; DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017; HOSSAIN et al., 2018); ajuda na identificação de componentes, processos e sistemas; compara as opções para minimizar os impactos ambientais; e, orienta sobre planejamento estratégico e de longo prazo em relação às tendências em design de materiais e produtos (ASIF et al., 2017; DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017; PEUPORTIER, 2008). Este método pode analisar produtos com base em suas funções, e não em suas características físicas específicas. A aplicação da ACV pode abranger o segmento industrial, organizações comunitárias e entidades certificadoras (DE LASSIO et al., 2016).

A Organização Internacional de Normalização (ISO – *International Organization for Standardization*) formalizou a ACV na sua série 14040 (ISO, 2006a, 2006b). No Brasil, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009 padronizam os cálculos e a metodologia que devem ser empregados em uma ACV. A NBR ISO 14040:2009 apresenta os princípios e estrutura de uma ACV, já a NBR ISO 14044:2009 fornece os requisitos e as orientações para que a ACV seja realizada adequadamente (ABNT, 2009a, 2009b). A ACV é dividida em quatro fases: (i) objetivo e escopo; (ii) análise de inventário; (iii) avaliação de impacto; e, (iv) interpretação. Todas as fases da ACV apresentam inter-relações entre si, o que indica que o processo de condução de uma ACV é dinâmico e iterativo. Os itens 2.1.1.1 a 2.1.1.4 apresentam de modo sucinto as etapas da ACV (para mais detalhes consultar ABNT (2009a, 2009b)).

### 2.1.1.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo define claramente a proposta do estudo a ser conduzido e identifica a aplicação pretendida, as razões pela qual o estudo está sendo realizado e o público alvo a quem se remete o mesmo. O escopo estabelece e detalha a abrangência do estudo, visando que este seja compatível e consistente ao objetivo definido (ABNT, 2009b). A unidade funcional é uma maneira de fornecer uma base de referência única de acordo com função exercida pelo produto, o que permite que sejam realizadas comparações adequadas entre diferentes estudos e cenários (PIEKARSKI, 2015; UGAYA, 2001).

As fronteiras do sistema determinam quais os processos elementares serão incluídos na ACV (ABNT, 2009b). Além disso, devem ser determinadas quais categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização serão incluídos no estudo de ACV. A ACV é uma técnica iterativa e, à medida que dados e informações são coletados, vários aspectos do escopo podem exigir modificações visando a atender ao objetivo original do estudo.

### 2.1.1.2 Inventário do Ciclo de Vida

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a compilação e a quantificação (procedimentos de cálculo) dos dados de entradas e saídas associadas ao sistema em estudo. Essa etapa envolve a coleta dos dados para o alcance dos objetivos de estudo em questão. A definição de objetivo e escopo de um estudo provê o plano inicial para a condução da fase de inventário do ciclo de vida de uma ACV (DONG; NG, 2015).

A coleta de dados engloba o planejamento; a definição das informações a serem coletadas; a definição das partes que fornecerão as informações; e, a preparação dos responsáveis pelas coletas. Os dados coletados pelos responsáveis pela condução da ACV são chamados dados primários; estes são dados próprios, obtidos por meio de coletas e medições. Para os casos onde haja limitações na obtenção dos dados, tais como inviabilidade (econômica ou temporal) e dados estratégicos de empresas (confidenciais), é possível utilizar dados secundários. Estes são dados públicos, dados de literatura ou dados obtidos de outras bases de dados construídas para outros estudos. Para os dados secundários, é provável que seja necessária a adaptação e ajuste para a realidade do estudo realizado (ABNT, 2009b).

No ICV, todos os procedimentos de cálculo devem ser documentados de explicitamente e os pressupostos utilizados devem ser claramente declarados e justificados. Convém que os mesmos procedimentos de cálculo sejam aplicados de maneira consistente ao longo de todo o

estudo. Uma verificação da validade dos dados deverá ser conduzida durante o processo de coleta para confirmar e fornecer evidências de que os requisitos de qualidade dos dados para a aplicação pretendida foram atendidos. A validação pode envolver o estabelecimento de balanços de massa, balanços de energia e/ou análises comparativas de fatores de emissão. Como cada processo elementar obedece às leis da conservação de massa e energia, balanços de massa e energia representam um recurso útil para a verificação da validade da descrição de um processo elementar.

### 2.1.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) provém as informações adicionais para ajudar na análise dos resultados fornecidos pelo ICV. Esta visa o entendimento e a investigação da magnitude e significância dos impactos potenciais de um sistema. Esse processo envolve associar dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando, dessa maneira, entender tais impactos. A fase de AICV também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009b, 2009a; ZAMPORI et al., 2016).

Em uma AICV é possível empregar dois tipos de abordagem: problema-orientado (*midpoint*) e dano-orientado (*endpoint*). Na abordagem de problema-orientado ou ponto médio (*midpoint*), os fluxos são classificados em temas ambientais de impactos potenciais. Na abordagem de dano-orientado ou ponto final (*endpoint*), classificam-se os fluxos ambientais em vários temas, ou seja, a modelagem de cada tema do dano causado ao ser humano, ao meio-ambiente e recursos (COSTA, 2012).

No Brasil, os métodos mais utilizados para a AICV são o CML 2002 (*midpoint*) e o Eco-indicador 99 (*endpoint*) (COSTA, 2012). O método ReCiPe é uma continuação dos métodos Eco-indicator 99 e CML 2002. Ele integra e harmoniza as abordagens de ponto médio (*midpoint*) e ponto final (*endpoint*) em uma estrutura consistente e, atualmente, suas categorias de impacto têm sido remodeladas e atualizadas (HUIJBREGTS et al., 2017; MENDES, 2013; MENDES; BUENO; OMETTO, 2015). O método ReCiPe possui dezoito categorias de impacto de ponto médio (*midpoint*) e três categorias de impacto de ponto final (*endpoint*), que são apresentadas no Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente.

Quadro 1 – Categorias de impacto de ponto médio (*midpoint*) ReCiPe 2016.

<b>Categorias de impacto <i>midpoint</i> ReCiPe 2016</b>	<b>Unidade</b>
Mudanças climáticas	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)
Depleção do ozônio estratosférico	ODP (kg CFC-11 eq)
Radiação ionizante	IRP (kBq Co-60 eq)
Formação de ozônio fotoquímico – saúde humana	HOFP (kg NO <sub>x</sub> eq)
Formação de material particulado	PMFP (kg PM <sub>2.5</sub> eq)
Formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres	EOFP (kg NO <sub>x</sub> eq)
Acidificação terrestre	TAP (kg SO <sub>2</sub> eq)
Eutrofização em água doce	FEP (kg P eq)
Eutrofização marinha	MEP (kg N eq)
Ecotoxicidade terrestre	TETP (kg 1,4-DCB)
Ecotoxicidade em água doce	FETP (kg 1,4-DCB)
Ecotoxicidade marinha	METP (kg 1,4-DCB)
Toxicidade humana – cancerígena	HTPc (kg 1,4-DCB)
Toxicidade humana – não cancerígena	HTPnc (kg 1,4-DCB)
Ocupação do solo	LOP (m <sup>2</sup> a crop eq)
Depleção de recursos minerais	SOP (kg Cu eq)
Depleção de combustíveis fósseis	FFP (kg oil eq)
Consumo de água	WCP (m <sup>3</sup> )

Fonte: O Autor, com base em Huijbregts et al. (2017) e Pré Consultants (2019).

Quadro 2 – Categorias de impacto de ponto final (*endpoint*) ReCiPe 2016.

<b>Categorias de impacto <i>endpoint</i> ReCiPe 2016</b>	<b>Unidade</b>
Danos à saúde humana	HH (DALY)
Danos à diversidade dos ecossistemas	ED (species.yr)
Danos à disponibilidade de recursos	RA (USD2013)

Fonte: O Autor, com base em Huijbregts et al. (2017) e Pré Consultants (2019).

No método ReCiPe 2016, a ponderação dos impactos pode ser realizada escolhendo-se três perspectivas culturais: hierárquica, igualitária e individualista. A perspectiva hierárquica é a mais comum entre a comunidade científica e os elaboradores de políticas públicas. Esta inclui fatos que são assegurados por documentos científicos ou de políticas com suficiente conhecimento e sua perspectiva de tempo é de médio prazo. A perspectiva igualitária baseia-se no princípio da precaução, isto é, todos os danos que tem possibilidade de ocorrer são incluídos, não se aceita que problemas futuros possam ser evitados. Isso representa imprecisões, pois dados às quais não se tem consenso são inseridos e sua perspectiva de tempo é de longo prazo. A perspectiva individualista inclui apenas as relações de causa-efeito comprovadas. Os limites podem ser negociados apenas se forem fornecidas provas científicas e sua perspectiva de tempo é de curto prazo (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003).

#### 2.1.1.4 Interpretação

A fase de interpretação tem como objetivo avaliar a integridade, sensibilidade e consistência dos dados, e apontar conclusões, limitações e recomendações (ZAMPORI et al., 2016). A interpretação é o procedimento onde há a identificação das questões significativas com base nos resultados das fases anteriores. Além disso, pode-se gerar as conclusões pertinentes, identificar as principais limitações encontradas e realizar as recomendações adequadas provenientes do estudo. Os resultados das fases de ICV ou AICV devem ser interpretados de acordo com o objetivo e escopo do estudo e a interpretação deverá incluir uma avaliação e uma verificação de sensibilidade em relação às entradas, saídas e escolhas metodológicas significativas, visando ao entendimento da incerteza dos resultados (ABNT, 2009b, 2009a; ZAMPORI et al., 2016).

### 2.1.2 Avaliação Social do Ciclo de Vida

A Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACVS) identifica, comunica e relata os potenciais impactos sociais e as condições sociais de um produto (HOSSAIN et al., 2018). Ela avalia o impacto de uma organização, produto ou sistema nessas diferentes partes interessadas (BORK; BARBA JUNIOR; GOMES, 2015). A ACVS verifica os possíveis impactos que podem afetar o comportamento das empresas e os impactos no capital social, ao longo do ciclo de vida; e, geralmente, é baseado em dados genéricos em um local específico (VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013). Ela enfatiza o bem-estar humano, a condição humana e os meios utilizados para aumentar a qualidade de vida da sociedade (ANDREWS et al., 2009; BORK; BARBA JUNIOR; GOMES, 2015). Este método ainda está em desenvolvimento devido à natureza complexa dos impactos sociais (HOSSAIN et al., 2018).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP – *United Nations Environment Programme*) e a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) criaram uma série de diretrizes para ACVS e fichas metodológicas para subcategorias de ACVS (*Guidelines for Social Life Cycle Assessment*). Os estudos contêm a definição básica de indicadores. Isso justifica a relevância da dimensão social para o desenvolvimento sustentável (ANDREWS et al., 2009).

### 2.1.2.1 Categorias de partes interessadas e subcategorias de impacto

Uma ACVS pode avaliar os impactos sociais e socioeconômicos de todos os estágios do ciclo de vida de um produto. Cada um desses estágios do ciclo de vida pode ser associado a diversas localizações geográficas, onde um ou mais desses processos são realizados. Cada uma dessas localizações geográficas, impactos sociais e socioeconômicos podem ser observados em categorias principais de partes interessadas. O Quadro 3 apresenta as categorias de partes interessadas e subcategorias de impacto consideradas pela UNEP/SETAC.

Quadro 3 – Categorias de partes interessadas e subcategorias de impacto.

<b>Categorias de Partes Interessadas</b>	<b>Subcategorias de impacto</b>
<b>Trabalhador</b>	Liberdade de associação e negociação coletiva Trabalho infantil Salário justo Horas de trabalho Trabalho forçado Igualdade de oportunidades/discriminação Saúde e segurança Benefícios sociais/segurança social
<b>Consumidor</b>	Saúde e segurança Mecanismo de feedback Privacidade do consumidor Transparência Responsabilidade pelo fim do ciclo de vida
<b>Atores da Cadeia de Valor</b>	Competição leal Promoção da responsabilidade social Relação com fornecedores Respeito dos direitos de propriedade intelectual
<b>Comunidade Local</b>	Acesso aos recursos materiais Acesso aos recursos imateriais Deslocamentos e migração Patrimônio cultural Condições de vida saudável Respeito aos direitos dos indígenas Engajamento com a comunidade Emprego local Condições de vida segura
<b>Sociedade</b>	Comprometimento público com questões sobre sustentabilidade Contribuição ao desenvolvimento econômico Prevenção e mitigação de conflitos armados Desenvolvimento tecnológico Corrupção

Fonte: O Autor, com base em Norris et al (2013).

As categorias de partes interessadas são grupos que devem ter interesses compartilhados devido ao relacionamento semelhante com os sistemas de produtos investigados. Estas fornecem uma base abrangente para a articulação das subcategorias. As categorias de partes

interessadas propostas são consideradas as principais categorias de grupo potencialmente impactadas pelo ciclo de vida de um produto. As subcategorias sociais e socioeconômicas foram definidas baseadas em acordos internacionais (ANDREWS et al., 2009).

#### 2.1.2.2 Potencial Salário Justo

O “salário justo” está relacionado ao valor de contraprestação proporcional de um determinado serviço ou classe de serviços prestados. Os estudos que tratam de salários e benefícios concentraram-se em padrões: o “salário mínimo legal”; o “salário predominante na indústria local”; o “salário de não pobreza”; o “salário digno” e, enfim, o “salário justo” (NEUGEBAUER et al., 2017; NORRIS et al., 2013).

O “salário mínimo legal” trata-se do salário mínimo exigido por lei. Em muitos casos este é considerado inadequado, pois o mesmo pode ser mantido baixo para atrair investimentos e há a possibilidade de os trabalhadores executarem horas extras excessivas para atenderem suas necessidades básicas (NORRIS et al., 2013).

O “salário predominante na indústria local” pode ser superior ao mínimo exigido ou atender aos requisitos legais, entretanto, isso não fornece garantias de que o mesmo seja suficiente para atender às necessidades básicas de um trabalhador (NORRIS et al., 2013).

O “salário de não pobreza” deve garantir um nível básico de segurança econômica acima da linha de pobreza, incluindo nutrição de baixo custo e necessidades mínimas não alimentares (NEUGEBAUER et al., 2017).

O “salário digno” inclui aspectos da dignidade humana, além de cobrir não apenas as necessidades do trabalhador, mas também as necessidades básicas de sua família, tais como: necessidades de alimentos nutritivos, água, abrigo, roupas, educação, saúde e transporte, além de proporcionar uma renda discricionária (NEUGEBAUER et al., 2017; NORRIS et al., 2013).

O “salário justo” pode ser entendido como o salário essencial para satisfazer as necessidades básicas de um trabalhador e de sua família para garantir condições de vida estáveis. Entretanto, além dos valores monetários, o “salário justo” deve considerar o tempo destinado ao trabalho e a igualdade de remuneração. O tempo de trabalho ou as horas extras trabalhadas têm relevância no contexto do “salário justo”, pois geralmente os trabalhadores nos países em desenvolvimento trabalham mais horas sem serem suficientemente compensados pelo trabalho adicional (NEUGEBAUER et al., 2017).

Neugebauer et al. (2017) propuseram o Potencial Salário Justo (PSJ) como uma categoria de impacto social de ponto médio. Eles desenvolveram um modelo de caracterização

para converter dados de inventário sobre a remuneração dos trabalhadores ao longo do ciclo de vida de um produto em resultados de indicadores de categoria. O potencial salário justo considera o salário real pago em cada processo do ciclo de vida em comparação com um salário mínimo, relaciona salário com o tempo de trabalho e inclui um fator de desigualdade para explicar as desigualdades de renda. Para a determinação do PSJ, as equações (2.1) e (2.2) expressam as consequências relacionadas aos pontos médios dos salários e apresentam um resultado numérico de indicador de categoria com caracterização regionalizada por meio de “equivalentes do salário justo”.

O Fator de Caracterização de Salário Justo ( $FC_{SJ}$ ) apresentado pela Eq. (2.1) é multiplicado pelos salários reais médios pagos aos trabalhadores empregados no processo  $n$  ao longo de um ano ( $SR_n$ ) e divididos pelo tempo real de trabalho executado pelos trabalhadores empregados no processo  $n$  ( $TRT_n$ ). A Eq. (2.2) apresenta o cálculo do fator de caracterização de salário justo para o processo  $n$  no local/região/setor definido.

$$PSJ_n = \frac{SR_n}{TRT_n} \times (FC_{SJ,n}) \quad (2.1)$$

$$FC_{SJ,n} = \frac{1}{SMV_n} \times TTC_n \times (1 - FD_n^2) \quad (2.2)$$

- $PSJ_n$ : Potencial Salário Justo [expresso em  $FW_{eq}$ ] para o processo  $n$  no ciclo de vida de um produto em local/região/setor definido;
- $SR_n$ : Salário Real (médio) [R\$/mês] pago aos trabalhadores empregados no processo  $n$  ao longo de um ano;
- $TRT_n$ : Tempo Real de Trabalho [horas/semana] dos trabalhadores empregados no processo  $n$  (incluindo férias e horas extras não remuneradas);
- $FC_{SJ,n}$ : Fator de Caracterização de Salário Justo [mês/R\$] para o processo  $n$  no local/região/setor definido;
- $SMV_n$ : Salário Mínimo de Vida [R\$/mês] que deve ser pago ao trabalhador para permitir um padrão de vida adequado para um indivíduo e/ou família no respectivo local/região/setor, onde o processo  $n$  é executado;
- $TTC_n$ : Tempo de Trabalho Contratado no local/região/setor [horas/semana] para que o processo  $n$  seja executado;
- $FD_n$ : (ao quadrado) Fator de Desigualdade [expresso em porcentagem] onde o processo  $n$  é executado.

Substituindo a Eq. (2.2) na Eq. (2.1), chega-se à equação final para a determinação do PSJ dado pela Eq. (2.3).

$$PSJ_n = \frac{SR_n}{SMV_n} \times \frac{TTC_n}{TRT_n} \times (1 - FD^2) \quad (2.3)$$

Analisando-se a Eq. (2.3), é possível verificar que:

- Se  $SR_n < SMV_n$ , conseqüentemente,  $\frac{SR_n}{SMV_n} < 1$ . Quanto menor o valor de  $\frac{SR_n}{SMV_n}$ , mais distante da situação alvo mínima está o valor pago aos trabalhadores empregados no processo  $n$  no local/região/setor definido;
- Se  $TRT_n > TTC_n$ , conseqüentemente,  $\frac{TTC_n}{TRT_n} < 1$ . Isso representa excesso de horas trabalhadas em relação ao tempo pela qual o trabalhador é contratado no local/região/setor para que o processo  $n$  seja executado. Quanto menor o valor de  $\frac{TTC_n}{TRT_n}$ , mais excesso de trabalho é evidenciado.

Ambas as situações reduzem o valor de  $PSJ_n$ , e este será cada vez menor à medida que os valores de salários pagos sejam menores e as horas de trabalho em excesso sejam maiores.

A variável  $FD_n$  expressa que um salário real pago maior ou menor que as leis e convenções sociais pode ser considerado injusto.  $FD_n^2$  representa uma medida de desigualdade proporcional que tem o objetivo de ponderar os níveis de desenvolvimento regional a fim de evitar distorções no resultado final.

As desigualdades de renda só podem ser consideradas se o salário real pago ao trabalhador for igual ou inferior ao salário médio para compensar a falta de pagamento. Com isso, evita-se a punição de empresas que pagam melhor que seus concorrentes, o que, especialmente nos países em desenvolvimento, pode desempenhar um papel notável na conquista de um salário justo e no estabelecimento de incentivos para melhorar os salários prevalecentes no setor.

Para esse modelo, utiliza-se o Índice de Gini como medida de desenvolvimento regional. O Índice de Gini é um instrumento para medir o grau de concentração de renda em determinado grupo. Ele aponta a diferença entre os rendimentos dos mais pobres e dos mais ricos. Numericamente, varia de zero a um, onde valor zero representa a situação de igualdade e expressa maior desigualdade quanto mais próximo de um.

Considera-se então, o valor de  $PSJ_n$  igual a um como valor de referência para a determinação do salário justo. Assim, o salário é justo para valores de  $PSJ_n$  superiores a um, e o salário é injusto para valores de  $PSJ_n$  inferiores a um (NEUGEBAUER et al., 2017).

### 2.1.3 Custo do Ciclo de Vida

O Custo do Ciclo de Vida (CCV) avalia e resume o custo total do projeto. Leva em consideração todos os custos de aquisição, posse e descarte de um produto (CABEZA et al., 2014; KLOEPFFER, 2008), para fornecer uma decisão no campo financeiro (VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013). O objetivo de um CCV é estimar os custos gerais das alternativas do projeto e selecionar o design que garante que a instalação ofereça o menor custo geral consistente com sua qualidade e função (KMEŤKOVÁ; KRAJČÍK, 2015).

O CCV foi definido pela primeira vez em 1977 em sua forma básica (GARDNER et al., 2007). O método identifica a melhor escolha e determina qual fase da construção apresenta o custo mais alto (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018). Essa técnica promove uma visão de longo alcance sobre a vida de um sistema (WÜBBENHORST, 1986). As decisões tomadas no início do processo de design podem ter uma influência considerável nos custos (CLIFT, 2003). O CCV é útil na avaliação do valor de um investimento em ativos duradouros (GARDNER et al., 2007; SMITH; WHITELEGG; WILLIAMS, 1997).

O que diferencia a aplicação do CCV com relação a outros estudos de performance é que neste são levados em conta, além dos custos de investimentos, os demais custos existentes durante as fases do ciclo de vida. O somatório de todos os custos permite selecionar a alternativa financeiramente mais vantajosa (SANTOS, 2007; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

O CCV compreende as etapas: (i) definição do objeto de estudo; (ii) estimativa do ciclo de vida dos elementos de estudo; (iii) elaboração do inventário do ciclo de vida de cada um dos componentes; e, (iv) atualização financeira e composição dos custos totais.

#### 2.1.3.1 Definição do objeto de estudo

O primeiro estágio do CCV é definir qual sistema ou parte da instalação deve ser analisada e quais opções de material devem ser consideradas (MARTERN, 2001). O CCV tem o objetivo de possibilitar a comparação entre duas ou mais opções viáveis, permitindo aos tomadores de decisões realizar o investimento na alternativa mais viável a longo prazo. Para isso, o objeto de estudo deve estar clara juntamente aos limites do sistema (SANTOS, 2007; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

### 2.1.3.2 Estimativa do ciclo de vida

Esta etapa consiste em estimar a duração do ciclo de vida, ou seja, a vida econômica do objeto de estudo e do sistema onde o mesmo está inserido (MARTERN, 2001). Os valores escolhidos devem representar uma visão realista da vida comercial do objeto de estudo e seu sistema, bem como levar em consideração as características dos materiais, usos e possíveis avanços tecnológicos (SANTOS, 2007; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

### 2.1.3.3 Elaboração do inventário do ciclo de vida

Esta etapa consiste no levantamento detalhado das propriedades e custos incorridos para cada um dos materiais e componentes envolvidos no ciclo de vida do objeto de estudo (SANTOS, 2007; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

### 2.1.3.4 Atualização financeira e composição dos custos totais

Como os custos incorridos ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo podem ser distribuídos ao longo de décadas, assim, é necessário considerar o valor do dinheiro longo do tempo. Essas análises devem comparar cenários homogêneos, sendo necessário trazer todos os gastos ao Valor Presente (VP). Isso é realizado por meio da utilização a taxa nominal de juros, assumindo que o montante não gasto num determinado momento poderia ser aplicado no mercado financeiro.

A relação entre todos os custos incorridos, pode ser expressa matematicamente por meio da Eq. (2.4).

$$CCV = CA + CI + \sum \frac{CO}{(1+r)^n} + \sum \frac{(CR - VR)}{(1+r)^n} + \sum \frac{CP}{(1+r)^n} \quad (2.4)$$

<i>CCV</i>	Custo do Ciclo de Vida;
<i>CA</i>	Custo de Aquisição para o material ou produto;
<i>CI</i>	Custo de Instalação;
<i>n</i>	Duração do ciclo de vida (em anos);
<i>r</i>	Taxa real de juros para o período de tempo <i>n</i> considerado;
<i>CO</i>	Custo Operacional do objeto de estudo no ano <i>n</i> (somatório dos custos de operação, inspeção e manutenção);
<i>CR</i>	Custo de Reposição do objeto de estudo durante o ciclo de vida do sistema;
<i>VR</i>	Valor Residual do objeto de estudo;

*CP*

Custo da Produção perdida no ano  $n$ .

Os Custos de Aquisição (CA) são os custos dos materiais ou produtos comprados colocados no local de utilização.

Os Custos de Instalação (CI) são os custos reais ou, na ausência destes, os custos baseados na experiência em tarefas semelhantes. Se os materiais ou produtos em comparação admitem métodos diferentes de instalação, a custos diversos, estas características deverão ser consideradas.

Os Custos de Operação (CO) são a soma dos custos calculados para as inspeções, manutenções planejadas ou corretivas e outros custos variáveis devido ao material ou produto em análise.

Os Custos de Reposição (CR) são aqueles que aparecem quando o reparo de peças se torna proibitivo e é necessária a substituição total. Estes custos incluem remoção, transporte e instalação de novos materiais ou produtos. Quando o material dura todo o ciclo de vida do sistema, CR é igual a zero e permanece a receita líquida obtida pela venda do material (ou valor residual).

O Valor Residual (VR) é o valor da sucata do material ou produto utilizado, após a finalização do seu ciclo de vida.

O Custo de Produção (CP) está relacionado ao que se deixou de ganhar devido às horas paradas para manutenção, reposição ou limpeza. Bem como os possíveis danos técnicos, pessoais, profissionais ou ao público usuário.

A taxa de juros ( $r$ ) é calculada a partir do custo de capital ( $c$ ) e da inflação ( $i$ ) esperados para o período considerado ( $n$ ), como pode ser visto na Eq. (2.5).

$$r = \frac{c - i}{1 + i} \quad (2.5)$$

A duração do ciclo de vida ( $n$ ) expressa a vida econômica ativa esperada ou desejada para o sistema ou unidade de avaliação. Diferentes valores de  $n$  poderão influir na indicação do material ou produto mais adequado (MARTERN, 2001; SANTOS, 2007; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

#### **2.1.4 O Pensamento do Ciclo de Vida aplicado à construção**

Com o atual impulso em direção à construção sustentável, o PCV ganhou importância (CABEZA et al., 2014; RUSSELL-SMITH; LEPECH, 2015). Verifica-se que o número de publicações na área é crescente. Esta subseção apresenta um panorama das publicações que

consideram as dimensões da sustentabilidade em projetos de construção por meio das abordagens de PCV. Foram apurados 91 artigos científicos publicados em periódicos de indexados em quatro bases de dados frequentemente empregadas na engenharia: *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. O Quadro 4 contém as palavras-chave e a *string* de busca empregadas na revisão de literatura.

Quadro 4 – Palavras-chave e *string* de busca.

“Life cycle assessment” OR “Social life cycle assessment” OR “Cost life cycle assessment” OR “Life cycle sustainability assessment”	AND	“Civil construction” OR “Building construction” OR “Construction projects” OR “Building projects” OR “Construction sector” OR “Building sector”
--	-----	---

Fonte: O Autor.

As publicações selecionadas datam de 1986 a 2018. Os critérios de inclusão significam que o estudo avaliado possui características que atendem às questões da pesquisa. Da mesma forma, atender aos critérios de exclusão significa que o artigo avaliado não possui informações relevantes para esta pesquisa. O Quadro 5 apresenta os critérios de inclusão e exclusão utilizados na revisão de literatura.

Quadro 5 – Critérios de inclusão e exclusão.

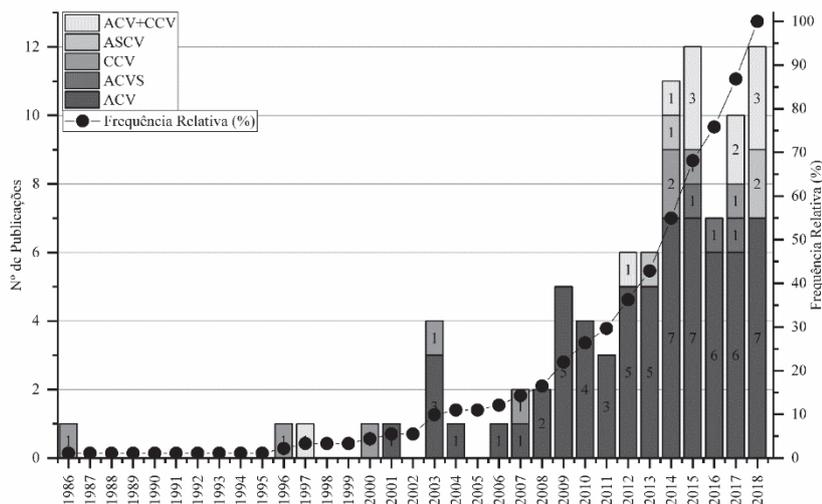
<b>Critérios de Inclusão (CI)</b>	CI-01	O artigo apresenta a ACV aplicada ao setor da construção.
	CI-02	O artigo apresenta a ACVS aplicada ao setor da construção.
	CI-03	O artigo apresenta o CCV aplicado ao setor da construção.
	CI-04	O artigo apresenta a ASCV aplicada ao setor da construção.
<b>Critérios de Exclusão (CE)</b>	CE-01	O artigo não apresenta ACV, ACVS, CCV ou ASCV aplicados ao setor da construção.
	CE-02	O artigo não está em língua inglesa.

Fonte: O Autor.

Após realizar a pesquisa dos artigos científicos nas bases de dados mencionadas, o número total de publicações selecionadas foi de 8603 artigos. O processo de exclusão começou com a eliminação dos artigos duplicados e a análise de títulos e palavras-chave; essa etapa excluiu 8506 artigos. Nas demais publicações, a triagem manual incluiu 13 artigos. A análise em texto completo avaliou 310 artigos e excluiu 219 artigos. O processo de seleção gerou a amostra de 91 artigos.

Identificou-se que há artigos que consideram uma dimensão da sustentabilidade à construção por meio do PCV (ACV, ACVS ou CCV); há artigos que tratam duas dimensões da sustentabilidade (ACV+CCV) aplicadas à construção; e, há também artigos que aplicam as três dimensões da sustentabilidade à construção (ASCV). A Figura 2 mostra a evolução das publicações de acordo com a abordagem do PCV empregada no artigo.

Figura 2 – Evolução temporal das publicações que aplicam o PCV à construção.



Fonte: O Autor.

A pesquisa indica que até o ano 2000, a maioria dos artigos estudava a dimensão econômica das construções por meio do CCV. Isso mostra que, no passado, as forças da economia e do mercado governavam o desenvolvimento. A indústria da construção é uma potencial usuária do CCV (VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013), porque pode estimar custos relevantes ao longo da vida útil dos edifícios (HUANG et al., 2018). O uso mais comum do CCV é na seleção de diferentes produtos e na alteração do design, a fim de comparar e otimizar produtos (VIEIRA NETO; FARIAS FILHO, 2013). A maioria das pesquisas é dedicada a projetos de recursos hídricos e transporte, incluindo estradas, pontes e pavimentos (ARDITI; MESSIHA, 1996).

A análise do CCV na construção não atingiu a maturidade porque os cálculos dependem de inúmeras suposições (CLIFT, 2003). O preço da mão de obra, combustíveis, materiais e componentes podem diferir significativamente de ano para ano e dependem da localização, mercado e qualidade; e, ainda existem efeitos indiretos causados pelo clima, pela qualidade dos materiais e pelos métodos de construção que afetam essa metodologia (ARDITI; MESSIHA, 1996; HUANG et al., 2018). Muitos parâmetros são incertos e precisam ser estimados no

cálculo, como a duração do ciclo de vida real, custos de produção, custos de operação, custos de modernização, custos de descarte e custos de manutenção (STERNER, 2000). Como o valor do dinheiro, hoje e no futuro, não é igual, as variáveis relacionadas ao valor do dinheiro no tempo (inflação e taxa de juros) também são críticas (HUANG et al., 2018).

A introdução da ACV na construção é relativamente recente (ABD RASHID; IDRIS; YUSOFF, 2017) e desde o ano de 2003, a maioria das aplicações envolveu a dimensão ambiental através da aplicação dessa metodologia. A ACV pode revelar informações valiosas referentes a materiais, água e energia que serão consumidas durante toda a vida útil prevista de um edifício (OLINZOCK et al., 2015). É utilizada nas indústrias de arquitetura e construção para avaliar a sustentabilidade (DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017) e implementar a análise do desempenho ambiental de edifícios e projetos de construção (DONG; NG, 2014).

O pico de publicações verificado em 2003 pode estar relacionado à “Agenda 21 para a construção sustentável em países em desenvolvimento: um documento de discussão” publicado pelo Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação em Construção Civil (CIB – *The International Council for Research and Innovation in Building and Construction*) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – Centro Internacional de Tecnologia Ambiental (UNEP – *United Nations Environment Programme*; IETC – *International Environmental Technology Centre*) em 2002. O objetivo deste documento era entender melhor os desafios da construção sustentável nos países em desenvolvimento e formular uma estratégia de pesquisa que assegurasse a contribuição do setor da construção para o desenvolvimento desses países (PLESSIS, 2002).

Desde 2006, o crescimento do número de estudos pode estar relacionado à atualização das normas ISO 14040: 2006 e ISO 14044: 2006. As padronizações cobrem os relatórios e a revisão crítica da ACV, as limitações da ACV, o relacionamento entre as fases da ACV e as condições para o uso de opções de valor e elementos opcionais (ISO, 2006a, 2006b). A ACV fornece informações sobre o impacto ambiental global e a demanda de energia durante toda a vida útil (ABD RASHID; IDRIS; YUSOFF, 2017; ASDRUBALI; BALDASSARRI; FTHENAKIS, 2013; OLINZOCK et al., 2015). Ela mede o impacto ambiental associado envolvido em todos os processos, do berço ao túmulo (ABD RASHID; YUSOFF, 2015; KOFOWOROLA; GHEEWALA, 2008), permitindo um vínculo entre a avaliação de materiais, processos e edifícios (OYARZO; PEUPORTIER, 2014). A poderosa e abrangente abordagem científica da ACV (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; SINGH et al., 2011) fornece melhor suporte à decisão (MALMQVIST et al., 2011) a engenheiros, desenvolvedores, arquitetos e planejadores urbanos, para fazer julgamentos mais sensatos para alcançar a meta

de uma sociedade ambientalmente sustentável (ABD RASHID; YUSOFF, 2015; ERLANDSSON; BORG, 2003; ZABALZA BRIBIÁN; ARANDA USÓN; SCARPELLINI, 2009).

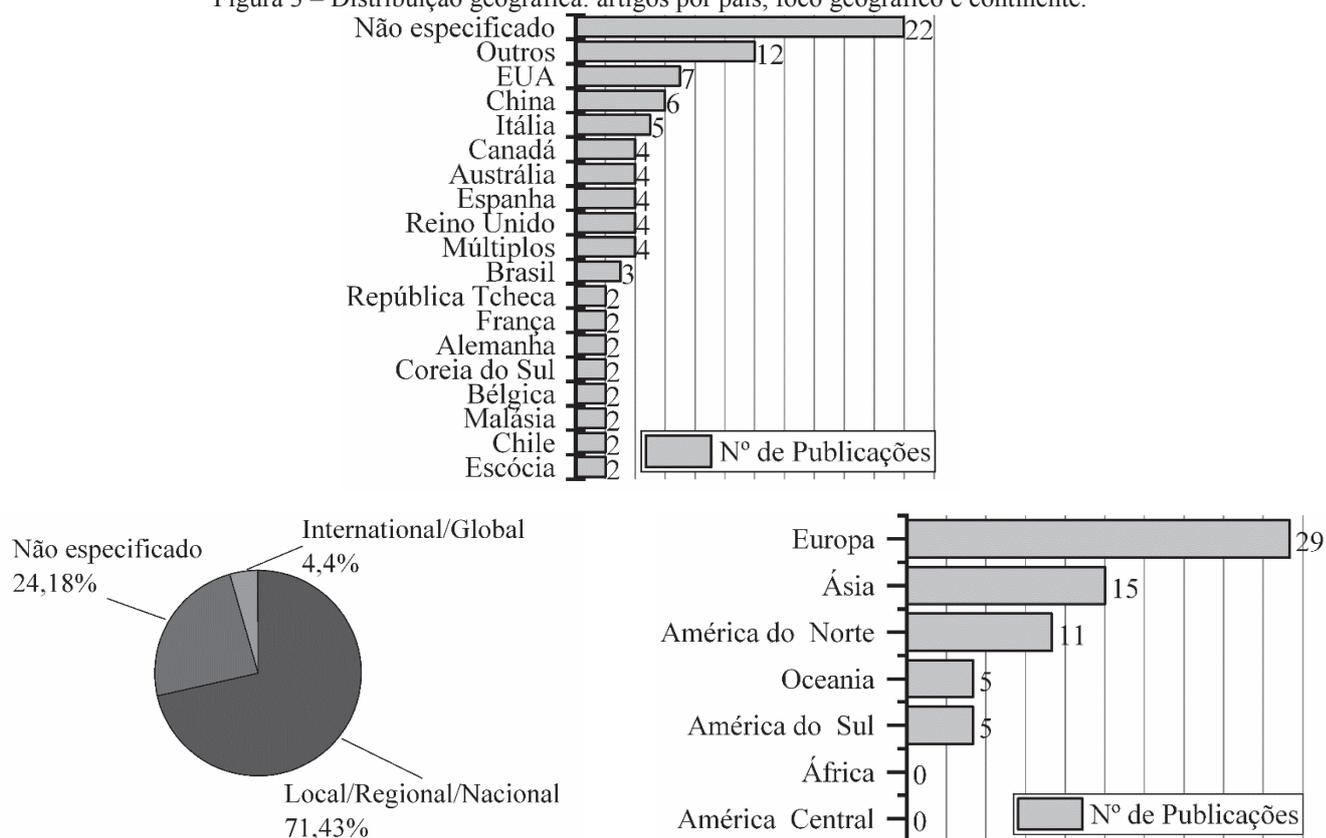
A partir de 2015, a dimensão social e os estudos conjuntos das dimensões ambiental e econômica aumentaram. Além disso, em 2018, a busca pelo estudo envolvendo as três dimensões da sustentabilidade também aumentou.

Poucos estudos realizaram a avaliação social em projetos de construção (HOSSEINIJOU; MANSOUR; SHIRAZI, 2014). Identificou-se que a sustentabilidade social é menos estudada que as outras dimensões (MCKENZIE, 2004). Muitos fatores dificultam a quantificação e avaliação dos impactos sociais (BORK; BARBA JUNIOR; GOMES, 2015; HOSSAIN et al., 2018; KLOEPFFER, 2008). Os resultados são difíceis de serem entendidos pelos tomadores de decisão (HOSSAIN et al., 2018). Em contraste com os aspectos ambientais e econômicos, uma avaliação social ainda carece de um consenso completo relacionado a indicadores adequados ou a uma abordagem padronizada (BORK; BARBA JUNIOR; GOMES, 2015).

Na combinação de duas dimensões de sustentabilidade, bem como na avaliação por meio da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV), também existem poucos estudos desenvolvidos. Em uma combinação das dimensões de sustentabilidade, não existe um método ou procedimento padronizado; entre muitos indicadores, é difícil relacionar os limites do sistema e uma unidade funcional e existe uma limitação para obter dados regionalizados específicos. Na ASCV, a avaliação deve incluir aspectos ambientais, sociais e econômicos, de produtos e serviços. Contudo, na prática, os resultados da ASCV podem não ser abrangentes, porque foram apresentados como três resultados separados, apresentados lado a lado, sem integração. As aplicações carecem de uma etapa final de integração para as diferentes perspectivas de sustentabilidade; essa omissão exige que os usuários façam uma consideração integrada do impacto geral da sustentabilidade, sem nenhum suporte metodológico. Nos casos em que a integração das perspectivas de sustentabilidade ocorre, elas são feitas graficamente, por exemplo, no Triângulo de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCST – *Life Cycle Sustainability Triangle*) e no Painel de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSD – *Life Cycle Sustainability Dashboard*). A intenção de implementar um cenário muito sustentável de acordo com as recomendações da avaliação de sustentabilidade pode levar a um resultado diferente devido a barreiras e limitações, como falta de apoio político ou disponibilidade insuficiente de recursos (EKENER et al., 2018; KELLER; RETTENMAIER; REINHARDT, 2015).

Geograficamente, é possível notar que grande parte das publicações pertence a países desenvolvidos. Entre os 28 países detectados, 20 países integram a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD – *Organization for Economic Cooperation and Development*) e 2 países trabalham em estreita colaboração com a OECD. Os países membros da OECD em todo o mundo identificam problemas, discutem, analisam e promovem políticas que visam melhorar o bem-estar econômico e social das pessoas em todo o mundo (OECD, 2011). Nos continentes que apresentaram estudos, há maior ênfase na dimensão ambiental. Em termos de completude das dimensões da sustentabilidade, a América do Norte e a Ásia se destacam por apresentarem artigos que contemplam as três dimensões. Apesar da distribuição no planeta, ainda existem grandes áreas carentes de estudos como os países pertencentes à África e à América Central. A Figura 3 apresenta a distribuição geográfica dos estudos.

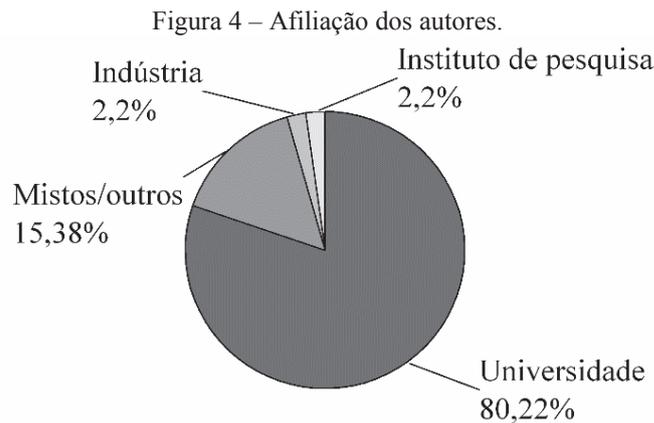
Figura 3 – Distribuição geográfica: artigos por país, foco geográfico e continente.



Fonte: O Autor, com base nos dados obtidos nas bases de dados.

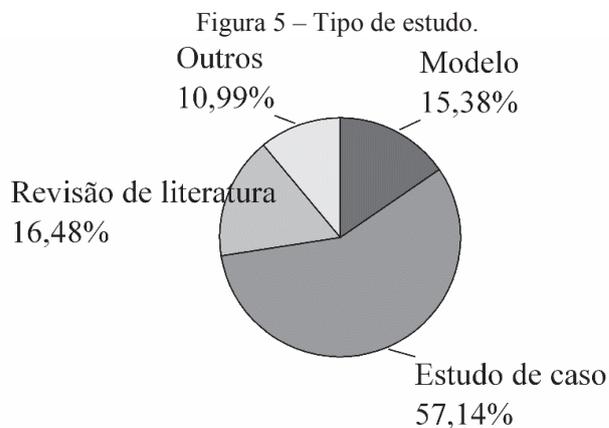
Em relação à afiliação dos autores, as universidades têm sido grandes promotoras dos estudos das dimensões da sustentabilidade através de abordagens PCV; elas apresentam o maior número de pessoas que realizam estudos nessa área. Embora as aplicações envolvam indústria

e profissionais como engenheiros e arquitetos, o conhecimento ainda está associado aos centros acadêmicos. Isso pode indicar que indústrias, conselhos, consultores, governos e outras iniciativas devem associar-se aos pesquisadores acadêmicos para expandirem as aplicações das abordagens de PCV relacionadas ao setor da construção. A distribuição dos estudos por afiliação dos autores pode ser vista na Figura 4.



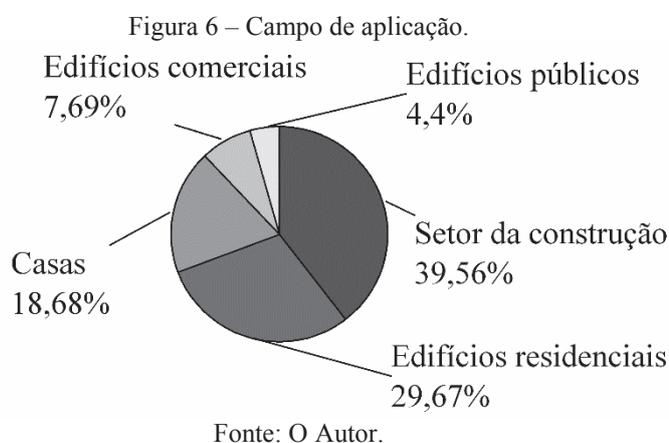
Fonte: O Autor.

Considerando o tipo de estudo (Figura 5), a grande quantidade de estudos de caso confirma que a maioria dos artigos apresenta foco local, regional ou nacional (como mostrado na Figura 3). Um grande número de estudos de revisão de literatura indica a necessidade dos pesquisadores de compreender o tema e quantificar as práticas utilizadas em todo o mundo. O número de modelos desenvolvidos pode ser justificado pela necessidade de padronização dos métodos. Além disso, abordagens como pesquisas e estudos teóricos mostram que existem muitos pesquisadores estudando e discutindo o tópico.



Fonte: O Autor.

Como indicado pela Figura 6, o número de aplicações que envolvem edifícios residenciais e casas mostra que há preocupação com a construção residencial; esse fato pode estar relacionado a um grande número de habitações existentes e à função que elas desempenham na sociedade. Os estudos enquadrados como setor de construção (materiais de construção, processos construtivos, gerenciamento de obras, construções temporárias) podem ilustrar que existem muitas questões não resolvidas dentro da construção que precisam de uma solução. O pequeno número de aplicações em edificações comerciais e prédios públicos, pode apontar que os setores público e privado ainda precisam de incentivos para desenvolver estudos que envolvam PCV aplicados a edificações.



## 2.2 PROCESSOS DE TOMADA DE DECISÃO

### 2.2.1 Análise de decisão multicritério

Frequentemente, o homem se depara com problemas cuja resolução implica uma tomada de decisão complexa. De modo geral, tais problemas possuem características como:

- Os critérios de resolução do problema são em número de, pelo menos, dois e conflitam entre si;
- Tanto os critérios como as alternativas de solução não são claramente definidos e as consequências da escolha de dada alternativa com relação a pelo menos um critério não são claramente compreendidas;

- Os critérios e as alternativas podem estar interligados, de tal maneira que um critério parece refletir parcialmente em outro critério. Ao passo que a eficácia da escolha de uma alternativa depende de outra alternativa ter sido ou não escolhida, no caso em que as alternativas não são mutuamente exclusivas;
- A solução do problema depende de um conjunto de pessoas, cada qual com seu próprio ponto de vista, muitas vezes conflitante com os demais;
- As restrições do problema não são bem definidas, podendo haver dúvida a respeito do que é critério e do que é restrição;
- Alguns dos critérios são quantificáveis, ao passo que outros só o são por meio de julgamentos de valor efetuados sobre uma escala;
- A escala para dado critério pode ser cardinal, verbal ou ordinal, dependendo dos dados disponíveis e da própria natureza dos critérios.

Até a primeira metade do século XX, utilizava-se o valor esperado pela matemática para a tomada de decisão em condições consideradas aleatórias. Verificava-se, no entanto, que em certas condições, as limitações e o conseqüente risco associado a tal tratamento eram inaceitáveis. Na década de 1960, surgiram métodos probabilísticos voltados para a tomada de decisão, que foram aplicados em diversos trabalhos técnicos. Alguns desses métodos foram suplantados por metodologias cuja matemática é menos complexa, cuja transparência é maior e são corretos do ponto de vista científico, pois são fundamentados em axiomas rigorosos. O crescente número de organizações devotadas ao estudo e à análise de decisões fez com que instituições de várias áreas formassem grupos para “Apoio à Tomada de Decisão”. Na década de 1970, surgiram os primeiros métodos voltados para os problemas discretos de decisão, estes tratam de um número finito de alternativas (ALMEIDA, 2013; GOMES; GOMES, 2019; YU, 2011).

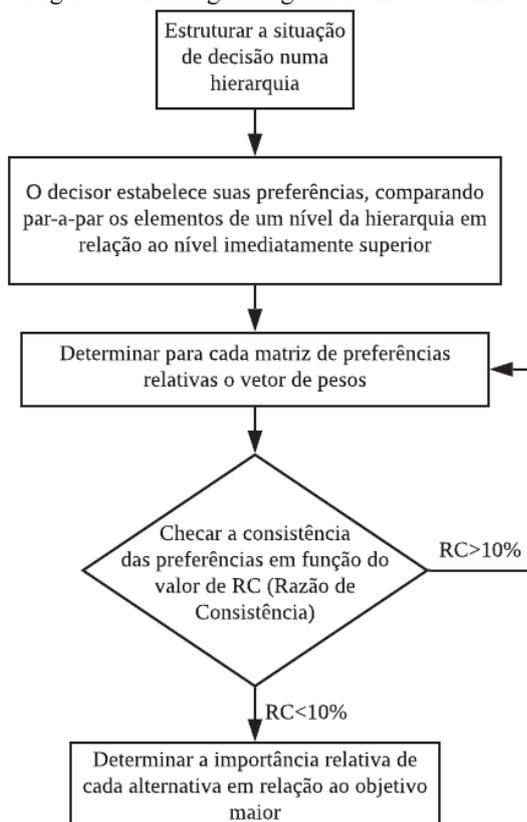
Entre os métodos multicritério discretos destacam-se a Teoria da Utilidade Multiatributo, o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) e os métodos de Eliminação e Escolha como Expressão da Realidade (Electre – *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) (GOMES; GOMES, 2019). O método de tomada de decisão AHP é apresentado de sucintamente na subseção 2.2.2 (para mais detalhes consultar Saaty (1988, 1990, 2008)).

### **2.2.2 Processo Analítico Hierárquico**

O método do Processo Analítico Hierárquico (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) foi desenvolvido pelo professor Thomas L. Saaty na década de 1970 e, desde então, recebeu ampla aplicação em diversas áreas. O método ganhou popularidade devido à sua simplicidade e à facilidade com que se pode obter soluções adequadas para problemas hierárquicos sérios, consistindo nos principais critérios e subcritérios. Na vida real, a incerteza dos processos, bem como a imprecisão das avaliações humanas, são comuns e naturais (PLEBANKIEWICZ; KUBEK, 2016).

O AHP fornece uma abordagem conveniente para analisar problemas de decisão. É um método para avaliar funções subjetivas e objetivas na tomada de decisão multicritério e ajudar os usuários a alcançar uma solução adequada. Outra característica importante do AHP é obter consenso no processo de tomada de decisão em grupo (WARIS et al., 2019). As principais razões para o amplo uso do AHP são sua capacidade de avaliar medidas subjetivas e objetivas, simplicidade, flexibilidade, decomposição de um problema complexo em várias hierarquias de critérios e capacidade de verificar as inconsistências nos julgamentos de um tomador de decisão (INTI; TANDON, 2017). O AHP utiliza um processo matemático sofisticado utilizando como ponto de partida a comparação entre duas alternativas para cada um dos critérios de decisão (GIUNTA, 2004; YU, 2011). A Figura 7 apresenta o fluxograma geral do método AHP.

Figura 7 – Fluxograma geral do método AHP.

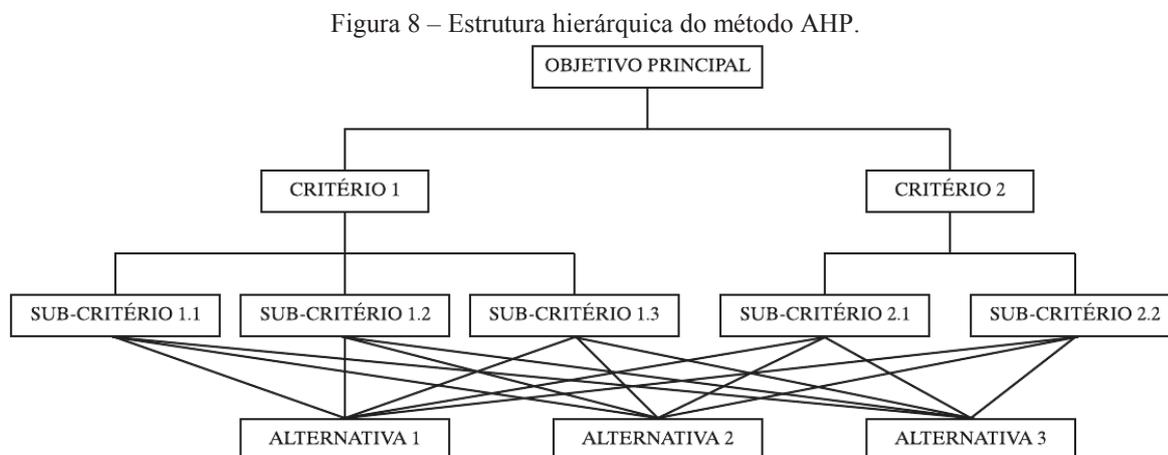


Fonte: O Autor, com base em Schmidt (1995).

A construção da hierarquia identifica e organiza objetivos, critérios, restrições e alternativas de decisão. A definição de uma hierarquia na forma de uma árvore consiste na decomposição sistemática dos critérios em níveis mais detalhados até que o critério seja suficientemente específico (VIEIRA, 2006). Existem cinco fatores relevantes para a definição dos critérios:

- Completitude: se a árvore está completa, ou seja, se todos os critérios relevantes ao decisor encontram-se nela;
- Operacionalidade: os critérios do nível mais inferior são suficientemente específicos para avaliar e comparar as alternativas;
- Decomponibilidade: o desempenho das alternativas em relação aos critérios tem que ser possível e independente do desempenho em outros critérios;
- Ausência de redundância: não deve haver dois critérios que representem a mesma grandeza;
- Tamanho adequado: os critérios não devem ser divididos além do nível em que podem ser avaliados, para que a árvore não se torne muito grande (GOMES; GOMES, 2019; VIEIRA, 2006).

O início da hierarquia deve representar o objetivo global ou um critério de síntese, enquanto os níveis inferiores são os critérios que impactam o do nível superior. No último nível estão os critérios que avaliarão as alternativas. A Figura 8 apresenta a estrutura hierárquica do método AHP.



Fonte: O Autor, com base em Saaty (1988, 1990, 2008).

Na definição de prioridades, se houver uma função analítica (ou de valor) para o critério, basta calcular o valor dessa função para cada alternativa. Se não houver, pode-se utilizar a valoração direta das alternativas, que consiste em ordenar as alternativas segundo a preferência do decisor e então estabelecer uma escala de valor (SAATY, 1988, 1990, 2008). Saaty propôs a Escala Fundamental apresentada no Quadro 6. Essa escala não consiste em simplesmente atribuir números, os valores indicam a “força” da preferência por um sobre o outro (SAATY, 1988, 1990, 2008).

Quadro 6 – Escala Fundamental.

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre outra	A experiência e o juízo favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o juízo favorecem moderadamente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
9	Importância absoluta	A experiência e o juízo favorecem absolutamente uma atividade em relação a outra.
2,4,6,8	Valores intermediários	Julgamento mais preciso da importância relativa das atividades.

Fonte: O Autor, com base em Saaty (1988, 1990, 2008).

As preferências são organizadas na forma de uma matriz quadrada  $A$ .

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Cada elemento  $a_{ij}$  do vetor linha da matriz  $A$  representa a dominância da alternativa  $A_i$  sobre a alternativa  $A_j$ . A diagonal principal é preenchida com um valor estipulado para representar a não-dominância de uma alternativa sobre a outra, na Escala Fundamental esse valor é igual a um. O decisor realiza  $n(n-1)/2$  comparações, sendo  $n$  o número de alternativas do critério analisado. Na matriz quadrada, tem-se  $a_{ij}$ , para  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Essas matrizes são recíprocas positivas ( $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ) (SAATY, 1988, 1990, 2008).

Os resultados parciais de conjunto  $A$  de alternativas dentro de cada critério podem ser obtidos a partir da matriz  $A$ . São chamados valores de impacto:

$$\bar{v}_i(A_j), \quad j = 1, \dots, n$$

O valor de impacto da alternativa  $j$  em relação à alternativa  $i$  é a representação numérica das atribuições verbais dadas pelo decisor a cada comparação de alternativas. Tais resultados são normalizados pela Eq. (2.6).

$$\sum_{i=1}^n \bar{v}_i(A_j) = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

onde  $n$  corresponde ao número de alternativas ou elementos comparados, uma vez que o mesmo procedimento deve ser feito para a comparação dos critérios. Desse modo, o vetor de prioridades da alternativa  $i$  em relação ao critério  $C_k$  é dado pela Eq. (2.7).

$$\bar{v}_k(A_i) = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{v}_i(A_j)}{n}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

Depois do obtido o vetor de prioridades das alternativas sob cada critério  $C_k$ , continua-se com o nível dos critérios. A normalização dos resultados das comparações par a par resulta nos pesos para os critérios, estes podem ser calculados pela Eq. (2.8).

$$\bar{w}_l(C_j) = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^m C_{ij}}, \quad j = 1, \dots, m \quad (2.8)$$

onde  $m$  corresponde ao número de critérios de um mesmo nível. O vetor de prioridades é então calculado pela Eq. (2.9).

$$\bar{w}(C_i) = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{w}_l(C_j)}{m}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

O valor ou pontuação global de cada alternativa se dá por uma função de agregação. O resultado é a priorização ou classificação das alternativas. A função de utilidade linear aditiva é geralmente adequada e avalia os desempenhos das alternativas conforme os múltiplos critérios apresentados pela Eq. (2.10).

$$\bar{f}(A_j) = \sum_{i=1}^m \bar{w}(C_i) \times v_i(A_j), \quad j = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

onde  $n$  corresponde ao número de alternativas.

O método AHP utiliza escalas de razão para todas as avaliações e introduz a possibilidade de avaliar inconsistências no julgamento de valor pelo decisor.

A consistência lógica avalia as comparações aos pares entre os elementos relevantes em cada nível da hierarquia (SAATY, 1988, 1990, 2008). Sendo  $a_{ij}$  o valor obtido da comparação par a par do elemento  $i$  com o elemento  $j$  e todos os juízos perfeitos, em todas as comparações seria possível verificar que  $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$  para qualquer  $i, j, k$  e a matriz  $A = (a_{ij})$  seria consistente.

Seja  $n$  o número de elementos a serem comparados,  $\lambda_{max}$  o vetor de  $A$  e  $w$  o vetor de prioridades. Caso os juízos fossem completamente consistentes, tem-se  $\lambda_{max} = n$  e  $a_{ij} = w_i/w_j$ . Contudo, quase sempre se verifica alguma inconsistência nos juízos. Essa inconsistência pode ser medida através da distância dos valores de  $\lambda_{max}$  e  $n$ . Portanto,  $\lambda_{max} - n$  é um indicador da inconsistência. Desse modo, sendo  $A$  a matriz de dominância, é possível encontrar o vetor que satisfaça a Eq. (2.11).

$$Aw = \lambda_{max} \times w \quad (2.11)$$

Cujo autovalor é dado pela Eq. (2.12).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad (2.12)$$

Para que a matriz  $A$  seja consistente,  $\lambda_{max} \geq n$  e então, o Índice de Consistência (IC) deve ser menor que 0,1. O IC é calculado pela Eq. (2.13).

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (2.13)$$

Já a Razão de Consistência (RC) é calculada pela Eq.(2.14).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2.14)$$

Na Eq. (2.14), o Índice Randômico (IR) é dado pelo Quadro 7, onde  $n$  é o número de alternativas.

Quadro 7 – Índice Randômico (IR).

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: O Autor, com base em Saaty (1988, 1990, 2008).

### 2.2.3 O Processo Analítico Hierárquico aplicado à construção

O AHP é empregado para analisar diferentes tipos de problemas sociais, políticos, econômicos e tecnológicos (BOTTERO; PEILA, 2005). Na indústria de arquitetura, engenharia e construção, o AHP é um dos métodos mais eficientes na tomada de decisões complexas (BOSTANCIOGLU; ONDER, 2019; NOORZAI, 2020; PRASCEVIC; PRASCEVIC, 2017; ZOLFAGHARIAN; IRIZARRY, 2017). Esta subseção apresenta um panorama das publicações que consideram o AHP como metodologia para a tomada de decisões em problemas complexos da construção. Foram apurados 178 artigos científicos publicados em periódicos de indexados

em quatro bases de dados frequentemente empregadas na engenharia: *Engineeing Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. O Quadro 8 contém as palavras-chave e a *string* de busca empregadas na revisão de literatura.

Quadro 8 – Palavras-chave e *string* de busca.

“Analytic Hierarchy Process”	AND	“Civil construction” OR “Building construction” OR “Construction projects” OR “Building projects” OR “Construction sector” OR “Building sector”
------------------------------	-----	---

Fonte: O Autor.

As publicações selecionadas datam de 1986 a 2020. Os critérios de inclusão significam que o estudo avaliado possui características que atendem às questões da pesquisa. Da mesma maneira, atender aos critérios de exclusão significa que o artigo avaliado não possui informações relevantes para esta pesquisa. O Quadro 9 apresenta os critérios de inclusão e exclusão utilizados na revisão de literatura.

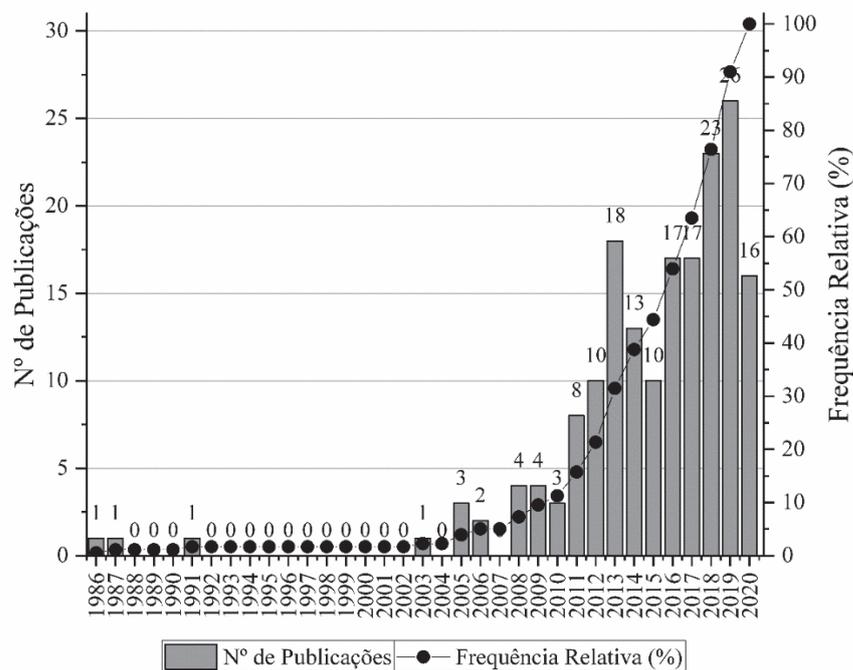
Quadro 9 – Critérios de inclusão e exclusão.

<b>Critérios de Inclusão (CI)</b>	CI-01	O artigo apresenta o método AHP aplicado ao setor da construção.
<b>Critérios de Exclusão (CE)</b>	CE-01	O artigo não apresenta o método AHP aplicado ao setor da construção.
	CE-02	O artigo não está em língua inglesa.

Fonte: O Autor.

Após realizar a pesquisa dos artigos científicos nas bases de dados mencionadas, o número total de publicações selecionadas foi de 3164 artigos. O processo de exclusão começou com a eliminação dos artigos duplicados e a análise de títulos e palavras-chave; essa etapa excluiu 2986 artigos. O processo de seleção gerou a amostra de 178 artigos. Na Figura 9 apresenta-se a evolução temporal das publicações que aplicam o AHP à indústria da construção.

Figura 9 – Evolução temporal das publicações que aplicam o AHP à construção.

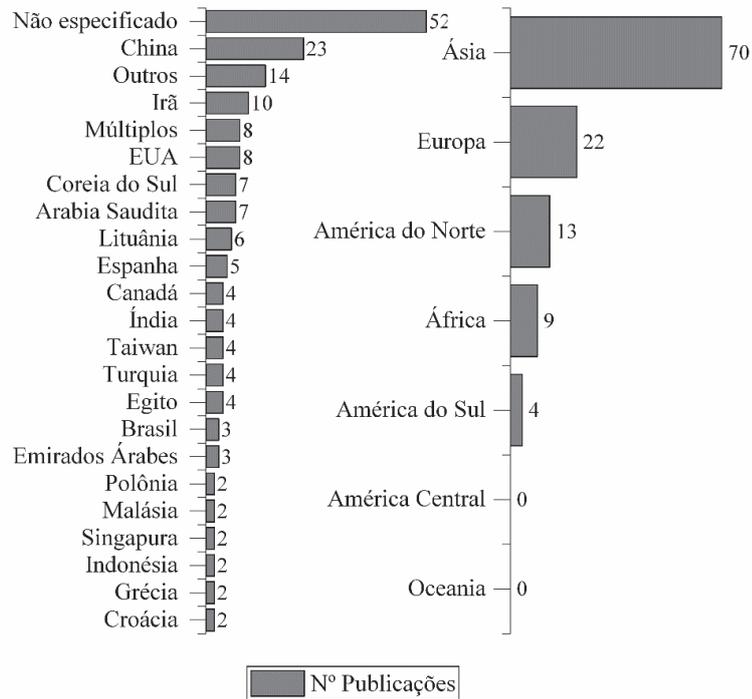


Fonte: O Autor.

A Figura 9 mostra que a primeira publicação da aplicação do AHP à construção foi apresentada no ano de 1986 e a publicação mais recente é do ano 2020 (primeiro trimestre de 2020). Verifica-se que, de 1986 até 2007 não há muitas modificações no cenário de aplicações do AHP à construção. A partir de 2008, observa-se um aumento no número de aplicações. De toda a amostra, mais de 50% dos artigos foram publicados a partir do ano de 2015, isso ratifica que, nos últimos anos, o AHP tem sido fortemente empregado na indústria da construção.

Geograficamente, foram identificadas aplicações do AHP à construção em mais de 34 países. A maior parte das aplicações foram registradas no continente asiático, sendo a China o país com o maior número de aplicações (23 publicações). Fora da Ásia, os EUA destacaram-se com 8 publicações. Apesar do número significativo de artigos analisados, verifica-se na África e América do Sul ainda há poucas aplicações envolvendo o AHP na construção; e, na América Central e Oceania, não foram identificados estudos. A Figura 10 ilustra o panorama geográfico apresentado.

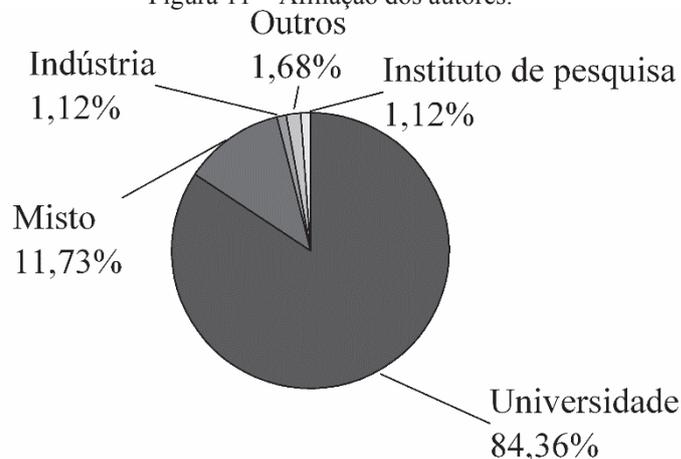
Figura 10 – Distribuição geográfica: artigos por país e continente.



Fonte: O Autor.

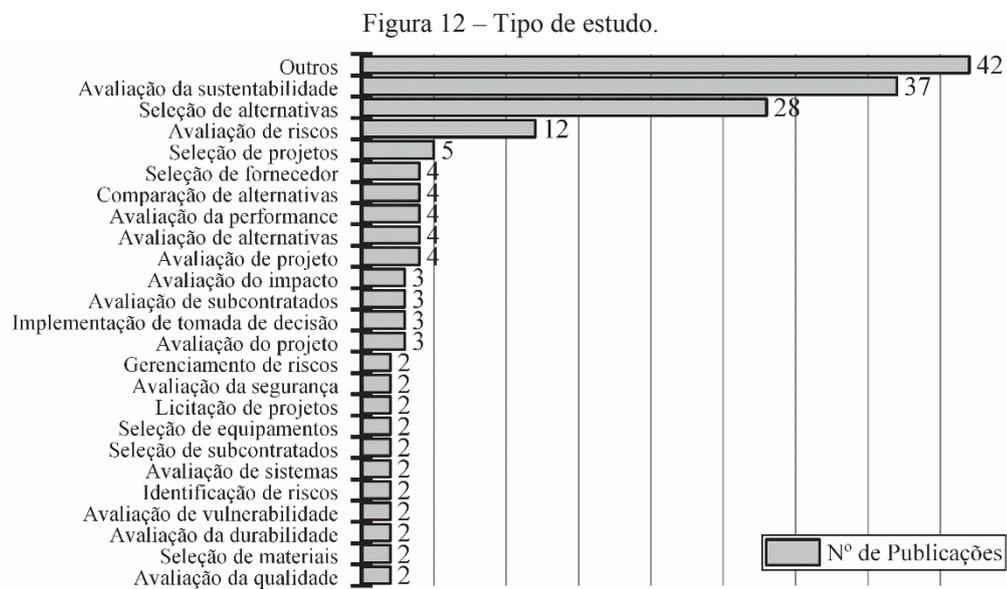
Quanto à afiliação dos autores, verificou-se que a maior parte das aplicações foram estudadas pelas universidades. Os resultados podem indicar que (assim como no estudo das dimensões da sustentabilidade através de abordagens PCV – item 2.1.4) indústrias, conselhos, consultores, governos e outras iniciativas devem associar-se aos pesquisadores acadêmicos para expandir as aplicações do AHP à indústria da construção. A Figura 11 mostra a distribuição dos estudos por afiliação dos autores.

Figura 11 – Afiliação dos autores.

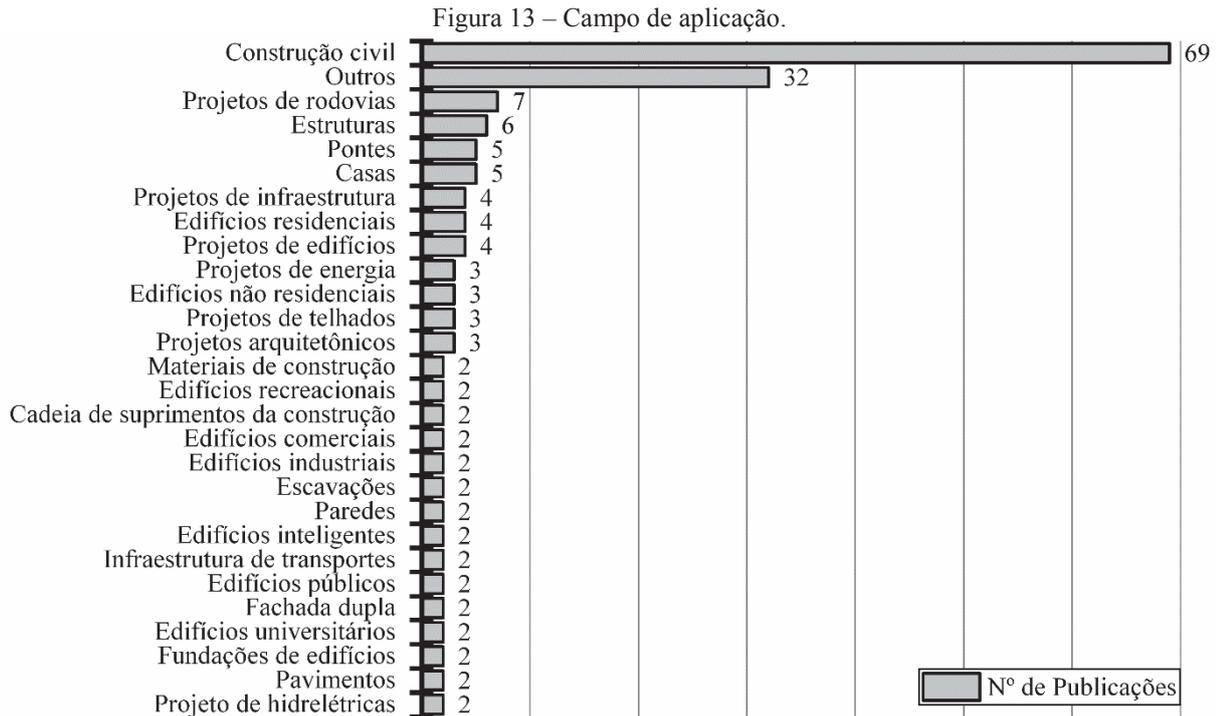


Fonte: O Autor.

De acordo com o tipo de estudo, o AHP é apresentado na literatura como uma ferramenta racional (LAI; WANG; WANG, 2008; LI et al., 2013; PLEBANKIEWICZ; KUBEK, 2016; SARKIS; MEADE; PRESLEY, 2012; WARIS et al., 2019), sendo utilizado em estudos de avaliação, seleção, comparação, análise, gerenciamento, modelagem, revisão, combinação, identificação, determinação, entre outros. Nas aplicações evidenciadas, verifica-se que a construção civil apresenta a maior quantidade de estudos (52 publicações), seguido pelos projetos de rodovias (7 publicações), estruturas (6 publicações), pontes (5 publicações) e casas (5 publicações). A Figura 12 apresenta todos os tipos de estudos identificados e a Figura 13 contém as aplicações evidenciadas.



Fonte: O Autor.



Com base no referencial teórico apresentado, é possível verificar que, tanto para o PCV quanto para o AHP, existe a escassez de modelos que avaliem a sustentabilidade de projetos por meio das dimensões ambiental, social e econômica, especialmente, em projetos de habitação unifamiliar de interesse social. Muitos dos modelos existentes na literatura, carecem de padronização e objetividade para a tomada de decisão por parte do projetista.

Para preencher essa lacuna presente na literatura, essa tese propõe o desenvolvimento de um modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de HIS sob a ótica do PCV e do AHP, com o objetivo de auxiliar o projetista a identificar os potenciais pontos de melhoria dos projetos considerando as três dimensões da sustentabilidade. Como a metodologia envolve medidas de concepção e dimensionamento dos projetos, busca-se possibilitar a determinação de soluções sustentáveis sem impactos diretos significativos no custo de construção da habitação.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

---

Para que os objetivos propostos pela tese fossem alcançados, o estudo foi dividido em fases. Na Fase 1 foram selecionados e identificados os projetos de habitação unifamiliar de interesse social de análise. Na Fase 2 foram montados os inventários do ciclo de vida e realizadas as avaliações por meio do PCV. E, finalmente, na Fase 3 os projetos foram comparados de acordo com os resultados provenientes da avaliação da sustentabilidade. A Fase 1, a Fase 2 e a Fase 3 são tratadas nas subseções 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente.

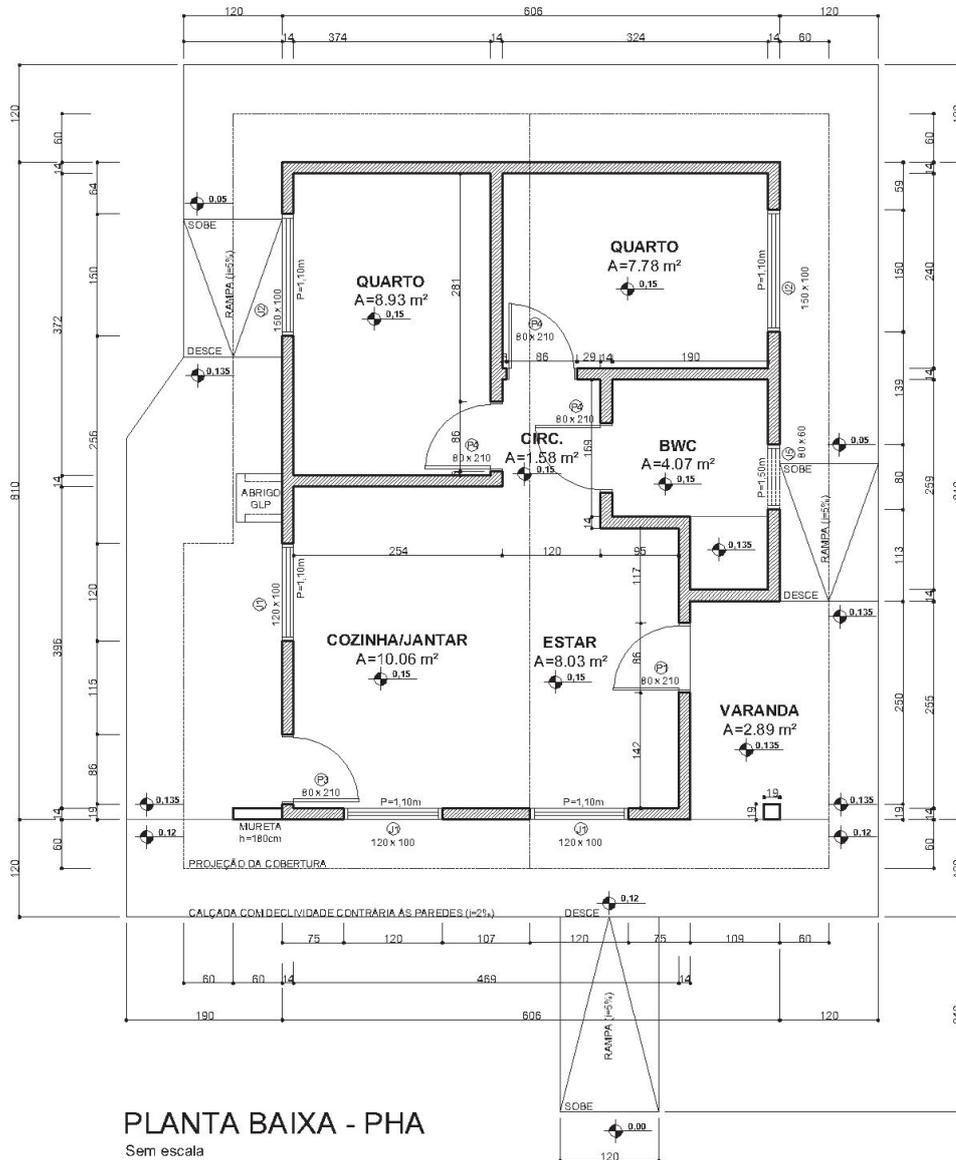
#### **3.1 FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DOS PROJETOS**

Foram empregados dois projetos de habitação unifamiliar de interesse de social. O Projeto Habitacional A é um projeto executado na cidade de Cantagalo (PR) pela Companhia de Habitação do Paraná. O Projeto Habitacional B é executado na cidade de Limeira do Oeste (MG) pela Companhia de Habitação do Estado de Minas Gerais. Estas tipologias construtivas foram empregadas em função da grande utilização das mesmas em projetos de HIS no Brasil. Ao longo da tese, os projetos passam a apresentar a nomenclatura: Projeto Habitacional A (PHA) e Projeto Habitacional B (PHB). Nas subseções a seguir, o PHA e o PHB são apresentados.

##### **3.1.1 Projeto Habitacional A (PHA)**

O PHA trata-se de uma residência unifamiliar de 49,09 m<sup>2</sup> de área construída. A habitação de um único pavimento executada em concreto armado é composta por uma sala de estar conjugada à cozinha, dois quartos, um banheiro, uma área de circulação e uma varanda. A Figura 14 apresenta a planta baixa do PHA e o Quadro 10 apresenta a descrição do sistema geral do PHA.

Figura 14 – Planta baixa do PHA.



Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

Quadro 10 – Descrição do sistema geral do PHA.

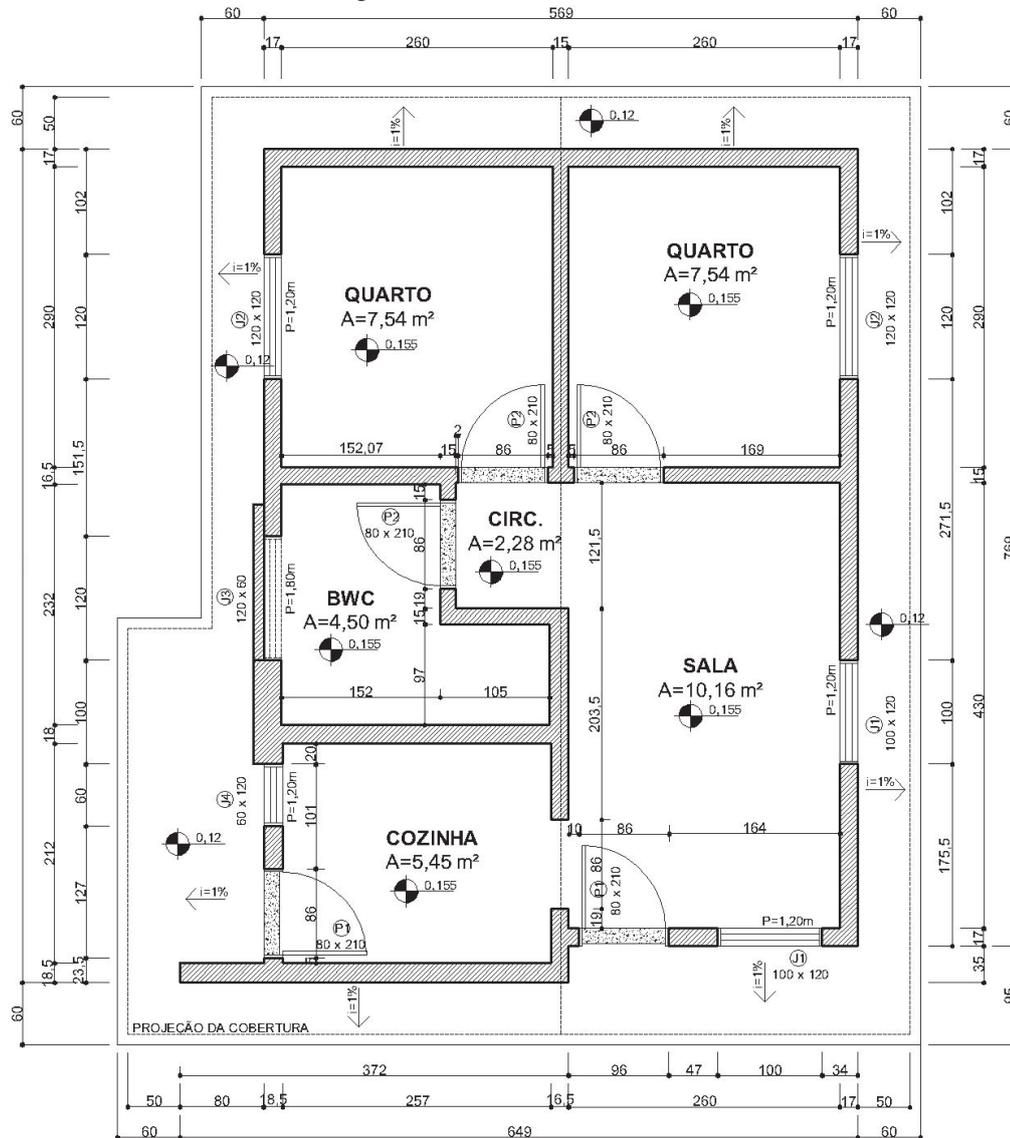
<b>Infraestrutura</b>	Estacas brocas de concreto com 20cm de diâmetro, vigas baldrame em concreto armado ( $f_{ck}=20\text{MPa}$ ), alvenaria de embasamento de tijolos maciços.
<b>Superestrutura</b>	Pilaretes, cinta de oitão, vigas de cobertura, pilares em concreto armado, lajes pré-moldadas. O concreto empregado tem resistência característica de 20MPa.
<b>Vedação</b>	Paredes de blocos cerâmicos furados (9cm $\times$ 14cm $\times$ 19cm) assentados com argamassa de cimento, cal e areia, vergas e contra-vergas em concreto armado ( $f_{ck}=20\text{MPa}$ ), esquadrias em alumínio.
<b>Cobertura</b>	Estruturas de madeira e telhas cerâmicas tipo romana.
<b>Revestimentos</b>	Revestimentos internos: chapisco (argamassa de cimento e areia); emboço paulista (argamassa de cimento, cal e areia); emassamento com massa PVA; tinta látex; rodapés e soleiras cerâmicos; revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltadas). Revestimentos externos: chapisco (argamassa de cimento e areia); emboço paulista (argamassa de cimento, cal e areia); forro de PVC; fundo selador acrílico; textura acrílica; esmalte sintético fosco; soleiras de mármore nas portas externas. Regularizações: piso de cimento alisado (argamassa de cimento e areia).

Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

### 3.1.2 Projeto Habitacional B (PHB)

O PHB trata-se de uma residência unifamiliar de 44,78 m<sup>2</sup> de área construída. A habitação com um único pavimento executada em alvenaria estrutural é composta por uma sala, dois quartos, uma área de circulação, um banheiro, uma cozinha e uma área de serviços externa. A Figura 15 apresenta a planta baixa do PHB e o Quadro 11 apresenta a descrição do sistema geral do PHB.

Figura 15 – Planta baixa do PHB.



## PLANTA BAIXA - PHB

Sem escala

Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

Quadro 11 – Descrição do sistema geral do PHB.

<b>Infraestrutura</b>	Radier em concreto armado ( $f_{ck}=25\text{MPa}$ ).
<b>Superestrutura/ Vedação</b>	Cintas de amarração de blocos canaleta J de concreto ( $14\text{cm} \times 19\text{cm} \times 19\text{cm} \times 31\text{cm}$ ) preenchidos com graute ( $f_{ck}=20\text{ MPa}$ ), lajes pré-moldadas treliçadas em concreto armado ( $f_{ck}=25\text{ MPa}$ ), alvenaria em blocos de concreto ( $14\text{cm} \times 19\text{cm} \times 39\text{cm}$ ), assentados e amarrados através de juntas desencontradas com argamassa de cimento, cal e areia média e espessura média das juntas de 10mm, vergas e contra-vergas de blocos canaleta de concreto preenchidos com graute ( $f_{ck}=20\text{ MPa}$ ), alvéolos dos blocos de concreto preenchidos com graute ( $f_{ck}=20\text{ MPa}$ ), esquadrias de madeira e alumínio.
<b>Cobertura</b>	Estruturas de aço e telhas cerâmicas tipo plan.
<b>Revestimentos</b>	Revestimentos internos: chapisco (argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (argamassa de cimento, cal e areia); gesso desempenado; emboço (argamassa de cimento, cal e areia); revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltada); tinta látex, rodapés cerâmicos assentados com argamassa colante; soleiras em mármore. Revestimentos externos: chapisco (em argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (em argamassa de cimento, cal e areia); emboço (em argamassa de cimento, cal e areia); moldura para portas e janelas (em argamassa de cimento cal e areia); revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltadas); tinta acrílica. Regularizações: contra-piso (argamassa de cimento e areia); molduras de portas e janelas pintadas com tinta esmalte.

Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

## 3.2 FASE 2 – PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA

### 3.2.1 Condução da Avaliação do Ciclo de Vida

#### 3.2.1.1 Definição do objetivo e escopo

A ACV é realizada nos projetos PHA e PHB. Emprega-se a ACV como ferramenta para identificar os impactos ambientais e comparar o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida dos projetos habitacionais, com o objetivo de apoiar a decisão sobre melhores materiais e técnicas construtivas para projetos habitacionais futuros ambientalmente preferíveis.

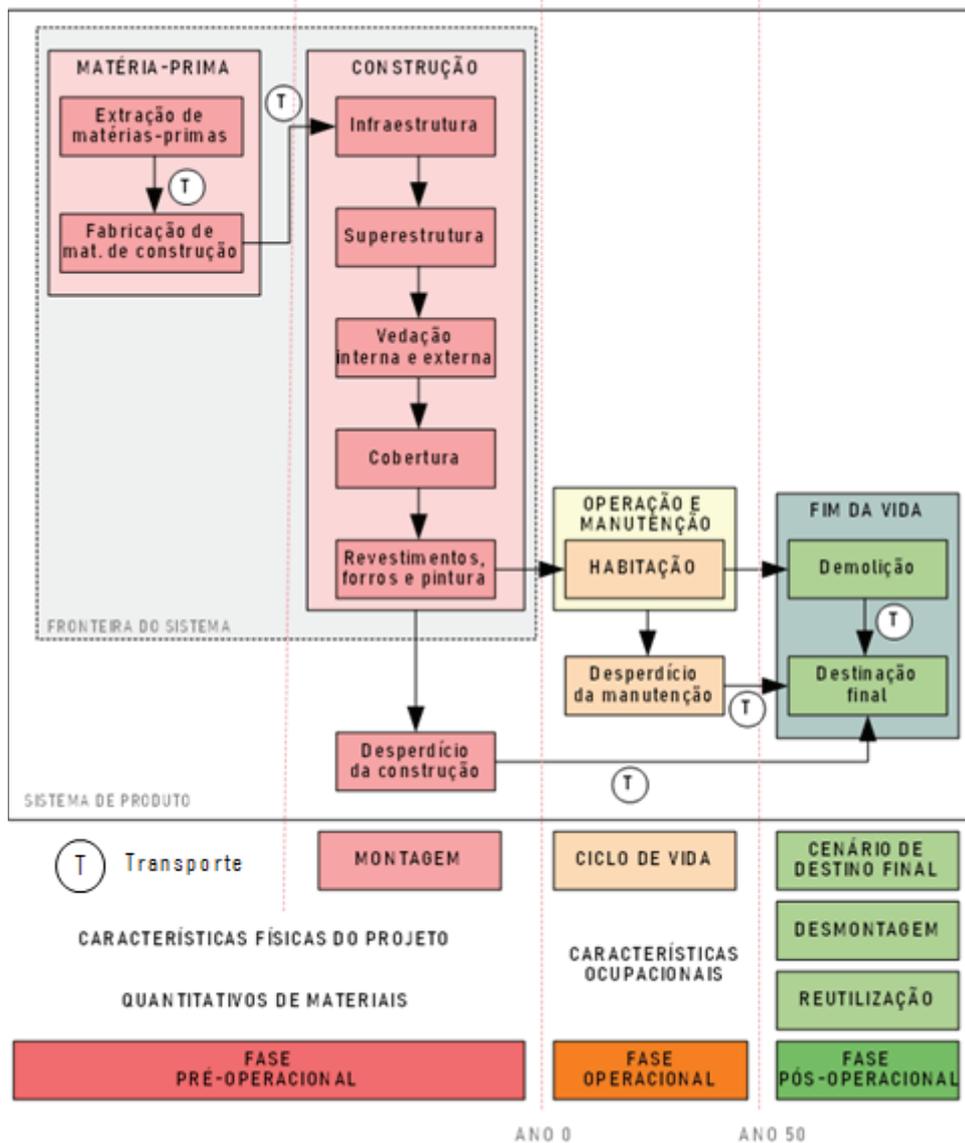
Esse estudo é direcionado a projetistas (engenheiros e arquitetos); tomadores de decisão do setor da construção civil brasileira para as esferas pública e privada.

A função dos projetos habitacionais estudados é proteger e dar conforto e segurança a uma família de 4 pessoas. A unidade funcional empregada é: “*1,0 m<sup>2</sup> de moradia construída para um período de 50 anos para 4 habitantes*”.

O sistema de produto apresenta o conjunto de processos elementares que compõem o ciclo de vida de uma habitação. A fronteira do sistema define quais etapas do ciclo de vida e quais processos pertencem ao sistema analisado. Nesse trabalho, realiza-se uma avaliação do berço ao portão. Como fronteira do sistema considera-se a fase pré-operacional, onde encontram-se os processos de extração de matéria-prima, fabricação dos materiais de construção, construção da habitação. A construção compreende as fases infraestrutura; superestrutura; vedação interna e externa; cobertura; revestimentos, forros e pintura. A fase pré-

operacional foi escolhida, pois é nessa fase onde o projetista é capaz de realizar modificações, e de acordo com John et al. (2010a; 2010b; 2020c), muitas das medidas relevantes para o aumento da sustentabilidade envolvem medidas de projeto. Foram excluídos os processos e as fases onde o projetista apresenta menor capacidade de intervenção. Dentre eles estão, os processos relacionados ao desperdício de materiais e as fases operacional e pós-operacional, onde estão os cenários de operação e manutenção (habitação e desperdício da manutenção) e de fim de vida das edificações (desmontagem, cenários de destinação final e reutilização). A Figura 16 mostra o sistema de produto e a fronteira do sistema empregados para a ACV do PHA e do PHB.

Figura 16 – Sistema de produto e fronteira do sistema de estudo.



Fonte: O Autor, com base em Macedo (2011).

### 3.2.1.2 Inventário do Ciclo de Vida

O ICV foi construído a partir dos projetos arquitetônico e de serviços do PHA e do PHB. Foram incluídos os materiais presentes nas etapas do ciclo de vida estudadas. O Quadro 12 apresenta os materiais analisados nesta ACV.

Para a construção do ICV considerou-se o fluxo de referência, ou seja, a quantidade de material necessária para desempenhar a função determinada. Calculou-se, então, a quantidade de material por metro quadrado de projeto.

Quadro 12 – Materiais analisados.

<b>Materiais</b>
Aço (kg/m <sup>2</sup> )
Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Madeira (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Bloco cerâmico maciço (kg/m <sup>2</sup> )
Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m <sup>2</sup> )
Argamassa – cimento e areia (kg/m <sup>2</sup> )
Bloco cerâmico furado (kg/m <sup>2</sup> )
Vidro (kg/m <sup>2</sup> )
Tinta (kg/m <sup>2</sup> )
Telha cerâmica (kg/m <sup>2</sup> )
Piso cerâmico (kg/m <sup>2</sup> )
Graute (kg/m <sup>2</sup> )
Bloco de concreto (kg/m <sup>2</sup> )
Gesso (kg/m <sup>2</sup> )
Argamassa colante (kg/m <sup>2</sup> )
Mármore (kg/m <sup>2</sup> )
Brita (kg/m <sup>2</sup> )
PVC (kg/m <sup>2</sup> )
Manta asfáltica (kg/m <sup>2</sup> )
Janela – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Porta – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Porta – madeira (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Massa acrílica (kg/m <sup>2</sup> )

Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

### 3.2.1.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Esta fase envolve a compilação e a quantificação de entradas e saídas referentes aos materiais presentes no ciclo de vida dos projetos. Em função da elevada quantidade de dados a serem manipulados, modelou-se o PHA e o PHB no *software System for Integrated Environmental Assessment of Products* (SimaPro) versão 9.0 licença *Faculty*. O SimaPro é um software desenvolvido pela empresa holandesa *Pré Consultants* e segue a estrutura das normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (PRÉ CONSULTANTS, 2019). A licença *Faculty* trata-se de uma versão gratuita para universidades de países não membros da Organização para

Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD – *Organization for Economic Co-operation and Development*), no qual se enquadra o Brasil (MEDEIROS, 2016). Os dados foram extraídos da base internacional *ecoinvent v3.3*. A *ecoinvent* é uma instituição suíça responsável pela gestão da principal base de dados internacional para a ACV. Essas bases de dados são utilizadas por mais de 80 países e por uma ampla gama de instituições (ECOINVENT, 2019). Os processos empregados foram do tipo *Market*, que incluem insumos da produção em vários ou em um único país, além de insumos dos processos de transporte. Os processos do tipo *Market* são recomendados quando os dados de um fornecedor específico não são conhecidos, que é o caso dos projetos estudados (PRÉ CONSULTANTS, 2020). O Quadro 13 apresenta os materiais elencados no inventário e seus respectivos processos no *software* SimaPro.

Quadro 13 – Materiais e processos SimaPro.

<b>Material</b>	<b>Processo SimaPro</b>
Aço (kg/m <sup>2</sup> )	Reinforcing steel {GLO}  market for   Cut-off, U
Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Concrete, 20MPa {GLO}  market for   Cut-off, U
Madeira (m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> )	Sawnwood, parana pine from sustainable forest management, kiln dried {GLO}  market for   Cut-off, U
Bloco cerâmico maciço (kg/m <sup>2</sup> )	Clay brick {GLO}  market for   Cut-off, U
Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m <sup>2</sup> )	Lime mortar {GLO}  market for   Cut-off, U
Argamassa – cimento e areia (kg/m <sup>2</sup> )	Cement mortar {RoW}  market for cement mortar   Cut-off, U
Bloco cerâmico furado (kg/m <sup>2</sup> )	Clay brick {GLO}  market for   Cut-off, U
Vidro (kg/m <sup>2</sup> )	Flat glass, uncoated {GLO}  market for   Cut-off, U
Tinta (kg/m <sup>2</sup> )	Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U
Telha cerâmica (kg/m <sup>2</sup> )	Roof tile {GLO}  market for   Cut-off, U
Piso cerâmico (kg/m <sup>2</sup> )	Ceramic tile {GLO}  market for   Cut-off, U
Graute (kg/m <sup>2</sup> )	Light mortar {GLO}  market for   Cut-off, U
Bloco de concreto (kg/m <sup>2</sup> )	Concrete block {GLO}  market for   Cut-off, U
Gesso (kg/m <sup>2</sup> )	Cover plaster, mineral {GLO}  market for   Cut-off, U
Argamassa colante (kg/m <sup>2</sup> )	Adhesive mortar {GLO}  market for   Cut-off, U
Mármore (kg/m <sup>2</sup> )	Natural stone plate, polished {GLO}  market for   Cut-off, U
Brita (kg/m <sup>2</sup> )	Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U
PVC (kg/m <sup>2</sup> )	Polyvinylidenc chloride, granulate {GLO}  market for   Cut-off, U
Manta asfáltica (kg/m <sup>2</sup> )	Bitumen adhesive compound, hot {GLO}  market for   Cut-off, U
Janela – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K {GLO}  market for   Cut-off, U
Porta – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Door, outer, wood-aluminium {GLO}  market for   Cut-off, U
Porta – madeira (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Door, inner, wood {GLO}  market for   Cut-off, U
Massa acrílica (kg/m <sup>2</sup> )	Acrylic filler {GLO}  market for   Cut-off, U

Fonte: O Autor, com base nos projetos, planilhas de orçamentos e no SimaPro.

#### 3.2.1.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Para a AICV do PHA e do PHB, empregou-se o método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva hierárquica e abordagens *midpoint* e *endpoint*.

#### 3.2.1.5 Interpretação

Nesta fase foram identificados dos pontos significativos da ACV com base nos resultados do ICV e da AICV. Os projetos foram avaliados e foram elencadas as conclusões e limitações do estudo.

### 3.2.2 Condução da Avaliação Social do Ciclo de Vida

A avaliação social proposta compilou os inventários de materiais do PHA e do PHB e classificou os materiais de acordo com o setor da cadeia de suprimentos da construção que o mesmo é proveniente. Calculou-se o potencial salário justo para cada setor e propôs-se um indicador para relacionar os dados sociais dos setores avaliados aos dados de projeto. Cada uma das etapas é mostrada nas subseções seguintes.

#### 3.2.2.1 Definição do objetivo e escopo

Essa ACVS tem como objetivo verificar a evolução dos indicadores sociais dos setores que tem influência significativa nos projetos estudados. O estudo compilou os dados extraídos da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram considerados os setores: Indústria madeireira, Indústria siderúrgica e Indústria de insumos químicos e não-metálicos, dos anos de 2002 a 2015, para dados sociais do Brasil.

#### 3.2.2.2 Inventário Social do Ciclo de Vida

Para cada setor, o estudo compilou dados extraídos da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2002 a 2015 (os microdados brasileiros não incluem anos anteriores a 2002 e anos posteriores a 2015).

O inventário social foi construído de acordo com as fichas metodológicas desenvolvidas pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e pela Sociedade de Toxicologia Química e Ambiental (SETAC). Foi considerada como categoria de partes interessadas, “trabalhador”, e, como subcategoria de impacto, “salário justo”. A categoria de partes interessadas “trabalhador” foi escolhida devido à relevante contribuição socioeconômica que o trabalhador faz para a sociedade (NORRIS et al., 2013). A subcategoria de impacto “salário justo” está relacionada ao salário essencial para atender às necessidades básicas dos trabalhadores e de suas famílias para garantir condições de vida estáveis (ANDREWS et al., 2009). Além disso, o “salário justo” ajuda a observar as condições gerais de trabalho nos setores.

Os setores foram identificados na PNAD por intermédio da variável V9907, que indica o código da atividade principal do empreendimento no trabalho principal da semana de referência, sendo os setores considerados Indústria madeireira (códigos de atividade 02001, 02002 e 20000), Indústria siderúrgica (códigos de atividade 27001 e 27002) e Indústria de insumos químicos e não-metálicos (códigos de atividade 14001, 26010, 26091, 26092, 24010 e 24090).

### 3.2.2.3 Potencial Salário Justo

O Potencial Salário Justo ( $PSJ_n$ ) foi calculado para os setores. Os Salários Reais ( $SR_n$ ) pagos pelos setores foram extraídos da PNAD por intermédio da variável V9532, que representa o rendimento mensal que o trabalhador recebia em dinheiro no mês de referência. Para o Salário Mínimo de Vida ( $SMV_n$ ) foram empregados os valores de salário mínimo vigente no Brasil em cada ano indicado, que podem ser vistos no Quadro 14

Para o Tempo de Trabalho Contratado ( $TTC_n$ ), foram consideradas quarenta e quatro horas, que é a duração normal da jornada de trabalho permitida no Brasil.

Como Tempo Real de Trabalho ( $TRT_n$ ), foi considerado o número médio de horas trabalhadas por semana no trabalho principal da semana de referência extraído da PNAD por meio da variável V9058.

E como Fator de Desigualdade ( $FD_n$ ), empregou-se o Índice de Gini calculado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Os valores de Índice de Gini são apresentados pelo Quadro 14.

Quadro 14 – Salário Mínimo Vigente e Índice de Gini – Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Salário Mínimo Vigente (R\$)</b>	<b>Índice Gini – Brasil</b>
<b>2002</b>	200,00	0,589
<b>2003</b>	240,00	0,583
<b>2004</b>	260,00	0,572
<b>2005</b>	300,00	0,570
<b>2006</b>	350,00	0,563
<b>2007</b>	380,00	0,556
<b>2008</b>	415,00	0,546
<b>2009</b>	465,00	0,543
<b>2011</b>	545,00	0,531
<b>2012</b>	622,00	0,530
<b>2013</b>	678,00	0,527
<b>2014</b>	724,00	0,518
<b>2015</b>	788,00	0,491

Fonte: O Autor, com base em DIEESE (2019) e IBGE (2010).

Para a análise das subcategorias de impacto “igualdade de oportunidades/discriminação”, “liberdade de associação e negociação coletiva” e “benefícios sociais/segurança social”, os trabalhadores foram divididos por sexo (trabalhadores homens e trabalhadoras mulheres), raça/cor (trabalhadores brancos e trabalhadores não brancos), associativismo (trabalhadores sindicalizados e trabalhadores não sindicalizados) e formalidade (trabalhadores formais e trabalhadores informais); e, foram empregadas as variáveis V0302, V0404, V9087 e V9042, respectivamente. Verifica-se também a sensibilidade do potencial salário justo, ou seja, investiga-se como a modificação da variável salário mínimo de vida interfere no resultado do potencial salário justo. Para isso, recalcula-se o potencial salário justo, substituindo-se o valor do salário mínimo vigente no Brasil pelo salário mínimo necessário calculado pelo Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE). Os resultados obtidos pelo inventário social do ciclo de vida servem de base para a criação dos cenários para o cálculo da sustentabilidade dos projetos analisados.

#### 3.2.2.4 Potencial Salário Justo Ponderado

O PSJ está relacionado aos dados sociais (salários, horas de trabalho e fator de desigualdade) e não à quantidade de material presente nos projetos. Esse método permite determinar os impactos dos salários justos ao longo do ciclo de vida de um produto; no entanto, não admite uma relação direta com a unidade funcional definida (NEUGEBAUER et al., 2017).

Para relacionar a unidade funcional ao potencial salário justo, propõe-se na presente tese o Potencial Salário Justo Ponderado (PSJP), que é um método para relacionar o inventário de materiais aos dados sociais do setor.

Considerando um produto, os materiais são quantificados de acordo com a unidade funcional estabelecida. De acordo com os materiais inventariados, é possível calcular a massa total do produto analisado. Os materiais são classificados de acordo com os setores da cadeia de suprimentos de onde são originários. Para cada setor identificado, os materiais existentes são selecionados e a massa equivalente do setor é calculada em relação à massa total do produto. A Eq. (3.1) mostra o cálculo do PSJP.

$$PSJP_n = \frac{1}{\sum MES_n} \sum_{i=1}^{NS} (MES_n)_i \times (PSJ_n)_i \quad (3.1)$$

$i$ :	Setor analisado;
$NS$ :	Número de Setores;
$PSJP_n$ :	Potencial Salário Justo Ponderado para o processo $n$ no ciclo de vida do produto em um local/região/setor definidos;
$PSJ_n$ :	Potencial Salário Justo para o processo $n$ no ciclo de vida de um produto em local/região/setor definido;
$MES_n$ :	Massa Equivalente do Setor do material para o processo $n$ no ciclo de vida do produto em um local/região/setor definidos.

Ao relacionar o PSJ e a MES, é possível calcular o PSJP para o PHA e o PHB.

### 3.2.3 Condução do Custo do Ciclo de Vida

#### 3.2.3.1 Definição do objeto de estudo

A avaliação econômica proposta compilou os inventários de materiais do PHA e do PHB. O levantamento de custos relacionados aos projetos foi construído com base no inventário de materiais.

#### 3.2.3.2 Estimativa do ciclo de vida

A subseção 2.1.3.4 tratou sobre os custos incorridos ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo. Assim, foram empregados apenas os Custos de Aquisição (CA) e os Custos de

Instalação (CI). Logo, a estimativa do ciclo de vida de 50 anos das habitações PHA e PHB definidas na unidade funcional estabelecida não é levada em consideração nesse estudo.

### 3.2.3.3 Elaboração do inventário do ciclo de vida

O ICV econômico foi construído a partir dos projetos arquitetônico e de serviços do PHA e do PHB. Foram incluídos os principais materiais presentes nas etapas do ciclo de vida escolhidas. O levantamento de custos empregou o Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que é um sistema que contém referências de preços em insumos e custos em composições estabelecidas pelo Governo Federal Brasileiro e desenvolvidas e mantidas pela Caixa Econômica Federal (CEF) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A tabela de referência de insumos e composições empregada trata-se da: “SINAPI\_ref\_Insumos\_Composicoes\_PR\_112019\_Desonerado” (SINAPI, 2019).

### 3.2.3.4 Atualização financeira e composição dos custos totais

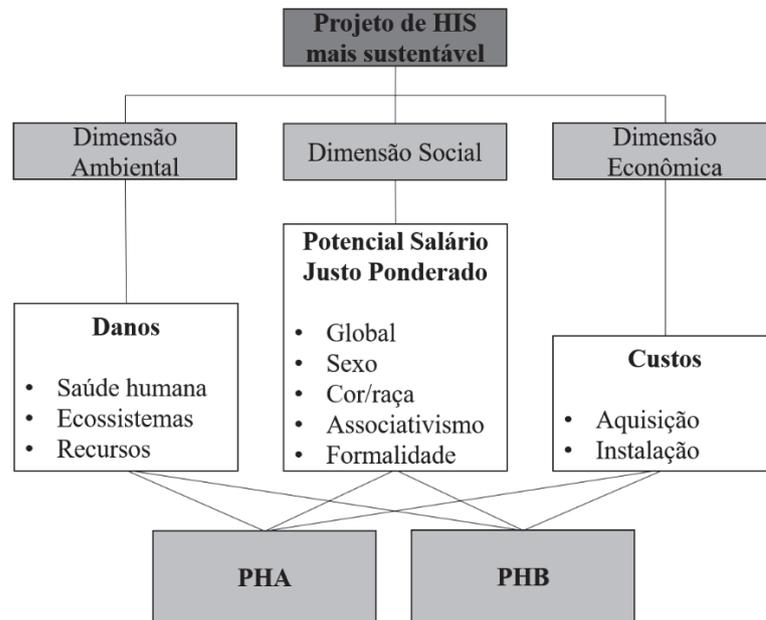
Como já foi dito, foram empregados apenas CA e CI. Logo, a estimativa do ciclo de vida de 50 anos do PHA e do PHB definidas na unidade funcional estabelecida não é levada em consideração nesse estudo. Assim, não é necessária a atualização financeira. O custo total é calculado pela soma de CA e CI. As avaliações realizadas na tese apresentam o custo total e o custo por fase da construção dos projetos.

## 3.3 FASE 3 – AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

O objetivo desse estudo é propor um modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social sob a ótica do PCV e do AHP. A Figura 17 apresenta em seu topo o objetivo principal a ser encontrado pelo estudo, que é determinar qual dos projetos (PHA ou PHB) apresenta características mais sustentáveis. Logo abaixo estão os critérios, que são as dimensões da sustentabilidade, ou seja, o PCV calculado por meio da ACV, da ACVS e do CCV. Como subcritérios para o estudo AHP estão: na dimensão ambiental, as categorias de danos (*endpoint*) da metodologia ReCiPe 2016; na dimensão social, o potencial salário justo ponderado (global, por sexo, por raça/cor, por

associativismo e por formalidade); e, na dimensão econômica, os custos relativos à aquisição e instalação dos projetos.

Figura 17 – Estrutura hierárquica da tese.



Fonte: O Autor.

A tomada de decisão por meio de uma estrutura hierárquica depende da construção de cenários. Isso significa que, é preciso ponderar os critérios e subcritérios empregados no modelo, ou seja, devem ser colocados pesos que representem a importância dos critérios e subcritérios uns sobre os outros.

Geralmente, a construção de cenários é afetada por práticas e tradições comuns das empresas de construção, bem como pela experiência e preferências dos projetistas (SHAPIRA; GOLDENBERG, 2005). Para contribuir na construção de cenários objetivos e padronizados, a tese propõe o emprego de quatro perspectivas de tomada de decisão: hierárquica, igualitária, individualista e de pesos iguais, o que dispensa a incorporação de metodologias de ponderação mais complexas e robustas ao AHP.

As perspectivas hierárquica, igualitária e individualista compõem as perspectivas culturais abordadas na subseção 2.1.1.3. Na perspectiva de pesos iguais trata-se do conceito de sustentabilidade ideal, onde as três dimensões da sustentabilidade são combinadas com a mesma importância (WCED, 1987). O Quadro 15 apresenta os pesos referentes aos cenários estudados. E o Quadro 16 apresenta as tomadas de decisão calculadas pelo modelo proposto.

Quadro 15 – Ponderação das perspectivas de análise do modelo.

Dimensão da Sustentabilidade	Perspectiva Hierárquica	Perspectiva Igualitária	Perspectiva Individualista	Perspectiva de pesos iguais
Ambiental	40%	50%	25%	33,33%
Social	40%	30%	55%	33,33%
Econômica	20%	20%	20%	33,33%

Fonte: O Autor, com base em (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003).

Quadro 16 – Tomadas de decisão (Continua).

Tipo de análise	Tipo de Avaliação	Ambiental			Social								Econômico						
		Danos à saúde humana (DALY)	Danos à diversidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Potencial Salário Justo Ponderado – Homens	Potencial Salário Justo Ponderado – Mulheres	Potencial Salário Justo Ponderado – Brancos	Potencial Salário Justo Ponderado – Não Brancos	Potencial Salário Justo Ponderado – Sindicalizados	Potencial Salário Justo Ponderado – Não	Potencial Salário Justo Ponderado – Formais	Potencial Salário Justo Ponderado – Informais	Custo Total (R\$)	Custo Equipamentos (R\$)	Custo Materiais (R\$)	Custo Mão de Obra (R\$)	Custo Outros (R\$)	
Perspectiva	Hierárquica	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Igualitária	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Individualista	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Pesos iguais	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
Por fase da construção	Infraestrutura	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Superestrutura	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Vedação	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Cobertura	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
	Revestimento	Sustentabilidade	x	x	x	x									x				
Por categoria	Sexo	Sustentabilidade	x	x	x		x	x							x				
	Raça/cor	Sustentabilidade	x	x	x				x	x					x				
	Associativismo	Sustentabilidade	x	x	x						x	x			x				
	Formalidade	Sustentabilidade	x	x	x								x	x	x				
Por dimensão da sustentabilidade	Ambiental hierárquica	Ambiental	x	x	x														
	Ambiental igualitária	Ambiental	x	x	x														
	Ambiental individualista	Ambiental	x	x	x														
	Ambiental com pesos iguais	Ambiental	x	x	x														
	Social	Social					x	x	x	x	x	x	x	x					
	Econômico	Econômica													x	x	x	x	

Fonte: O Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta os resultados do modelo voltado para a identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social sob a ótica do PCV e do AHP.

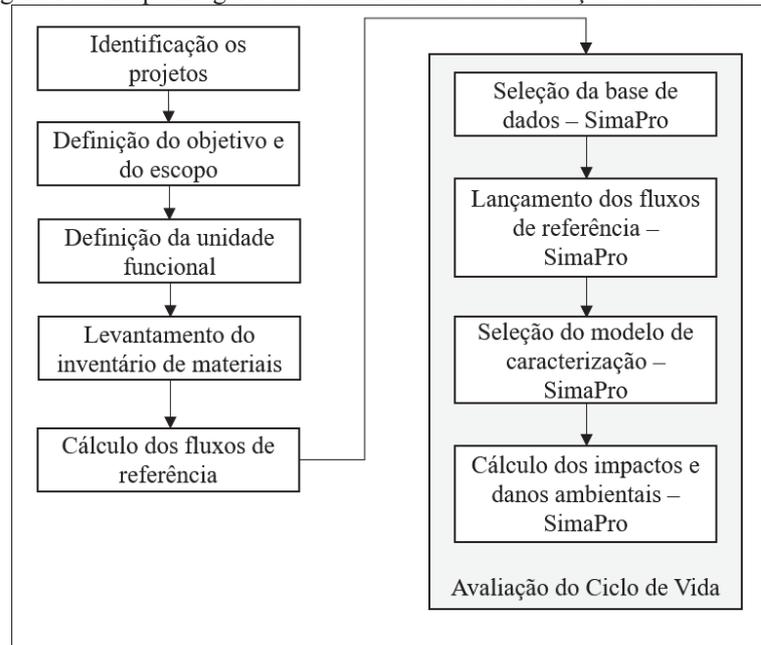
Na subseção 4.1, o PHA e o PHB são avaliados individualmente para cada dimensão da sustentabilidade, ou seja, são apresentados os resultados dos ICVs, AICVs e interpretações para a ACV, a ACVS e o CCV. Na subseção 4.2, o modelo proposto reúne os resultados de tomadas de decisão por meio das quatro perspectivas propostas: hierárquica, igualitária, individualista e de pesos iguais. As análises realizadas apontam qual das alternativas entre o PHA e o PHB apresenta características mais sustentáveis e auxiliam o projetista a realizar suas escolhas.

### 4.1 PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA

#### 4.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida

A Figura 18 apresenta o esquema geral de funcionamento da Avaliação do Ciclo de Vida. E o Quadro 17 contém as avaliações da dimensão ambiental executadas na tese.

Figura 18 – Esquema geral de funcionamento da Avaliação do Ciclo de Vida.



Fonte: O Autor.

Quadro 17 – Avaliação da dimensão ambiental.

<b>ReCiPe 2016</b> <b>Abordagem <i>midpoint</i></b> <b>18 categorias de impacto</b> <b>Perspectiva hierárquica</b>	Análise global: impactos ambientais dos projetos
	Análise global: impactos ambientais por material dos projetos
<b>ReCiPe 2016</b> <b>Abordagem <i>endpoint</i></b> <b>3 categorias de dano</b> <b>Perspectiva hierárquica</b>	Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à saúde humana
	Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade dos ecossistemas
	Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade de recursos
	Danos normalizados dos projetos
	Dano ambiental por fase da construção dos projetos

Fonte: O Autor.

## 4.1.1.1 Inventário do Ciclo de Vida

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam o ICV para o PHA e o PHB. As quantidades de material apresentadas seguem o fluxo de referência do problema, ou seja, o inventário contém a quantidade de material para 1,0 m<sup>2</sup> dos projetos. Os itens seguintes apresentam os resultados das modelagens realizadas no software SimaPro para o PHA e o PHB.

Tabela 1 – ICV do PHA para a unidade funcional definida (Continua).

<b>Material</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Total</b>
Aço (kg/m <sup>2</sup> )	3,91	0,90	0,43	0,69	0,44	6,37
Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,08	0,67	0,01	0,00	0,10	0,86
Madeira (m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> )	0,11	0,00	0,01	0,03	0,00	0,16
Bloco cerâmico maciço (kg/m <sup>2</sup> )	36,92	35,49	0,00	0,00	0,00	72,41
Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m <sup>2</sup> )	13,24	0,00	38,83	4,21	417,79	474,07
Argamassa – cimento e areia (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	102,68	102,68
Bloco cerâmico furado (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	115,34	0,00	0,00	115,34
Vidro (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10
Tinta (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,04	0,25	1,79	2,08
Telha cerâmica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	61,92	0,00	61,92
Piso cerâmico (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	25,38	25,38
Graute (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bloco de concreto (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gesso (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Argamassa colante (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	7,76	7,76
Mármore (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	2,13
Brita (kg/m <sup>2</sup> )	12,76	0,00	0,00	0,00	82,66	95,42

Tabela 1 – ICV do PHA para a unidade funcional definida (Conclusão).

<b>Material</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Total</b>
PVC (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	6,05	6,05
Manta asfáltica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,23
Janela – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04
Porta – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
Porta – madeira (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,21
Massa acrílica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85	1,85

Fonte: O Autor, com base nos projetos e nas planilhas de orçamento.

Tabela 2 – ICV do PHB para a unidade funcional definida (Continua).

<b>Material</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Total</b>
Aço (kg/m <sup>2</sup> )	1,29	0,80	0,90	14,17	0,00	17,16
Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,25
Madeira (m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> )	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Bloco cerâmico maciço (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	13,03	0,00	0,00	13,03
Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	2,63	52,87	4,49	221,80	281,79
Argamassa – cimento e areia (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	1,13	0,00	82,09	83,21
Bloco cerâmico furado (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vidro (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tinta (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45	2,45
Telha cerâmica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	97,93	0,00	97,93
Piso cerâmico (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	21,89	21,89
Graute (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	24,81	50,49	0,00	0,00	75,30
Bloco de concreto (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	31,17	412,35	0,00	3,52	447,03
Gesso (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	52,23	52,23
Argamassa colante (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	6,76	6,76
Mármore (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,48
Brita (kg/m <sup>2</sup> )	143,58	0,00	0,00	0,00	0,00	143,58
PVC (kg/m <sup>2</sup> )	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
Manta asfáltica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Janela – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10
Porta – alumínio (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
Porta – madeira (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,11
Massa acrílica (kg/m <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: O Autor, com base nos projetos e nas planilhas de orçamento.

#### 4.1.1.2 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida e Interpretação

##### 4.1.1.2.1 Abordagem de ponto médio (*midpoint*) – ReCiPe 2016

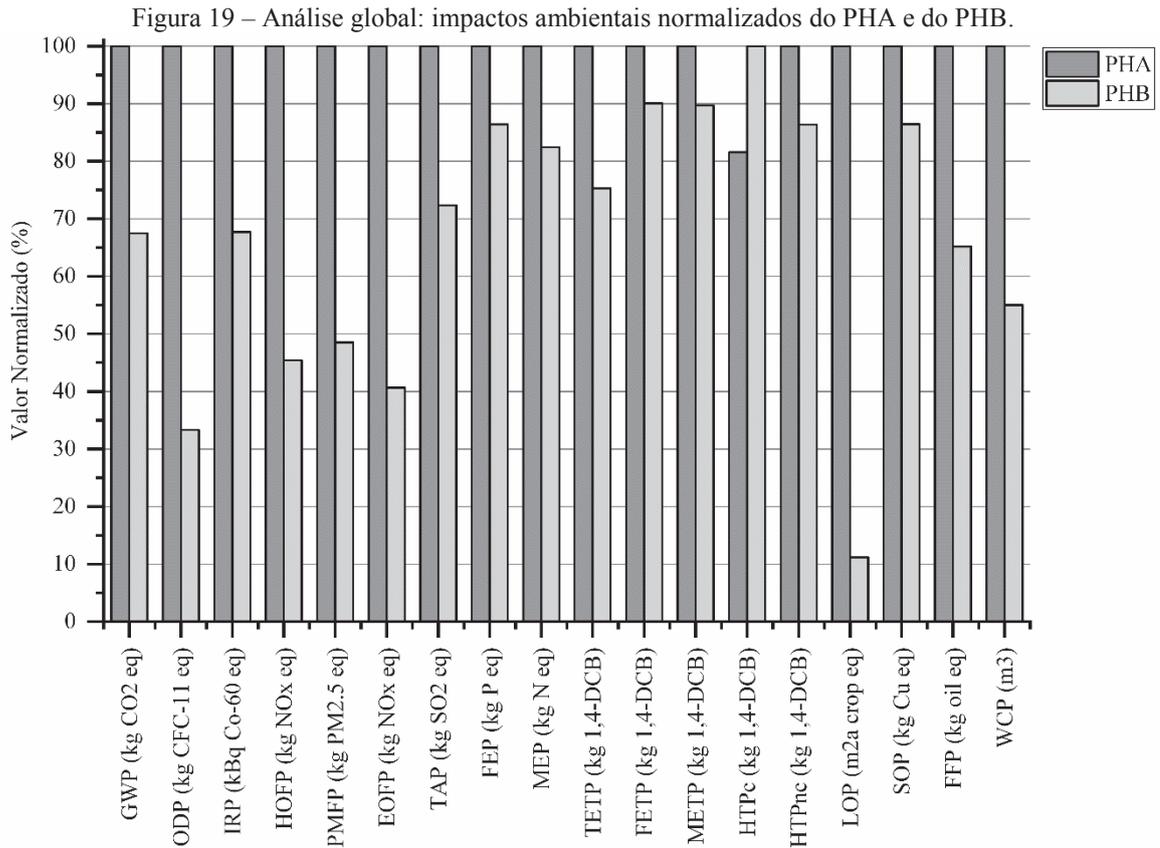
A Tabela 3 contém os valores globais de impactos ambientais por metro quadrado de construção do PHA e do PHB para as categorias de impacto *midpoint*.

Tabela 3 – Análise global: impactos ambientais por m<sup>2</sup> de construção.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Sigla (Unidade)</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Mudanças climáticas	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	957,6666	646,0279
Depleção do ozônio estratosférico	ODP (kg CFC-11 eq)	0,0006	0,0002
Radiação ionizante	IRP (kBq Co-60 eq)	25,3590	17,1717
Formação de ozônio fotoquímico – saúde humana	HOFP (kg NOx eq)	3,1888	1,4490
Formação de material particulado	PMFP (kg PM2.5 eq)	2,1946	1,0647
Formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres	EOFP (kg NOx eq)	3,7021	1,5050
Acidificação terrestre	TAP (kg SO <sub>2</sub> eq)	2,5506	1,8456
Eutrofização em água doce	FEP (kg P eq)	0,1577	0,1363
Eutrofização marinha	MEP (kg N eq)	0,0182	0,0150
Ecotoxicidade terrestre	TETP (kg 1,4-DCB)	1746,1290	1314,3130
Ecotoxicidade em água doce	FETP (kg 1,4-DCB)	12,0716	10,8762
Ecotoxicidade marinha	METP (kg 1,4-DCB)	17,3240	15,5367
Toxicidade humana – cancerígena	HTPc (kg 1,4-DCB)	32,4227	39,7413
Toxicidade humana – não cancerígena	HTPnc (kg 1,4-DCB)	344,0758	297,1238
Ocupação do solo	LOP (m <sup>2</sup> a crop eq)	537,7498	60,0525
Depleção de recursos minerais	SOP (kg Cu eq)	7,8786	6,8102
Depleção de combustíveis fósseis	FFP (kg oil eq)	170,0274	110,8143
Consumo de água	WCP (m <sup>3</sup> )	8,4901	4,6724

Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

A Figura 19 mostra a comparação entre o PHA e o PHB. Verifica-se que, globalmente, a tipologia construtiva do PHA apresenta impactos ambientais superiores à tipologia construtiva do PHB em todas as categorias de impacto de ponto médio, exceto na categoria “Toxicidade humana – cancerígena (HTPc)”, onde PHB possui o maior impacto.

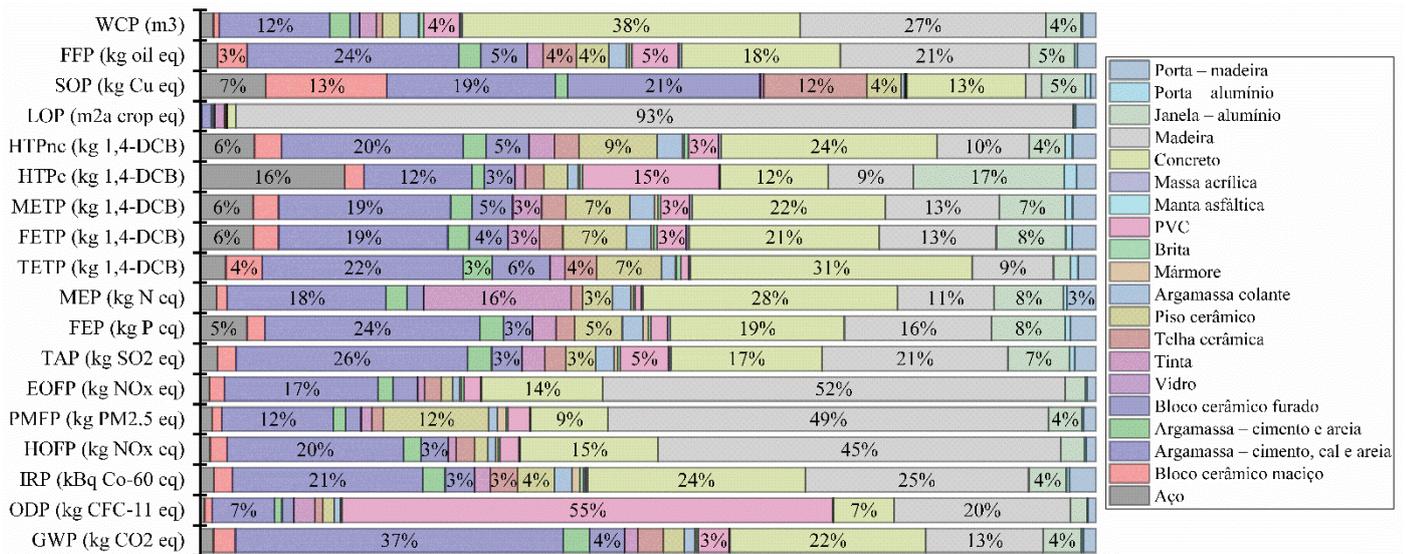


Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Nas categorias de impacto “Depleção do ozônio estratosférico (ODP)”, “Formação de ozônio fotoquímico – saúde humana (HOFP)”, “Formação de material particulado (PMFP)”, “Formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres (EOFP)” e “Ocupação do solo (LOP)”, os impactos gerados pelo PHA superam em mais de 50% os impactos provenientes do PHB.

A Figura 20 e a Figura 21 apresentam a distribuição global dos impactos ambientais de acordo com os materiais presentes no PHA e no PHB, respectivamente.

Figura 20 – Análise global: impactos ambientais por material – PHA.



Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Figura 21 – Análise global: impactos ambientais por material – PHB.



Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Conforme Zampori et al. (2016) e a European Commission (2016), os materiais mais relevantes são aqueles que somados contribuem em 80% dos valores gerados na categoria de impacto analisada (EUROPEAN COMMISSION, 2016; ZAMPORI et al., 2016). Com base na Figura 20 e na Figura 21, o Quadro 18 apresenta os materiais mais relevantes na geração dos impactos ambientais por categoria de impacto para o PHA e o PHB.

Quadro 18 – Análise global: materiais que causaram os maiores impactos por projeto (Continua).

<b>Categoria de impacto</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Mudanças climáticas	Argamassa – cimento, cal e areia (37%) Concreto (22%) Madeira (13%) Bloco cerâmico furado (4%) Janela – alumínio (4%)	Argamassa – cimento, cal e areia (32%) Janela – alumínio (15%) Concreto (9%) Graute (7%) Telha cerâmica (7%) Aço (6%) Bloco de concreto (6%)
Depleção do ozônio estratosférico	PVC (55%) Madeira (20%) Concreto (7%) Argamassa – cimento, cal e areia (7%)	Argamassa – cimento, cal e areia (16%) Janela – alumínio (16%) Tinta (11%) Concreto (8%) PVC (7%) Telha cerâmica (6%) Bloco de concreto (6%) Aço (5%) Graute (5%)
Radiação ionizante	Madeira (25%) Concreto (24%) Argamassa – cimento, cal e areia (21%) Piso cerâmico (4%) Janela – alumínio (4%) Telha cerâmica (3%)	Argamassa – cimento, cal e areia (19%) Bloco de concreto (14%) Janela – alumínio (14%) Concreto (10%) Telha cerâmica (7%) Aço (6%) Piso cerâmico (5%) Graute (5%)
Formação de ozônio fotoquímico – saúde humana	Madeira (45%) Argamassa – cimento, cal e areia (20%) Concreto (15%)	Argamassa – cimento, cal e areia (26%) Janela – alumínio (13%) Concreto (10%) Bloco de concreto (8%) Graute (7%) Telha cerâmica (7%) Aço (7%)
Formação de material particulado	Madeira (49%) Argamassa – cimento, cal e areia (12%) Piso cerâmico (12%) Concreto (9%)	Piso cerâmico (21%) Janela – alumínio (18%) Argamassa – cimento, cal e areia (15%) Aço (8%) Madeira (6%) Concreto (5%) Graute (5%)
Formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres	Madeira (52%) Argamassa – cimento, cal e areia (17%) Concreto (14%)	Argamassa – cimento, cal e areia (25%) Janela – alumínio (13%) Concreto (10%) Bloco de concreto (8%) Telha cerâmica (7%) Madeira (7%) Aço (7%) Graute (6%)
Acidificação terrestre	Argamassa – cimento, cal e areia (26%) Madeira (21%) Concreto (27%) Janela – alumínio (7%) PVC (5%) Piso cerâmico (3%) Tinta (3%)	Janela – alumínio (22%) Argamassa – cimento, cal e areia (21%) Graute (8%) Aço (7%) Concreto (7%) Bloco de concreto (6%) Telha cerâmica (5%)
Eutrofização em água doce	Argamassa – cimento, cal e areia (24%) Concreto (19%) Madeira (16%) Janela – alumínio (8%) Aço (5%) Piso cerâmico (5%)	Janela – alumínio (22%) Aço (16%) Argamassa – cimento, cal e areia (16%) Bloco de concreto (7%) Concreto (7%) Graute (6%) Piso cerâmico (5%)
Eutrofização marinha	Concreto (28%) Argamassa – cimento, cal e areia (18%) Tinta (16%) Madeira (11%) Janela – alumínio (8%)	Tinta (24%) Janela – alumínio (22%) Argamassa – cimento, cal e areia (13%) Concreto (10%) Aço (6%)

Quadro 18 – Análise global: materiais que causaram os maiores impactos por projeto (Conclusão).

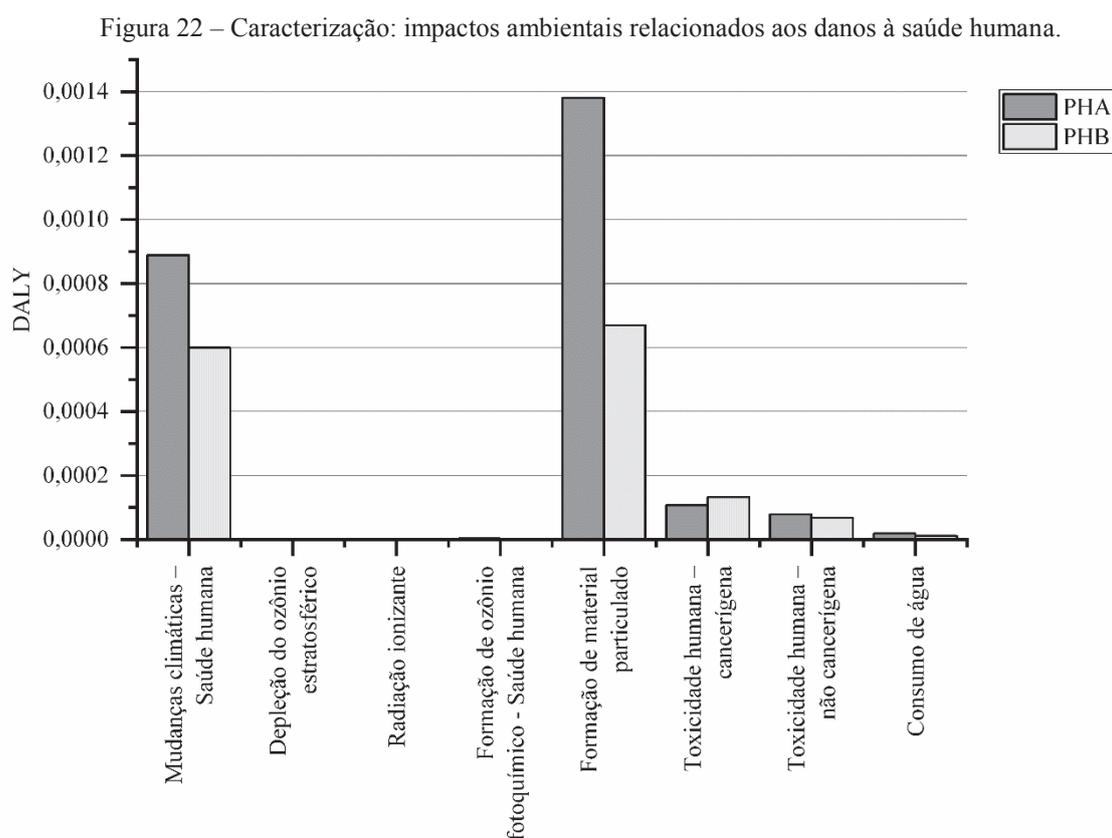
<b>Categoria de impacto</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Ecotoxicidade terrestre	<p>Concreto (31%)  Argamassa – cimento, cal e areia (22%)  Madeira (9%)  Piso cerâmico (7%)  Bloco cerâmico furado (6%)  Bloco cerâmico maciço (4%)  Telha cerâmica (4%)</p>	<p>Argamassa – cimento, cal e areia (18%)  Bloco de concreto (14%)  Concreto (12%)  Aço (10%)  Piso cerâmico (8%)  Telha cerâmica (7%)  Janela – alumínio (6%)</p>
Ecotoxicidade em água doce	<p>Concreto (21%)  Argamassa – cimento, cal e areia (19%)  Madeira (13%)  Janela – alumínio (8%)  Piso cerâmico (7%)  Aço (6%)  Bloco cerâmico furado (4%)</p>	<p>Janela – alumínio (20%)  Aço (18%)  Argamassa – cimento, cal e areia (12%)  Bloco de concreto (9%)  Piso cerâmico (7%)  Concreto (7%)  Tinta (5%)  Telha cerâmica (5%)</p>
Ecotoxicidade marinha	<p>Concreto (22%)  Argamassa – cimento, cal e areia (19%)  Madeira (13%)  Piso cerâmico (7%)  Janela – alumínio (7%)  Aço (6%)  Bloco cerâmico furado (5%)</p>	<p>Janela – alumínio (19%)  Aço (18%)  Argamassa – cimento, cal e areia (13%)  Bloco de concreto (10%)  Piso cerâmico (7%)  Concreto (7%)  Telha cerâmica (5%)</p>
Toxicidade humana – cancerígena	<p>Janela – alumínio (17%)  Aço (16%)  PVC (15%)  Argamassa – cimento, cal e areia (12%)  Concreto (12%)  Madeira (9%)</p>	<p>Aço (36%)  Janela – alumínio (32%)  Argamassa – cimento, cal e areia (6%)  Bloco de concreto (6%)</p>
Toxicidade humana – não cancerígena	<p>Concreto (24%)  Argamassa – cimento, cal e areia (20%)  Madeira (10%)  Piso cerâmico (9%)  Aço (6%)  Bloco cerâmico furado (5%)  Janela – alumínio (4%)</p>	<p>Aço (19%)  Argamassa – cimento, cal e areia (14%)  Bloco de concreto (11%)  Janela – alumínio (11%)  Piso cerâmico (9%)  Concreto (8%)  Telha cerâmica (5%)  Graute (5%)</p>
Ocupação do solo	<p>Madeira (93%)</p>	<p>Madeira (48%)  Porta – madeira (11%)  Tinta (11%)  Porta – alumínio (7%)  Argamassa – cimento, cal e areia (6%)</p>
Depleção de recursos minerais	<p>Bloco cerâmico furado (21%)  Argamassa – cimento, cal e areia (19%)  Bloco cerâmico maciço (13%)  Concreto (13%)  Telha cerâmica (12%)</p>	<p>Aço (23%)  Telha cerâmica (21%)  Argamassa – cimento, cal e areia (13%)  Janela – alumínio (13%)  Graute (8%)</p>
Depleção de combustíveis fósseis	<p>Argamassa – cimento, cal e areia (24%)  Madeira (21%)  Concreto (18%)  Bloco cerâmico furado (5%)  PVC (5%)  Telha cerâmica (4%)  Piso cerâmico (4%)</p>	<p>Argamassa – cimento, cal e areia (22%)  Janela – alumínio (18%)  Telha cerâmica (9%)  Concreto (8%)  Aço (8%)  Graute (6%)  Bloco de concreto (6%)</p>
Consumo de água	<p>Concreto (38%)  Madeira (27%)  Argamassa – cimento, cal e areia (12%)  Janela – alumínio (4%)</p>	<p>Concreto (20%)  Janela – alumínio (17%)  Bloco de concreto (16%)  Argamassa – cimento, cal e areia (13%)  Aço (7%)  Tinta (4%)</p>

Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Verifica-se, por intermédio do Quadro 18, que no PHA, os materiais recorrentes na geração dos impactos são “Argamassa – cimento, cal e areia”, “Concreto” e “Madeira”. No PHB, os materiais recorrentes na geração de impacto são “Argamassa – cimento, cal e areia” e “Aço” e “Janela – alumínio”.

#### 4.1.1.2.2 Abordagem de ponto final (*endpoint*) – ReCiPe 2016

Na abordagem *endpoint*, o método ReCiPe 2016 considera que o dano à saúde humana é causado pelas categorias de impacto: “Mudanças climáticas – Saúde humana”, “Depleção do ozônio estratosférico”, “Radiação ionizante”, “Formação de ozônio fotoquímico – Saúde humana”, “Formação de material particulado”, “Toxicidade humana – cancerígena”, “Toxicidade humana – não cancerígena” e “Consumo de água” (HUIJBREGTS et al., 2017). A Figura 22 apresenta os impactos ambientais relacionados aos “Danos à saúde humana”.



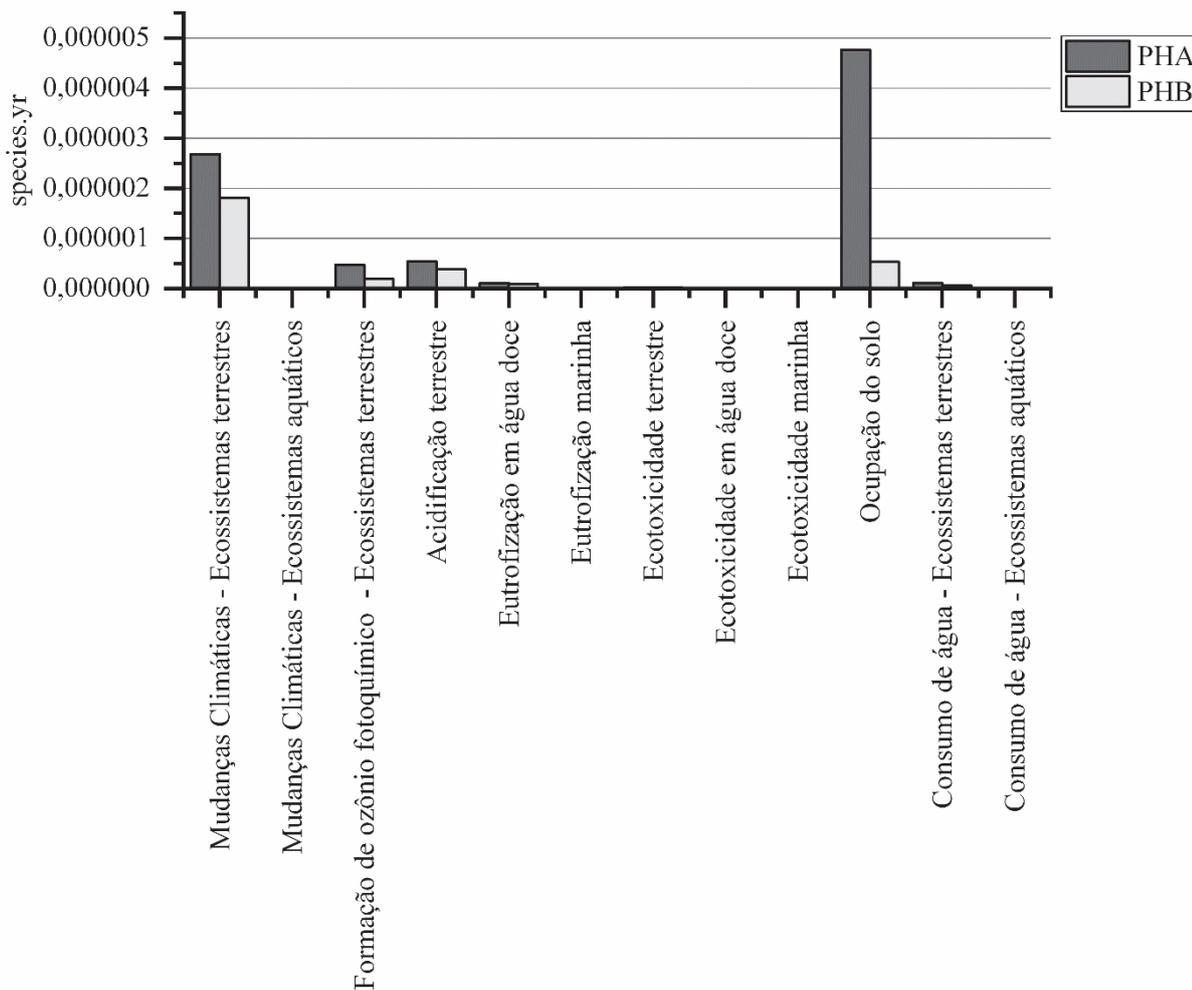
Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Conforme mostrado na Figura 22, as categorias que geram maior impacto à saúde humana são “Mudanças climáticas – Saúde Humana” e “Formação de material particulado”

tanto para o PHA como para o PHB. Nessas duas categorias, o PHA possui maior impacto à saúde humana do que o PHB. O dano total causado pelo PHA é igual a 0,0025 *Disability-Adjusted Life Year* (DALY) e pelo PHB é igual 0,0015 DALY. Esses valores representam os anos perdidos por incapacidade gerados pelas categorias de impacto.

No dano à disponibilidade dos ecossistemas, o método ReCiPe 2016 assume que os danos são causados pelas categorias de impacto: “Mudanças Climáticas – Ecossistemas terrestres”, “Mudanças Climáticas – Ecossistemas aquáticos”, “Formação de ozônio fotoquímico – Ecossistemas terrestres”, “Acidificação terrestre”, “Eutrofização em água doce”, “Eutrofização marinha”, “Ecotoxicidade terrestre”, “Ecotoxicidade em água doce”, “Ecotoxicidade marinha”, “Ocupação do solo”, “Consumo de água – Ecossistemas terrestres”, e “Consumo de água – Ecossistemas aquáticos” (HUIJBREGTS et al., 2017). A Figura 23 apresenta os impactos ambientais relacionados aos “Danos à disponibilidade dos ecossistemas”.

Figura 23 – Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade dos ecossistemas.

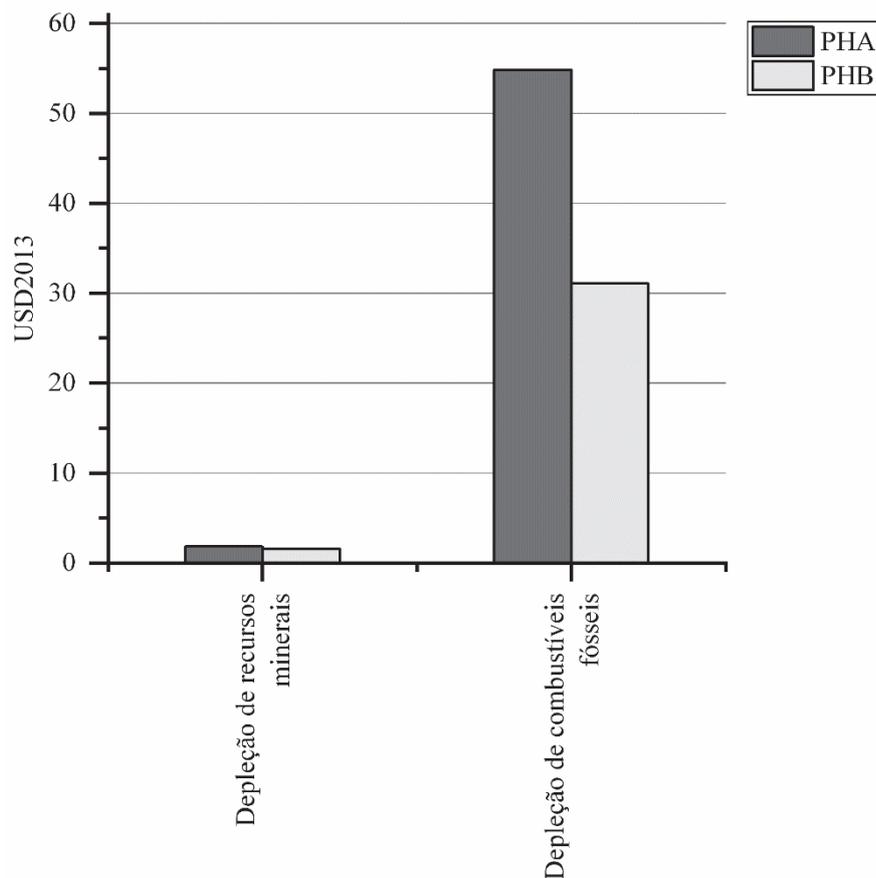


Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

De acordo com a Figura 23, as categorias que geram maior impacto à disponibilidade dos ecossistemas são “Mudanças Climáticas – Ecossistemas terrestres” e “Ocupação do solo”, para o PHA e o PHB. O impacto ambiental total obtido foi de  $8,72E-06$  *species.yr* (espécies desaparecendo durante um ano) para o PHA e de  $3,11E-06$  *species.yr* para o PHB. Observa-se que para a categoria “Ocupação do solo”, o PHA apresentou um impacto de  $4,77E-06$  *species.yr*, valor superior ao impacto do PHB que foi de  $5,33E-07$  *species.yr*.

No dano à disponibilidade de recursos, o método ReCiPe 2016 considera que os danos são causados pelas categorias de impacto: “Depleção de recursos minerais” e “Depleção de combustíveis fósseis” (HUIJBREGTS et al., 2017). A Figura 24 apresenta os impactos ambientais relacionados aos “Danos à disponibilidade de recursos”. O impacto ambiental total obtido foi de 56,63 USD2013 (dólares americanos no ano 2013) para o PHA e de 32,63 USD2013 para o PHB.

Figura 24 – Caracterização: impactos ambientais relacionados aos danos à disponibilidade de recursos.



Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Verifica-se na Figura 24 que a categoria “Depleção de combustíveis fósseis” é predominante na geração de impactos tanto para o PHA quanto para o PHB. Observa-se que o PHA apresenta um impacto de 54,80 USD2013, superior ao valor de o PHB que é de 31,05 USD2013.

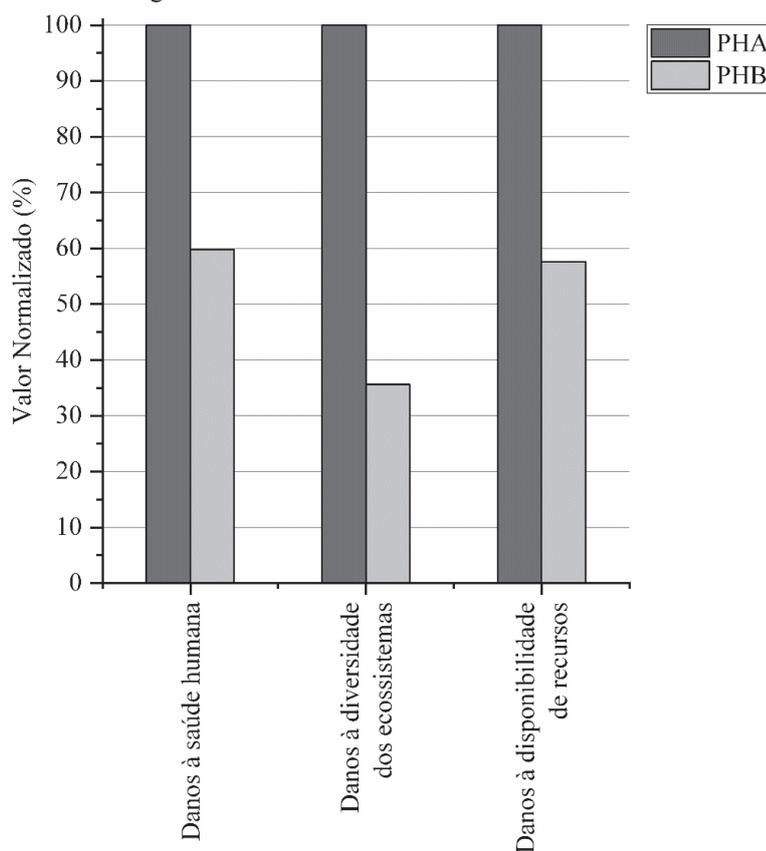
Na análise global dos danos, verifica-se que o PHA apresenta maior geração de danos à saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos, isso pode ser visto na Tabela 4 e na Figura 25.

Tabela 4 – Análise global: danos ambientais por m<sup>2</sup> de construção.

<b>Categoria de dano</b>	<b>Sigla (Unidade)</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Danos à saúde humana	HH (DALY)	0,0024	0,0014
Danos à disponibilidade dos ecossistemas	ED (species.yr)	8,72E-06	3,11E-06
Danos à disponibilidade de recursos	RA (USD2013)	56,63	32,63

Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

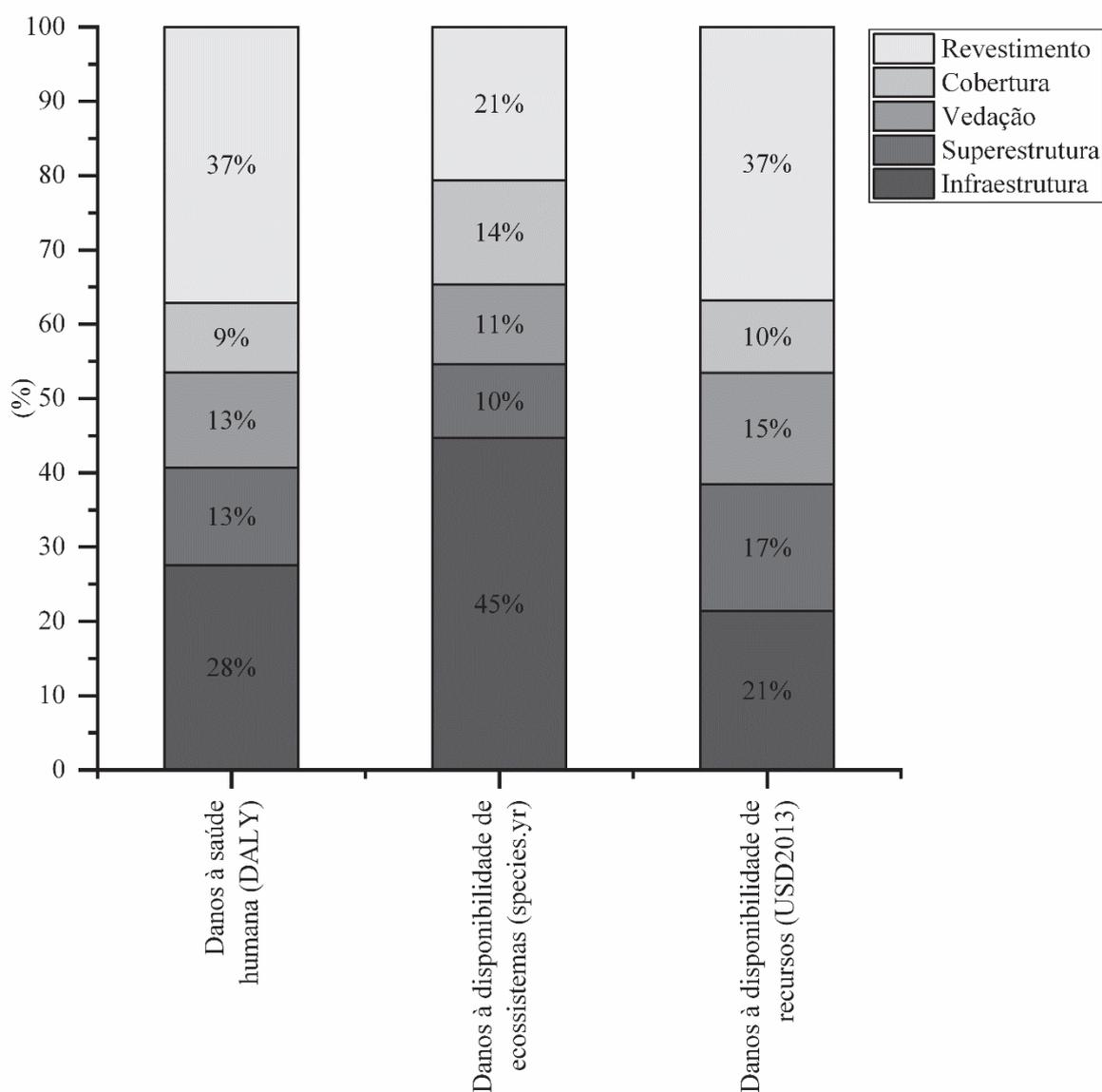
Figura 25 – Danos normalizados do PHA e do PHB.



Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Verifica-se também, a contribuição de cada uma das fases da construção do PHA e do PHB. A Figura 26 apresenta os danos ambientais por fase de construção do PHA.

Figura 26 – Dano ambiental por fase da construção – PHA.

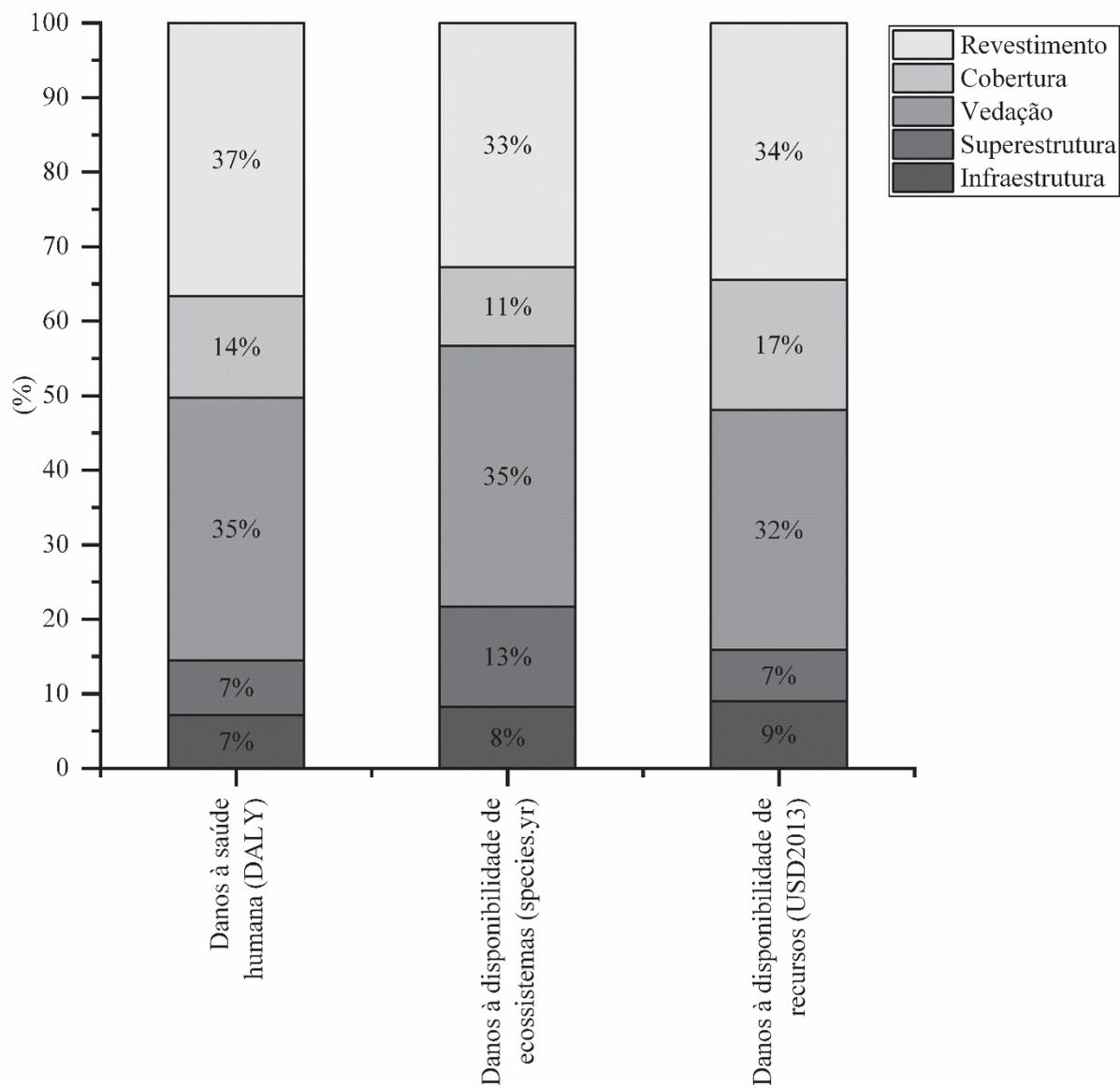


Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

No PHA, como mostra a Figura 26, as fases infraestrutura e revestimento apresentam a maior geração de danos ambientais. A fase de revestimento possui os maiores danos nas categorias “Danos à saúde humana (HH)” (37%) e “Danos à disponibilidade de recursos (RA)” (37%). A fase de infraestrutura tem os maiores danos na categoria “Danos à diversidade dos ecossistemas” (ED) (45%).

A Figura 27 apresenta os danos ambientais por fase de construção do PHB.

Figura 27 – Dano ambiental por fase da construção – PHB.



Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

No PHB, como mostra a Figura 27, as fases de vedação e revestimento apresentam a maior geração de danos ambientais. A fase de revestimento possui os maiores danos nas categorias “Danos à saúde humana (HH)” (37%) e “Danos à disponibilidade de recursos (RA)” (35%). A fase de vedação tem os maiores danos na categoria “Danos à diversidade dos ecossistemas” (ED) (35%).

Relacionando os resultados das abordagens *midpoint* e *endpoint*, combinam-se os resultados obtidos pelo Quadro 18 e pela Figura 26, e verifica-se que, no PHA, os materiais que geraram os maiores impactos ambientais (“Argamassa – cimento, cal e areia”, “Concreto” e “Madeira”) estão em maior quantidade nas fases infraestrutura e revestimento. Combinam-se

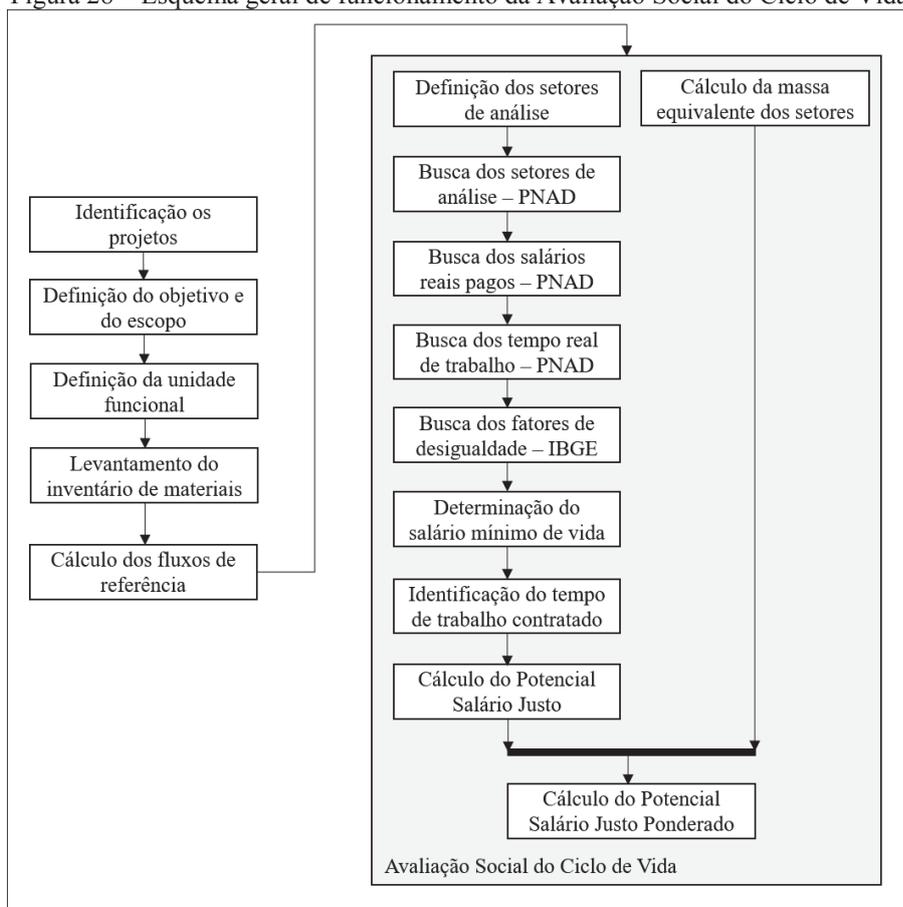
também os resultados obtidos pelo Quadro 18 e pela Figura 27, e verifica-se que, no PHB, os maiores geradores de impactos (“Argamassa – cimento, cal e areia” e “Janela – alumínio) estão empregados nas fases de vedação e revestimento.

De acordo com os resultados apresentados, a avaliação ambiental aponta que, as fases de infraestrutura e revestimento do PHA e as fases de vedação e revestimento do PHB são potenciais pontos de modificação e melhoria que devem ser consideradas pelo projetista na busca por um projeto ambientalmente mais adequado.

#### 4.1.2 Avaliação Social do Ciclo de Vida

A Figura 28 apresenta o esquema geral de funcionamento da Avaliação Social do Ciclo de Vida. O Quadro 19 contém as avaliações da dimensão social executadas na tese.

Figura 28 – Esquema geral de funcionamento da Avaliação Social do Ciclo de Vida.



Fonte: O Autor.

Quadro 19 – Avaliação da dimensão social.

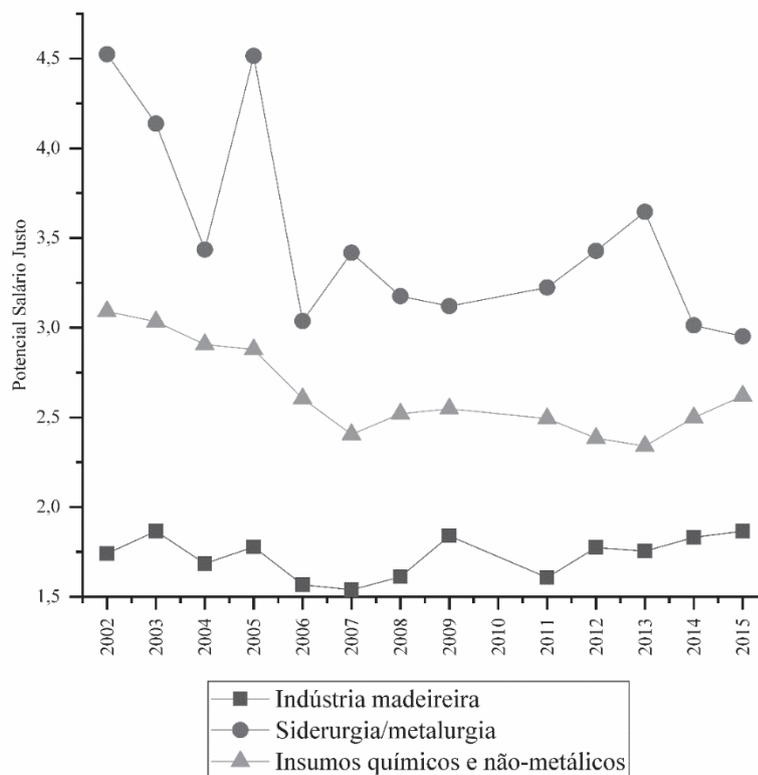
<b>Potencial Salário Justo</b>	Análise por setor	Indústria madeireira
		Indústria siderúrgica
		Indústria de insumos químicos e não-metálicos
	Trabalhadores por categoria	Sexo
		Raça/cor
Associativismo		
Formalidade		
Análise de sensibilidade do potencial salário justo		
<b>Potencial Salário Justo Ponderado</b>	Análise global dos projetos	
	Fase de construção	Infraestrutura
		Superestrutura
		Vedação
		Cobertura
		Revestimento

Fonte: O Autor.

## 4.1.2.1 Potencial Salário Justo

O PSJ para a indústria madeireira, indústria siderúrgica e indústria de insumos químicos e não-metálicos foi calculado de 2002 a 2015 e pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 – Potencial Salário Justo por setor.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

A Figura 29 mostra que os três setores apresentaram PSJ superior a um; isso significa que todos pagaram salários justos. A Tabela 5 mostra o PSJ médio para o período analisado.

Tabela 5 – Valores médios de 2002 a 2015.

Setor	Salários Reais (SR) (R\$/mês)	Tempo Real de Trabalho (TRT) (horas/semana)	PSJ Médio
<b>Indústria Madeireira*</b>	721,28	40,31	1,72
<b>Indústria Siderúrgica*</b>	1509,08	43,06	3,36
<b>Insumos químicos e não-metálicos*</b>	1148,79	43,15	2,55

\* Valores médios de 2002 a 2015: Índice Gini médio brasileiro igual a 0,547. O salário mínimo médio vigente no Brasil é igual a R\$ 459,00.

Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

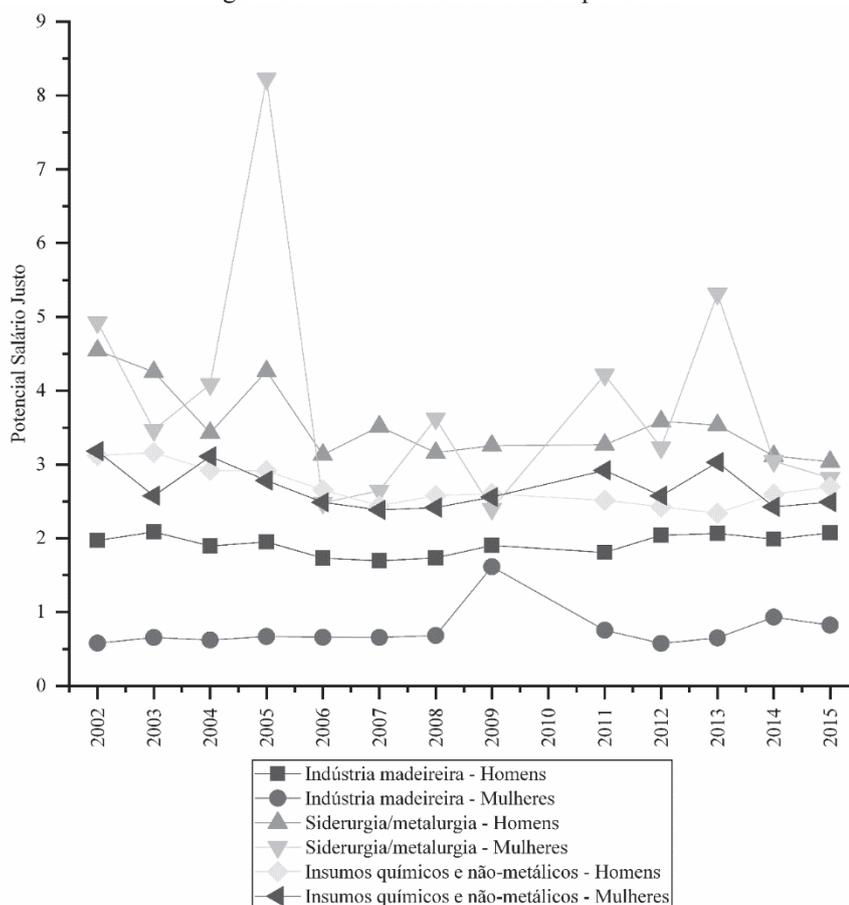
Considerando os SR pagos pelos setores, os salários mais altos foram pagos pela indústria siderúrgica, seguidos pela indústria de insumos químicos e não-metálicos e pela indústria madeireira. Em termos de TRT, todos os setores trabalharam menos do que a jornada de trabalho brasileira típica de quarenta e quatro horas; no entanto, a indústria de insumos químicos e não-metálicos trabalhou mais horas, seguidos pela indústria siderúrgica e pela indústria madeireira. Verificou-se que o PSJ é maior na indústria siderúrgica, seguido pela indústria de insumos químicos e não-metálicos e indústria madeireira.

#### 4.1.2.1.1 Potencial Salário Justo – Trabalhadores por categoria

Com a análise da categoria de partes interessadas “trabalhador” e a subcategoria de impacto “salário justo” por meio do potencial salário justo, torna-se possível refletir outras subcategorias de impacto. Este item apresenta a análise do potencial salário justo para os setores indústria madeireira, indústria siderúrgica e indústria de insumos químicos e não-metálicos, considerando os trabalhadores por categorias. O estudo dividiu os dados sociais em categorias sociais: sexo do trabalhador, raça/cor do trabalhador, associativismo e formalidade do trabalhador.

A Figura 30 apresenta o potencial salário justo por sexo, apontando as diferenças entre o potencial salário justo para trabalhadores homens e trabalhadoras mulheres.

Figura 30 – Potencial Salário Justo por sexo.

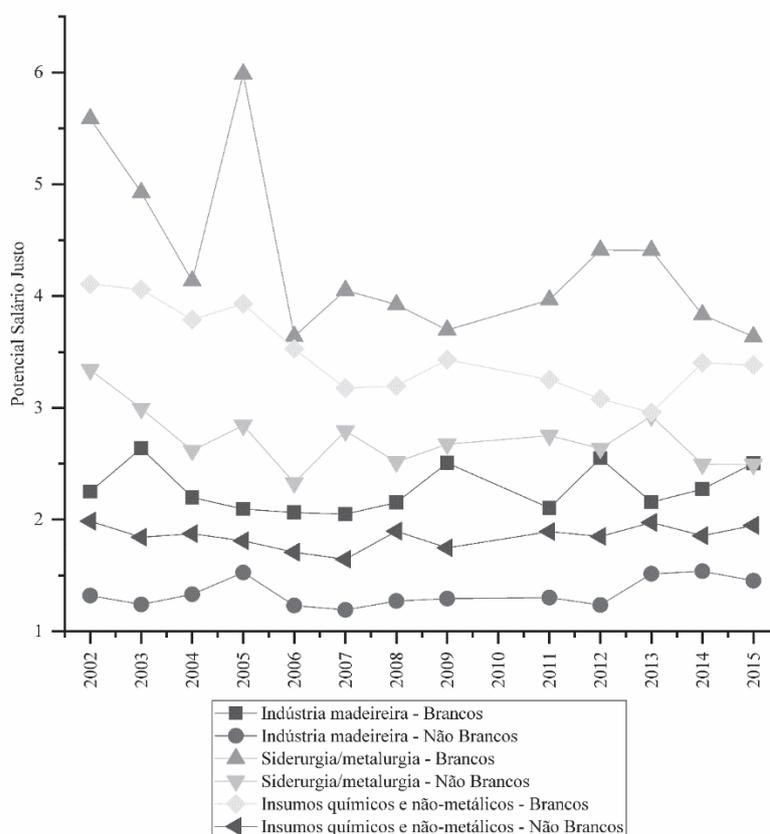


Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

A Figura 30 mostra que, para trabalhadores homens e trabalhadoras mulheres, todos os salários pagos podem ser considerados justos em todo o período analisado, exceto para as trabalhadoras da indústria madeireira que receberam salários injustos em quase todo o período. No setor da indústria madeireira, os trabalhadores homens tinham um maior potencial salário justo do que as trabalhadoras mulheres. Na indústria siderúrgica e na indústria de insumos químicos e não-metálicos, houve variação do maior potencial salário justo entre trabalhadores homens e trabalhadoras mulheres.

A Figura 31 apresenta o potencial salário justo por raça/cor, indicando as diferenças entre o potencial salário justo para trabalhadores brancos e não brancos.

Figura 31 – Potencial Salário Justo por raça/cor.

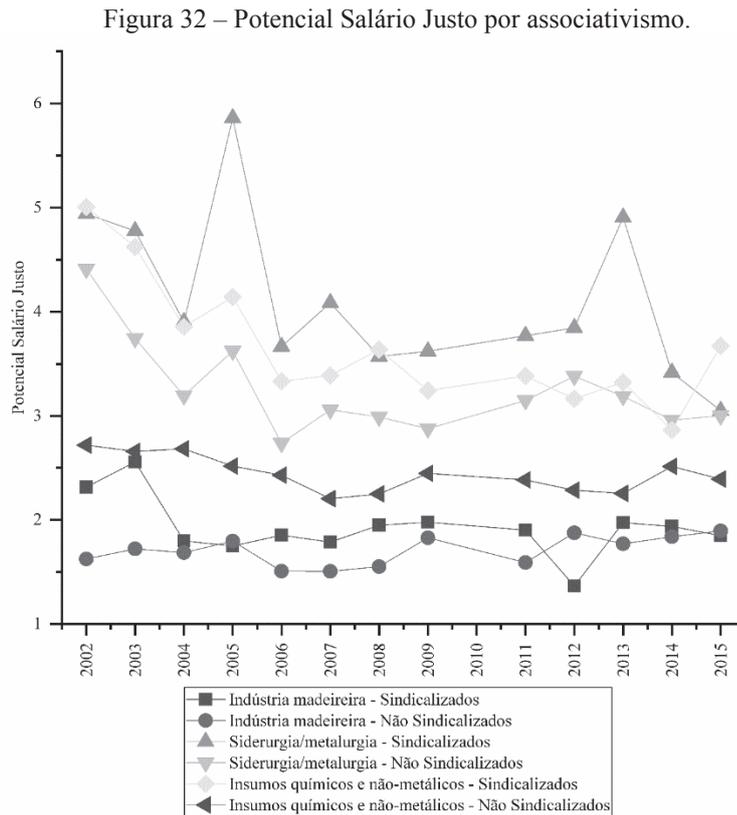


Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

A Figura 31 mostra que trabalhadores brancos e não brancos apresentaram potencial salário justo que pode ser considerado justo em todo o período analisado. No entanto, em todos os setores, os trabalhadores brancos apresentaram maior potencial salário justo do que os trabalhadores não brancos. Do ponto de vista da subcategoria “igualdade de oportunidades/discriminação”, todos têm o direito de serem tratados de maneira justa e ter acesso à igualdade de oportunidades. A igualdade de oportunidades ou o princípio da não discriminação enfatiza que oportunidades e distribuição de recursos devem estar disponíveis gratuitamente a todos os cidadãos, independentemente de sexo ou raça/cor (NORRIS et al., 2013). De acordo com a Figura 30 e a Figura 31, os setores indústria madeireira, indústria siderúrgica e indústria de insumos químicos e não-metálicos apresentam diferenças significativas entre o potencial salário justo nas categorias sexo e raça/cor. Como o potencial salário justo relaciona os salários reais pagos aos trabalhadores e o tempo real trabalhado por eles, pode haver uma discrepância entre essas variáveis para trabalhadores homens e trabalhadoras mulheres, e também para trabalhadores brancos e não brancos. Trabalhadores com os menores valores de potencial salário justo, provavelmente, trabalharão mais horas,

receberão menores salários ou as duas situações acontecerão simultaneamente. Isso pode caracterizar a existência de discriminação direta ou indireta.

A Figura 32 apresenta o potencial salário justo por associativismo dos trabalhadores, apresentam-se as diferenças entre o potencial salário justo para trabalhadores sindicalizados e não sindicalizados.



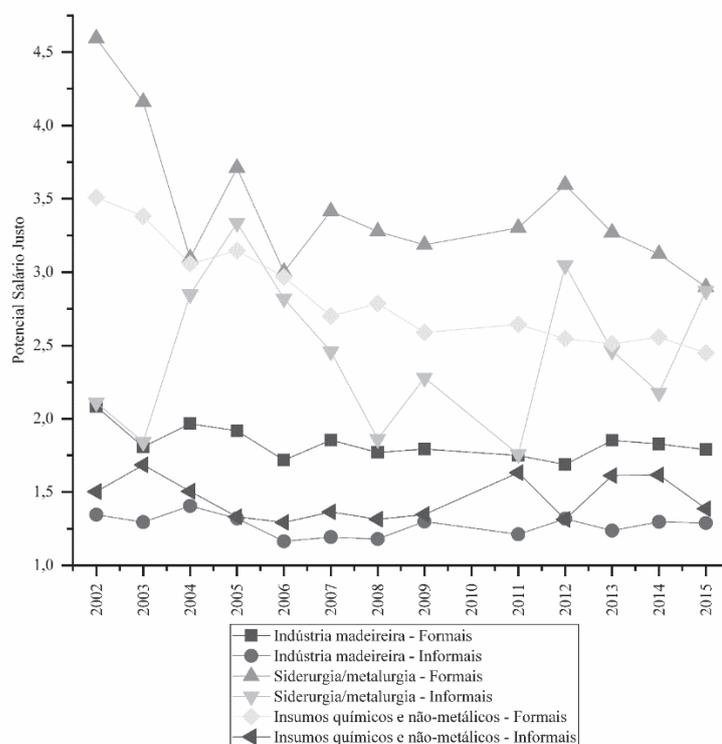
Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Na Figura 32, trabalhadores sindicalizados e não sindicalizados apresentaram potencial salário justo que pode ser considerado justo ao longo do período analisado. No setor da indústria madeireira, houve uma alternância do maior potencial salário justo entre trabalhadores sindicalizados e não sindicalizados. Nos setores indústria siderúrgica e indústria de insumos químicos e não-metálicos, os trabalhadores sindicalizados apresentaram um maior potencial salário justo do que os trabalhadores não sindicalizados em todo o período. Dada a subcategoria de impacto “liberdade de associação e negociação coletiva”, todos os trabalhadores e empregadores têm o direito de estabelecer e ingressar em organizações de sua escolha, sem autorização prévia, para promover e defender seus respectivos interesses e negociar coletivamente com outras partes. Eles devem ser capazes de fazer isso livremente, sem

interferência de outras partes ou do Estado, e a discriminação não deve ser o resultado dessa associação sindical (NORRIS et al., 2013). A Figura 32 mostra que há uma diferença no potencial salário justo entre trabalhadores sindicalizados e não sindicalizados. Possivelmente, trabalhadores não sindicalizados trabalham mais horas do que seus empregos permitem, ganham salários inferiores à posição que desempenham ou ambas as situações acontecem simultaneamente. Isso pode indicar que a união de sindicatos, associações e grupos de trabalhadores pode fortalecer sua luta por direitos e condições de trabalho adequadas.

A Figura 33 apresenta o potencial salário justo por formalidade do trabalhador e apontam-se as diferenças entre o potencial salário justo dos trabalhadores formais e informais.

Figura 33 – Potencial Salário Justo por formalidade.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Quanto à formalidade do trabalho, a Figura 33 mostra que tanto os trabalhadores formais quanto os informais apresentaram potencial salário justo que pode ser considerado justo durante todo o período analisado. Em todos os setores, os trabalhadores formais tiveram um maior potencial salário justo do que os trabalhadores informais ao longo do período. Considerando a subcategoria de impacto “benefícios sociais/segurança social”, os benefícios sociais referem-se à remuneração não monetária do emprego e a seguridade social gera quatro categorias básicas de benefícios: benefícios de aposentadoria, invalidez, aos dependentes e aos sobreviventes

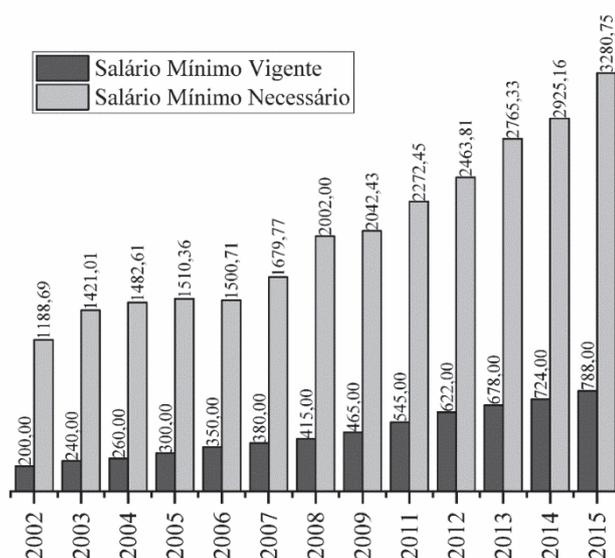
(NORRIS et al., 2013). É possível que os trabalhadores informais trabalhem mais horas, recebam menores salários ou ambas as situações ocorram simultaneamente. Como os trabalhadores informais não têm direito a benefícios sociais do trabalho com carteira assinada, assim, em caso de acidente, lesão, morte ou aposentadoria, esses trabalhadores podem não ter renda suficiente para garantir condições básicas de vida para si e suas famílias.

Além da discriminação e poder de barganha dos trabalhadores por meio dos sindicatos, a variação nos salários pagos pode estar relacionada a outros fatores. Existem diferenças decorrentes das diferentes capacidades produtivas dos trabalhadores, uma vez que não há homogeneidade nas características produtivas dos indivíduos, portanto, haveria vários mercados de trabalho, definidos de acordo com as diversas especialidades; então, é possível que haja dispersão salarial entre trabalhadores na mesma ocupação. Também há a escolaridade que pode aumentar o fluxo de renda; um aumento no nível de conhecimento altera a capacidade produtiva dos trabalhadores, aumentando sua eficiência e desenvolvendo habilidades que lhes permitam realizar atividades que agregam mais valor e melhor remuneração. Uma indústria com forte poder de mercado para fixar preços pode controlar suas margens de lucro e, conseqüentemente, repassar aumentos salariais aos preços. Portanto, as empresas podem optar por pagar salários mais altos que o mercado, porque essa prática aumentaria a produtividade de seus funcionários. O governo também pode intervir no processo de fixação de salários para corrigir falhas do mercado ou influenciar a distribuição de renda. Os instrumentos comumente utilizados são o salário mínimo e o estabelecimento de regras de correção salarial, estas últimas principalmente quando o processo inflacionário avança.

#### 4.1.2.1.2 Análise de sensibilidade do potencial salário justo

No cálculo do PSJ, verifica-se que a variável Salário Mínimo de Vida (SMV) é um valor de referência, pois como já apresentado na subseção 2.1.2.2, o salário mínimo definido pela legislação pode não oferecer garantias quanto ao nível de segurança financeira necessária aos trabalhadores. O Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE) calcula o salário mínimo necessário para atender as necessidades básicas do trabalhador e sua família com base no Decreto Lei nº 399 de 1938, que estabelece que o gasto com alimentação de um trabalhador adulto não pode ser inferior ao custo da Cesta Básica de Alimentos (BRASIL, 2019; DIEESE, 2019). A Figura 34 apresenta um comparativo entre o salário mínimo vigente no Brasil e o salário mínimo necessário calculado pelo DIEESE.

Figura 34 – Salário mínimo vigente no Brasil × Salário mínimo segundo DIEESE.



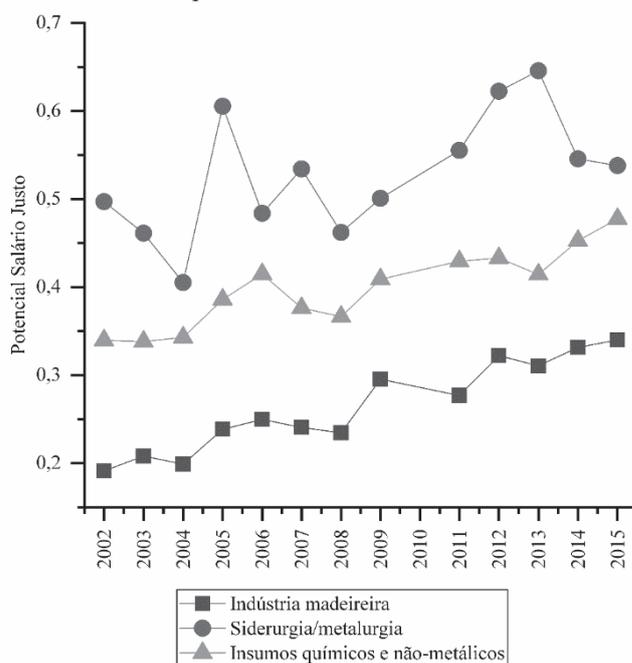
Fonte: Adaptado de DIEESE (2019).

Verifica-se por intermédio da Figura 34, que o salário mínimo vigente no Brasil é demasiadamente baixo quando comparado ao salário mínimo necessário para atender as necessidades básicas do trabalhador e sua família.

Na Figura 35, recalcula-se o PSJ para a indústria madeireira, indústria siderúrgica e indústria de insumos químicos e não-metálicos de 2002 a 2015, substituindo-se o valor do salário mínimo vigente no Brasil pelo salário mínimo necessário calculado pelo DIEESE. Analisando a Figura 29 e a Figura 35, constata-se que comparar os SR pagos aos trabalhadores ao salário mínimo vigente no Brasil, faz com que os SR pagos pareçam mais justos do que eles realmente são. Quando o SMV é modificado, o PSJ torna-se inferior a um em todos os anos, ou seja, isso significa que os SR pagos aos trabalhadores dos setores apresentam-se injustos em relação ao salário mínimo necessário no período e a quantidade média de horas trabalhadas.

Esses resultados apontam que o PSJ pode ser uma boa referência para a análise social entre os setores, entretanto, deve-se ter cautela na definição do significado de salários justos ou injustos. O PSJ é sensível ao salário de referência com o qual os salários pagos são relacionados.

Figura 35 – Potencial Salário Justo por setor: salário mínimo necessário calculado pelo DIEESE.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD e do DIEESE.

#### 4.1.2.2 Potencial Salário Justo Ponderado

O PSJ já calculado, não admite uma relação direta com a unidade funcional do problema. Para relacionar a unidade funcional ao PSJ, este estudo propõe o Potencial Salário Justo Ponderado (PSJP) como uma alternativa para relacionar o inventário de material aos dados sociais do setor.

O PSJP condensa em um valor único os materiais utilizados nos projetos e a situação social dos trabalhadores nos setores envolvidos, viabilizando a comparação entre os projetos. É possível avaliar qual projeto tem as melhores características sociais.

A partir do inventário de materiais dos projetos, foi possível calcular a variável Massa Equivalente do Setor (MES) mostrada no Quadro 20. O inventário de materiais foi construído com base na unidade funcional estabelecida; portanto, a variável MES representa a quantidade de material pertencente a 1,0 m<sup>2</sup> de construção.

Quadro 20 – Massa Equivalente dos Setores.

	<b>Indústria Madeireira</b>	<b>Indústria Siderúrgica</b>	<b>Indústria de insumos químicos e não-metálicos</b>
<b>PHA</b>	3,864%	0,795%	95,341%
<b>PHB</b>	0,316%	1,851%	97,833%

Fonte: O Autor, com base nos dados dos projetos, planilhas de orçamentos e IBGE (2010).

De acordo com a variável MES (Quadro 20), tanto no PHA como no PHB, a maioria dos materiais pertence ao setor indústria de insumos químicos e não-metálicos. Na sequência, o PHA apresenta mais materiais da indústria madeireira, seguido pela indústria siderúrgica. E o PHB apresenta mais material da indústria siderúrgica seguido pela indústria madeireira. A Figura 36 apresenta os valores de PSJP global.

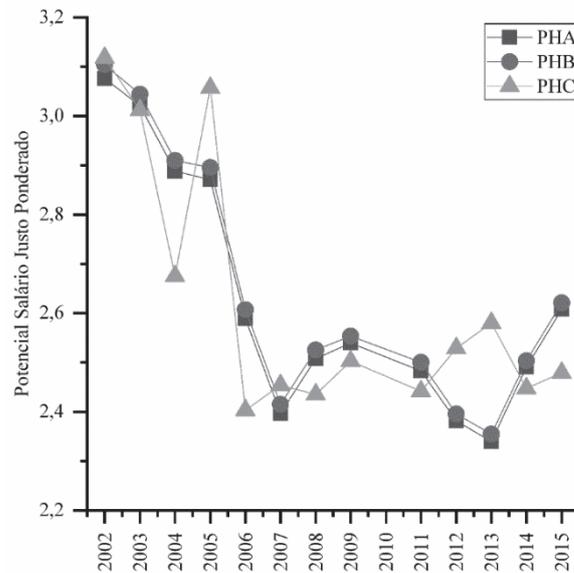
A Figura 36 mostra que o PHB tem um PSJP mais alto que o PHA durante o período analisado. Isso significa que, a proporção de materiais do PHB combinada com os dados sociais dos setores fornece uma classificação social mais elevada. A tipologia construtiva alvenaria estrutural empregada no PHB contém mais materiais de setores que têm uma melhor relação entre SR pagos e TRT. Nos estágios do ciclo de vida analisados, o PHB pode gerar impactos sociais mais positivos que o PHA.

Observa-se que as curvas de potencial salário justo ponderado do PHA e do PHB têm o mesmo comportamento. Isso significa que os projetos têm quantidades semelhantes de materiais em cada setor. Embora possuam tipologias construtivas diferentes, a variável MES tem predominância no setor indústria de insumos químicos e não-metálicos e quantidades muito mais baixas da indústria madeireira e da indústria siderúrgica, o que justifica resultados semelhantes entre as curvas de potencial salário justo ponderado.

Se um Projeto Habitacional C (PHC) possuir a mesma quantidade de materiais nos três setores analisados, torna a variável MES igual a 33,33% para a indústria madeireira, 33,33% para a indústria siderúrgica e, 33,33% para a indústria de insumos químicos e não-metálicos. Refazendo a análise e considerando os mesmos valores de PSJ para cada um dos setores em seus respectivos anos, é possível observar a terceira curva na Figura 36.

O comportamento da curva do projeto PHC difere das curvas do PHA e do PHB. As quantidades de material em cada setor afetam a resposta final do problema. O PHC apresenta flutuações nos valores de PSJP, porque os valores de SR pagos, o TRT e o Índice Gini brasileiro assumem valores diferentes ao longo dos anos.

Figura 36 – Potencial Salário Justo Ponderado Global.



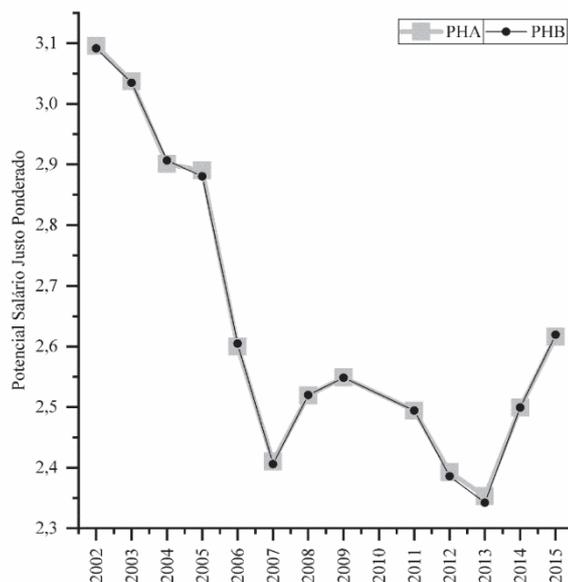
Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

#### 4.1.2.2.1 Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção

Calculou-se o PSJP para cada uma das fases da construção do PHA e do PHB, e comparou-se os mesmos do ponto de vista social por fases. Os resultados são apresentados da Figura 37 à Figura 41.

Na infraestrutura, como mostrado no Quadro 10 e no Quadro 11, o PHA é composto por estacas brocas de concreto com 20 cm de diâmetro, vigas baldrame em concreto armado e alvenaria de embasamento de tijolos maciços; e, o PHB é composto por radier em concreto armado. Na avaliação do PSJP, verifica-se pela Figura 37 que o PHA e o PHB apresentam PSJP semelhantes em relação à infraestrutura. Contudo, numericamente, ao longo do período de análise constatou-se que a infraestrutura do PHA apresenta avaliação social superior.

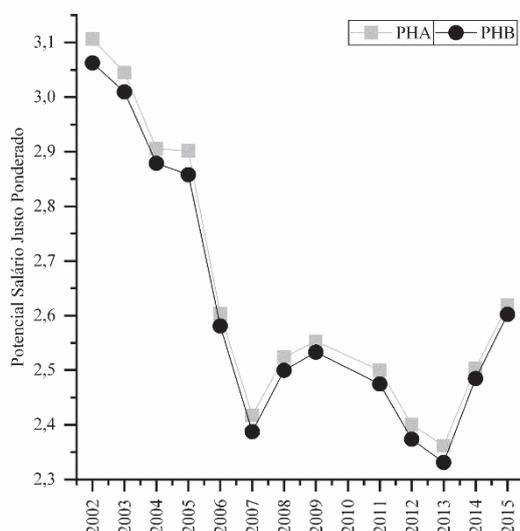
Figura 37 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Infraestrutura.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Na superestrutura, o PHA é composto por pilaretes, cinta de oitão, vigas de cobertura, pilares em concreto armado e lajes pré-moldadas. O PHB é composto por cintas de amarração de blocos canaletas J de concreto preenchidos com graute e lajes pré-moldadas treliçadas em concreto armado. Na análise do PSJP, verifica-se, por meio da Figura 38, que a superestrutura do PHA contém PSJP superior à superestrutura do PHB em todos os anos analisados, o que indica que a superestrutura do PHA apresenta uma combinação de fatores que apresenta melhor desempenho social.

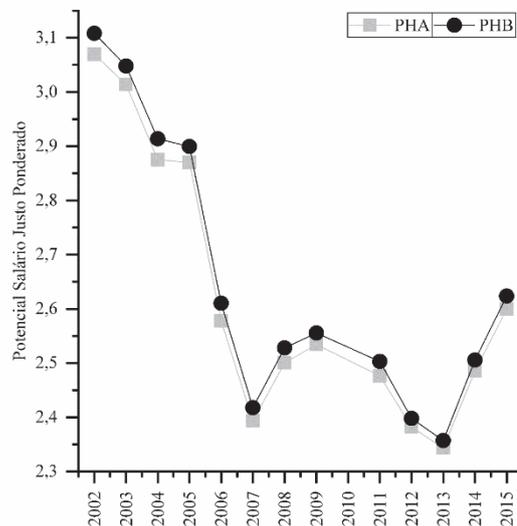
Figura 38 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Superestrutura.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Para os elementos que compõem a vedação, o PHA contém paredes de blocos cerâmicos furados assentados com argamassa de cimento, cal e areia, vergas e contra-vergas em concreto armado e esquadrias em alumínio. O PHB apresenta alvenaria em blocos de concreto, assentados com argamassa de cimento, cal e areia média, vergas e contra-vergas de blocos canaleta de concreto preenchidos com graute, alvéolos dos blocos de concreto preenchidos com graute e esquadrias de madeira e alumínio. Na análise do PSJP, verifica-se que a vedação do PHB apresenta PSJP superior à vedação do PHA em todos os anos analisados, como pode ser visto na Figura 39. Isso indica que os elementos de vedação empregados pelo PHB apresentam uma combinação de fatores que geram melhor desempenho social.

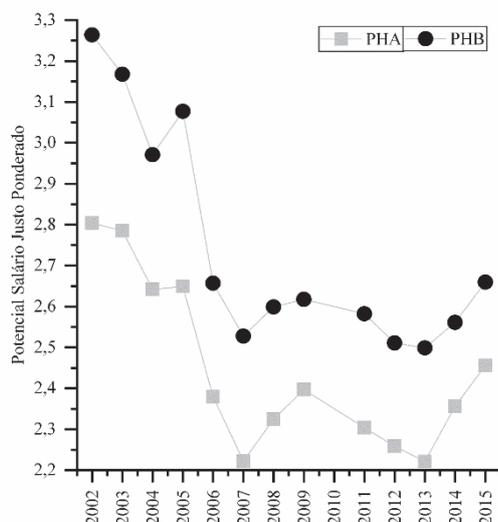
Figura 39 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Vedação.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Na cobertura, o PHA é composto por estruturas de madeira e telhas cerâmicas. E o PHB é construído em estruturas de aço e telhas cerâmicas. Na avaliação do PSJP, como pode ser visto na Figura 40, verifica-se que a cobertura do PHB apresenta PSJP superior à cobertura do PHA em todos os anos analisados. Verifica-se que a cobertura empregada pelo PHB possui uma combinação de fatores que geram um desempenho social significativamente superior.

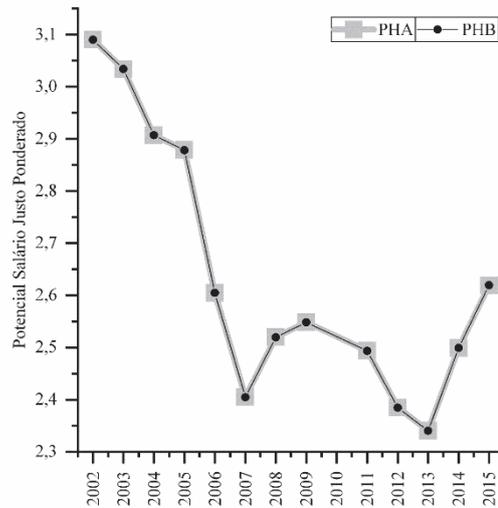
Figura 40 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Cobertura.



Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

No revestimento, o PHA apresenta revestimentos internos compostos por chapisco (argamassa de cimento e areia); emboço paulista (argamassa de cimento, cal e areia); emassamento com massa PVA; tinta látex; rodapés e soleiras cerâmicos; revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltadas); e, revestimentos externos executados em chapisco (argamassa de cimento e areia); emboço paulista (argamassa de cimento, cal e areia); forro de PVC; fundo selador acrílico; textura acrílica; esmalte sintético fosco; soleiras de mármore nas portas externas. O PHB contém revestimentos internos compostos por chapisco (argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (argamassa de cimento, cal e areia); gesso desempenado; emboço (argamassa de cimento, cal e areia); revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltada); tinta látex, rodapés em cerâmica assentados com argamassa colante; soleiras em mármore; e, revestimentos externos compostos por chapisco (em argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (em argamassa de cimento, cal e areia); emboço (em argamassa de cimento, cal e areia); moldura para portas e janelas (em argamassa de cimento cal e areia); revestimento cerâmico (piso com placas tipo esmaltadas); tinta acrílica. Na análise do PSJP, como mostra a Figura 41, as curvas de PSJP indicam que os elementos que compõem revestimentos do PHA e do PHB apresentam uma avaliação social semelhante. Entretanto, numericamente, ao longo do período de análise constatou-se que os revestimentos do PHA apresentam avaliação social superior.

Figura 41 – Potencial Salário Justo Ponderado por fase da construção: Revestimento.

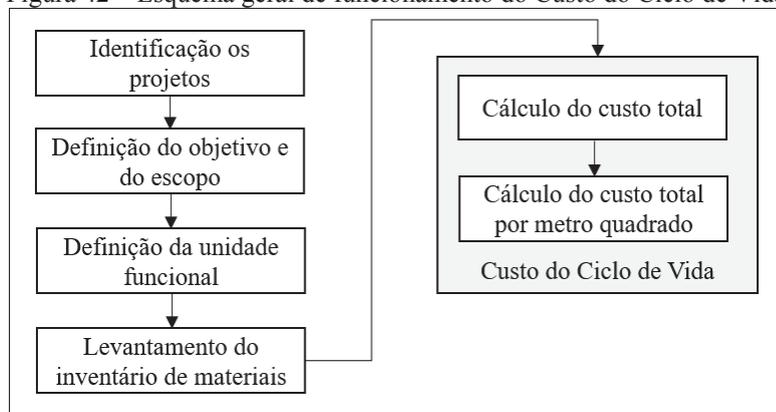


Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

### 4.1.3 Custos do Ciclo de Vida

A Figura 42 apresenta o esquema geral de funcionamento do Custo do Ciclo de Vida.

Figura 42 – Esquema geral de funcionamento do Custo do Ciclo de Vida.

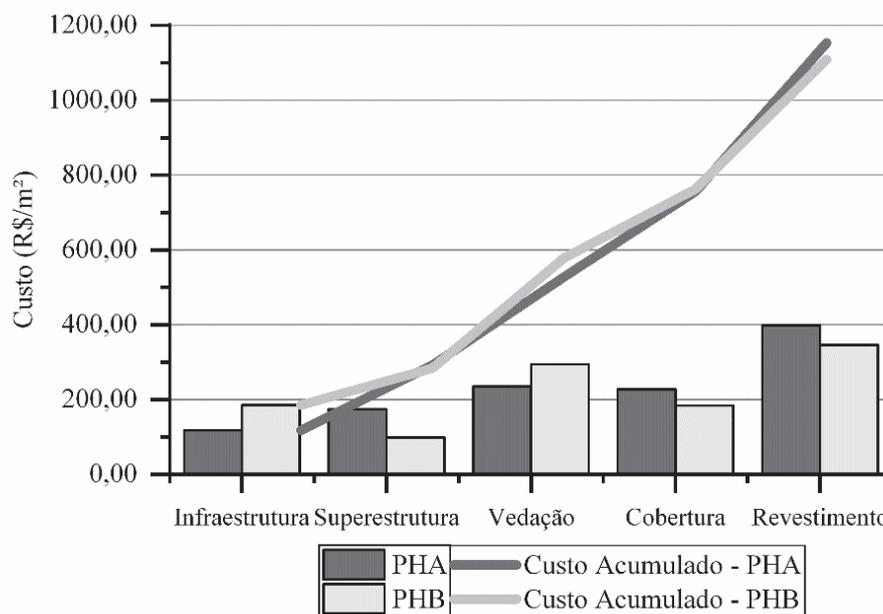


Fonte: O Autor.

#### 4.1.3.1 Composição de custos totais

Para os custos relacionados aos projetos, o ICV econômico foi construído com base no inventário de materiais. De acordo com os valores de custos definidos pelo SINAPI, a Figura 43 apresenta os custos para a unidade funcional definida no problema. Foram considerados CA e CI, e estão inclusos custos com materiais, mão de obra e equipamentos.

Figura 43 – Análise de custos PHA e PHB.



Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

Verifica-se, por meio da Figura 43, que o custo total por metro quadrado do PHA (R\$ 1152,61) é superior ao custo do PHB (R\$ 1107,66). Isso torna o PHB, economicamente, mais atrativo.

Analisando os custos por fase da construção, verifica-se que o PHA é economicamente mais vantajoso nas fases de infraestrutura (PHA R\$ 117,89 × PHB R\$ 185,12) e vedação (PHA R\$ 234,94 × PHB R\$ 294,06). Já o PHB é mais vantajoso nas fases de superestrutura (PHA R\$ 173,99 × PHB R\$ 98,40), cobertura (PHA R\$ 227,78 × PHB R\$ 183,95) e revestimento (PHA R\$ 398,01 × PHB R\$ 346,13).

#### 4.1.4 Resumo dos resultados do PCV

Com os dados gerados pela ACV, ACVS e CCV, foi possível realizar a comparação dos valores absolutos obtidos em cada uma das dimensões da sustentabilidade. Verifica-se que diante de diferentes critérios de análise, há numerosos resultados possíveis quanto ao desempenho nas dimensões ambiental, social e econômica.

Para os resultados da ACV, apresentam-se o Quadro 21 e o Quadro 22. O Quadro 21 mostra a melhor opção entre o PHA e o PHB de acordo com a categoria de impacto *midpoint* para o impacto global e por fase da construção. O Quadro 22 contém a melhor opção entre o

PHA e o PHB de acordo com a categoria de impacto *endpoint* para o dano global e por fase da construção.

Quadro 21 – Melhor opção de acordo com o impacto: global e por fase de construção.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Global</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>
GWP (kg CO2 eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
ODP (kg CFC-11 eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
IRP (kBq Co-60 eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
HOFP (kg NOx eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
PMFP (kg PM2.5 eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
EOFP (kg NOx eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
TAP (kg SO2 eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
FEP (kg P eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
MEP (kg N eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
TETP (kg 1,4-DCB)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
FETP (kg 1,4-DCB)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
METP (kg 1,4-DCB)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
HTPc (kg 1,4-DCB)	PHA	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
HTPnc (kg 1,4-DCB)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
LOP (m2a crop eq)	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB	PHB
SOP (kg Cu eq)	PHB	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB
FFP (kg oil eq)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB
WCP (m3)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB

Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Quadro 22 – Melhor opção de acordo com o dano: global e por fase da construção.

<b>Categoria de dano</b>	<b>Global</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>
HH (DALY)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
ED (species.yr)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHB	PHB
RA (USD2013)	PHB	PHB	PHB	PHA	PHA	PHB

Fonte: O Autor, com base nos dados do SimaPro.

Como resultado da ACVS, em função da quantidade de dados e anos analisados, apresenta-se apenas o PSJP para o ano 2015. O Quadro 23 apresenta a melhor opção entre o PHA e o PHB, de acordo com o PSJP global e por fase da construção no ano 2015.

Quadro 23 – Melhor opção de acordo com o PSJP 2015: global e por fase da construção.

	<b>Global</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>
Potencial Salário Justo Ponderado 2015	PHB	PHA	PHA	PHB	PHB	PHA

Fonte: O Autor, com base nos dados da PNAD.

Nos resultados do CCV, o Quadro 24 apresenta a melhor opção entre o PHA e o PHB de acordo com o custo total e por fase de construção.

Quadro 24 – Melhor opção de acordo com o custo: total e por fase da construção.

	<b>Total</b>	<b>Infraestrutura</b>	<b>Superestrutura</b>	<b>Vedação</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Revestimento</b>
Custo	PHB	PHA	PHB	PHA	PHB	PHB

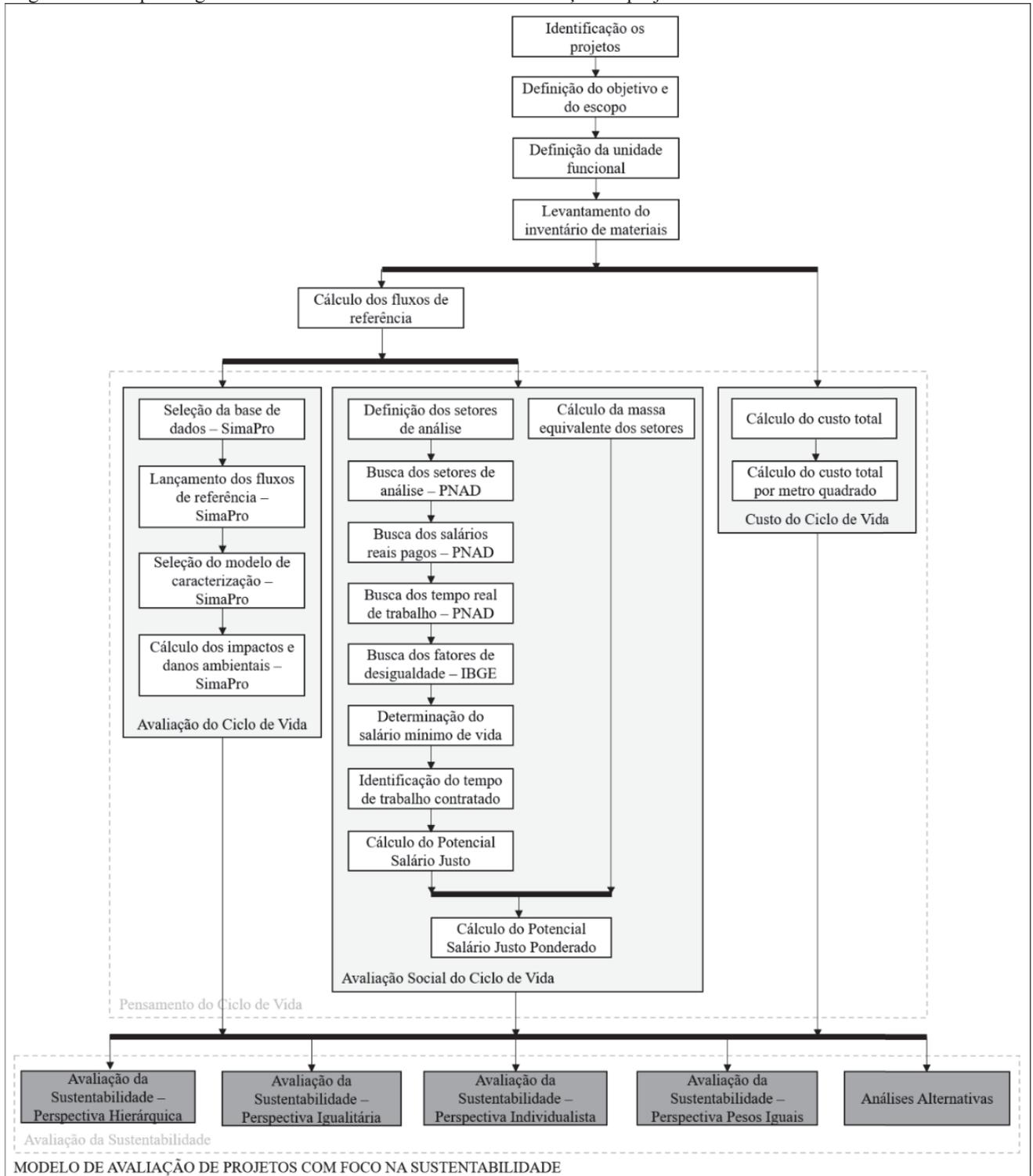
Fonte: O Autor, com base nos projetos e planilhas de orçamentos.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

De posse dos dados apresentados na subseção 4.1.4, a tomada de decisão do projetista quanto à sustentabilidade do PHA e do PHB ainda é complexa, pois há a presença de muitas variáveis. Esta subseção considera as dimensões ambiental, social e econômica, apresentando os resultados do modelo de identificação da alternativa mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social sob a ótica do PCV e do AHP. Para cada uma das análises realizadas, o modelo proposto determina qual dos projetos (PHA ou PHB) apresenta características mais sustentáveis, auxiliando na tomada de decisão do projetista.

A Figura 44 mostra o esquema geral de funcionamento do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade proposto.

Figura 44 – Esquema geral de funcionamento do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.



Fonte: O Autor

No modelo proposto, os dados complexos obtidos pela ACV, ACVS e CCV são compilados e relacionados entre si por meio do método AHP. Com essa metodologia, o projetista tem a opção de avaliar os projetos considerando as perspectivas culturais hierárquica, igualitária e individualista, bem como o conceito de sustentabilidade ideal com pesos iguais e alguns cenários alternativos: por fase de construção, por categoria social e por dimensão da sustentabilidade.

#### 4.2.1 Perspectiva hierárquica

A perspectiva hierárquica considera para as dimensões ambiental, social e econômica os pesos 40%, 40% e 20%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003). Para essa análise, a dimensão ambiental contém os dados provenientes da análise ambiental por meio do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva hierárquica e abordagem *endpoint*. A dimensão social é dada pelo PSJP global para o ano 2015. A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado.

A Tabela 6 apresenta os valores dos critérios ambiental, social e econômico empregados para a determinação da sustentabilidade do PHA e do PHB sob a perspectiva hierárquica. E a Tabela 7 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela perspectiva hierárquica.

Tabela 6 – Perspectiva hierárquica: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )
<b>PHA</b>	0,0025	8,72E-06	56,63	2,608	1152,61
<b>PHB</b>	0,0015	3,11E-06	32,63	2,621	1107,66

Fonte: O Autor, com base nos resultados da ACV, ACVS e CCV.

Por meio da Tabela 7, é possível perceber que a dimensão ambiental recebeu o peso de 40% na análise, sendo esse valor dividido entre as categorias de impacto *endpoint*. Para essa ponderação considerou-se que a categoria “Danos à saúde humana” seria equivalente à dimensão social (40%), a categoria “Danos à disponibilidade dos ecossistemas” seria

equivalente à dimensão ambiental (40%) e a categoria “Danos à disponibilidade de recursos” seria equivalente à dimensão econômica (20%), o que resulta nos pesos finais 16%, 16% e 8%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003).

Tabela 7 – Perspectiva hierárquica: sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )	Vetor de Decisão
<b>Vetor de Critérios</b>	16,00%	16,00%	8,00%	40,00%	20,00%	
<b>PHA</b>	37,41%	26,27%	36,56%	49,87%	49,01%	42,86%
<b>PHB</b>	62,59%	73,73%	63,44%	50,13%	50,99%	57,14%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que da perspectiva hierárquica, o PHB (57,14%) apresenta uma combinação de características ambientais, sociais e econômicos mais sustentáveis do que o PHA (42,86%).

#### 4.2.2 Perspectiva igualitária

A perspectiva igualitária considera para as dimensões ambiental, social e econômica os pesos 50%, 30% e 20%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003). Para essa análise, a dimensão ambiental contém os dados provenientes da análise ambiental por meio do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva igualitária e abordagem *endpoint*. A dimensão social é dada pelo PSJP global para o ano 2015. A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado.

A Tabela 8 apresenta os valores dos critérios ambiental, social e econômico empregados para a determinação da sustentabilidade do PHA e do PHB sob a perspectiva igualitária. E a Tabela 9 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela perspectiva igualitária.

Tabela 8 – Perspectiva igualitária: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )
<b>PHA</b>	0,043	4,16216E-05	57,56	2,608	1152,61
<b>PHB</b>	0,038	2,79975E-05	33,31	2,621	1107,66

Fonte: O Autor, com base nos resultados da ACV, ACVS e CCV.

Por meio da Tabela 9, verifica-se que a dimensão ambiental recebeu o peso de 50% na análise, sendo esse valor foi dividido entre as categorias de impacto *endpoint*. Para essa ponderação considerou-se que, a categoria “Danos à saúde humana” seria equivalente à dimensão social (30%), a categoria “Danos à disponibilidade dos ecossistemas” seria equivalente à dimensão ambiental (50%) e a categoria “Danos à disponibilidade de recursos” seria equivalente à dimensão econômica (20%), o que resulta nos pesos finais de 15%, 25% e 10%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003).

Tabela 9 – Perspectiva igualitária: sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )	Vetor de Decisão
<b>Vetor de Critérios</b>	15,00%	25,00%	10,00%	30,00%	20,00%	
<b>PHA</b>	46,50%	40,22%	36,66%	49,87%	49,01%	45,46%
<b>PHB</b>	53,50%	59,78%	63,34%	50,13%	50,99%	54,54%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que da perspectiva igualitária, o PHB (54,54%) apresenta uma combinação de características ambientais, sociais e econômicas mais sustentáveis do que o PHA (45,46%).

### 4.2.3 Perspectiva individualista

A perspectiva individualista considera para as dimensões ambiental, social e econômica os pesos 25%, 55% e 20%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003). Para essa análise, a dimensão ambiental contém os dados provenientes da análise ambiental por meio do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva individualista e abordagem *endpoint*. A dimensão social é dada pelo PSJP global para o ano 2015. A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado.

A Tabela 10 apresenta os valores dos critérios ambiental, social e econômicos empregados para a determinação da sustentabilidade do PHA e do PHB sob a perspectiva individualista. E a Tabela 11 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela perspectiva individualista.

Tabela 10 – Perspectiva individualista: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )
<b>PHA</b>	0,0010	6,4676E-06	55,55	2,608	1152,61
<b>PHB</b>	0,0004	1,59988E-06	31,72	2,621	1107,66

Fonte: O Autor, com base nos resultados da ACV, ACVS e CCV.

Por meio da Tabela 11, verifica-se que a dimensão ambiental recebeu o peso de 25% na análise, sendo esse valor foi dividido entre as categorias de impacto *endpoint*. Para essa ponderação considerou-se que, a categoria “Danos à saúde humana” seria equivalente à dimensão social (55%), a categoria “Danos à disponibilidade dos ecossistemas” seria equivalente à dimensão ambiental (25%) e a categoria “Danos à disponibilidade de recursos” seria equivalente à dimensão econômica (20%), o que resulta nos pesos finais de 13,75%, 6,25% e 5,0%, respectivamente (CANCHUMANI, 2013; XAVIER, 2003).

Tabela 11 – Perspectiva individualista: sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )	Vetor de Decisão
<b>Vetor de Critérios</b>	13,75%	6,25%	5,00%	55,00%	20,00%	
<b>PHA</b>	28,50%	19,83%	36,34%	49,87%	49,01%	44,21%
<b>PHB</b>	71,50%	80,17%	63,66%	50,13%	50,99%	55,79%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que da perspectiva individualista, o PHB (55,79%) apresenta uma combinação de características ambientais, sociais e econômicos mais sustentáveis do que o PHA (44,21%).

#### 4.2.4 Perspectivas de pesos iguais

A perspectiva de pesos iguais considera o conceito de sustentabilidade ideal, assim para as dimensões ambiental, social e econômica os pesos são de 33,33%, 33,33% e 33,33%, respectivamente (WCED, 1987). Para essa análise, a dimensão ambiental contém os dados provenientes da análise ambiental por meio do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva hierárquica e abordagem *endpoint*. A dimensão social é dada pelo PSJP global para o ano 2015. A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado.

A Tabela 12 apresenta os valores dos critérios ambiental, social e econômico empregados para a determinação da sustentabilidade do PHA e do PHB sob a perspectiva o conceito de sustentabilidade ideal que considera de pesos iguais. E a Tabela 13 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela perspectiva de pesos iguais.

Tabela 12 – Perspectiva de pesos iguais: valores dos critérios para determinação da sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )
<b>PHA</b>	0,0025	8,72E-06	56,63	2,608	1152,61
<b>PHB</b>	0,0015	3,11E-06	32,63	2,621	1107,66

Fonte: O Autor, com base nos resultados da ACV, ACVS e CCV.

Por meio da Tabela 13, verifica-se que a dimensão ambiental recebeu o peso de 33,33% na análise, sendo esse valor foi dividido entre as categorias de impacto *endpoint*. Para essa ponderação considerou-se que, a categoria “Danos à saúde humana” seria equivalente à dimensão social (33,33%), a categoria “Danos à disponibilidade dos ecossistemas” seria equivalente à dimensão ambiental (33,33%) e a categoria “Danos à disponibilidade de recursos” seria equivalente à dimensão econômica (33,33%), o que resulta nos pesos finais de 11,11%, 11,11% e 11,11%, respectivamente.

Tabela 13 – Perspectiva de pesos iguais: sustentabilidade.

	Danos à saúde humana (DALY)	Danos à disponibilidade dos ecossistemas (species.yr)	Danos à disponibilidade de recursos (USD 2013)	Potencial Salário Justo Ponderado Global	Custo Total (R\$/m <sup>2</sup> )	Vetor de Decisão
<b>Vetor de Critérios</b>	11,11%	11,11%	11,11%	33,33%	33,33%	
<b>PHA</b>	37,41%	26,27%	36,56%	49,87%	49,01%	44,10%
<b>PHB</b>	62,59%	73,73%	63,44%	50,13%	50,99%	55,90%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que da perspectiva do conceito de sustentabilidade ideal que considera pesos iguais, o PHB (55,90%) apresenta uma combinação de características ambientais, sociais e econômicas mais sustentáveis que o PHA (44,10%).

#### 4.2.5 Análises alternativas

##### 4.2.5.1 Análise por fase da construção

Foram realizadas análises considerando as fases da construção do PHA e do PHB. As dimensões ambiental, social e econômica foram avaliadas individualmente para cada uma das fases da construção. A partir desses resultados, é possível comparar do ponto de vista da sustentabilidade qual o melhor projeto para cada uma das fases: infraestrutura, superestrutura, vedação, cobertura e revestimentos.

Para essa análise, a dimensão ambiental emprega os dados provenientes do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva hierárquica e abordagem *endpoint* para cada uma das fases da construção. A dimensão social é dada pelo PSJP global para o ano 2015 para cada uma das fases da construção. A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado para cada uma das fases da construção.

A Tabela 14 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela análise alternativa por fase da construção.

Tabela 14 – Análise alternativa por fase da construção: sustentabilidade

<b>Fase da construção</b>	<b>Perspectiva</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Infraestrutura	Hierárquica	36,54%	63,46%
Superestrutura	Hierárquica	37,91%	62,09%
Vedação	Hierárquica	54,03%	45,97%
Cobertura	Hierárquica	43,80%	56,20%
Revestimento	Hierárquica	43,81%	56,19%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que, a partir da perspectiva hierárquica por fase da construção, as fases infraestrutura, superestrutura, cobertura e revestimento do PHB (63,46%, 62,09%, 56,20% e 56,19%, respectivamente) apresentam uma combinação de características ambientais, sociais e econômicas mais sustentáveis do que o PHA (36,54%, 37,91%, 43,80% e 43,81%, respectivamente). Na fase de vedação, o PHA (54,03%) que se mostra mais sustentável.

#### 4.2.5.2 Análise por categoria social do trabalhador

Foram realizadas análises considerando as categorias sociais que se enquadram os trabalhadores dos setores: indústria siderúrgica, indústria madeireira e insumos químicos e não metálicos.

Para essa análise, as dimensões ambiental e econômica foram avaliadas para os projetos PHA e PHB. A dimensão ambiental contém os dados provenientes do método de caracterização ReCiPe 2016 em sua perspectiva hierárquica e abordagem *endpoint*. E a dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado.

A dimensão social foi subdividida de acordo com as categorias sociais ocupadas pelos trabalhadores: sexo, raça/cor, associativismo e formalidade.

Na categoria sexo dos trabalhadores, o PSJP é calculado para trabalhadores homens (PSJP – Homens) e trabalhadoras mulheres (PSJP – Mulheres).

Na categoria raça/cor dos trabalhadores, o PSJP é calculado para trabalhadores brancos (PSJP – Brancos) e trabalhadores não brancos (PSJP – Não Brancos).

Na categoria associativismo dos trabalhadores, o PSJP é calculado para trabalhadores sindicalizados (PSJP – Sindicalizados) e trabalhadores não sindicalizados (PSJP – Não Sindicalizados).

Na categoria formalidade dos trabalhadores, o PSJP é calculado para trabalhadores formais (PSJP – Formais) e trabalhadores informais (PSJP – Informais).

A partir dos resultados gerados, é possível comparar, do ponto de vista da sustentabilidade qual é o melhor projeto entre o PHA e o PHB, entretanto, as respostas avaliam individualmente, a situação dos trabalhadores por categoria.

A Tabela 15 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela análise alternativa por categoria social dos trabalhadores.

Tabela 15 – Análise alternativa por categoria social: sustentabilidade.

<b>Categoria</b>	<b>Perspectiva</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Sexo	Hierárquica	42,84%	57,16%
Raça/cor	Hierárquica	42,87%	57,13%
Associativismo	Hierárquica	42,86%	57,14%
Formalidade	Hierárquica	42,86%	57,14%

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O resultado final aponta que da perspectiva hierárquica por categoria social, as categorias sexo, raça/cor, associativismo e formalidade do PHB (57,16%, 57,13%, 57,14% e

57,14%, respectivamente) apresentam uma combinação de características ambientais, sociais e econômicas mais sustentáveis do que o PHA (42,84%, 42,87%, 42,86% e 42,86%, respectivamente). As similaridades dos resultados acontecem devido à proximidade dos valores de PSJP do PHA e do PHB para cada uma das categorias sociais analisadas.

#### 4.2.5.3 Análises por dimensão da sustentabilidade

Foram realizadas análises considerando apenas as dimensões da sustentabilidade, onde os projetos foram avaliados individualmente do ponto de vista ambiental, social e econômico.

Para a dimensão ambiental, foram realizadas quatro análises. Foram empregados os dados provenientes do método de caracterização ReCiPe 2016 em suas perspectivas hierárquica, igualitária, individualista e pesos iguais e abordagem *endpoint*. Nas avaliações ambientais, as categorias de impacto *endpoint* foram comparadas entre si, logo, o resultado gerado apresenta o melhor projeto do ponto de vista ambiental de acordo com os danos causados.

Na dimensão social foi empregado o PSJP para o ano 2015 para as categorias sociais: sexo, raça/cor, associativismo e formalidade. O resultado social aponta qual o melhor projeto considerando apenas as relações entre salários pagos e horas trabalhadas pelos trabalhadores.

Na dimensão econômica, empregou-se separadamente os custos dos equipamentos, materiais e mão de obra por metro quadrado de cada um dos projetos. O resultado econômico aponta qual o melhor projeto considerando apenas os custos.

A Tabela 16 apresenta os resultados do modelo para a sustentabilidade pela análise alternativa por dimensão da sustentabilidade.

Tabela 16 – Análise alternativa por dimensão da sustentabilidade: análises ambiental, social e econômica.

<b>Critérios</b>	<b>Perspectiva</b>	<b>PHA</b>	<b>PHB</b>
Ambiental	Hierárquica	32,78%	67,22%
Ambiental	Igualitária	41,39%	58,61%
Ambiental	Individualista	27,90%	72,10%
Ambiental	Pesos iguais	33,41%	66,59%
Social	Pesos iguais	49,85%	50,15%
Econômico	Pesos iguais	31,12%	68,88%

Fonte: O Autor, com base nos resultados da ACV, ACVS, CCV e do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

Verifica-se que em todas as dimensões da sustentabilidade, o PHB apresenta uma combinação de características superiores ao PHA.

#### 4.2.6 Resumo dos resultados

O Quadro 25 mostra o resumo dos resultados apresentados pelo modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade sob a ótica do PCV e do AHP.

Quadro 25 – Quadro resumo do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade sob a ótica do PCV e do AHP.

Tipo de análise		Tipo de Avaliação	PHA	PHB	Melhor Projeto
Perspectiva	Hierárquica	Sustentabilidade	42,86%	57,14%	PHB
	Igualitária	Sustentabilidade	45,46%	54,54%	PHB
	Individualista	Sustentabilidade	44,21%	55,79%	PHB
	Pesos iguais	Sustentabilidade	44,10%	55,90%	PHB
Por fase da construção	Infraestrutura	Sustentabilidade	36,54%	63,46%	PHB
	Superestrutura	Sustentabilidade	37,91%	62,09%	PHB
	Vedação	Sustentabilidade	54,03%	45,97%	PHA
	Cobertura	Sustentabilidade	43,80%	56,20%	PHB
	Revestimento	Sustentabilidade	43,81%	56,19%	PHB
Por categoria	Sexo	Sustentabilidade	42,84%	57,16%	PHB
	Raça/cor	Sustentabilidade	42,87%	57,13%	PHB
	Associativismo	Sustentabilidade	42,86%	57,14%	PHB
	Formalidade	Sustentabilidade	42,86%	57,14%	PHB
Por dimensão da sustentabilidade	Ambiental hierárquica	Ambiental	32,78%	67,22%	PHB
	Ambiental igualitária	Ambiental	41,39%	58,61%	PHB
	Ambiental individualista	Ambiental	27,90%	72,10%	PHB
	Ambiental com pesos iguais	Ambiental	33,41%	66,59%	PHB
	Social	Social	49,85%	50,15%	PHB
	Econômico	Econômica	31,12%	68,88%	PHB

Fonte: O Autor, com base nos resultados do modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade.

O Quadro 25 apresenta um panorama de todas as simulações realizadas com os dados do PHA e do PHB. Por meio dos resultados apresentados, constata-se que o PHB apresenta uma combinação de características ambientais, sociais e econômicos mais sustentáveis do que o PHA em todas análises realizadas, exceto na análise por etapa da construção, na fase de vedação, onde o PHA apresenta-se mais sustentável.

De posse dos resultados, o projetista pode optar por escolher o PHB como alternativa a ser implementada ou pode realizar ajustes no PHA para que o mesmo apresente melhores

---

resultados. O projetista tem influência direta nas fases de concepção e dimensionamento. Então, de acordo com o nível de sustentabilidade obtido, o projeto pode ser modificado por meio da alteração das quantidades de material, dos tipos de material, da geometria do projeto e até mesmo mudança da tipologia construtiva.

É importante destacar que o processo de identificação da tipologia construtiva mais sustentável não é absoluto. As modificações nos projetos alteram os resultados de todas as dimensões da sustentabilidade. Na dimensão ambiental, alteram-se os impactos e danos ambientais gerados. Na dimensão social, alteram-se os setores da qual são provenientes as matérias-primas, o que modifica o potencial salário justo ponderado. Na dimensão econômica, a alteração das quantidades de materiais modifica os custos globais. Conseqüentemente, altera-se também a resposta final da sustentabilidade.

A ponderação das dimensões da sustentabilidade e critérios de análise, geralmente, é definida com base nos pesos determinados por meio de questionários e entrevistas com profissionais e especialistas na área. Isso pode enviesar a análise, tornando o processo subjetivo. Para reduzir essa subjetividade, é preciso que as amostras de profissionais consultados sejam compostas por uma grande quantidade de elementos, o que é uma limitação no processo de levantamento dos dados, devido aos elevados custos e a quantidade de tempo exigida para esse tipo de coleta.

As perspectivas culturais e de pesos iguais aqui empregadas para a ponderação das dimensões e critérios, reduzem a subjetividade da análise, pois não dependem da visão ou opinião de outros profissionais. As mesmas são consagradas pela bibliografia e vastamente utilizadas em softwares que envolvem o PCV. Além do método ReCiPe 2016, destaca-se o método de caracterização Eco-Indicator 99, que são globalmente utilizados e aceitos pela comunidade científica e indústria, o que comprova que a utilização das perspectivas culturais é vantajosa.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

Essa tese apresenta um modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade que foi validado pela análise de dois projetos de habitação unifamiliar de interesse social de tipologias construtivas diferentes (PHA e PHB). Esse modelo trata-se de uma ferramenta que pode ser utilizada por projetistas (engenheiros e arquitetos) e tomadores de decisão do setor da construção civil nas esferas pública e privada. No modelo proposto, o usuário consegue verificar os potenciais pontos de melhoria para o ciclo de vida dos projetos considerados. O emprego do pensamento do ciclo de vida como critérios e subcritérios do processo analítico hierárquico, torna possível a verificação de melhorias que podem ser executadas nos projetos e devem ser foco de análise do projetista no processo de concepção e dimensionamento.

Na dimensão ambiental, verificou-se que a ACV é um método capaz de gerar resultados de impactos e danos ambientais para todas as etapas do ciclo de vida de uma edificação. Nos projetos PHA e PHB, os resultados das abordagens *midpoint* e *endpoint* do método ReCiPe 2016 mostraram que o PHB gera menores impactos e menores danos ambientais quando comparado ao PHA.

Na abordagem *midpoint*, o PHB apresentou impactos ambientais superiores apenas na categoria de impacto “Toxicidade humana – cancerígena (HTPc)”, já o PHA apresentou maiores impactos ambientais em todas as outras 17 categorias de impacto. Nas categorias de impacto “Depleção do ozônio estratosférico (ODP)”, “Formação de ozônio fotoquímico – saúde humana (HOFp)”, “Formação de material particulado (PMFP)”, “Formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres (EOFP)” e “Ocupação do solo (LOP)”, os impactos gerados pelo PHA superaram em mais de 50% os impactos provenientes do PHB. Considerando a análise por material, no PHA os materiais que geraram mais impactos foram “Argamassa – cimento, cal e areia”, “Concreto” e “Madeira”. No PHB os materiais que mais contribuíram na geração dos impactos foram “Argamassa – cimento, cal e areia” e “Aço” e “Janela – alumínio”.

Na abordagem *endpoint*, verificou-se que o PHA apresentou maior geração de danos à saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos. Nos danos à saúde humana, as categorias que geraram maior impacto à saúde humana foram “Mudanças climáticas – Saúde Humana” e “Formação de material particulado” tanto para o PHA como para o PHB. Nos danos à disponibilidade dos ecossistemas, as categorias que geraram maior impacto à disponibilidade dos ecossistemas foram “Mudanças Climáticas – Ecossistemas terrestres” e “Ocupação do solo”, para o PHA e o PHB. Nos danos à disponibilidade de recursos, a categoria “Depleção de

combustíveis fósseis” foi predominante na geração de impactos tanto para o PHA quanto para o PHB. Considerando a análise por fase da construção, no PHA, as fases infraestrutura e revestimento apresentaram os maiores danos ambientais. No PHB, as fases de vedação e revestimento apresentaram os maiores danos.

Relacionando os resultados das abordagens *midpoint* e *endpoint*, verificou-se que, no PHA, os materiais que geraram os maiores impactos ambientais (“Argamassa – cimento, cal e areia”, “Concreto” e “Madeira”) estão em maior quantidade nas fases infraestrutura e revestimento. No PHB, os maiores geradores de impactos (“Argamassa – cimento, cal e areia” e “Janela – alumínio) estão empregados nas fases de vedação e revestimento. Com esses resultados, a avaliação ambiental apontou que as fases de infraestrutura e revestimento do PHA e as fases de vedação e revestimento do PHB são potenciais pontos de modificação e melhoria que devem ser consideradas pelo projetista na busca por um projeto ambientalmente mais adequado.

Na dimensão social, o potencial salário justo mostrou que existem diferenças entre os salários pagos pela cadeia de suprimentos da construção. Existem diferenças entre o potencial salário justo entre trabalhadores homens e mulheres, há também diferenças entre trabalhadores brancos e não brancos. Essa discrepância entre os salários pagos e o tempo trabalhado por eles, pode indicar alguma discriminação dentro dos setores. Com relação ao associativismo dos trabalhadores e formalidade do trabalho, os trabalhadores que fazem parte de grupos e associações e possuem carteira assinada podem acessar com mais facilidade os requisitos e direitos mínimos em seu trabalho. Apesar da possível discriminação existente nos setores, a variação dos salários pagos também pode estar relacionada a outros fatores, como as diferenças resultantes das diversas capacidades produtivas e níveis de escolaridade dos trabalhadores, as empresas que podem optar por pagar salários mais altos que o mercado e o governo que pode intervir no processo de fixação de salários para corrigir falhas do mercado ou influenciar a distribuição de renda. Além disso, o estudo mostrou que o potencial salário justo é sensível ao salário de referência ao qual os salários analisados estão relacionados. A modificação do salário mínimo vigente no Brasil mostrou como o salário mínimo pode interferir na resposta.

O potencial salário justo ponderado mostrou que o PHB tem melhores características sociais do que o PHA durante o período analisado. Como o PHA e o PHB possuem características semelhantes em termos de composição dos materiais para os setores analisados, o fictício PHC foi usado para mostrar que as quantidades de elementos presentes em cada setor modificam o comportamento da curva de potencial salário justo ponderado ao longo do tempo.

A dimensão econômica apontou que do ponto de vista do custo total por metro quadrado, o PHB é, economicamente, mais atrativo. Por fase da construção, o PHA é economicamente mais vantajoso nas fases de infraestrutura e vedação e o PHB é economicamente mais vantajoso nas fases de superestrutura, cobertura e revestimento.

Relacionando os resultados das dimensões ambiental, social e econômica, constatou-se que o PHB apresenta uma combinação de características mais sustentáveis do que o PHA em todas análises realizadas, exceto na análise por fase da construção, na etapa de vedação, onde o PHA apresentou-se mais sustentável.

As aplicações estudadas tratam de projetos de habitação unifamiliar de interesse social. A ferramenta proposta agregou os dados das dimensões da sustentabilidade e permitiu gerar cenários de tomada de decisão envolvendo questões ambientais, sociais e econômicas. Os estudos realizados são uma maneira de destacar e incentivar o desenvolvimento de metodologias para minimizar os problemas relativos à sustentabilidade na construção de projetos de habitação de interesse social no Brasil e em outros países em desenvolvimento. Embora os projetos e dados aqui estudados sejam brasileiros, questões envolvendo a sustentabilidade em projetos de habitação de interesse social também são uma realidade em outros países em desenvolvimento. Diferentes países reconheceram o crescimento demográfico explosivo e a urbanização como fenômenos mundiais. Existe uma necessidade generalizada de reflexão sobre esse processo e seus problemas. Assim, o método proposto pode ser adaptado a diferentes dados para avaliar as condições de sustentabilidade em projetos de habitação de interesse social de outros países. Para a verificação de projetos internacionais a partir do modelo proposto, deve-se verificar se há dados ambientais locais. Na dimensão social, deve-se levantar os dados sociais referentes aos trabalhadores locais. Na dimensão econômica, deve-se executar o levantamento de custos de acordo com a localidade a ser estudada. Na combinação do pensamento do ciclo de vida ao processo analítico hierárquico, basta selecionar as perspectivas de análise a serem consideradas e aplicar a metodologia proposta.

Desde 2013, vigora no Brasil o conjunto de normas ABNT NBR 15575, que garantem o atendimento das exigências dos usuários (segurança, habitabilidade e sustentabilidade) de edificações habitacionais. A série de normas ABNT NBR 15575:2013 é baseada em modelos internacionais de normalização de desempenho, e está dividida em seis partes: (i) requisitos gerais; (ii) requisitos para os sistemas estruturais; (iii) requisitos para os sistemas de pisos; (iv) requisitos para os sistemas de vedação; (v) requisitos para os sistemas de coberturas; e, (vi) requisitos para sistemas hidrossanitários. Relacionando-se o modelo de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade proposto por essa tese à ABNT NBR 15575:2013, verifica-se que

---

o modelo aqui desenvolvido pode atuar como complemento às diretrizes estabelecidas por essas normas e também como uma ferramenta que pode apoiar o projetista a conceber projetos que atendam às exigências dos usuários. Para a dimensão ambiental, os resultados apresentados podem auxiliar no desenvolvimento de novos projetos que utilizem quantidades menores de materiais e recursos naturais, ou até mesmo empreguem a combinação de diferentes tipologias construtivas, onde o projeto resultante apresentará os materiais que gerem os menores impactos e danos ambientais possíveis. Na dimensão social, o modelo aqui proposto vai além das exigências do usuário do projeto consideradas pela ABNT NBR 15575:2013. A tese verifica as condições sociais dos trabalhadores envolvidos na cadeia de suprimento da construção. Os valores de potencial salário justo e de potencial salário justo ponderado podem auxiliar na verificação de possíveis pontos de melhoria e maximização das condições sociais das partes envolvidas no projeto. Por exemplo, os salários podem ser equacionados e melhorados, a carga de trabalho por ser monitorada e os direitos e benefícios mínimos determinados por lei podem ser alcançados através do incentivo ao trabalho formal e à participação em sindicatos e grupos de trabalhadores. Na dimensão econômica, a redução da quantidade de materiais e recursos naturais e a alteração dos materiais, tecnologias e equipamentos empregados podem significar a redução do custo total dos projetos. Todos esses fatores podem tornar os projetos de habitação interesse social mais viáveis de serem implementados e mais acessíveis de serem adquiridos.

Entre as implicações do estudo aqui realizado está o avanço da sustentabilidade aplicada à construção de projetos de habitação de interesse social. Por meio do modelo e resultados aqui apresentados, é possível complementar os programas de avaliação da qualidade na construção já existentes e contribuir para a geração de uma nova metodologia de avaliação e certificação para projetos envolvendo questões ambientais, sociais e econômicas.

Para os estudos na área, a ferramenta aqui apresentada serve de base para discussões sobre a inclusão das dimensões da sustentabilidade na construção. A revisão de literatura apontou que grande parte dos estudos consideram a dimensão ambiental como a sustentabilidade absoluta. Para esses casos, este estudo pode contribuir como base para a incorporação de outras dimensões da sustentabilidade por meio da inclusão do potencial salário justo ponderado como dimensão social e do custo do ciclo de vida como dimensão econômica, o que gerará um resultado de sustentabilidade mais abrangente. Para outras áreas de estudo, é possível adaptar a metodologia de tomada de decisão a diferentes setores e fornecer valores para a seleção de alternativas com base na sustentabilidade.

Para a academia, este trabalho contribui como uma ferramenta que pode ser usada por educadores para mostrar aos futuros profissionais do setor da construção como a

sustentabilidade é relevante no projeto de novas estruturas; é uma oportunidade de mostrar aos alunos que os projetos devem integrar conceitos da sustentabilidade aos aspectos técnicos. Para isso, os cursos de engenharia civil e arquitetura podem incorporar em suas disciplinas questões e conceitos relacionados ao desenvolvimento sustentável.

Para as aplicações práticas, a ferramenta e o conhecimento aqui apresentados podem amparar projetistas e empresas a conceber projetos sustentáveis. Este trabalho pode ser a base para a educação continuada e o treinamento de profissionais e instituições no setor da construção. Isso pode ser atingido através de treinamentos, oficinas e cursos. Para a comunidade, além da redução dos impactos e danos ambientais e da melhoria das condições socioeconômicas dos projetos, as habitações resultantes da implementação da sustentabilidade serão a maior contribuição.

Além de verificar projetos considerando questões ambientais, sociais e econômicas, é importante salientar a ligação dessa tese à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas. A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, que busca fortalecer a paz universal. O plano indica 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, para erradicar a pobreza e promover vida digna para todos, dentro dos limites do planeta.

Na dimensão ambiental, a verificação dos projetos quando à sua geração de impactos e danos ambientais por meio do método ReCiPe 2016, gera resultados que buscam solucionar o objetivo “Ação Contra a Mudança Global do Clima” (ODS 13), onde procuram-se medidas para combater a mudança do clima e seus impactos.

Na dimensão social, tornar os salários mais justos e garantir os direitos dos trabalhadores dentro dos setores que apresentam influência significativa nos projetos, pode atender ao objetivo “Erradicação da Pobreza” (ODS 1), que trata sobre acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares. O potencial salário justo calculado considerando a categoria sexo dos trabalhadores, gera resultados que possibilitam satisfazer ao objetivo “Igualdade de Gênero” (ODS 5), onde busca-se alcançar a igualdade de gênero. A divisão dos trabalhadores por raça/cor, auxilia no atendimento do objetivo “Redução de Desigualdades” (ODS 10), onde pretende-se reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles. Para o objetivo “Trabalho Decente e Crescimento Econômico” (ODS 8), tanto os resultados gerados pela dimensão social por meio da divisão dos trabalhadores por associativismo e por formalidade, quanto os resultados da dimensão econômica onde apresentam-se os custos mais vantajosos, tem relação com a promoção do crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, do emprego pleno e produtivo e do trabalho decente para todos.

---

Pela combinação do pensamento do ciclo de vida ao processo analítico hierárquico, a tese gera uma nova metodologia padronizada e objetiva para avaliar e conceber projetos. Os resultados gerados auxiliam no atendimento dos objetivos “Indústria, Inovação e Infraestrutura” (ODS 9), que trata da construção de infraestruturas resilientes, promoção da industrialização inclusiva e sustentável e fomento à inovação; “Cidades e Comunidades Sustentáveis” (ODS 11), que busca tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis; e, “Consumo e Produção Responsáveis” (ODS 12) que trata sobre assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.

Para aprimorar ainda mais os resultados, existem algumas melhorias que devem ser feitas em trabalhos futuros, tais como:

- Aumentar o número de setores de análise, dividindo o setor de insumos químicos e não-metálicos em, por exemplo: indústria de minérios, indústria de cerâmica, indústria de máquinas e equipamentos;
- Verificar todo o ciclo de vida das edificações (berço ao túmulo) e também considerar a possibilidade de reciclagem dos materiais e reinserção no ciclo de vida (berço ao berço), conseqüentemente, agregar os custos de operação, reposição, valor residual e custos de produção;
- Acrescentar outras etapas construtivas à análise dos projetos (projetos dos sistemas hidrossanitários e elétricos);
- Aplicar a metodologia para verificar a sustentabilidade dentro de um projeto único, comparando diferentes tipos de materiais e técnicas construtivas, bem como, analisando outros tipos de infraestrutura, superestrutura, vedação, cobertura e revestimento;
- O conceito clássico da sustentabilidade traz como dimensões o ambiente, a sociedade e a economia, entretanto, há outras como: cultural, territorial, política (nacional e internacional), que podem ser acrescentadas aos critérios de análise;
- Coletar dados primários suficientes para análise do potencial salário justo e do potencial salário justo ponderado;
- Calcular um fator de desigualdade próprio com base em dados sociais primários;
- Inserir Building Information Modelling (BIM) à metodologia de avaliação de projetos com foco na sustentabilidade. Essa ferramenta pode fornecer informações mais precisas sobre a qualidade e a quantidade de materiais e o prazo da construção, o que pode melhorar ainda mais o modelo proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABD RASHID, A. F.; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 244–248, maio 2015.

ABD RASHID, A.; IDRIS, J.; YUSOFF, S. Environmental Impact Analysis on Residential Building in Malaysia Using Life Cycle Assessment. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p. 329, 23 fev. 2017.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040:2009**:Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044:2009**:Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações, Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT. **ABNT NBR 15575:2013**:Desempenho de edificações habitacionais, Rio de Janeiro, 2013.

AKTAS, C. B.; BILEC, M. M. Impact of lifetime on US residential building LCA results. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 3, p. 337–349, 16 mar. 2012.

AL-GHAMDI, S. G.; BILEC, M. M. Green Building Rating Systems and Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparative Study of the Existing Assessment Tools. **Journal of Architectural Engineering**, v. 23, n. 1, p. 04016015, mar. 2017.

ALLACKER, K.; SOUZA, D. M. DE; SALA, S. Land use impact assessment in the construction sector: an analysis of LCIA models and case study application. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 11, p. 1799–1809, 8 nov. 2014.

ALMEIDA, A. T. DE. **Processo de Decisão nas Organizações: Construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2013.

ANDREWS, E. S. et al. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2009.

ARDITI, D. A.; MESSIHA, H. M. Life-Cycle Costing in Municipal Construction Projects. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 2, n. 1, p. 5–14, mar. 1996.

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

ASIF, M. et al. Life Cycle Assessment of a Three-Bedroom House in Saudi Arabia.

**Environments**, v. 4, n. 3, p. 52, 19 jul. 2017.

ASIF, M.; MUNEEER, T.; KELLEY, R. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1391–1394, mar. 2007.

BARBA, D. J. DE; GOMES, J. DE O.; LACERDA, J. F. S. B. DE. Sustainability assessment in conventional and industrialized systems built in Brazil. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 144–149, 2015.

BILEC, M. M.; RIES, R. J.; MATTHEWS, H. S. Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Processes for Buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 16, n. 3, p. 199–205, set. 2010.

BISSOLI-DALVI, M. **ISMAS: A sustentabilidade como premissa para a seleção de materiais**. 2014. 195 f. Tese (Doctorado en Arquitectura y Urbanismo da Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño)—Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño: Universidad del Bío-Bío, Bío-Bío, 2014.

BORK, C. A. S.; BARBA JUNIOR, D. J. DE; GOMES, J. DE O. Social Life Cycle Assessment of three Companies of the Furniture Sector. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 150–155, 2015.

BOSTANCIOGLU, E.; ONDER, N. P. Applying analytic hierarchy process to the evaluation of double skin façades. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 15, n. 1, p. 66–82, 2 jan. 2019.

BOTTERO, M.; PEILA, D. The use of the Analytic Hierarchy Process for the comparison between microtunnelling and trench excavation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 20, n. 6, p. 501–513, nov. 2005.

BRASIL. **DECRETO-LEI Nº 399, DE 30 DE ABRIL DE 1938**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1930-1939/decreto-lei-399-30-abril-1938-348733-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 26 set. 2019.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 379–388, out. 2013.

BUYTAERT, V. et al. Towards integrated sustainability assessment for energetic use of biomass: A state of the art evaluation of assessment tools. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3918–3933, out. 2011.

CABEZA, L. F. et al. 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.

CANCHUMANI, G. A. L. **Óleos lubrificantes usados: um estudo de caso da**

**avaliação de ciclo de vida do sistema de rerrefino no Brasil.** 2013. 157 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético)—Pós-Graduação em Planejamento Energético: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CARVALHO, M. T. M. **Metodologia para a avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto.** 2009. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Construção Civil)—Departamento de Engenharia Civil: Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CBIC. **Energia nas construções uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia.** Brasília: CBIC, 2017.

CIROTH, A. et al. **Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products.** Paris, France: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011.

CLIFT, M. Life-cycle costing in the construction sector. **Industry and Environment**, v. 26, p. 37–41, 2003.

COSTA, K. A. **A UTILIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO EM SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NO SUBSETOR DE EDIFICAÇÕES.** 2012. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Pós-Graduação em Engenharia Civil: Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

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

DANSO, H. Dimensions and Indicators for Sustainable Construction Materials: A Review. **Research & Development in Material Science**, v. 3, n. 4, 19 fev. 2018.

DE LASSIO, J. et al. Case Study: LCA Methodology Applied to Materials Management in a Brazilian Residential Construction Site. **Journal of Engineering**, p. 1–9, 2016.

DIEESE. **DIEESE - análise cesta básica - salário mínimo nominal e necessário - novembro 2019.** Disponível em: <<https://www.dieese.org.br/analisecestabasica/salarioMinimo.html>>. Acesso em: 25 set. 2019.

DINIZ, E. M.; BERMANN, C. Economia verde e sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 323–330, 2012.

DONG, Y. H.; NG, S. T. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—a study of commercial buildings in Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 7, p. 1409–1423, 25 jul. 2014.

DONG, Y. H.; NG, S. T. A social life cycle assessment model for building construction

in Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 8, p. 1166–1180, 6 ago. 2015.

DOSSCHE, C.; BOEL, V.; DE CORTE, W. Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 302–311, 2017.

ECOINVENT. **ecoinvent 3.6 - ecoinvent**. Disponível em: <[www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-36/ecoinvent-36.html](http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-36/ecoinvent-36.html)>. Acesso em: 19 fev. 2020.

EKENER, E. et al. Developing Life Cycle Sustainability Assessment methodology by applying values-based sustainability weighting - Tested on biomass based and fossil transportation fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 337–351, abr. 2018.

ERLANDSSON, M.; BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. **Building and Environment**, v. 38, n. 7, p. 919–938, jul. 2003.

EUROPEAN COMMISSION. **Product Environmental Footprint Pilot Guidance - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase - version 5.2**. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/Guidance\\_products.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/Guidance_products.pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2020.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Estatística e Informações: demografia e indicadores sociais: Déficit Habitacional no Brasil 2015**. Belo Horizonte: Diretoria de Estatística e Informações, 2018.

GARDNER, L. et al. Life-cycle costing of metallic structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability**, v. 160, n. 4, p. 167–177, dez. 2007.

GEA. **Global Energy Assessment (GEA) - Toward a Sustainable Future**. Cambridge, UK & New York, NY, USA & Laxenburg, Austria: Cambridge University Press & International Institute for Applied Systems Analysis, 2012.

GERVASIO, H.; DIMOVA, S.; PINTO, A. Benchmarking the Life-Cycle Environmental Performance of Buildings. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p. 1454, 7 maio 2018.

GHADIMI, P. et al. Methodologies for Measuring Sustainability of Product/Process : **Pertanika Journal Science & Technology**, v. 21, n. 2, p. 303–325, 2013.

GIUNTA, M. A. B. **Ambiente para o ensino do desenho adequado às inovações tecnológicas e às novas propostas metodológicas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 22 out. 2004.

GLASS, J. et al. Future use of life-cycle assessment in civil engineering. **Proceedings**

of the **Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 166, n. 4, p. 204–212, ago. 2013.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Princípios e métodos para tomada de decisão**. 6. ed. São Paulo, SP: Editora Atlas Ltda., 2019.

GONÇALVES DE LASSIO, J. G.; NAKED HADDAD, A. Life cycle assessment of building construction materials: case study for a housing complex. **Revista de la construcción**, v. 15, n. 2, p. 69–77, 30 ago. 2016.

GONG, Y. et al. Life Cycle Assessment Applied to Green Building Certification in South Korea. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 1309–1313, 2015.

HOSSAIN, M. U. et al. Development of social sustainability assessment method and a comparative case study on assessing recycled construction materials. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 8, p. 1654–1674, 1 ago. 2018.

HOSSEINIJOU, S. A.; MANSOUR, S.; SHIRAZI, M. A. Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p. 620–645, 15 mar. 2014.

HUANG, L. et al. Life cycle assessment and life cycle cost of university dormitories in the southeast China: Case study of the university town of Fuzhou. **Journal of Cleaner Production**, v. 173, p. 151–159, fev. 2018.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 12 fev. 2017.

IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2016**. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic\\_2016\\_v26\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2016_v26_informativo.pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IBICT. **Pensamento do Ciclo de Vida**. Disponível em: <[acv.ibict.br/acv/pensamento-do-ciclo-de-vida/%0D](http://acv.ibict.br/acv/pensamento-do-ciclo-de-vida/%0D)>. Acesso em: 15 jan. 2020.

INTI, S.; TANDON, V. Application of Fuzzy Preference–Analytic Hierarchy Process Logic in Evaluating Sustainability of Transportation Infrastructure Requiring Multicriteria Decision Making. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 23, n. 4, p. 04017014, dez. 2017.

INVIDIATA, A.; LAVAGNA, M.; GHISI, E. Selecting design strategies using multicriteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**, v. 139, p. 58–68, jul. 2018.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK & New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2015.

ISO. **ISO 14040:Environmental management — life cycle assessment — principles and framework**, Geneva, 2006a.

ISO. **ISO 14044:Environmental management — life cycle assessment — requirements and guidelines**, Geneva, 2006b.

JOHN, V. M. et al. **Mapeamento dos principais interessados e dos processos que afetam a seleção de soluções (tecnologias e materiais) para projetos de habitação social**. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/1\\_Mapeamento\\_090511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/1_Mapeamento_090511.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2020a.

JOHN, V. M. et al. **Soluções para sustentabilidade em Habitação de Interesse Social com a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo (CDHU)**. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/2\\_Licoes\\_Aprendidas\\_100511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/2_Licoes_Aprendidas_100511.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2020b.

JOHN, V. M. et al. **Avaliação das tecnologias existentes no mercado e soluções para melhorar a eficiência energética e o uso racional da água em Habitação de Interesse Social no Brasil**. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/3\\_Avaliacao\\_120511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/3_Avaliacao_120511.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2020c.

KAMALI, M.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 204, p. 109479, dez. 2019.

KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A. Integrated life cycle sustainability assessment – A practical approach applied to biorefineries. **Applied Energy**, v. 154, p. 1072–1081, set. 2015.

KIM, S.-H. et al. Environmental impact assessment and eco-friendly decision-making in civil structures. **Journal of Environmental Management**, v. 126, p. 105–112, set. 2013.

KLOEPFFER, W. State-of-the-Art in Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)

Life Cycle Sustainability Assessment of Products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008.

KMEŤKOVÁ, J.; KRAJČÍK, M. Energy Efficient Retrofit and Life Cycle Assessment of an Apartment Building. **Energy Procedia**, v. 78, p. 3186–3191, nov. 2015.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 6, p. 498–511, 21 set. 2008.

LAI, Y.-T.; WANG, W.-C.; WANG, H.-H. AHP- and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects. **Automation in Construction**, v. 17, n. 5, p. 623–632, jul. 2008.

LI, F. et al. Improved AHP Method and Its Application in Risk Identification. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 3, p. 312–320, mar. 2013.

MACEDO, D. B. G. **METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS – APLICAÇÃO EM UM SISTEMA ESTRUTURADO EM AÇO**. 2011. 265f. Tese (Doutorado em Engenharia)—Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAIA, A. G.; PIRES, P. DOS S. Uma compreensão da sustentabilidade por meio dos níveis de complexidade das decisões organizacionais. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, v. 12, n. 3, p. 177–206, jun. 2011.

MALMQVIST, T. et al. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. **Energy**, v. 36, n. 4, p. 1900–1907, abr. 2011.

MARTERN, S. VON. Life Cycle Cost LCC - a new approach to material selection. **Avesta Sheffield**, 2001.

MCKENZIE, S. **SOCIAL SUSTAINABILITY: TOWARDS SOME DEFINITIONS**: Working Paper Series n. 27. 2004. Magill, South Australia: [s.n.].

MEDEIROS, L. M. **IMPACTOS AMBIENTAIS DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS: UM EXERCÍCIO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental: Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)—Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de

Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 24 nov. 2015.

MILANI, C. J. **Proposta de indicadores de sustentabilidade para o projeto de pontes de pequenos vãos**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental: Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

MOTTA, S. F. R.; AGUILAR, M. T. P. SUSTENTABILIDADE E PROCESSOS DE PROJETOS DE EDIFICAÇÕES. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 1, 7 ago. 2009.

NASCIMENTO, E. P. DO. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 51–64, 2012.

NEUGEBAUER, S. et al. Calculation of Fair wage potentials along products' life cycle – Introduction of a new midpoint impact category for social life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 1221–1232, fev. 2017.

NOORZAI, E. Performance Analysis of Alternative Contracting Methods for Highway Construction Projects: Case Study for Iran. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 26, n. 2, p. 04020003, jun. 2020.

NORRIS, C. B. et al. **The Methodological Sheets for Sub-categories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA)**. Gothenburg, Sweden: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013.

OECD. **OECD Guidelines for Multinational Enterprises, 2011 Edition**. Paris: OECD, 2011.

OLINZOCK, M. A. et al. Life cycle assessment use in the North American building community: summary of findings from a 2011/2012 survey. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 3, p. 318–331, 8 mar. 2015.

OYARZO, J.; PEUPORTIER, B. Life cycle assessment model applied to housing in Chile. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 109–116, abr. 2014.

PEUPORTIER, B. Life Cycle Assessment applications in the building sector. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 9, n. 4, p. 334, 2008.

PIEKARSKI, C. M. **Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em Avaliação do Ciclo de Vida e indicadores corporativos**. 2015. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia)—Pós-Graduação em Engenharia de Produção: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

PLEBANKIEWICZ, E.; KUBEK, D. Multicriteria Selection of the Building Material Supplier Using AHP and Fuzzy AHP. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 1, p. 04015057, jan. 2016.

PLESSIS, C. DU. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries:**

**A discussion document.** Pretoria: CIB & UNEP-IETC, CSIR Building and Construction Technology, 2002.

PLESSIS, C. DU. A strategic framework for sustainable construction in developing countries. **Construction Management and Economics**, v. 25, n. 1, p. 67–76, jan. 2007.

PRASCEVIC, N.; PRASCEVIC, Z. APPLICATION OF FUZZY AHP FOR RANKING AND SELECTION OF ALTERNATIVES IN CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 8, p. 1123–1135, 20 nov. 2017.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro**. Faculty. Release 9.0.0.33, 2019.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual: Methods Library**. Disponível em: <<https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

RASLANAS, S.; KLIUKAS, R.; STASIUKYNAS, A. Sustainability assessment for recreational buildings. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 33, n. 4, p. 286–312, 29 out. 2016.

RASLANAS, S.; STASIUKYNAS, A.; JURGELAITYTĖ, E. Sustainability Assessment Studies of Recreational Buildings. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 929–937, 2013.

REMMEN, A.; JENSEN, A. A.; FRYDENDAL, J. **Life Cycle Management - A Business Guide to Sustainability**. Paris: UNEP DTIE, 2007.

REZA, B.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2053–2066, abr. 2011.

RUSSELL-SMITH, S. V.; LEPECH, M. D. Cradle-to-gate sustainable target value design: integrating life cycle assessment and construction management for buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 107–115, ago. 2015.

SAATY, T. L. What is the Analytic Hierarchy Process? In: **Mathematical Models for Decision Support**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. p. 109–121.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SALA, S. Triple bottom line, sustainability and sustainability assessment, an overview. In: **Biofuels for a More Sustainable Future**. Ispra: Elsevier, 2020. p. 47–72.

SANTORO, J. F. **Determinação de parâmetros ambientais para o dimensionamento**

**otimizado de estruturas em concreto armado.** 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental: Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do Ciclo de Vida e Custeio do Ciclo de Vida de Evaporadores para Usinas de Açúcar.** 2007. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia)—Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SANTOS, L. J. C.; TENÓRIO, J. A. S. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 1, p. 179–184, mar. 2010.

SARKIS, J.; MEADE, L. M.; PRESLEY, A. R. Incorporating sustainability into contractor evaluation and team formation in the built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 31, p. 40–53, ago. 2012.

SCHAMNE, A. N.; NAGALLI, A. Evaluation of the potential application of the precepts of solid waste reverse logistics to the civil construction sector in Curitiba, Paraná. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 22, n. 1/2/3/4, p. 24, 2018.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão - abordagens: AHP e Macbeth.** 1995. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Departamento de Engenharia de Produção: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SHAPIRA, A.; GOLDENBERG, M. AHP-Based Equipment Selection Model for Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 131, n. 12, p. 1263–1273, dez. 2005.

SINAPI. **SINAPI\_ref\_Insumos\_Composicoes\_PR\_112019\_Desonerado.** Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-pr/SINAPI\\_ref\\_Insumos\\_Composicoes\\_PR\\_2019\\_09a12\\_Retificacao02.zip](https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-pr/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_PR_2019_09a12_Retificacao02.zip). Acesso em: 2 fev. 2020.

SINGH, A. et al. Review of Life-Cycle Assessment Applications in Building Construction. **Journal of Architectural Engineering**, v. 17, n. 1, p. 15–23, mar. 2011.

SMITH, M.; WHITELEGG, J.; WILLIAMS, N. Life cycle analysis of housing. **Housing Studies**, v. 12, n. 2, p. 215–229, abr. 1997.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments. **Building and Environment**, v. 103, p. 215–227, jul. 2016.

STERNER, E. Life-cycle costing and its use in the Swedish building sector. **Building Research & Information**, v. 28, n. 5–6, p. 387–393, 18 set. 2000.

UGAYA, C. M. L. **Análise do Ciclo de Vida: estudo de caso para materiais e componentes automotivos no Brasil**. 2001. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia)—Faculdade de Engenharia Mecânica: Universidade de Campinas, 2001.

VAN OOTEGHEM, K.; XU, L. The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. **Building and Environment**, v. 49, p. 212–226, mar. 2012.

VIEIRA, G. H. **Análise e comparação dos métodos de decisão multicritério AHP clássico e multiplicativo**. 2006. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)—Instituto Tecnológico de Aeronáutica: São José dos Campos, 2006.

VIEIRA NETO, J.; FARIAS FILHO, J. R. DE. Sustainability in the civil construction industry: an exploratory study of life cycle analysis methods. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 16, n. 5/6, p. 420, 2013.

VITALE, P.; ARENA, U. An attributional life cycle assessment for an Italian residential multifamily building. **Environmental Technology**, v. 39, n. 23, p. 3033–3045, 2 dez. 2018.

VITORIO JUNIOR, P. C.; KRIPKA, M. Fair wage potential as a tool for social assessment in building projects. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 18 ago. 2020.

WARIS, M. et al. An Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) for Sustainable Procurement of Construction Equipment: Multicriteria-Based Decision Framework for Malaysia. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2019, p. 1–20, 15 set. 2019.

WCED. **Our Common Future**. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

WÜBBENHORST, K. L. Life cycle costing for construction projects. **Long Range Planning**, v. 19, n. 4, p. 87–97, ago. 1986.

XAVIER, J. H. V. **Análise de Ciclo de Vida (ACV) da produção agrícola familiar em Unaí-MG: resultados econômicos e impactos ambientais**. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável)—Centro de Desenvolvimento Sustentável: Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

YOUSSEF, A. M.; PRADHAN, B.; TARABEES, E. Integrated evaluation of urban development suitability based on remote sensing and GIS techniques: contribution from the analytic hierarchy process. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 4, n. 3–4, p. 463–473, 27 abr. 2011.

YU, A. S. O. **Tomada de decisão nas organizações: Uma visão multidisciplinar**. 1. ed. São Paulo, SP: Editora Saraiva, 2011.

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

ZAMPORI, L. et al. **Guide for interpreting life cycle assessment result**. Disponível em: <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104415/lb-na-28266-en-n.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

ZOLFAGHARIAN, S.; IRIZARRY, J. Constructability Assessment Model for Commercial Building Designs in the United States. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 8, p. 04017031, ago. 2017.

## APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA À TESE

---

VITORIO JUNIOR, P. C.; KRIPKA, M. Fair wage potential as a tool for social assessment in building projects. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 18 ago. 2020.

VITORIO JUNIOR, Paulo Cezar; KRIPKA, Moacir. An overview of life cycle thinking applied to buildings: A systematic review. – Submetido (em processo de revisão).

VITORIO JUNIOR, Paulo Cezar; KRIPKA, Moacir. **4th Responsible Management Education Research Conference**, 2017, Curitiba. The optimization perspective of the sustainability problem, 2017.



# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)