

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura**

Bárbara Pretto Biasi

**Avaliação integrada de impactos ambientais e econômicos
relacionados à fase de manutenção de edificações públicas
educacionais**

Porto Alegre
2023

BÁRBARA PRETTO BIASI

**AVALIAÇÃO INTEGRADA DE IMPACTOS AMBIENTAIS E
ECONÔMICOS RELACIONADOS À FASE DE
MANUTENÇÃO DE EDIFICAÇÕES PÚBLICAS
EDUCACIONAIS**

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

Profa. PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello
PhD., UFRGS, Brasil
Orientadora

Porto Alegre
2023

BÁRBARA PRETTO BIASI

**AVALIAÇÃO INTEGRADA DE IMPACTOS AMBIENTAIS E
ECONÔMICOS RELACIONADOS À FASE DE
MANUTENÇÃO DE EDIFICAÇÕES PÚBLICAS
EDUCACIONAIS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Sustentabilidade, e aprovada em sua forma final pela Professora Orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2023.

**Profa. PhD. Ana Carolina Badalotti
Passuello**
PhD. pela UFRGS, Brasil
Orientadora

Profa. PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello
Coordenadora PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Andrea Parisi Kern (UNISINOS)
Dra. pela UFRGS, Brasil

Profa. Dra. Iamara Rossi Bulhões (UFRGS)
Dra. pela UNICAMP, Brasil

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)
Dr. pela UFRGS, Brasil

A todas as pessoas que me inspiraram a ser quem sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos, primeiramente, são para Deus e o universo, por todas as oportunidades, desafios e conquistas.

Agradeço à Universidade, ao PPGCI, ao grupo de pesquisa *LiFE Sustainability*, aos professores(as) e também aos colegas pelos conhecimentos e experiências compartilhados ao longo da pós-graduação.

Agradeço especialmente à minha orientadora Profa. PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello, que tornou esse trabalho possível com todo apoio, incentivo e sabedoria. Também ao Prof. PhD. Robert J. Ries e à colega Me. Constance Manfredini, que participaram da elaboração do estudo.

Agradeço à minha banca examinadora Profa. Dra. Andrea Parisi Kern, Profa. Dra. Iamara Rossi Bulhões e Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat pelas contribuições ao trabalho.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS pela confiança no meu trabalho e pela disponibilização das informações do estudo de caso.

Agradeço a toda minha família, pelo amor e apoio incondicional, por acreditarem nos meus sonhos e serem exemplos de vida. Principalmente à minha mãe Noelise, ao meu pai José Luís e aos meus irmãos, Isabela e Francisco.

Agradeço aos meus companheiros de mestrado, Síntique, Victor e Marciele, pela força e empatia. Agradeço aos meus amigos, pela amizade e boas energias, entre eles: Camila, Vanessa, Kiara, Mariana, Mateus, Caio e Sarah. Agradeço ao meu namorado Maykon por sempre estar ao meu lado.

Finalmente, agradeço pela evolução pessoal e profissional, pelos objetivos e metas que me encaminham a me tornar Mestra em Engenharia Civil.

“o rumo que muda o mundo
é eterno”

(Rupi Kaur)

RESUMO

BIASI, B. P. **Avaliação integrada de impactos ambientais e econômicos relacionados à fase de manutenção de edificações públicas educacionais.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

A sustentabilidade da sociedade está interligada com a melhoria da sustentabilidade do ambiente construído, especialmente dos edifícios públicos. A negligência quanto à deterioração dos edifícios públicos de ensino durante a fase de uso e operação, a falta de planejamento com manutenção preventiva e o desrespeito aos impactos ambientais afetam a qualidade e o desempenho do edifício, a educação e o bem-estar de seus ocupantes. O objetivo deste estudo é definir um método para avaliação dos potenciais impactos ambientais e econômicos de oito alternativas de materiais para sistemas de pisos, janelas e pinturas internas. O escopo considera a fase de substituição para o período de referência de 30 anos de um edifício representativo do ensino público em Porto Alegre, Brasil. O método inclui a aplicação integrada de ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA com 7 indicadores) e Custo do Ciclo de Vida (LCC com 2 indicadores), de acordo com regulamentações nacionais e internacionais. A análise recebe o auxílio dos softwares *OpenLCA* e *Excel*, além de combinação de cenários e análises de sensibilidade. Os resultados demonstram disparidades na análise integrada LCA-LCC entre as diferentes alternativas. Os resultados indicam que as alternativas com menores impactos ambientais são pisos de madeira, janelas de madeira e pintura acrílica. Do ponto de vista econômico, há redução de custos para as alternativas de pisos cerâmicos, janelas metálicas e pintura acrílica. Nota-se que o sistema de pintura obtém resultados convergentes para a sustentabilidade na redução de impactos e custos ambientais. No caso de alternativas de pisos e janelas, a escolha da melhor alternativa leva em consideração aspectos extras, como: disponibilidade de materiais, prioridade ambiental, entre outros. Assim, a discussão do estudo se desdobra para proporcionar escolhas conscientes e equilibradas para a tomada de decisão dos profissionais técnicos do setor construtivo, sendo público ou privado. O estudo obtém resultados promissores e inéditos no que diz respeito ao aprofundamento na literatura sobre impactos ambientais e econômicos em edificações brasileiras.

Palavras-chave: Avaliação de impactos. Manutenção. Edificações públicas educacionais.

ABSTRACT

BIASI, B. P. **Integrated assessment of environmental and economic impacts related to the maintenance phase of public educational buildings.** 2023. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

The sustainability of society is interconnected with improving the sustainability of the built environment, especially public buildings. Negligence regarding the deterioration of public education buildings during the use and operation phase, the lack of planning with preventive maintenance and disregard for environmental impacts affect the quality and performance of the building, the education and well-being of its occupants. The objective of this study is to define a method for evaluating the potential environmental and economic impacts of eight material alternatives for flooring, window and painting systems. The scope considers the replacement phase for the reference period of 30 years of a representative public education building in Porto Alegre, Brazil. The method includes the integrated application of Life Cycle Assessment (LCA with 7 indicators) and Life Cycle Cost (LCC with 2 indicators) tools, in accordance with national and international regulations. The analysis is supported by OpenLCA and Excel software, in addition to a combination of scenarios and sensitivity analysis. The results demonstrate disparities in the integrated LCA-LCC analysis between the different alternatives. The results indicate that the alternatives with the lowest environmental impacts are wooden floors, wooden windows and acrylic paint. From an economic point of view, there is a cost reduction for the alternatives of ceramic floors, metal windows and acrylic paint. It is noted that the painting system obtains convergent results for sustainability in reducing environmental impacts and costs. In the case of flooring and window alternatives, choosing the best alternative takes into account extra aspects, such as: availability of materials, environmental priority, among others. Thus, the discussion of the study unfolds to provide conscious and balanced choices for decision-making by technical professionals in the construction sector, whether public or private. The study obtains promising and unprecedented results in terms of deepening the literature on environmental and economic impacts on Brazilian buildings.

Keywords: Impact assessment. Maintenance. Public educational buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Análise bibliométrica da revisão sistemática I.....	24
Figura 2 – Conceito de avaliação de sustentabilidade de edificações	25
Figura 3 – Estágios de avaliação de um edifício	26
Figura 4 – Estudos de caso da revisão sistemática I.....	33
Figura 5 – Análise bibliométrica da revisão sistemática II	40
Figura 6 – Número de estudantes matriculados na educação infantil no Brasil.....	45
Figura 7 – Presença de recursos relacionados à tecnologia e à infraestrutura disponíveis nas escolas de educação infantil no Brasil.....	46
Figura 8 – Delineamento da pesquisa pela estratégia <i>Design Science Research</i> (DSR).....	54
Figura 9 – Estruturação esquemática do método de aplicação em estudo de caso.....	56
Figura 10 – Planta baixa da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias com escala gráfica de plotagem de 1:200	58
Figura 11 – Registro fotográfico da fachada do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias em 2023.....	60
Figura 12 – Localização georreferenciada da edificação do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias	61
Figura 13 – Fluxograma do processo de cálculo do desempenho ambiental (LCA).....	62
Figura 14 – Definição dos estágios de avaliação do estudo de caso	64
Figura 15 – Fluxograma do processo de cálculo do desempenho econômico (LCC)	70
Figura 16 – Variação da Média Anual INCC e SELIC	74
Figura 17 – Registros fotográficos das condições atuais da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias	77
Figura 18 – Linha do tempo de substituições do sistema de revestimentos de pisos para três alternativas de materiais conforme Cenário base (estimativa própria) e Cenário teste (NBR 15575-1)	82
Figura 19 – Linha do tempo de substituições do sistema de janelas para três alternativas de materiais conforme Cenário base (estimativa própria) e Cenário teste (NBR 15575-1).....	83
Figura 20 – Linha do tempo de substituições do sistema de pinturas internas para três alternativas de materiais conforme Cenário base (estimativa própria) e Cenário teste (NBR 15575-1)	83
Figura 21 – Custos iniciais e totais das alternativas de sistemas de pisos, janelas e pinturas internas para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos.....	96
Figura 22 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos totais dos cenários alternativos de pisos cerâmico (FL-C), madeira (FL-W) e vinílico (FL-V) em relação ao cenário base de referência (FL-C) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² no caso dos pisos) no período de referência de 30 anos	97
Figura 23 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por estágio do ciclo de vida dos cenários alternativos de pisos cerâmico (FL-C), madeira (FL-W) e vinílico (FL-V) em relação ao cenário base de referência (FL-C) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do	

ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² no caso dos pisos) no período de referência de 30 anos	99
Figura 24 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por materiais dos cenários alternativos de pisos cerâmico (FL-C), madeira (FL-W) e vinílico (FL-V) em relação ao cenário base de referência (FL-C) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² no caso dos pisos) no período de referência de 30 anos	101
Figura 25 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos totais dos cenários alternativos de janelas metálicas (FR-M), madeira (FR-W) e PVC (FR-P) em relação ao cenário base de referência (FR-M) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (114,08 m ² no caso das janelas) no período de referência de 30 anos ..	102
Figura 26 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por estágio do ciclo de vida dos cenários alternativos de janelas metálicas (FR-M), madeira (FR-W) e PVC (FR-P) em relação ao cenário base de referência (FR-M) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (114,08 m ² no caso das janelas) no período de referência de 30 anos	104
Figura 27 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por materiais dos cenários alternativos de janelas metálicas (FR-M), madeira (FR-W) e PVC (FR-P) em relação ao cenário base de referência (FR-M) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (114,08 m ² no caso das janelas) no período de referência de 30 anos	105
Figura 28 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos totais dos cenários alternativos de pinturas acrílica (PA-A) e PVA (PA-PVA) em relação ao cenário base de referência (PA-A) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (1.932,77 m ² no caso das pinturas) no período de referência de 30 anos	106
Figura 29 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por estágio do ciclo de vida dos cenários alternativos de pinturas acrílica (PA-A) e PVA (PA-PVA) em relação ao cenário base de referência (PA-A) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (1.932,77 m ² no caso das pinturas) no período de referência de 30 anos	108
Figura 30 – Resumo ilustrativo impactos ambientais e econômicos totais dos cenários alternativos de sistemas de pisos, janelas e pinturas para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos	109
Figura 31 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por estágio do ciclo de vida dos cenários alternativos de pisos vinílico (FL-V encaixado) em relação ao cenário base de referência (FL-V colado) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² no caso dos pisos) no período de referência de 30 anos	114
Figura 32 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por variação da vida útil (base e NBR 15575) dos cenários alternativos de pisos cerâmico (FL-C), madeira (FL-W) e vinílico (FL-V) em relação ao cenário base de referência (FL-C) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² no caso dos pisos) no período de referência de 30 anos	115

Figura 33 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por variação da vida útil (base e NBR 15575) dos cenários alternativos de janelas metálicas (FR-M), madeira (FR-W) e PVC (FR-P) em relação ao cenário base de referência (FR-M) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (114,08 m ² no caso das janelas) no período de referência de 30 anos	117
Figura 34 – Comparação dos resultados de impactos ambientais e econômicos por variação da vida útil (base e NBR 15575) dos cenários alternativos de pinturas acrílica (PA-A) e PVA (PA-PVA) em relação ao cenário base de referência (PA-A) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (1.932,77 m ² no caso das pinturas) no período de referência de 30 anos	118
Figura 35 – Comparação dos resultados de impactos econômicos por variação de índices SELIC e INCC dos cenários alternativos de sistemas de pisos, janelas e pinturas internas em relação ao Cenário A de referência (FL-C, FR-M e PA-A) para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fluxo metodológico das revisões sistemáticas (RSI e RSII).....	22
Tabela 2 – Estudos de caso da revisão sistemática I: Estágios de avaliação de um edifício....	28
Tabela 3 – Categorias de impacto da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) conforme BS EN 15804 (2019)	29
Tabela 4 – Categorias de impacto da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) conforme BS EN 15804 (2013): referência para o estudo	30
Tabela 5 – Estudos de caso da revisão sistemática I: Escopo e objetivo da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA).....	32
Tabela 6 – Propostas de análises LCC (RS1-IMP).....	37
Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP) de acordo com norma de desempenho (ABNT NBR 15575-1, 2021)	42
Tabela 8 – Valores de vida útil (anos) para doze modelos de vida útil selecionados	43
Tabela 9 – Estudos de casos e Propostas da revisão sistemática II: Informações sobre avaliações de impactos	48
Tabela 10 – Estudos de casos e Propostas da revisão sistemática II: Estágios de avaliação de um edifício.....	50
Tabela 11 – Dados gerais do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias.....	57
Tabela 12 – Especificações dos setores do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias	59
Tabela 13 – Representatividade da massa dos sistemas construtivos do estudo de caso com período de referência do ano zero (2023) relativo à edificação existente e do ano trinta (2053) relativo às substituições ao longo de 30 anos	63
Tabela 14 – Aspectos do objetivo e escopo da avaliação ambiental (LCA)	66
Tabela 15 – Quantitativos de área e de massa para alternativas de sistemas construtivos.....	67
Tabela 16 – Distâncias de transporte de materiais para módulo B4 (substituições)	68
Tabela 17 – Distâncias de transporte de resíduos para o módulo C2 (transporte de fim de vida)	69
Tabela 18 – Aspectos do objetivo e escopo da avaliação econômica (LCC).....	71
Tabela 19 – Informações sobre as bases de dados econômicos (SINAPI e SBC)	72
Tabela 20 – Informações sobre os índices de custos econômicos (INCC-M e SELIC).....	73
Tabela 21 – Análise de sensibilidade entre combinações de índices de custos (INCC-M e SELIC).....	74
Tabela 22 – Representatividade na orçamentação de manutenção da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias	78
Tabela 23 – Valores de vida útil para Cenário base (estimativa própria) e Cenário teste (NBR 15575) com período de referência de 30 anos para o número de substituições	81
Tabela 24 – Processo de materiais das bases de dados <i>Ecoinvent</i> e <i>EPD System</i> para avaliação ambiental	85
Tabela 25 – Composição de piso de madeira (FL-W) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (586,93 m ²)	86

Tabela 26 – Composição de piso cerâmico (FL-C) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (586,93 m ²)	87
Tabela 27 – Composição de piso vinílico (FL-V) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (586,93 m ²)	88
Tabela 28 – Composição de janelas metálicas (FR-M) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (114,80 m ²).....	89
Tabela 29 – Composição de janelas de madeira (FR-W) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (114,80 m ²).....	90
Tabela 30 – Composição de janelas de PVC (FR-P) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (114,80 m ²)	91
Tabela 31 – Composição de pintura com tinta acrílica (PA-A) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (1.932,77 m ²).....	92
Tabela 32 – Composição de pintura com tinta PVA (PA-PVA) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (1.932,77 m ²).....	93
Tabela 33 – Impactos ambientais e econômicos totais das alternativas de sistemas de pisos, janelas e pinturas internas para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos	94
Tabela 34 – Cenários possíveis para combinação de alternativas para os sistemas de pisos, janelas e pinturas	110
Tabela 35 – Impactos ambientais e econômicos totais dos cenários alternativos de combinação de sistemas de pisos, janelas e pinturas internas para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos	110
Tabela 36 – Composição de piso vinílico encaixado (FL-V) formado pelas bases de dados SINAPI e SBC para avaliação econômica para edificação completa (586,93 m ²).....	113
Tabela 37 – Cenários alternativos de variação de índices SELIC e INCC para avaliação econômica de sistemas de pisos, janelas e pinturas para os estágios B4, C1, C2 e C4 do ciclo de vida da edificação completa (586,93 m ² para pisos, 114,08 m ² para janelas e 1.932,77 m ² para pinturas) no período de referência de 30 anos	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ADP-F: Potencial de depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis, do inglês *Abiotic Resources Depletion (fossil fuels)*
- ADP-N: Potencial de depleção de recursos abióticos - elementos, reservas finais, do inglês *Abiotic Resources Depletion (non-fossil)*
- AP: Potencial de acidificação, do inglês *Acidification potential*
- ATHENA: Athena Institute
- BCB: Banco Central do Brasil
- BDI: Benefícios e Despesas Indiretas
- BEES: Building for Environmental and Economic Sustainability
- BIM: Modelagem de Informação da Construção, do inglês *Building Information Modeling*
- BR: Brasil
- BRI: British Shorthair
- BSI ou BS: British Standards Institution
- CA: Canadá
- DAP: Declaração Ambiental de Produto
- DE: Alemanha
- DK: Dansk Standard
- DSR: *Design Science Research*
- DSS: sistema automatizado de apoio à decisão
- EC: Economia Circular
- EE: Escola de Engenharia
- EIC: custo de impacto ambiental, do inglês *environmental impact cost*
- EN: *European Committee for Standardization*
- EP: Potencial de eutrofização, do inglês *Eutrophication – generic*
- EPD: *Environmental Product Declarations*
- ERBI: Índice de Carga Relativa Ambiental, do inglês *Environmental Relative Burden Index*
- FAETP: Ecotoxicidade aquática de água doce, do inglês *Freshwater aquatic ecotoxicity*
- FGV: Fundação Getúlio Vargas
- FL-C: Piso cerâmico, do inglês *Ceramic floor*
- FL-V: Piso vinílico, do inglês *Vinyl floor*
- FL-W: Piso de madeira, do inglês *Wood floor*
- FR-M: Janela metálica, do inglês *Metal window frame*
- FR-P: Janela de PVC, do inglês *PVC window frame*

FR-W: Janela de madeira, do inglês *Wooden window frame*

GEE: Gases Do Efeito Estufa

GWP: Potencial de aquecimento global, do inglês *Global warming potential*

HTP: Toxidade humana, do inglês *Human toxicity*

HVAC: Aquecimento, ventilação e ar-condicionado, do inglês *Heating, Ventilating and Air Conditioning*.

IBRE: Instituto Brasileiro de Economia

INCC-M: Índice Nacional de Custo da Construção

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ISO: Organização Internacional de Normalização, do inglês *International Organization for Standardization*

LCA: Avaliação do Ciclo de Vida, do inglês *Life Cycle Assessment*

LCC: Custo do Ciclo de Vida, do inglês *Life Cycle Cost Assessment*

LCI: Inventário do Ciclo de Vida, do inglês *Life Cycle Inventory*

LCIA: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, do inglês *Life Cycle Impact Assessment*

MAETP: Ecotoxicidade aquática de água salgada, do inglês *Marine aquatic ecotoxicity*

MCDA: Análise de Decisão Multicritério, do inglês *Multiple Criteria Decision Analysis*

MEANS: RSMMeans

NBR: Norma Técnica Brasileira

NL: Holanda

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

NZ: Nova Zelândia

NZBM: NZ Building Management

ODP: Potencial de depleção da camada de ozônio, do inglês *Ozone depletion potential*

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PA-A: Pintura acrílica, do inglês *Acrylic painting*

PA-PVA: Pintura PVA, do inglês *Water based paint (PVA)*

PIN: Pintura interna

PO-NOX: Oxidação fotoquímica - alto NOx, do inglês *Photochemical oxidation*

PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

PV: Valor Presente, do inglês *Present Value*

PVC: Policloreto de vinila

RNA: Rede Neural Artificial

RoW: *Rest of the World*

RS: Rio Grande do Sul

RSL: Vida útil de referência, do inglês *Reference Service Life*

SABO: *Sabo Standard*

SBC: *Informativo SBC*

SBG: *Standards-Based Grading*

SD: Dinâmica de Sistemas, do inglês *Systems Dynamics*

SE: Suécia

SELIC: Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SINAPI: Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil

SL: Vida útil, do inglês *Service Life*

TETP: Potencial Toxicidade terrestre, do inglês *Terrestrial ecotoxicity potential*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UK: Reino Unido

ULC: ULC Standards

UNESCO: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas

UNISINOS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos

US: Estados Unidos

USACE: U.S. Army Corps of Engineers

UVB: Raios ultravioleta B

VUP: Vida Útil de Projeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	PRESSUPOSTOS	17
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.4	QUESTÕES DE PESQUISA.....	19
1.5	OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.6	DELIMITAÇÕES	20
1.7	LIMITAÇÕES	20
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS EM EDIFICAÇÕES	23
2.1.1	Avaliação do Ciclo de Vida (LCA).....	26
2.1.2	Custo do Ciclo de Vida (LCC).....	35
2.2	MANUTENÇÃO DE EDIFICAÇÕES.....	39
2.2.1	Estimativas de vida útil de sistemas e/ou edificações	41
2.2.2	Contexto da manutenção de edificações escolares públicas no Brasil	44
2.2.3	Manutenção de edificações conforme a literatura internacional e nacional.....	47
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	53
3.1	ESTRATÉGIA E DELINEAMENTO DO MÉTODO.....	53
3.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	57
3.2.1	Estudo de caso.....	57
3.2.2	Avaliação Do Ciclo De Vida (LCA)	62
3.2.3	Custo do Ciclo de Vida (LCC).....	70
4	RESULTADOS.....	76
4.1	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (LCI).....	76
4.1.1	Seleção dos sistemas construtivos avaliados.....	76
4.1.2	Especificação de materiais das alternativas	78
4.1.3	Definição de vida útil.....	80

4.1.4 Definição de processos.....	84
4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (LCIA)	93
4.2.1 Análise de impactos do sistema de pisos (cerâmico, madeira e vinílico)	97
4.2.2 Análise de impactos do sistema de janelas (metálica, madeira e PVC)	102
4.2.3 Análise de impactos do sistema de pinturas internas (acrílica e PVA)	106
4.2.4 Análise combinada entre sistemas	109
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	112
4.3.1 Sensibilidade da variação de materiais na alternativa de piso vinílico	112
4.3.2 Sensibilidade da variação de Vida Útil de Referência (RSL) de materiais	115
4.3.3 Sensibilidade da variação de índices INCC e SELIC na avaliação econômica.....	119
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
REFERÊNCIAS	127
Apêndice A – Planilha orçamentária para manutenção global da edificação completa do estudo de caso (Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS) ..	131
Apêndice B – Quantitativo da edificação do estudo de caso	138
Apêndice C – Composições analíticas utilizadas na avaliação do Custo do Ciclo de Vida (LCC) segundo as bases de dados SINAPI e SBC	140

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a introdução desta pesquisa, englobando as premissas do estudo: contexto e justificativa (item 1.1), pressupostos (item 1.2), problema de pesquisa (item 1.3), questões de pesquisa (item 1.4), objetivos da pesquisa (item 1.5), além das delimitações (item 1.6) e limitações (item 1.7). A estrutura do trabalho (item 1.8) também é evidenciada.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A sustentabilidade é condicionada por escolhas ecologicamente corretas, economicamente viáveis, socialmente justas e culturalmente diversas. Atualmente, há recorrência desse tema no setor da construção civil, sendo esta responsável pelo consumo de recursos e de energia, por emissões substanciais ao ambiente e pela geração de resíduos. Por outro lado, a construção civil também possui grande potencial para a mitigação desses impactos em edificações (Alshamrani, 2021). A sustentabilidade está inter-relacionada com a melhoria do ambiente construído, portanto, projetar construções sustentáveis é um dever dos profissionais da área.

Devido ao crescente desenvolvimento urbano e conseqüente intervenção construtiva no entorno, provoca-se o debate sobre a diminuição dos efeitos ambientais negativos e do consumo excessivo de recursos em edificações – que diferem conforme os tipos e as quantidades de materiais, equipamentos e serviços. Os principais fatores que determinam os impactos em construções são referentes aos produtos utilizados, seus métodos de síntese, entrega e manuseio, além da durabilidade e do potencial de reutilização e reciclagem, ou seja, a análise de todo o ciclo de vida da edificação (Alshamrani, 2021; Selicati & Cardinale, 2023)

Até o momento, o critério de seleção mais significativo na tomada de decisão de produtos, elementos e/ou sistemas construtivos é baseado principalmente no desempenho econômico, com a prioridade aproximada de 33% para o custo operacional seguido de 25% para o custo inicial (Alshamrani & Alshibani, 2020). Entretanto, considerando o panorama e as demandas atuais, é essencial a inclusão de uma perspectiva ambiental para minimização dos danos ao meio ambiente – essa abordagem holística da sustentabilidade é muitas vezes enriquecida com estratégias que englobam todo o ciclo de vida (Ferreira et al., 2015; Wittocx et al., 2022). Nesse

contexto, existem abordagens de ciclo de vida que permitem quantificar os potenciais impactos e os níveis de desempenho das edificações, entre essas metodologias, estão a Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês *Life Cycle Assessment*, LCA) e o Custo do Ciclo de Vida (do inglês *Life Cycle Cost Assessment*, LCC).

A LCA é usada como ferramenta para quantificação dos impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de um edifício, de acordo com os estágios construtivos e o desempenho dos seus sistemas e elementos. A LCC é uma ferramenta de avaliação econômica que prevê o custo total do ciclo de vida de um edifício, incluindo as etapas de aquisição, projeto, construção, operação, manutenção e descarte (Santos et al., 2019). Ambas as abordagens podem ser aplicadas com recortes metodológicos a depender do escopo e do objetivo da avaliação.

O cálculo de impactos em edificações ao longo do ciclo de vida possibilita a otimização ambiental e econômica da construção civil, o desenvolvimento sustentável e a tomada de decisão consciente. A complexidade dos processos inerentes às construções deve ser prevista nos impactos, sendo condicionada pelas limitações das avaliações de impactos, a extensa vida útil do produto e a influência do uso e operação (Pulgrossi, 2020).

O ciclo de vida de uma edificação é composto pelas etapas de produção, construção, uso e fim de vida – as quais influenciam nas dimensões ambiental, econômica e social (BS EN 16627, 2015). A fase de uso e operação apresenta grande variabilidade no desempenho da edificação, dependendo do comportamento dos ocupantes, do padrão de uso e da frequência de manutenção. A determinação do valor de vida útil do elemento está diretamente relacionada ao número de substituições a serem feitas ao longo do ciclo de vida da edificação. Nessa condição, são averiguadas variações entre 6% e 72% na contribuição de impactos ambientais da etapa de substituições a depender da referência de vida útil, do inventário do ciclo de vida e da categoria de impacto avaliada (M. Morales, 2019; Oyarzo & Peuportier, 2014).

Estudos constataam que a fase de uso e operação é relevante por representar o período mais extenso no ciclo de vida de uma edificação, pela geração de impactos significativos e pela subjetividade inerente aos diferentes comportamentos dos usuários (Ferreira et al., 2015; Moraga, 2017; M. Morales et al., 2019). Na esfera ambiental, grande parte dos impactos dos sistemas construtivos está relacionada ao uso da edificação (Moraga, 2017; Ortiz-Rodríguez et al., 2010; Oyarzo & Peuportier, 2014). Cerca de 80% a 85% dos impactos globais podem ser

contabilizados nessa fase (Buyle et al., 2013; Ferreira et al., 2015), onde a etapa de substituição (B4) pode englobar mais de 50% dos impactos ambientais gerados (Pulgrossi, 2020).

Do ponto de vista econômico, os resultados encontrados para a fase de uso e operação de uma edificação residencial mostram que os custos do estágio de construção variam de 55% a 58%, seguidos pelos custos de operação e manutenção com representatividade de 25% a 27% do custo do ciclo de vida (Alshamrani, 2021). Além disso, na maioria dos países há uma grande área urbana já construída, dessa forma, as intervenções durante o uso podem representar quase 50% do mercado da construção, sendo empregadas pelos usuários, empresas seguradoras e agentes responsáveis (Ferreira et al., 2015). Tal perspectiva reforça a necessidade do emprego de renovação sustentável ao longo do ciclo de vida, sendo a solução mais provável para o mercado imobiliário, todavia, a mais desafiadora.

A busca por edifícios sustentáveis é um desafio e uma preocupação para as instituições. Nos últimos anos, a Administração Pública Brasileira implementou medidas legislativas obrigatórias para a incorporação de estratégias sustentáveis em edifícios existentes e futuros, como: eficiência do consumo de compras públicas no uso, mitigação e tratamentos de possíveis impactos ambientais. Tarantini, Loprieno e Porta (2011) afirmam que as compras verdes são uma ferramenta política significativa para reduzir os impactos ambientais de serviços e produtos. A influência no mercado promovida pelos contratos públicos ecológicos tem o potencial de inspirar fornecedores, fabricantes, empresas privadas e consumidores a adotarem práticas de produção e consumo mais sustentáveis.

Atualmente, o processo de manutenção de edificações é focado na solução e correção de patologias em edificações deterioradas, quando deveria ocorrer o prognóstico, a periodicidade e a prevenção de problemas. Além disso, no geral, as edificações não possuem o histórico para acompanhamento de intervenções, nem consideram a análise de impactos ambientais e econômicos (Gamarra et al., 2019). Comumente são utilizados os sistemas construtivos de menor custo na economia atual, o que, muitas vezes, acarreta em sistemas de qualidade, desempenho e durabilidade abaixo do esperado à longo prazo.

A crescente discussão sobre manutenibilidade de edifícios modifica a cultura de que o processo de construção seja limitado até o momento de entrega da edificação – o acompanhamento e a gestão da construção devem ser feitos durante todo seu ciclo de vida, inclusive no estágio de

uso e operação, que contabiliza sete fases (B1-B7) ao todo: uso, manutenção, reparos, substituições, reformas, consumo de energia e de água operacional (BS EN 16627, 2015).

Segundo a ABNT NBR 5674 (2012), a manutenção de edificações consiste em um processo obrigatório e regulamentado, que deve ser planejado e duradouro para manter o desempenho dos sistemas. A manutenção pode ser dividida em três frentes: (i) Preventiva, antes de ocorrer o problema; (ii) Preditiva, monitoramento para identificar a possibilidade de ocorrer o problema; e (iii) Corretiva ou de avaria, após ocorrer o problema (ABNT NBR 5462, 2016).

Há normativas nacionais sobre a manutenção de edificações e sistemas, como: confiabilidade e manutenibilidade (ABNT NBR 5462, 2016), procedimento da manutenção de edificações (ABNT NBR 5674, 2012), elaboração de manuais de uso (ABNT NBR 14037-1, 2011), desempenho de elementos construtivos (ABNT NBR 15575-1, 2021) e reforma de edificações (ABNT NBR 16280, 2020). Tais literaturas descrevem conceitos e procedimentos para a adequada manutenção, entretanto, faltam normativas que definam o tempo de vida útil específico e detalhado para diferentes sistemas. Além de que, mesmo com a obrigatoriedade de entrega de manuais técnicos sobre a manutenção das construções, na prática, esses manuais não recebem a devida atenção pelos ocupantes dos edifícios e prestadores de serviço.

No meio internacional, as normativas europeias ganham destaque com a definição de métodos de cálculos de impactos ambientais, econômicos e sociais (BS EN 15804, 2019; BS EN 15978, 2011; BS EN 16627, 2015). A literatura internacional regulamenta a aplicação de avaliações de impactos de edificações, no entanto, a aplicação dessas normativas é condicionada principalmente pela obrigatoriedade de selos verdes e certificações ambientais para edifícios. No Brasil, há um aumento de reconhecimento e aplicação dessas certificações, por conta do lançamento de legislações, como a Portaria nº 309 de 6 de setembro de 2022 (INMETRO, 2022) – que define instruções e protocolos para a eficiência energética em edificações comerciais, de serviços e públicas, e residenciais.

Os trabalhos de Guardigli *et al.* (2019), Medgyasszay *et al.* (2018), Trovato *et al.* (2020), Užšilaityte *et al.* (2010) elaboram o estudo integrado de avaliações ambientais e econômicas em edifícios públicos, em que o processo de manutenção demanda uma série de procedimentos técnicos, administrativos e legislativos. O setor público é fundamentalmente diferente do setor

privado, porque os fatores políticos afetam a alocação de recursos, envolvendo as agências, o tesouro e o interesse público (Salicath & Liyanage, 2016).

As fases do processo podem ser elencadas em: problema na edificação, solicitação de manutenção (majoritariamente pelos responsáveis usuários da edificação), vistorias técnicas, documentação do escopo, licitação pública, contratação da empresa, execução da obra, fiscalização, aprovação e liberação de pagamento dos serviços à empresa (Libraga, 2022; TCU, 2014). Vale ressaltar que a maioria dos setores públicos utiliza manutenções corretivas, que sanam problemas pontuais que afetam o uso do edifício.

Especificamente para edificações educacionais, a falta de manutenções acarreta danos ao cotidiano dos ocupantes – como alunos(as), professores(as) e funcionários(as) – influenciando não apenas a estrutura e a ocupação do edifício, mas as esferas de educação e saúde. Em Porto Alegre/RS, cerca de cem escolas enfrentam condições preocupantes nos seus edifícios, aportado pelo emprego de uma força-tarefa composta por profissionais das áreas da construção civil, buscando remediar a situação da manutenção das escolas. Dentre elas, a E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias (estudo de caso representativo deste trabalho) fiscalizada pela autora do trabalho, atuando temporariamente como Engenheira Civil na Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS (LEI N° 13.113, DE 25 DE MAIO DE 2022, 2022).

A avaliação integrada de impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção de edificações educacionais públicas possibilita aprofundar as discussões e contribuições para a análise de sistemas construtivos na perspectiva de casos reais. O presente trabalho busca propor um método de integração entre ambiental-econômico no processo de tomada de decisões, com aplicação no estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias, englobando o contexto da região metropolitana de Porto Alegre/RS.

1.2 PRESSUPOSTOS

Os pressupostos que justificam o tema da pesquisa são:

- Abrangência das dimensões ambiental e econômica: a interdisciplinaridade entre as dimensões ambiental e econômica é essencial para viabilização da sustentabilidade na construção civil, tanto em relação aos impactos para o meio ambiente, quanto ao custo-benefício e tempo de retorno do investimento (Alshamrani, 2021; Bandeira, 2013);

- Importância de um planejamento para manutenção de edificações: a manutenção da maioria dos edifícios é realizada usando um método de manutenção corretiva, em vez da manutenção preventiva, o que leva à rápida deterioração, falhas de desempenho e prejuízos no estágio de uso dessas edificações (Kang et al., 2020). Assim, a análise dos impactos econômicos ao longo do tempo pode respaldar a tomada de decisão desses ocupantes, baseado em uma previsão orçamentária para a fase de pós-ocupação;
- Estudo de caso representativo de uma edificação pública educacional: em economias emergentes como a brasileira, há um aumento populacional contínuo e consequente necessidade progressiva de prédios escolares em boa qualidade. Muitos estudos têm discutido a melhoria do desempenho de edifícios escolares, no entanto, os governos de vários países estão enfrentando dificuldades no planejamento e financiamento, devido à falta de dados abrangentes sobre edifícios escolares (Kang et al., 2020).

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema de pesquisa decorre da inexistência de um método para avaliação integrada de impactos ambientais e econômicos em edificações para o contexto brasileiro. Do ponto de vista acadêmico, a carência de estudos no Brasil sobre a Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (LCC) e a inexistência de um método para a integração entre avaliações são problemas para a disseminação e a aplicação da sustentabilidade interdisciplinar no cenário nacional.

Atualmente, a literatura brasileira do ramo da sustentabilidade em edificações discute sobretudo a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e a mitigação de impactos ambientais, porém, muitas vezes, o viés acadêmico ocasiona pouca aplicabilidade efetiva. Ao analisar apenas os fatores ambientais, uma gama de informações relevantes é ignorada – como os custos econômicos relacionados a determinado sistema construtivo. Considerando que a lógica de mercado é majoritariamente focada na parte financeira, a integração de uma análise de custos auxilia na validação dos resultados ambientais e torna os requisitos da sustentabilidade factíveis de serem implementados de fato por instituições públicas e empresas privadas.

Na prática, a deterioração dos edifícios públicos educacionais na fase de uso e operação representa uma realidade alarmante, por conta da falta de planejamento com manutenções preventivas e da ausência de compreensão de todo o ciclo de vida da construção. Dessa forma,

as instituições são incapazes de manter a qualidade e o desempenho de seus edifícios, influenciando o conforto, a educação e a saúde de seus ocupantes. Além disso, ocorre negligência dos fatores ambientais para tomada de decisão dos órgãos públicos no processo construtivo, sendo que as premissas para a escolha são prioritariamente econômicas.

1.4 QUESTÕES DE PESQUISA

Com base no problema de pesquisa, é definida a questão geral de pesquisa:

Como relacionar a avaliação de impactos ambientais e econômicos durante a fase de manutenção de edificações públicas educacionais?

Como desdobramento da questão principal, foram definidas as questões específicas:

- Como estruturar mecanismos a serem utilizados na LCC na conjuntura brasileira de forma efetiva, considerando a normativa europeia (BS EN 16627, 2015)?
- Quais sistemas, materiais e insumos devem ser o enfoque na fase de manutenção do caso representativo da edificação pública educacional E.M.E.I. Florencia Socias Vurlod (estudo de caso) para redução dos impactos no ciclo de vida?
- De que modo comunicar avaliações e resultados com vistas para agentes envolvidos no processo de tomada de decisões na construção civil?

1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo geral da pesquisa:

Propor um método para a avaliação integrada de impactos ambientais (Avaliação do Ciclo de Vida – LCA) e econômicos (Custo do Ciclo de Vida – LCC) para a tomada de decisão referente à seleção de sistemas construtivos na fase de manutenção de edificações, com aplicação em um estudo de caso representativo educacional público.

Objetivos específicos da pesquisa:

- Determinar a rotina de avaliação LCC e os índices econômicos de maior influência na área construtiva brasileira para tornar a análise realista e representativa;

- Delimitar os sistemas da manutenção do caso representativo da edificação pública educacional E.M.E.I. Florencia Socias Vurlod (estudo de caso) que geram maior influência nos impactos ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida;
- Sugerir uma representação e definição de resultados para análise integrada de agentes responsáveis por obras e infraestrutura da Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS, buscando melhoria contínua e estímulo à aplicação em obras futuras.

1.6 DELIMITAÇÕES

Para a realização da pesquisa, baseado no escopo e nos objetivos, são definidas as delimitações:

- a) A avaliação de impactos ambientais e econômicos é realizada pelo emprego de técnicas de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e de Custo do Ciclo de Vida (LCC), respectivamente;
- b) Para a avaliação ambiental (LCA), nos casos de indisponibilidade de informações regionalizadas dos processos em análise, são adotados dados internacionais; para a avaliação econômica, a base de dados para a composição dos sistemas é regionalizada (Rio Grande do Sul/RS) e os índices de custos são nacionais;
- c) A aplicação do método é restrita ao estudo de caso de um modelo padrão de edificação pública educacional, disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS, são avaliados três sistemas com cenários alternativos – de acordo com a relevância na manutenção e do prazo para o desenvolvimento desta pesquisa;
- d) A determinação dos períodos de vida útil da edificação e dos sistemas construtivos é definida conforme: a norma brasileira de desempenho de edificações (ABNT NBR 15575-1, 2021), as instruções dos fabricantes de materiais, Declaração Ambiental de Produto (DAP) e a perspectiva da idade da construção avaliada.

1.7 LIMITAÇÕES

Para a realização da pesquisa, baseado no escopo e nos recursos disponíveis, são definidas as limitações:

- a) O uso de dados secundários de materiais de bancos internacionais e/ou nacionais pré-definidos para caracterização da edificação nas análises LCA-LCC, pela indisponibilidade de processos ambientais e econômicos padronizadas;
- b) A dimensão social não é avaliada na pesquisa, mesmo sendo prescrita pela norma europeia sobre sustentabilidade em edificações (BS EN 16627, 2015), devido à indisponibilidade de recursos e de tempo, também pelo fato da Avaliação do desempenho social dos edifícios (BS EN 16309, 2014) estar pouco desenvolvida no âmbito acadêmico, o que acarreta dificuldades para sua correta aplicação;
- c) O estudo de caso está localizado em Porto Alegre/RS, sendo representativo apenas para a cidade e região metropolitana – esta barreira geográfica e as demais limitações podem ser extrapoladas e aprofundadas em trabalhos futuros.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, de acordo com a sequência:

O primeiro capítulo de Introdução (item 1) apresenta a contextualização ao tema de avaliação de impactos ambientais e econômicos com enfoque na fase de manutenção de edificações, as justificativas, as questões, os objetivos, as delimitações, as limitações e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo, Revisão bibliográfica (item 2), apresenta uma abordagem crítica baseada em duas revisões sistemáticas de literatura, organizada em Avaliação de impactos ambientais e econômicos em edificações e Manutenção de edificações.

O terceiro capítulo demonstra o Método de pesquisa (item 3), onde constam a estratégia e o delineamento da pesquisa. O capítulo descreve o Estudo de caso, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e o Custo do Ciclo de Vida (LCC).

O quarto capítulo de Resultados (item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) demonstra os resultados encontrados na pesquisa, que abrangem o Inventário do Ciclo de Vida (LCI), a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) e a Análise de sensibilidade.

O quinto e último capítulo apresenta as Considerações finais (item 4), as contribuições da pesquisa, as possibilidades de aplicação do método e de trabalhos futuros sobre o tema. Por fim, são disponibilizados as Referências bibliográficas e os Apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica fornece embasamento teórico para a pesquisa, sendo um processo de levantamento, análise e descrição de publicações científicas. A revisão é baseada em duas revisões sistemáticas de literatura, aprofundadas nas seções: (2.1) Avaliação de impactos ambientais e econômicos em edificações; e (2.2) Manutenção de edificações.

As revisões sistemáticas englobam os seguintes temas: (i) Impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção em edificações; e (ii) Ciclos de construção, operação e manutenção de edificações. A Tabela 1 demonstra o fluxo metodológico das revisões sistemáticas com a estruturação de: data da pesquisa, a *string* utilizada, as delimitações e a seleção dos documentos

Tabela 1 – Fluxo metodológico das revisões sistemáticas (RSI e RSII)

Revisão sistemática	RSI	RSII
String de pesquisa	<i>[(buil* OR construct* AND maint* AND lca AND life AND cycle AND assessment AND lcc AND cost)]</i>	<i>[(buil* OR construct* AND maint* AND life AND cycle AND school)]</i>
Plataforma	Scopus	Scopus
Áreas de pesquisa	<i>Engineering e Environmental Science</i>	<i>Engineering e Environmental Science</i>
Idiomas	Inglês, espanhol e português	Inglês, espanhol e português
Período de publicação	2010-2023	2010-2023
Seleção por título	48	55
Seleção por resumo	19	22
Seleção por acesso	12	14
Seleção por texto	12	14
Abordagem "bola de neve"	9	5
Documentos selecionados	21	19

Fonte: elaborado pela autora (2023).

As investigações são realizadas pela base de dados *Scopus*, devido à qualidade, confiança e ampla cobertura acadêmica nacional e internacional sobre edificações. Os documentos são submetidos a cinco rodadas de filtragem com análises de: título, resumo, disponibilidade de acesso e aprofundada análise do documento completo, além da abordagem “Bola de neve” – utilizada para artigos que não são contemplados pela base de dados, ou seja, são adicionados documentos extras relevantes ao tema. A análise da disponibilidade de acesso *online* consiste na verificação da publicação em texto completo, onde a plataforma *Scopus* pode direcionar o acesso para outros sites restritos ao público e à UFRGS. O tratamento, a organização e a graficação dos dados é feita com o apoio dos softwares *Mendeley* e *Microsoft Office Excel*.

As revisões de literatura servem como base para o desenvolvimento do trabalho, trazendo conteúdos sobre impactos de edificações, ferramentas para avaliação dos mesmos, além do panorama atual de pesquisas acadêmicas. O aprofundamento nos documentos selecionados nas revisões acontece nas subseções (2.1) e (2.2), em que ocorre a análise bibliométrica e a interpretação dos artigos, a partir de conceitos, convergências e divergências dos temas.

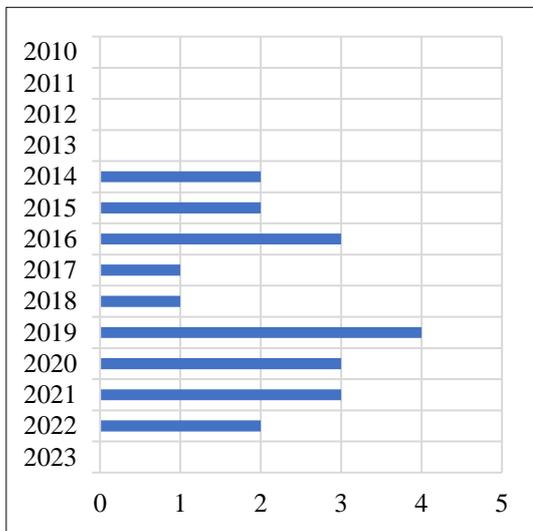
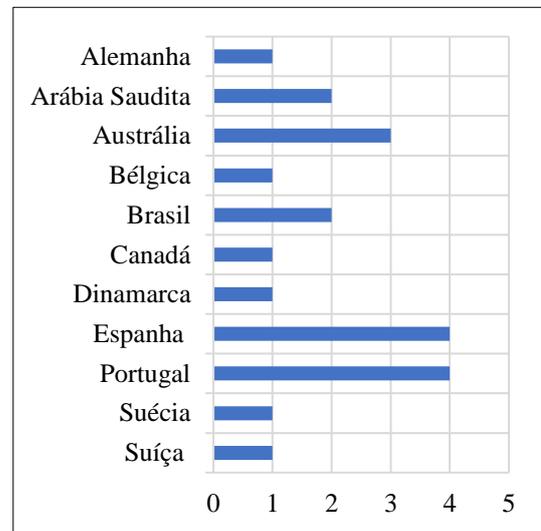
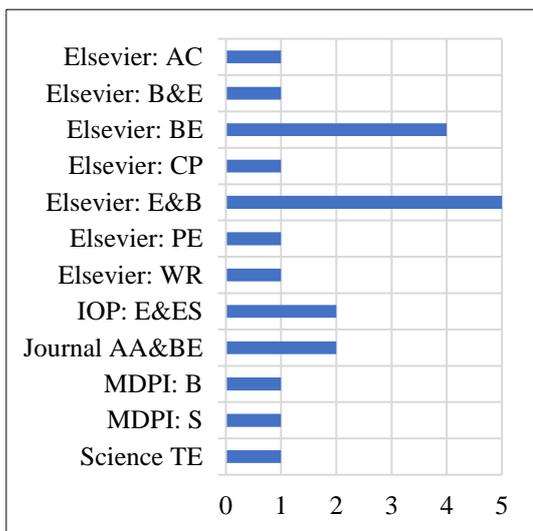
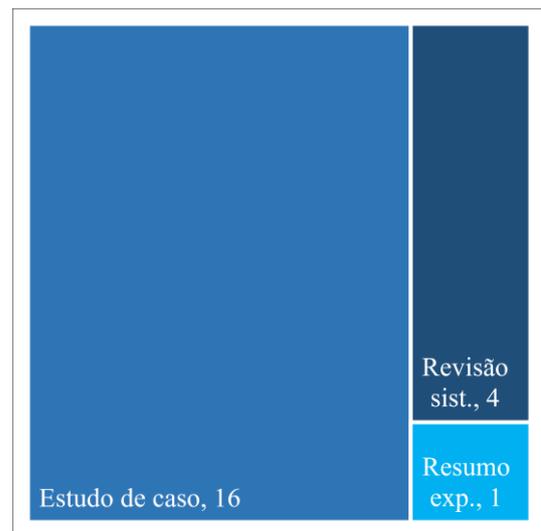
2.1 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS EM EDIFICAÇÕES

A primeira revisão sistemática sobre Impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção em edificações, busca responder à seguinte questão: *Qual a relevância dos impactos ambientais e econômicos durante a fase de uso, operação e manutenção em edificações?*

A revisão é realizada no mês de abril de 2023 com a *string* de palavras-chave *[(buil* OR construct* AND maint* AND LCA AND life AND cycle AND assessment AND LCC AND cost)]*, sendo selecionados artigos que tratam de impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção. Durante a seleção dos documentos, os critérios de especificação do tema foram: enfoque em edificações, avaliações integradas, abrangência da fase de manutenção e revisões críticas sobre o tema. Vale ressaltar que são encontrados pouca quantidade de documentos que abrangem as três especificações da busca (manutenção, LCA e LCC).

A análise bibliométrica define o perfil das publicações considerando as informações de: ano, país, meios de publicação e tipo de publicação. Os resultados são demonstrados na Figura 2.

Figura 1 – Análise bibliométrica da revisão sistemática I

(a) N° de documentos *versus* Ano de publicação(b) N° de documentos *versus* País de publicação(c) N° de documentos *versus* Meios de publicação(d) N° de casos *versus* Tipo de publicação

Nota: Os meios de publicação são Elsevier: Automation in Construction (AC), Building and Environment (B&E), Building Engineering (BE), Cleaner Production (CP), Energy and Buildings (E&B), Procedia Engineering (PE), Water Research (WR), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (E&ES), Journal of Asian Architecture and Building Engineering (AA&BE), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI): Buildings (B), Sustainability (S), Science of the Total Environment (TE).

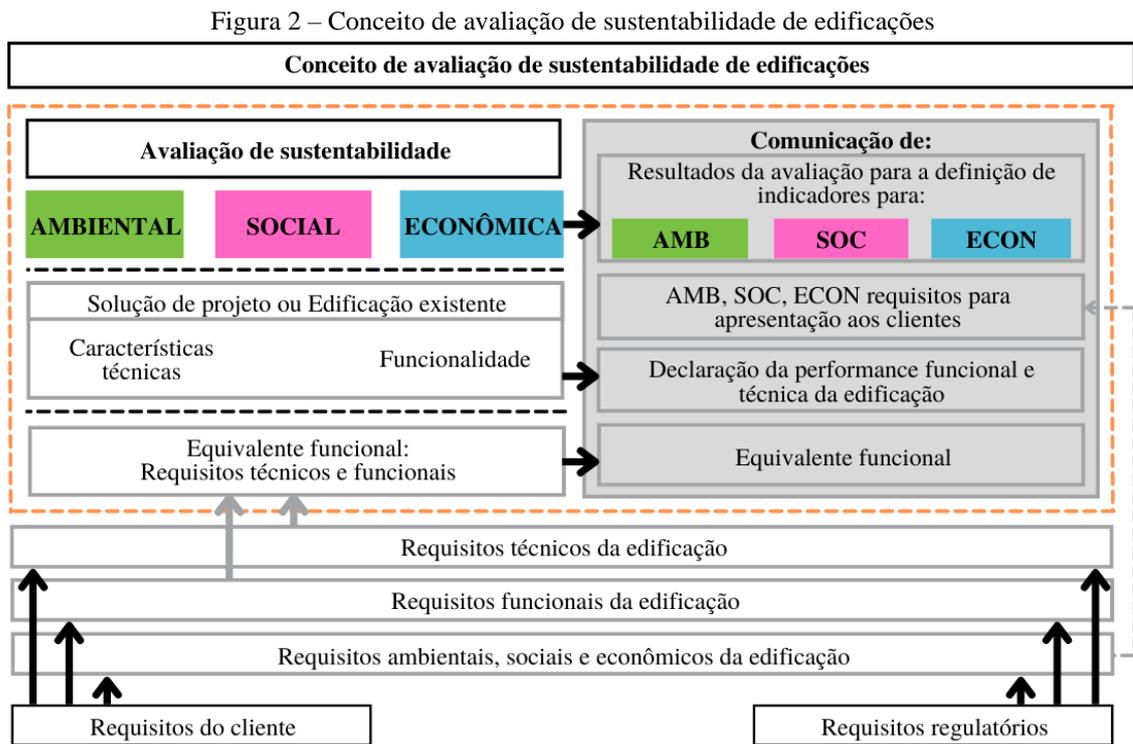
Fonte: elaborado pela autora (2023).

No ano de publicação (Figura 1-a), nota-se certa dispersão de estudos realizados entre os anos de 2014 e 2022 pela preocupação ambiental do setor construtivo nos últimos anos e consequente busca por avaliações de impactos para otimização das edificações (Antipova et al., 2014). No país de publicação (Figura 1-b), há uma maior concentração de publicações em países da Europa, como Portugal e Espanha com quatro publicações cada – justificado pelo nível de

desenvolvimento dos países e o grande número de edificações (Gustafsson et al., 2017). O Brasil aparece com duas publicações (Martins Vaz et al., 2020; M. F. D. Morales et al., 2021), todavia, há necessidade de mais estudos principalmente no âmbito científico nacional.

Os meios de publicação (Figura 1-c) são periódicos internacionais das áreas de *Engineering* e *Environmental Science*, sendo que o periódico *Elsevier* possui o maior número de publicações entre os artigos selecionados (14 documentos, cerca de 64%). As publicações são divididas em três categorias quanto ao tipo de publicação (Figura 1-d): (1ª) Revisão sistemática, que consiste em uma revisão científica das principais contribuições sobre o tema; (2ª) Estudo de caso, que parte do desenvolvimento de um modelo LCA-LCC para aplicação em edificações características; e (3ª) Resumo expandido, que consiste em uma discussão breve sobre o tema. Cerca de 76% dos documentos foram do tipo “Estudo de caso”, o que possibilitou uma análise ampla sobre o tema, enquanto apenas quatro publicações se enquadram como “Revisão sistemática” (Fouche & Crawford, 2017; Mjörnell et al., 2014; Pombo et al., 2016; Vilches et al., 2017) e apenas uma publicação como “Resumo expandido” (Lützkendorf, 2019).

Em uma análise aprofundada dos textos dos documentos selecionados, contata-se que a avaliação de sustentabilidade em edificações assenta em três pilares: econômico, ambiental e social (Santos et al., 2019) englobados por requisitos técnicos e funcionais (Figura 2).



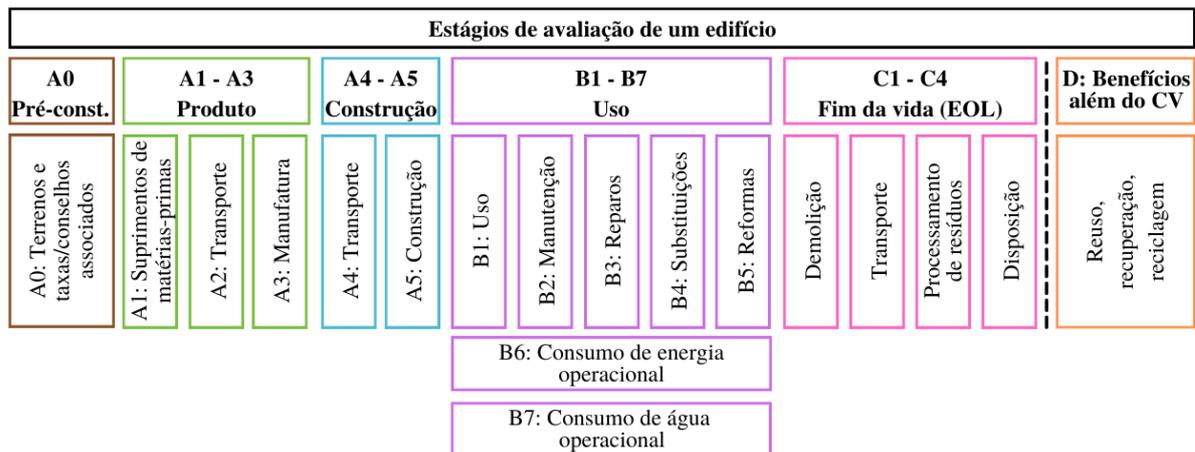
Fonte: adaptado de (BS EN 16627, 2015).

Os edifícios são sistemas não lineares com comportamentos dinâmicos e complexos e com ciclos de vida relativamente longos (Sharif & Hammad, 2019). Portanto, há necessidade de informações objetivas para apoiar a tomada de decisão, com base no impacto ambiental e financeiro de uma estratégia – estudos direcionados possuem alto valor agregado para o ramo da construção, os fornecedores, os proprietários de edificações e até os seus ocupantes (Wittocx et al., 2022). As ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e de Custo do Ciclo de Vida (LCC) são as utilizadas para avaliar os impactos ambientais e econômicos do ciclo da vida de produtos, processos e serviços, inclusive na construção civil (Santos et al., 2019).

2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)

A Avaliação do Ciclo de Vida – ou em inglês *Life Cycle Assessment* (LCA) – é uma ferramenta para avaliação dos impactos ambientais, como: consumo de energia, emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), acidificação, eutrofização, depleção de ozônio, entre outros. Definida como uma “compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida”, ou seja, desde a aquisição da matéria-prima até a sua disposição final (Figura 3). A LCA é regulada pelas normativas ABNT NBR 14040 (2009), ABNT NBR 14044 (2009) e BS EN 15978 (2011).

Figura 3 – Estágios de avaliação de um edifício



Fonte: adaptado de (BS EN 16627, 2015).

Como visto na Figura 3, a norma europeia (BS EN 16627, 2015) define seis grupos para o estudo do ciclo de vida de uma edificação, sendo: pré-construção, produto, construção, uso, fim de vida e beneficiamento – subdividido em 18 estágios de construção. Cabe destacar que o

módulo A0 de pré-construção não faz parte da avaliação ambiental, segundo a norma (BS EN 15978, 2011) – os demais módulos são correspondentes para o escopo ambiental e econômico.

O limite para o estágio de produto (módulos A1-A3) abrange os processos “do berço ao portão” (do inglês “*cradle to gate*”) para os materiais e serviços utilizados na construção. Esta fase inclui o fornecimento de todos os materiais, produtos e energia, bem como o processamento de resíduos até ao estado final de resíduo e/ou eliminação de resíduos finais durante a fase de produto. Onde: (A1) extração e processamento de matérias-primas e processamento de materiais secundários; (A2) transporte de matérias-primas e insumos até o fabricante; e (A3) fabricação dos produtos e embalagens (BS EN 15804, 2019; BS EN 15978, 2011).

O limite para o estágio de construção (módulos A4-A5) abrange os processos desde o portão da fábrica dos produtos de construção até a conclusão prática da obra. Já os limites do estágio de uso (módulos B1-B7) abrange o período desde a conclusão da construção até o momento da desconstrução/demolição. Considerando o uso de produtos e serviços de construção para proteger, conservar, moderar e/ou controlar o objeto de avaliação (BS EN 15978, 2011).

Os limites do estágio de fim de vida (módulos C1-C4) consideram o desmantelamento da edificação, quando ela não se destina a ter qualquer utilização. A demolição/desconstrução do edifício pode ser considerada como um processo de múltiplas saídas, onde os produtos podem ser descartados, recuperados, reciclados ou reutilizados. O limite para o reuso, recuperação e/ou reciclagem (módulo D) quantifica os benefícios ambientais líquidos ou cargas resultantes da reutilização, reciclagem e recuperação de energia resultantes dos fluxos líquidos de materiais e energia exportada que saem do limite do sistema (BS EN 15978, 2011).

Nesse contexto, as pesquisas podem definir recortes de acordo com o escopo, o objetivo e a metodologia do estudo. A Tabela 2 demonstra a delimitação de estágios utilizada em cada um dos artigos do tipo “estudo de caso”, analisados através da revisão sistemática I sobre impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção em edificações.

Tabela 2 – Estudos de caso da revisão sistemática I: Estágios de avaliação de um edifício

Referência	Estágios de avaliação de um edifício									
	Produto / Construção (A1-A5)	Uso (B1)	Manutenção (B2)	Reparos (B3)	Substituições (B4)	Reformas (B5)	Consumo de energia operacional (B6)	Consumo de água operacional (B7)	Fim da vida (C1-C4)	Benefícios (D)
(Wittocx et al., 2022)	X			X					X	
(M. F. D. Morales et al., 2021)					X					
(Alshamrani, 2021)	X	X	X						X	
(Sharif & Hammad, 2019)							X			
(Santos et al., 2019)	X		X	X	X				X	X
(Gustafsson et al., 2017)	X		X				X		X	
(Islam et al., 2015)	X		X		X		X		X	
(Ferreira et al., 2015)	X								X	
(Islam et al., 2022)	X	X	X						X	
(Alshamrani, 2022)	X	X	X						X	
(Zimmermann et al., 2020)	X	X							X	X
(Antipova et al., 2014)	X	X								
(Rodrigues et al., 2018)	X	X					X		X	
(Martins et al., 2019)							X			X
(Ros-Dosdá et al., 2019)	X	X							X	
(Saadatian et al., 2021)	X	X							X	

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A maioria dos documentos (Tabela 2) restringe as avaliações de edifícios aos estágios iniciais (A1-A5) e finais (C1-C4), ou seja, ocorre o processo de produção/construção da edificação e posterior fim de vida útil dos sistemas com a geração de uma série de resíduos (Islam et al., 2015). Os impactos do estágio de uso e operação (B1-B7), como premissa da revisão, são calculados na maioria dos estudos de caso – com exceção de quatro artigos (Antipova et al., 2014; Ros-Dosdá et al., 2019; Saadatian et al., 2021; Zimmermann et al., 2020).

Segundo a norma ABNT NBR 16280 (2020), *reforma* é definida como “alteração nas condições de edificação existentes com ou sem mudança de função, visando recuperar, ou ampliar suas condições de habitabilidade, uso ou segurança, e que não seja manutenção”. O grupo B1-B5 foca no reaproveitamento/requalificação da edificação, o fim da vida útil dos sistemas requer a manutenção (abordagem proativa) ou o reparo/reforma – reativa (Wittocx et al., 2022).

Segundo a norma europeia BS EN 16627 (2015), *manutenção* é definida como a combinação das ações técnicas e administrativas associadas durante a vida útil para manter um edifício ou um sistema em um estado funcional, incluindo limpeza, manutenção, repintura, reparação e

substituição de peças. Já o termo “reforma” engloba modificação, intervenção e/ou melhorias em um edifício existente, a fim de trazê-lo para uma condição aceitável.

A manutenção de edificações aparece com diferentes definições a depender do escopo e das referências do estudo, sendo assim, a abstenção do estágio B5 pelos estudos de caso não é uma informação conclusiva. O estudo de revisão sistemática de Vilches *et al.* (2017) sobre reforma de edifícios direciona o estágio de manutenção (B2) como um tipo de intervenção construtiva para acrescentar novos materiais ou elementos, incluir melhorias estéticas ou espaciais das edificações e/ou restaurar usos específicos aos elementos da construção.

As categorias de avaliação de impacto são recomendadas e atualizadas por normas (BS EN 15804, 2019; BS EN 15978, 2011). A normativa de 2019 define quinze categorias (Tabela 3).

Tabela 3 – Categorias de impacto da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) conforme BS EN 15804 (2019)

Categoria de impacto	Tradução livre	Unidade
<i>Climate change – total, fossil, biogenic and land use</i>	Mudança climática – total, fóssil, uso biogênico e da terra	kg CO ₂ eq
<i>Ozone depletion</i>	Depleção de ozônio	kg CFC ₁₁ eq
<i>Acidification</i>	Acidificação	kg mol H ⁺
<i>Eutrophication – freshwater</i>	Eutrofização – água doce	kg PO ₄ eq
<i>Eutrophication – marine</i>	Eutrofização – marinha	kg N eq
<i>Eutrophication – terrestrial</i>	Eutrofização – terrestre	mol N eq
<i>Photochemical ozone formation</i>	Formação de ozônio fotoquímico	kg NMVOC eq
<i>Depletion of abiotic resources – minerals and metals</i>	Depleção de recursos abióticos – minerais e metais	kg Sb eq
<i>Depletion of abiotic resources – fossil fuels</i>	Depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis	MJ, net calorific value
<i>Human toxicity – cancer, non-cancer</i>	Toxicidade humana-câncer, não-câncer	CTUh
<i>Eco-toxicity (freshwater)</i>	Eco-toxicidade (água doce)	CTUe
<i>Water use</i>	Uso da água	m ³ world eq. deprived
<i>Land use</i>	Uso da terra	Dimensionless
<i>Ionising radiation, human health</i>	Radiação ionizante, saúde humana	kBq U-235
<i>Particulate matter emissions</i>	Emissões de matéria de partículas	Disease incidence

Fonte: elaborado pela autora (2023).

No caso deste estudo, a norma de referência utilizada para a seleção das categorias de impacto é a BS EN 15804 do ano de 2013 (BS EN 15804, 2013), pela disponibilidade de dados no *EPD System* para os sistemas construtivos avaliados. Tais categorias são utilizadas pela maioria dos estudos consultados, exceto pelos estudos com impactos selecionados, como o potencial de aquecimento global (GWP) (Islam et al., 2015). A Tabela 4 expressa a respectiva sigla, nomenclatura em inglês, tradução livre e unidade de medida das categorias ambientais deste estudo – a descrição de cada categoria está na sequência.

Tabela 4 – Categorias de impacto da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) conforme BS EN 15804 (2013): referência para o estudo

Sigla	Categoria de impacto	Tradução livre	Unidade
ADP-F	<i>Depletion of abiotic resources - fossil fuels</i>	Potencial de depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis	MJ
ADP-N	<i>Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserves</i>	Potencial de depleção de recursos abióticos - elementos, reservas finais	kg SB eq
AP	<i>Acidification potential</i>	Potencial de acidificação	kg SO ₂ eq
EP	<i>Eutrophication - generic</i>	Potencial de eutrofização	kg NO _x eq
GWP	<i>Global warming potential</i>	Potencial de aquecimento global	kg CO ₂ eq
ODP	<i>Ozone layer depletion - ODP steady state</i>	Potencial de depleção da camada de ozônio	kg CFC ₁₁ eq
PO-NOX	<i>Photochemical oxidation - high Nox</i>	Oxidação fotoquímica - alto Nox	kg C ₂ H ₄ eq

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A descrição das categorias de impacto apresentada na continuação baseia-se em Acero, Rodríguez e Citroth (2015). A Depleção Abiótica de recursos (fósseis ou não fósseis) é uma das categorias de impacto que expressa o esgotamento dos recursos naturais não biológicos do planeta, como petróleo, minério de ferro, água, entre outros. O valor do consumo de recursos abióticos de uma substância é uma medida da escassez de uma substância, dependendo da quantidade de recursos e da taxa de extração. Esse impacto pode ter alcance global, regional e local. As unidades de medida utilizadas são: *megajoule* (MJ), para combustíveis fósseis (ADP-F), e antimônio equivalente (kg SB eq), para esgotamento de recursos não fósseis (ADP-N).

A acidificação (AP) é uma categoria de impacto que expressa o impacto tóxico que substâncias acidificantes têm sobre o solo, águas subterrâneas, organismos, ecossistemas e materiais. A reação dos gases ácidos com a água na atmosfera cria a “chuva ácida” que provoca uma redução da biodiversidade. A unidade de medida é expressa pelo peso equivalente de dióxido de enxofre emitido/equivalente (kg SO₂ eq).

O potencial de eutrofização (EP) é a proliferação anormal da vegetação nos ecossistemas aquáticos causada pela adição de nutrientes em rios, lagos ou oceanos que determina a falta de oxigênio, e é influenciado principalmente pela emissão de fosfatos e nitratos na água. Tal ocorrência pode levar ao aumento da mortalidade de espécies aquáticas (fauna e flora) e à perda de espécies que dependem de ambientes pobres em nutrientes. A unidade de medida é expressa em massa de fosfato equivalente (kg PO₄ eq).

O aquecimento global (GWP) é um conceito que expressa o aquecimento da atmosfera influenciado pela mudança climática. Uma das atividades humanas que tem maior efeito sobre

o aquecimento global é a queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural. A unidade de medida é expressa pelo peso equivalente de dióxido de carbono emitido/equivalente (kg CO₂ eq).

A depleção da camada de ozônio (ODP) é um conceito que expressa a redução do ozônio na estratosfera e a destruição dessa camada, conhecido como “buraco de ozônio”. As emissões de recursos artificiais são o principal fator de influência, como: CFCs, HCFCs, cloro, bromo, etc. Desse modo, ocorre a capacidade de impedir que os raios ultravioleta B (UVB) entre na atmosfera terrestre é reduzida, aumentando a quantidade de luz UVB cancerígena que atinge a superfície da Terra. A unidade de medida é expressa pelo peso equivalente de clorofluorcarbonetos emitido/equivalente (kg CFC₁₁ eq).

A oxidação fotoquímica (PO-NOX) é a formação de substâncias reativas (principalmente ozônio) que são prejudiciais à saúde do ser humano e dos ecossistemas, podendo danificar também colheitas, pecuária e agricultura. Este problema é conhecido como “poluição de verão”. A unidade de medida é expressa pelo peso equivalente de etileno – C₂H₄ (kg ethylene).

Além da análise de estágios do ciclo de vida e de categorias de impactos avaliadas nos artigos do tipo “estudo de caso”, a Tabela 5 demonstra as demais informações sobre o escopo e o objetivo da LCA de cada estudo.

Conforme a Tabela 5, os objetivos variam conforme o estudo, abrangendo desde impactos ambientais e econômicos, até temas relacionados com eficiência energética, *retrofit* e avaliações integradas com outras ferramentas.

Tabela 5 – Estudos de caso da revisão sistemática I: Escopo e objetivo da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)

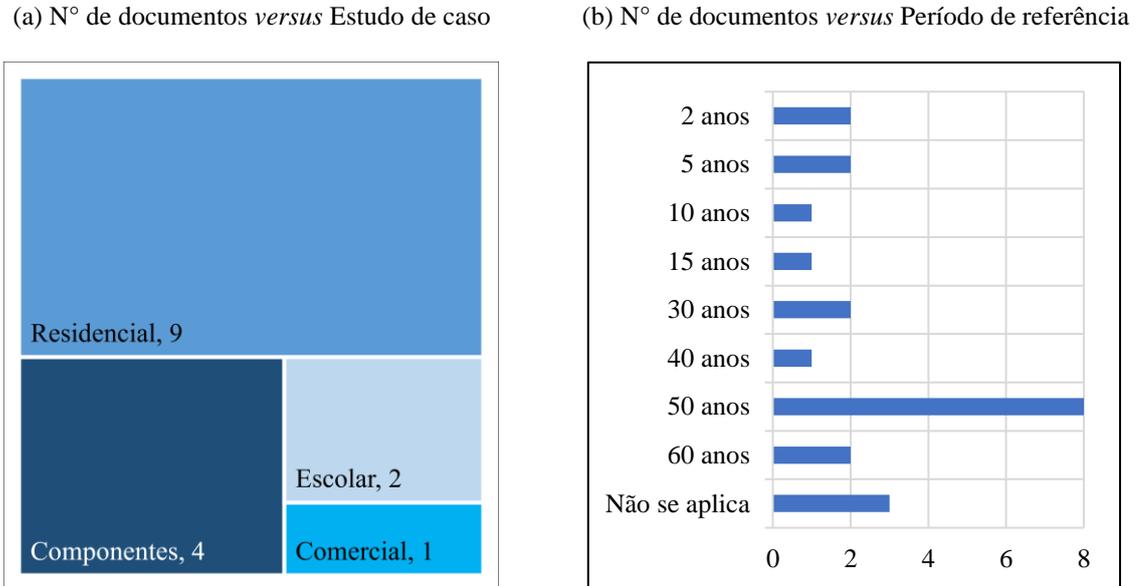
Referência	Estudo de caso	Objetivo do estudo	Localização	Período de referência de estudo
(Wittoxc et al., 2022)	Edificação residencial	Recuperação de varandas de concreto armado	Bélgica	2, 5 e 40 anos
(M. F. D. Morales et al., 2021)	Sistemas construtivos	Análise de incertezas para valores de vida útil de diferentes literaturas e normativas	Brasil	Não se aplica
(Alshamrani, 2021)	Edificação residencial	Avaliação comparativa de impactos ambientais e econômicos entre sistemas tradicionais e inovadores (como modulares)	Arábia Saudita	50 anos
(Sharif & Hammad, 2019)	Edificação universitária	Aplicação de metodologia de Otimização Multiobjetivo Baseada em Simulação (SBMO) e Rede Neural Artificial (RNA) para renovação energética de edifícios	Canadá	Não se aplica
(Santos et al., 2019)	Residência unifamiliar	Aplicação de <i>framework</i> BIM-LCA/LCC como potencial repositório de dados e suporte para uma avaliação ambiental e econômica automática	Bélgica	60 anos
(Gustafsson et al., 2017)	Edificações de escritórios	Avaliação de renovação energética sistêmica	Europa	15, 30 e 60 anos
(Islam et al., 2015)	Edificações residenciais	Avaliação comparativa de impactos ambientais e econômicos entre sistemas de coberturas e pisos	Austrália	50 anos
(Ferreira et al., 2015)	Edificação residencial	Avaliação comparativa de impactos ambientais e econômicos da reabilitação estrutural de edifícios com demolição e reconstrução	Portugal	50 anos
(Islam et al., 2022)	Residência unifamiliar	Modificação de estudo de caso com base em seis projetos alternativos para fornecer uma determinada classificação por estrelas, a fim de demonstrar a estrutura de análise ambiental e de custos	Austrália	50 anos
(Alshamrani, 2022)	Residência unifamiliar geminada	Avaliação os impactos ambientais e a viabilidade econômica de vários sistemas construtivos, incluindo pré-fabricados e convencionais	Arábia Saudita	50 anos
(Zimmermann et al., 2020)	Edificação escolar	Aplicação de <i>framework</i> sobre estratégias de economia circular para <i>retrofit</i> de edificações	Dinamarca	50 anos
(Antipova et al., 2014)	Residência unifamiliar	Aplicação de Otimização Multiobjetivo para <i>retrofit</i> de edificações	Portugal	Não se aplica
(Rodrigues et al., 2018)	Edificações residenciais	Avaliação de impactos ambientais e econômicos para <i>retrofit</i> do sistema térmico de edificações	Portugal	50 anos
(Martins Vaz et al., 2020)	Pavimentos permeáveis	Análise do ciclo de vida energético e do custo do ciclo de vida dos sistemas de captação de águas pluviais de diferentes tipos de pavimentos	Brasil	2, 5 e 10 anos
(Ros-Dosdá et al., 2019)	Sistema de pisos	Comparação de impactos ambientais de sistemas de revestimentos de pisos a partir de informações contidas nas EPDs	Espanha	50 anos
(Saadatian et al., 2021)	Sistema de janelas	Avaliação integrada ambiental e econômica de soluções de janelas com alternativas de envidraçamento e caixilharia	Portugal	30 anos

Nota: Em destaque cinza os documentos referentes ao tipo de edificação educacional.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Figura 4 quantifica os documentos quanto ao seu escopo: tipo de estudo de caso e período de referência, que estão interligados com a vida útil da edificação e de seus sistemas construtivos, e também com os resultados encontrados.

Figura 4 – Estudos de caso da revisão sistemática I



Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Figura 4-a demonstra que quase 60% dos casos (nove entre 16) são focados em edificações residenciais unifamiliar ou multifamiliar, em contraponto, há apenas um comercial de escritórios (Gustafsson et al., 2017). Além disso, dois casos focam na área da educação (Sharif & Hammad, 2019; Zimmermann et al., 2020) e quatro casos avaliam sistemas e/ou componentes construtivos específicos (Martins et al., 2019; M. F. D. Morales et al., 2021; Ros-Dosdá et al., 2019; Saadatian et al., 2021).

A Figura 4-b apresenta o período de referência dos estudos de caso dos documentos, ao todo são 16 documentos e 22 estudos de caso. Há uma variação considerável entre os períodos (2 a 60 anos), sendo que três artigos englobam diferentes períodos em uma mesma análise, são eles: avaliação de pavimentos permeáveis com 2, 5 e 10 anos (Martins et al., 2019); recuperação de varandas de concreto armado com 2, 5 e 40 anos (Wittocx et al., 2022); e renovação energética sistemas de edifícios de escritórios com 15, 30 e 60 anos (Gustafsson et al., 2017). Comumente, em casos de edificações e/ou componentes, é utilizado apenas um período de referência, conforme visto em mais de 80% dos documentos. Outrossim, nota-se que os estágios de manutenção (B1-B7) são independentes do ano de referência, entretanto, há tendências de

avaliações dos estágios de manutenção (B2) e reparo (B3) para períodos menores do que 30 anos, já o estágio de substituições (B4) é avaliado em períodos iguais ou superiores a 50 anos.

O artigo (Sharif & Hammad, 2019) sobre a renovação energética de edifícios universitários busca atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável a um custo relativamente baixo, ao ser comparado com a demolição e reconstrução de novos edifícios. Para tal, define a métodos para avaliação energética, com resultados positivos para o uso da Rede Neural Artificial (RNA).

O artigo de Zimmermann *et al.* (2020) desenvolve uma estrutura baseado na Economia Circular (EC) para a incluir benefícios ambientais para a preservação dos materiais de construção já existentes no canteiro de obras. A estrutura inclui cenários para preservação, renovação, demolição e novas construções – o estudo de caso é um edifício escolar da Dinamarca. Mostra a relevância dos impactos (12% do total) da demolição dos componentes, sistemas e edifício existentes. A EC associa desenvolvimento econômico à menores impactos ambientais, por meio da otimização dos processos e redução do consumo, priorizando insumos mais duráveis, recicláveis e renováveis (Wittocx *et al.*, 2022).

Entre os artigos sobre componentes construtivos, Ros-Dosdá *et al.* (2019) traz uma comparação ambiental de revestimentos de piso interno para o estágio de uso de uma edificação. São avaliados os revestimentos: inorgânicos (pedra natural e telhas cerâmicas), polímeros (carpete e PVC) e derivados de madeira (laminado e parquet) – considerando dados disponibilizados em EPDs. Em uma comparação simplificada, nota-se que os pisos inorgânicos apresentam melhor desempenho ambiental, seguidos pelo laminado e PVC com impactos maiores em cerca de 25%. Na sequência o *parquet*, com bons resultados para áreas de baixo tráfego, e o carpete, que obtém os piores impactos ambientais para todos os cenários de tráfego.

Outro caso, é o artigo de Saadatian *et al.* (2021) que avalia a seleção ideal de componentes para janelas, considerando material da esquadria, caixilhos e vidraçaria. Como resultado, a análise do LCC mostra que o investimento inicial nas janelas tem um impacto elevado no custo global, mesmo quando se considera uma vida útil de 30 anos. Além disso, há a influência da localização geográfica da edificação, do fator solar e da transmitância térmica da edificação.

Vilches *et al.* (2017) publicam uma revisão sistemática na Dinamarca, o artigo disserta sobre a aplicação de *framework* sobre estratégias de EC para *retrofit* de edificações em um período de referência de 50 anos. Os edifícios existentes são parte do patrimônio edificado das cidades e

devem continuar a serem utilizados, porém, existe uma tendência de remodelação e demolição decorrente do não atendimento aos padrões e códigos de construção atuais.

Entre as limitações encontradas a partir da análise dos documentos estão:

- (i) Simplificação de cálculo, devido à ausência de dados específicos e complexidade dos sistemas, embora a omissão de materiais/processos em pequena quantidade possa simplificar e agilizar os cálculos, pode incidir na redução não intencional da precisão das avaliações LCA-LCC (Santos et al., 2019; Sharif & Hammad, 2019);
- (ii) Lista restritiva de materiais com incapacidade de adicionar novos materiais e/ou dificuldade para editar as informações. Além de falta de fontes de referência com dados adaptáveis e representativos para as diversas regiões do mundo, incluindo localização, fabricante e/ou método de produção (Mjörnell et al., 2014; Santos et al., 2019);
- (iii) Comparabilidade e sensibilidade para impactos resultantes em diferentes edifícios, sendo que na maioria dos casos ocorrem situações equivalentes em edifícios localizados em áreas muito diferentes (Ferreira et al., 2015; Vilches et al., 2017);
- (iv) Carência de informação detalhada sobre as soluções (parte do edifício existente), além disso, existe um nível de incerteza sobre os edifícios existentes que implicam mais investigação (Alshamrani, 2022; Ferreira et al., 2015).

2.1.2 Custo do Ciclo de Vida (LCC)

O Custo do Ciclo de Vida – ou em inglês *Life Cycle Cost* (LCC) – é uma ferramenta para avaliação dos impactos econômicos, onde são estimados todos os custos relevantes para a edificação, como: construção, operação, manutenção, reparo e substituição, descarte e valores residuais ao longo do período de vida (Islam et al., 2015). Os estágios do ciclo de vida são os expostos anteriormente na Figura 3, a ferramenta LCC é apresentada pela normativa europeia (BS EN 16627, 2015), em que os módulos devem incluir os seguintes custos:

Os limites antes do uso (A0-A5) englobam as fases de pré-construção, fabricação do produto, entrega no local e construção, onde os custos associados a todas as fases do ciclo de vida antes da utilização, incluindo custos de planejamento, custos do terreno e honorários profissionais, devem ser considerados e comunicados nesse módulo.

Os limites do estágio de uso (módulos B1-B7) fazem parte da fase de operação da edificação e abrangem o período desde a conclusão prática e entrega da obra de construção até ao momento em que o edifício é desconstruído/demolido. Devem ser considerados todos os custos relacionados com utilização, manutenção, gestão, inspeção, reparo, substituição e remodelação do edifício ao longo desta fase do ciclo de vida. Pode incluir, por exemplo, os custos de operação do edifício, como: aquecimento, refrigeração, iluminação, abastecimento de água, elevadores e escadas rolantes, limpeza, reparo de produtos e máquinas de construção.

Os limites para fase de fim de vida (módulos C1-C4) iniciam quando o edifício é desmantelado, seus componentes e materiais são removidos e o local do terreno está pronto para reutilização futura. O edifício em si não se destina a ter qualquer uso posterior. Neste ponto, o custo da demolição/desconstrução do edifício pode ser considerado como um processo de múltiplas saídas que fornece uma fonte de materiais, produtos e elementos construtivos que devem ser descartados, recuperados, reciclados ou reutilizados – modelados por processos que tenham se mostrado economicamente e tecnicamente viáveis.

Os limites para os benefícios e cargas além do limite do sistema (Módulo D) quantifica a receita para o proprietário do edifício resultante da reutilização, reciclagem e recuperação de energia de fluxos de materiais e energia exportada que saem do limite do sistema. Contabilizando os componentes para reutilização, os materiais para reciclagem e a valorização energética – como recursos potenciais para uso futuro e geração de renda.

A norma europeia BS EN 16627 (2015) serve como referência para as avaliações de custos em edificações nacionais, pois ainda não há regulamentação padrão brasileira. Essa é uma limitação dos estudos LCC no Brasil, sendo que os custos desempenham um papel importante no setor da construção, particularmente no setor público, onde os recursos são muitas vezes limitados. Devido à ausência de uma estrutura geral para os cálculos de LCC, alguns estudos adotam as premissas normativas (ABNT NBR ISO 14040, 2009; ABNT NBR ISO 14044, 2009) com valores que consideram custos de insumos, mão de obra e equipamentos (Wittcox et al., 2022).

A análise de custos estima todos os custos com o Valor Presente (do inglês, *Present Value*, PV), com a projeção de custos futuros (ou seja, operação, manutenção e alienação) com cálculos que englobam os valores atuais em uma estimativa de inflação futura e a taxa de desconto adequada (Islam et al., 2015) – a equação está no item 0. O cálculo do PV pode ser aplicado em toda a

gama de investimentos em construção, abrangendo programas de investimento completos, ativos, sistemas, componentes e modelos de operação e manutenção (BS EN 16627, 2015).

Os preços e custos totais são baseados na prática atual no setor construtivo e no país de origem, além das situações do mercado local, da escala do projeto e da complexidade da execução (Wittcox et al., 2022). Como método de sintetização da LCC, um dos estudos ainda propôs uma análise simplificada (Santos et al., 2019), conforme exposto na Tabela 6.

Tabela 6 – Propostas de análises LCC (RS1-IMP)

Tipo de análise	Custos	Detalhes do projeto
Análise LCC completa	Custo de aquisição; durabilidade; densidade	Vida útil do edifício; taxa de desconto; tipo de transporte; distância de transporte; veículos usados durante a construção; custos das atividades de construção; recursos estimados usadas durante a fase operacional; possíveis cenários de resíduos para cada material
Análise de LCC simplificada	Custo de aquisição	Não se aplica

Fonte: adaptado de (Santos et al., 2019).

A proposta de análise de LCC simplificada de Santos e outros pesquisadores (2019) é controversa, sendo que a premissa do LCC é calcular os custos ao longo do ciclo de vida, ao considerar apenas os custos de aquisição, o cálculo tende a representar uma análise de viabilidade econômica ou orçamentação, e não uma avaliação de custos LCC.

O LCC pode auxiliar tomadores de decisões, responsáveis técnicos e clientes no entendimento do custo de um produto durante todo o seu ciclo de vida. Produtos ambientalmente favoráveis que são inicialmente mais caros podem ser econômicos ao considerar toda a sua vida útil (Pombo et al., 2016). Os documentos analisados possuem um objetivo em comum: informar as partes interessadas sobre as melhores opções de projeto, construção e/ou reforma atendendo às perspectivas econômicas atuais e futuras (Islam et al., 2015) – assim como o presente trabalho.

Na perspectiva do estágio de uso e operação, pesquisas antecedentes indicam que pequenas ações de reparo e/ou manutenção menos dispendiosas podem reduzir os custos do ciclo de vida, ocasionando a diminuição do número de grandes intervenções para estruturas e condicionando a qualidade e a durabilidade dos sistemas construtivos (Wittcox et al., 2022).

Os principais resultados dos documentos ponderam sobre a importância das análises de impacto ambiental e econômico para a tomada de decisões na fase de projeto e de manutenção. Como exemplo, os resultados encontrados no caso de edificação residencial mostram que 55% a 58% é a maior contribuição da fase de construção comparado a todo o LCC, seguido por custos de

operação e manutenção de 25% a 27% do LCC geral, verificando-se também que o custo de impacto ambiental (EIC) representa aproximadamente 17% a 18% do total do LCC – o EIC é criado com base nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e no potencial de aquecimento global (GWP) resultante no que se refere à modalidade de construção (Alshamrani, 2021).

Ademais, os resultados apontam para três argumentos que são discutidos a seguir.

- (i) Necessidade de manutenções ao longo do ciclo de vida com benefícios ambientais e econômicos, reparos parciais com mínima intervenção são a opção mais preferível para uma curta extensão de vida útil (5 anos), já para o cenário com maior período de referência, indica-se a substituição total dos sistemas e envolve o maior impacto ambiental e financeiro (Witcox et al., 2022).
- (ii) Escolha correta de insumos e técnicas eficientes, incluindo inovações construtivas, como o uso de construção modular e de materiais fabricados localmente que criam novas alternativas às técnicas tradicionais de construção (Alshamrani, 2021).
- (iii) Adaptação cultural, social e política ao conceito de manutenção e reconstrução – sendo que a reforma de estruturas e/ou sistemas pode contribuir para reduzir os impactos ambientais da construção, devem ser desenvolvidas soluções econômicas adicionais e facilitados financiamentos que possam apoiar obras de remodelação em vez de construir novos edifícios (Ferreira et al., 2015). A fase de uso de um edifício constitui uma das fontes mais importantes do seu impacto no ciclo de vida, considerando que muitos estudos já focam na redução dos impactos energéticos operacionais através da eficiência energética e do uso de energia renovável, os impactos da substituição/manutenção dos elementos do edifício representam cada vez mais uma porcentagem maior nas LCA-LCC da edificação (Morales et al., 2021).

Como visto, as limitações dos documentos são sobretudo relacionadas com a variabilidade e especificidade de cada caso – como características da edificação, dados do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), previsão de vida útil de elementos e também custos econômicos (Ferreira et al., 2015; Vilches et al., 2017). Outros parâmetros devem ser analisados, como: localização, acessibilidade, geografia, tecnologia, idade, método de coleta, fatores sociais, ambiente físico e representatividade (Islam et al., 2015; Witcox et al., 2022) – ou seja, a comparação adequada entre os estudos é impossível e seus resultados não podem ser generalizados.

Na fase de uso e operação, a abordagem LCA-LCC e o método de aplicação carecem de informação detalhada sobre as soluções e a edificação existente, sendo de difícil obtenção e elevado nível de incerteza (Ferreira et al., 2015). Ademais, informações de previsões de vida útil dos sistemas construtivos também são referenciadas na literatura e/ou normas que dependem do escopo do estudo e do país de origem (Morales et al., 2021).

Os impactos ambientais e econômicos são influenciados pelas premissas de projeto, pelos materiais selecionados e pela extensão da manutenção e/ou número de substituições para alcançar uma determinada vida útil em uma situação específica. Outrossim, as variações de preços de insumos, de equipamentos e de mão de obra devem ser consideradas em um processo de tomada de decisão sustentável (Wittocx et al., 2022).

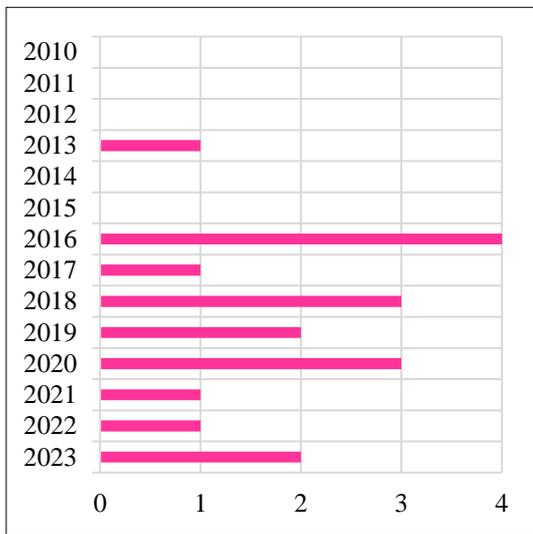
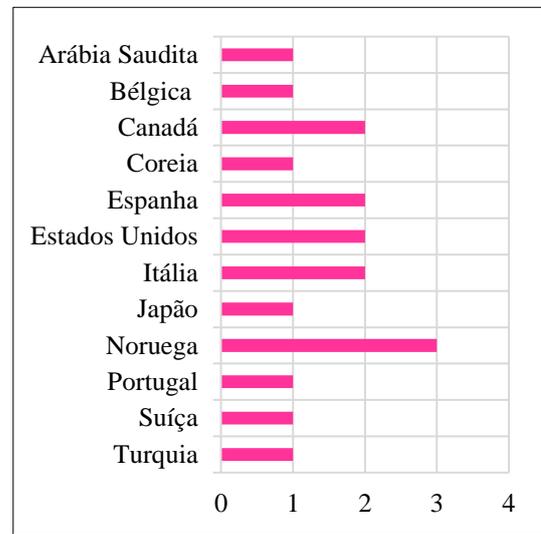
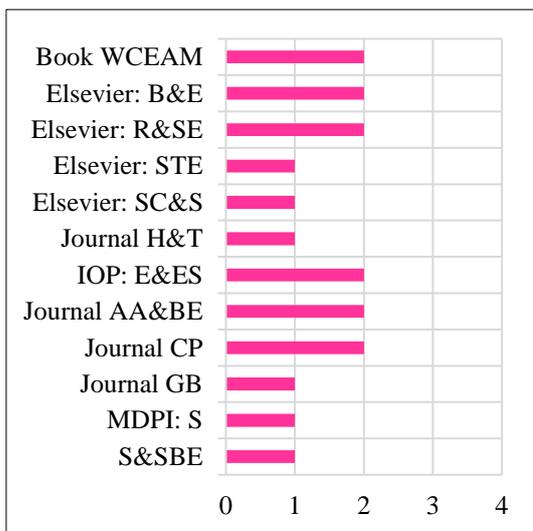
2.2 MANUTENÇÃO DE EDIFICAÇÕES

A segunda revisão sistemática sobre Ciclos de construção, operação e manutenção de edificações, busca responder a seguinte questão: *Como funciona o ciclo de manutenções de edificações escolares?*

A revisão foi realizada no mês de abril de 2023 com a *string* de palavras-chave [(*buil* OR construct* AND maint* AND life AND cycle AND school*)], onde os critérios de especificação do tema são o enfoque em edificações escolares e/ou públicas e revisões críticas sobre o tema.

A análise bibliométrica define o perfil das publicações considerando as informações de: ano, país, meios de publicação e tipo de publicação. Os resultados são demonstrados na Figura 5.

Figura 5 – Análise bibliométrica da revisão sistemática II

(a) N° de documentos *versus* Ano de publicação(b) N° de documentos *versus* País de publicação(c) N° de documentos *versus* Meios de publicação(d) N° de casos *versus* Tipo de publicação

Nota: Os meios de publicação são Book Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015), Elsevier: Building and Environment (B&E), Renewable and Sustainable Energy Reviews (R&SE), Science of the Total Environment (STE), Sustainable Cities and Society (SC&S), International Journal of Heat and Technology (H&T), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (E&ES), Journal of Asian Architecture and Building Engineering (AA&BE), Journal of Cleaner Production (CP), Journal of Green Building (GB), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI): Sustainability (S), Smart and Sustainable Built Environment (S&SBE).

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Como visto na Figura 5-a sobre o ano de publicação, há um aumento no número de publicações a partir de 2016 (com quatro documentos) até 2023. Edifícios saudáveis, sustentáveis e energeticamente eficientes são mais valiosos desde do Movimento Verde e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de 2015 (Selicati & Cardinale, 2023). Além disso, devido

ao aumento de infraestruturas sociais deterioradas, observou-se a importância do planejamento de longo prazo para a sustentabilidade e a melhoria do desempenho (Kang et al., 2020).

Quanto ao país de publicação (Figura 5-b), nota-se uma diversidade de doze países com documentos, com destaque para Noruega (três documentos), enquanto nenhum documento nacional foi selecionado nesta revisão. Para os meios de publicação (Figura 5-c) com enfoque nas áreas de *Engineering* e *Environmental Science*, são contabilizados seis documentos publicados na *Elsevier* (cerca de 33%) e demais periódicos.

As publicações são divididas em três categorias quanto ao tipo de publicação (Figura 5-d), com: onze documentos (cerca de 61%) do tipo “Estudo de caso”, com aplicação de uma metodologia específica em edificações. Ademais, quatro documentos como “Proposta de *framework*” com 22% (Alshamrani & Alshibani, 2020; Dickerson & Professor, 2016; Kang et al., 2020; Kim et al., 2018) e três documentos como “Revisão sistemática” com 17% (Anand & Amor, 2017; Buyle et al., 2013; Marjaba & Chidiac, 2016).

Em uma análise dos textos selecionados, constata-se que a manutenção de edificações abrange múltiplos fatores, como: a dinâmica do setor responsável, organizacional, administrativo e executivo; a inovação e sustentabilidade no setor construtivo; as necessidades e o comportamento dos usuários; e também a vida útil dos componentes e da própria edificação.

2.2.1 Estimativas de vida útil de sistemas e/ou edificações

A vida útil é estimada por um conjunto de condições específicas de uso, determinado a partir de dados de vida útil de referência levando em conta quaisquer diferenças entre o uso e a referência (BS EN 16627, 2015). Ou seja, as estimativas de vida útil dos materiais, componentes e sistemas influenciam diretamente na manutenção das edificações, definindo os períodos de substituição, reparo, reforma e outros. A vida útil e o tempo de ocupação aumentam notadamente devido aos requisitos de manutenção (Huang et al., 2018).

Cada material de construção possui uma vida útil esperada que é influenciada pelas propriedades inerentes e pelo regime de manutenção da instalação em vigor (Alshamrani & Alshibani, 2020). Os dados de vida útil de referência (do inglês, *Reference Service Life*, RSL) são informações qualitativas ou quantitativas para descrição da validade da vida útil (BS EN 16627, 2015). O RSL depende do desempenho funcional do produto, da construção e das condições de utilização (BS EN 15804, 2013). A depender do escopo e das diretrizes adotados pelo responsável do estudo, a vida útil pode ser determinada por: Declaração Ambiental de

Produto (DAP) da base de dados *EPD System* (entre outras), informações técnicas do fabricante, histórico de manutenções do caso específico e/ou a vida útil definida por normativas.

Em geral, a vida útil é assumida e não baseada em um método de cálculo, por meio de uma pesquisa de dados de vida útil de edifícios antigos, de valores amplamente utilizados para um determinado tipo de edifícios ou de um material principal da vida útil do edifício (Anand & Amor, 2017). As suposições de vida útil variam entre 25 e 100 anos, podem também ser analisadas para o período de tempo de uma geração, reduzindo a incerteza nos resultados operacionais das gerações futuras (Verbeeck & Hens, 2010).

No Brasil, a maioria dos estudos utiliza a Vida Útil de Projeto (VUP) definida pela norma de desempenho ABNT NBR 15575-1 (2021) para edificações habitacionais como “período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado, a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos”. A Tabela 7 apresenta a VUP normativa dos sistemas.

Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP) de acordo com norma de desempenho (ABNT NBR 15575-1, 2021)

Sistema	VUP (em anos)		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

Nota: Considerando periodicidade e processos de manutenção do respectivo manual de uso (ABNT NBR 5674, 2012), operação e manutenção entregue ao usuário em atendimento à (ABNT NBR 14037-1, 2011).

Fonte: adaptado de (ABNT NBR 15575-1, 2021).

Na ABNT NBR 15575-1 (2021) os valores de vida útil variam entre 13 e 75 anos, sendo determinados com base em três critérios de falha: (1) o efeito que uma falha no desempenho do sistema ou elemento acarreta; (2) a maior facilidade ou dificuldade de manutenção e reparação em caso de falha no desempenho; e (3) o custo de correção da falha.

A vida útil de um edifício é um parâmetro difícil de padronizar, pois depende de muitos fatores (Huang et al., 2018). Em estudos antecedentes, como a tese desenvolvida por Morales (2019), há a constatação das incertezas na previsão de vida útil de elementos. A Tabela 8 demonstra os valores de vida útil dos principais elementos com base em normativas nacionais e internacionais, trabalhos antecedentes e outras fontes bibliográficas.

Tabela 8 – Valores de vida útil (anos) para doze modelos de vida útil selecionados

Grupo	Elementos	CA	BEES	BRI	DKD	HAPM	MEANS	NZBM	SABO	SBG	ULC	USACE	ABNT
		US	NL	US	UK	US	NZ	SE	DE	DE	US	BR	
Infraestrutura	Lajes de concreto		100	100	50	60	75		50	70	50	75	63
	Vigas de nivelamento		100	100		60	75		50	100	50		63
	Portas de alumínio			75	40	20	50	60	30	50	50	75	25
	Janelas de alumínio	25		75	35	23	50	60	30	50	40	75	25
	Argamassa externa	48	100	25		35		60		40	45	300	25
	Telhas cerâmicas	75	70	75			70		30	50	50	70	17
	Escadas de concreto		100	100	50		75		50	70	50	300	63
Supraestrutura	Paredes externas de tijolos de barro		200		75	60	75	100	50	120	50	500	63
	Pintura externa	8				8	5	8	10	20	15	8	10
	Paredes internas de tijolos de barro		200	100	75	60	75	100	50	120	50	500	63
	Lajes de concreto armado		100	100	75	60	75		50	70	50	500	63
	Estrutura do telhado		75	100	40	35		100	30	80	50		25
	Pintura do teto	8	4		7	10	10	8	30	20	5	4	4
Acabamentos	Argamassa interna		100	25			75			25	50	300	17
	Pintura interna	8	4		7	6	5	8	10	20	5	4	4

Nota: onde Athena Institute (ATHENA) do Canadá (CA); Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) dos Estados Unidos (US); British Shorthair (BRI) da Holanda (NL); Dansk Standard (DK) do Reino Unido (UK); RSMMeans (MEANS) dos US; NZ Building Management (NZBM) da Nova Zelândia (NZ); Sabo Standard (SABO) da Suécia (SE); Standards-Based Grading (SBG) da Alemanha (DE); ULC Standards (ULC) da DE; U.S. Army Corps of Engineers (USACE) dos US; Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) do Brasil (BR). Os valores numerais estão destacados com escala de cores com tons crescentes: baixos (branco), médios (cinza claro) e altos (cinza escuro).

Fonte: adaptado de Morales *et al.* (2021).

Ao comparar os valores da Tabela 8 observa-se uma excessiva variação entre os valores de vida útil para um mesmo componente – alcançando uma discrepância de quase 18 vezes no caso da argamassa interna entre as normas USACE/US (300 anos) e ABNT NBR/BR 15575-1 (17 anos), por exemplo. A alta variabilidade da vida útil dos elementos deflagra a incerteza envolvida nos cálculos de impactos ao longo do ciclo de vida da edificação, além de impossibilitar uma comparação entre os estágios de uso e operação de diferentes estudos.

Segundo a literatura, os impactos ambientais da manutenção podem variar em cerca de 2% e 55% quanto ao impacto total do ciclo de vida, dependendo de fatores como a vida útil assumida, o regime e frequência de manutenção assumido e a intensidade das substituições (Grant & Ries, 2013). Outro estudo cita que o estágio de uso é o mais importante, podendo representar de 80% a 85% dos impactos do ciclo de vida das situações mais comuns (Ferreira et al., 2015).

A vida útil de um edifício pode ser afetada pela durabilidade dos elementos de construção e pelas exigências do mercado, como a reestruturação e/ou demolição do edifício antes do fim de vida estimado (Anand & Amor, 2017). A longa vida útil da edificação e a subjetividade do

comportamento do usuário amplia as suposições e estimativas para o cálculo de impactos, trazendo maiores incertezas para a credibilidade dos resultados (Buyle et al., 2013).

2.2.2 Contexto da manutenção de edificações escolares públicas no Brasil

Os aspectos do comportamento humano, em conjunto com aspectos técnicos e funcionais, são elementos essenciais para a sustentabilidade e o desempenho de uma edificação (Kustiani & Khidmat, 2021). Idealmente, se o edifício apresentar um bom desempenho, as necessidades dos seus ocupantes são bem acomodadas e vice-versa. Ou seja, as medições qualitativas baseadas no usuário são importantes no ciclo de vida das edificações, sendo que o período de uso e ocupação é o ciclo mais longo de desempenho do edifício (Nurdini & Hadianto, 2018).

No contexto de edificações escolares, a manutenção e o comportamento dos usuários envolvem uma abordagem holística desde a concepção do projeto até a forma de uso dos espaços no dia a dia, com o intuito de consolidar ambientes com promoção da aprendizagem, funcionalidade e preservação a longo prazo. Ou seja, a noção de “edifício escolar saudável” implica a sintonia da infraestrutura com o entorno ambiental, promovendo a interação entre o espaço físico, a abordagem pedagógica e o desenvolvimento infantil (Azevedo et al., 2004).

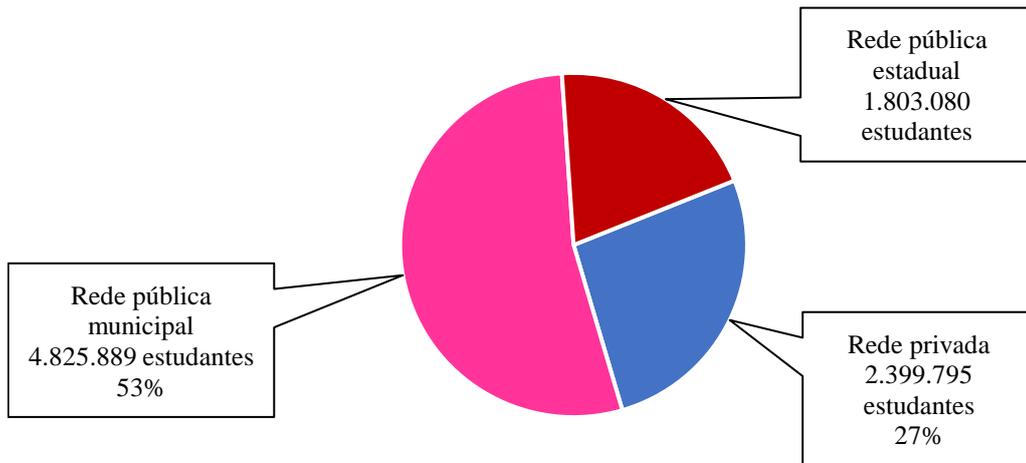
A qualidade do ensino em instituições educacionais está ligada ao nível de habitabilidade da construção, dessa forma, garantir a manutenção e conservar o desempenho das instalações são ações necessárias para apoiar a qualidade da educação (Kim et al., 2018). Segundo trecho formulado pela UNESCO (sigla da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, criada das Nações Unidas) e citado por Azevedo e outros pesquisadores (2004):

O prédio escolar deve ser seguro e atraente em termos de seu projeto global, funcionalidade no layout; deve dar condições para que seja efetivamente possível um ensino efetivo, atividades extracurriculares em especial em áreas carentes e rurais, atuando como um centro comunitário. Deve ser construída a escola em conformidade com padrões sanitários, tendo durabilidade, adaptabilidade e deve requerer uma manutenção econômica.

Edificações públicas são locais de grande circulação humana, com cargas de operação superiores a unidades habitacionais – especialmente as escolas primárias operadas continuamente (Keles & Yazicioglu, 2023). O controle dos riscos ambientais no interior das escolas públicas tem influência no âmbito público geral (Dickerson & Professor, 2016). Muitos edifícios são antigos, estão em mau estado e podem conter condições ambientais que inibem a aprendizagem e representam riscos acrescidos para a saúde.

No Brasil, as instituições públicas de educação infantil englobam cerca de 6.628.969 estudantes de todo país, atendendo crianças de até cinco anos, segundo dados do último Censo Escolar da Educação Básica realizado em 2022 pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira – INEP (Brasil, 2023). A Figura 6 expressa o número de estudantes matriculados na educação infantil no Brasil, divididos entre redes pública e privada – nota-se que a rede pública alcança a maioria das escolas infantis com quase 75% do total.

Figura 6 – Número de estudantes matriculados na educação infantil no Brasil

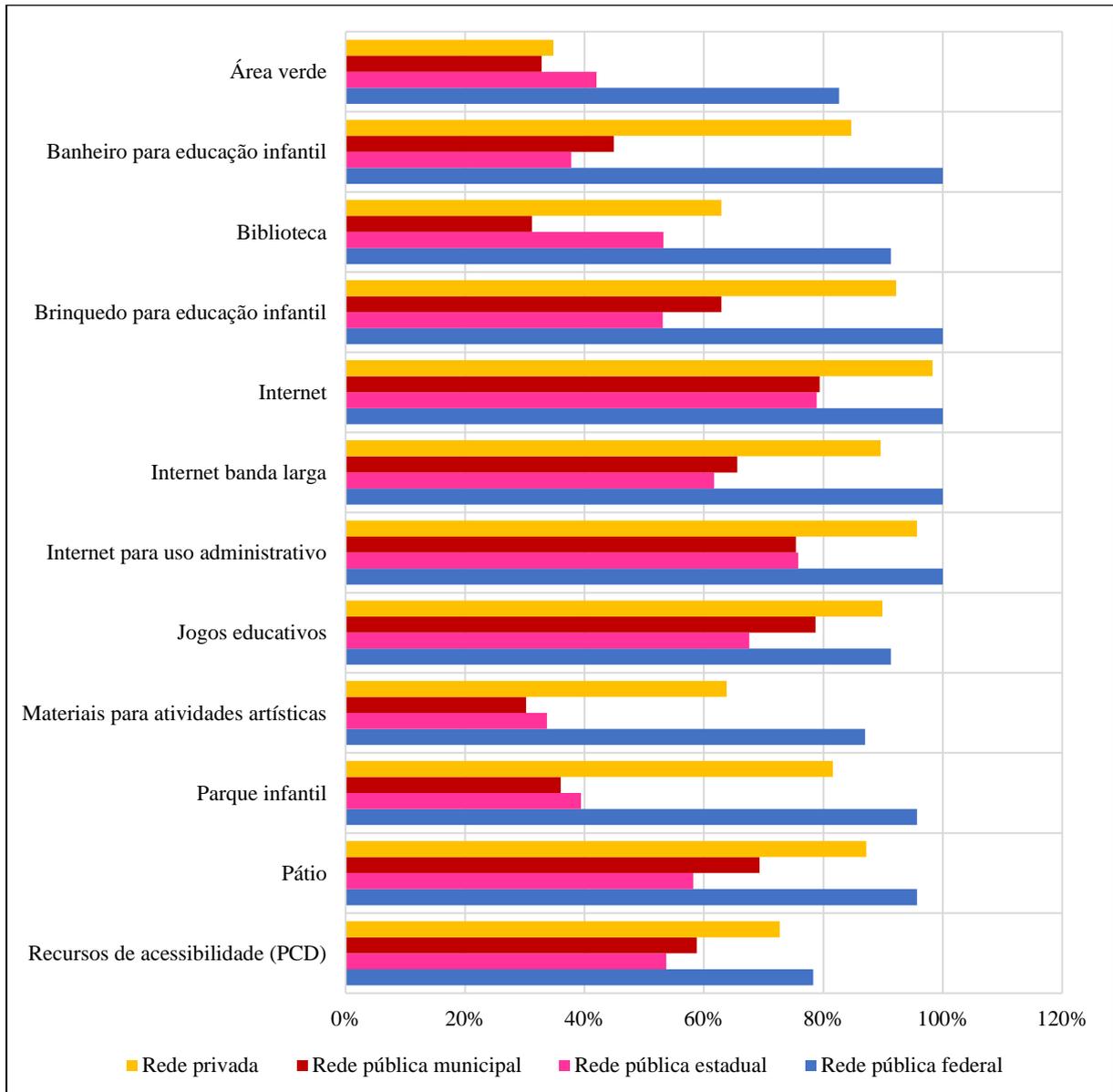


Fonte: adaptado de Censo Escolar da Educação Básica (Brasil, 2023).

A quantificação das crianças beneficiadas pelo sistema público de educação infantil deflagra a importância da adequada manutenção de suas edificações, que influencia o cotidiano de estudantes, professores(as) e funcionários(as) da escola.

Na Figura 7 são estimados os recursos relacionados à tecnologia e à infraestrutura disponíveis nas escolas de educação infantil no Brasil. Com base na Figura 16, verifica-se que os menores índices da presença de tecnologia e infraestrutura estão vinculados à rede pública municipal (na cor vermelha), sendo que a porcentagem é relativa às escolas em que há presença desses equipamentos/espços. Em quesitos relacionados com a construção civil aparecem: biblioteca (31,2%), banheiro para educação infantil (44,9%), recursos de acessibilidade (58,8%), área verde (32,8%), parque infantil (36,0%) e pátio (69,3%) – os quais são contemplados, muitas vezes, pela manutenção predial e pela conservação de bens públicos.

Figura 7 – Presença de recursos relacionados à tecnologia e à infraestrutura disponíveis nas escolas de educação infantil no Brasil



Fonte: adaptado de Censo Escolar da Educação Básica (Brasil, 2023).

O custeio de uma edificação pública requer a execução de passos técnicos e burocráticos, que se desdobram nas fases iniciais, licitação e manutenção da obra. A licitação é um processo público de seleção de uma empresa especializada para a realização do empreendimento e/ou serviços, pautado em critérios específicos conforme o objetivo e as regulamentações vigentes. A documentação técnica das obras públicas é crucial para o processo de licitação, por isso, as soluções técnicas devem ser minuciosamente justificadas e orçamentadas. O processo da obra e os atores envolvidos podem variar consideravelmente, dependendo da complexidade dos serviços, da estrutura organizacional de cada instituição e do número de profissionais

qualificados para a elaboração dos documentos. Ademais, o processo está sujeito às fiscalizações interna e externa do governo, com o intuito de assegurar a aderência às normas técnicas, às diretrizes administrativas e aos parâmetros orçamentários e de especificações para edificações públicas (Bretas, 2010; Libraga, 2022).

Dentro da instituição pública e para obras voltadas a edificações escolares, é imperativo que haja pelo menos quatro partes envolvidas: (i) a gestão ou coordenação, responsável pela tomada de decisões e pela administração; (ii) a equipe diretiva da escola, que reivindica e prioriza as necessidades da instituição; (iii) o corpo técnico, composto por profissionais de engenharia e arquitetura, encarregados das vistorias, levantamentos e documentação técnica exigida pela gestão; e (iv) entidades reguladoras governamentais, como prefeituras e órgãos de licenciamento ambiental, que desempenham um papel crucial na avaliação legal do projeto, assegurando a aderência aos códigos municipais de construção, aos planos urbanísticos e à legislação ambiental (TCU, 2014). Ou seja, tal procedimento abrange múltiplas etapas e partes interessadas até a contratação e efetiva construção, operação e/ou manutenção do edifício.

2.2.3 Manutenção de edificações conforme a literatura internacional e nacional

Os documentos da revisão sistemática II apresentam uma gama de perspectivas e procedimentos aplicados em edificações, inclusive para otimização de impactos da fase de manutenção desse tipo de construção. As metodologias demonstradas nos estudos podem ser divididas em: avaliações de impactos LCA-LCC (tema do presente trabalho) e avaliações múltiplas.

A Tabela 9 elenca as informações dos documentos que tratam das avaliações de impactos LCA-LCC, estando em destaque os artigos que tratam do mesmo estudo de caso do presente trabalho – edificações educacionais públicas (Alshamrani & Alshibani, 2020; Kang et al., 2020; Keles & Yazicioglu, 2023; Salicath et al., 2016; Salicath & Liyanage, 2016). Tais estudos buscam a otimização de custos da fase de uso e manutenção aliado à redução dos impactos ambientais.

Tabela 9 – Estudos de casos e Propostas da revisão sistemática II: Informações sobre avaliações de impactos

Referência	Tipo de publicação	Edificação	Objetivo do estudo	Localização	Avaliação	Período de referência de estudo
(Keles & Yazicioglu, 2023)	Estudo de caso	Escolas primárias públicas	Desenvolvimento de alternativas sustentáveis para reduzir o impacto ambiental atingir as metas de sustentabilidade	Turquia	LCA	50 anos
(Selicati & Cardinale, 2023)	Estudo de caso	Edificações da administração pública	Diagnóstico energético, avaliação e medição de conforto para renovação e descarbonização de edifícios existentes	Itália	LCA	10 anos
(Alshamrani & Alshibani, 2020)	Proposta de framework	Edificação educacional	Elaboração de um sistema automatizado de apoio à decisão (DSS) para auxiliar os distritos escolares na seleção de novas instalações educacionais potenciais	Canadá	LCC	20 anos
(Kang et al., 2020)	Proposta de framework	Edificação educacional	Elaboração de um modelo de dinâmica de sistemas (SD) para a melhoria do desempenho de edifícios, considerando deterioração e manutenção	Coreia	LCC	50 anos
(Huang et al., 2018)	Estudo de caso	Dormitórios universitários	Avaliação de impactos ambientais e custo do ciclo de vida de dormitórios, como parte da sustentabilidade	China	LCA, LCC	50 anos
(Dickerson & Professor, 2016)	Proposta de framework	Edificação educacional pública	Elaboração de um método quantitativo simplificado baseado no Índice de Carga Relativa Ambiental (ERBI) para classificar os impactos ambientais das instalações e manutenções	Estados Unidos	LCA	30 anos
(Salicath et al., 2016)	Estudo de caso	Edificação educacional pública	Gestão de ativos públicos, envolvendo estudos de caso com quatro escolas públicas, para redução de custos na fase de operação	Noruega	LCC	5 anos
(Salicath & Liyanage, 2016)	Estudo de caso	Edificação educacional pública	Simulação de cenários de aluguel com taxas de uso, operação e depreciação	Noruega	LCC	25 anos
(Dejaco et al., 2020)	Estudo de caso	Edificação habitacional unifamiliar	Apoio o processo de tomada de decisão na fase de projeto para facilitar orientação, monitoramento e escolha de soluções estruturais	Itália	LCA, LCC	50 anos
(Galimshina et al., 2019)	Estudo de caso	Edificação habitacional	Definição de parâmetros de maior influência para identificar cenários de renovação robustos	Suíça	LCA, LCC	60 anos

Nota: Em destaque cinza os documentos referentes ao tipo de edificação educacional pública.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

No estudo elaborado por Keles e Yazicioglu (2023), os resultados mostram que o concreto armado é o material de maior contribuição para a energia incorporada ao ciclo de vida e para a emissão de CO₂ em edifícios. Além disso, o uso de envidraçamento em fachadas e/ou aumento da entrada de luz em janelas refletem no alto desempenho, o que reduz significativamente os impactos ambientais. Ademais, o uso de materiais reciclados e à base de fibra também tem um potencial significativo para auxiliar essa redução.

Outros artigos, além da análise de impactos, trazem visões mais críticas sobre as edificações públicas. Salicath e Liyanage (2016) definem a gestão do patrimônio público como um campo específico da gestão, incluindo os bens de interesse público, como edifícios educacionais, habitações públicas, estradas, túneis, ferrovias, aeroportos e redes de abastecimento de água. (Salicath et al., 2016) cita que a gestão de ativos públicos é um processo relativamente exigente devido aos papéis complexos das partes interessadas e aos padrões específicos de oferta e demanda, o que é particularmente visível dentro dos processos econômicos e operacionais.

A avaliação de impactos ao longo do ciclo de vida das edificações surge como uma oportunidade de uma análise estratégica dos requisitos de ativos públicos para atender às necessidades das partes interessadas envolvidas, onde a manutenção deve ser adaptada aos objetivos estratégicos e operacionais (Salicath & Liyanage, 2016). O processo seletivo dos sistemas construtivos aplicados em edificações públicas é complexo, pois reúne diversos fatores de influência e envolve um grande volume de dados necessários, o que torna esse processo ainda mais complexo e demorado (Alshamrani & Alshibani, 2020).

Assim, o setor público pode se beneficiar amplamente com a experimentação de técnicas para a diminuição de impactos gerados pelas construções, que buscam apoiar os processos internos de decisão (Salicath et al., 2016). Alguns exemplos de propostas são verificados em estudos, como: sistema automatizado de apoio à decisão (DSS) (Alshamrani & Alshibani, 2020); modelo de dinâmica de sistemas (SD) (Kang et al., 2020); e método quantitativo simplificado baseado no Índice de Carga Relativa Ambiental (ERBI) (Dickerson & Professor, 2016).

A Tabela 10 expressa a seleção de estágios de avaliação utilizada em cada documento.

Tabela 10 – Estudos de casos e Propostas da revisão sistemática II: Estágios de avaliação de um edifício

Referência	Estágios de avaliação de um edifício									
	Produto / Construção (A1-A5)	Uso (B1)	Manutenção (B2)	Reparos (B3)	Substituições (B4)	Reformas (B5)	Consumo de energia operacional (B6)	Consumo de água operacional (B6)	Fim da vida (C1-C4)	Benefícios (D)
(Keles & Yazicioglu, 2023)	X	X								
(Selicati & Cardinale, 2023)		X								
(Alshamrani & Alshibani, 2020)	X	X	X	X	X	X	X		X	
(Kang et al., 2020)	X		X				X			
(Huang et al., 2018)	X	X	X	X	X				X	
(Dickerson & Professor, 2016)	X	X	X						X	
(Salicath et al., 2016)	X	X	X			X			X	
(Salicath & Liyanage, 2016)	X	X	X			X			X	
(Dejaco et al., 2020)	X				X			X	X	
(Galimshina et al., 2019)	X				X		X		X	

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Por meio da análise dos estágios de avaliação da Tabela 10, nota-se que a maioria dos estudos considera os estágios de: produto/construção (A1-A5), uso (B1), manutenção (B2) e fim da vida (C1-C4). O artigo de Alshamrani e Alshibani (2020) leva em conta todos os estágios relativos ao uso, operação e manutenções da edificação, tal análise é realizada por meio de um sistema automatizado e apenas para LCC, facilitando a avaliação de diferentes fases da edificação.

Por exemplo, no artigo de Huang *et al.* (2018), a avaliação dos estágios B2, B3 e B4 é baseado em dados de consumo de manutenção estimados pelos relatórios de danos e reparos da administração imobiliária da Universidade – considerando porcentagem de substituições para pisos (80% em uma substituição), telhas e tubulações com duas substituições completas; também são considerados reparos em esquadrias (20% de danos anualmente) e duas repinturas ao longo de 50 anos. Já no estudo de Salicath *et al.* (2016) é discutido a importância de fundos públicos contínuos para atividades operacionais críticas como a manutenção da edificação, os dados de vida útil dos elementos também são previstos conforme o histórico de manutenções de quatro escolas públicas da Noruega.

No grupo dos documentos que estudam as avaliações múltiplas, os escopos e as metodologias são diversos, desde a análise subjetiva do comportamento dos estudantes até a estimativa analítica dos pagamentos de manutenção das escolas. A seguir, são resumidos os panoramas adotados por cada artigo.

O artigo de Rezvani *et al.* (2022) avalia onze edificações públicas e privadas de uso geral (entre elas, duas edificações escolares) e prescreve uma pontuação de resiliência dos ativos construídos. Lançando uma nova abordagem de Análise de Decisão Multicritério (MCDA) com cinco dimensões inter-relacionadas: ambiental, econômica, organizacional, social e técnica – sendo mais subjetiva e dinâmica que a definida pela LCA-LCC, dessa forma, serve como inspiração de possíveis aplicações dentro do escopo do presente estudo.

Outro estudo desenvolve um sistema automatizado de apoio à tomada de decisões para edificações escolares potenciais, considerando os quesitos de custo de construção, custo de funcionamento (ou seja, custos de energia, operação, manutenção e renovação), valor residual devolvido e custos associados de impacto ambiental – cujo impacto é referente ao equivalente de dióxido de carbono emitido e ao respectivo preço de mercado da tonelada métrica de CO₂ (Alshamrani & Alshibani, 2020). A monetização da taxa de carbono é um esquema de incentivos financeiros para empresas com investimento em tecnologias e/ou compra de créditos de carbono para redução das emissões de carbono para a atmosfera – o problema desse esquema é que os custos crescentes previstos pelo imposto de carbono não refletem o real valor monetário dos impactos ecológicos gerados (Dejaco *et al.*, 2020).

Os artigos de Gamarra *et al.* (2018) e Gamarra *et al.* (2019) têm como objetivo a quantificação dos impactos ambientais e econômicos ao longo de toda a cadeia de valor das atividades escolares por aluno, considerando custos externos e consumo agregado de energia e de água. São desenvolvidos em uma edificação educacional de ensino secundário da Espanha em um período de um ano, e tem como base as atividades de uso subjetivo dos ambientes e os comportamentos dos usuários.

No artigo de Kim *et al.* (2018) há a concepção de um modelo baseado em análise de regressão múltipla para estimar os custos de manutenção e reparos em edificações, adotando registros de pagamento relacionados a trabalhos de manutenção e reparo de instituições de ensino para desenvolver uma abordagem quantitativa.

O estudo desenvolvido por (Ito & Murakami, 2010) demonstra a importância da relação custo-benefício do controle ambiental interno adicional (aquecimento, ventilação e ar-condicionado, conhecido como HCVA) e o benefício associado de melhor desempenho acadêmico em um modelo de construção escolar em escala limitada no Japão. Os resultados são dados em impacto/pessoa/m², uma unidade promissora para relacionar os usuários com o ambiente.

A partir da análise dos documentos, são destacados os seguintes pontos:

- (i) A métrica para Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é atualmente o estado da arte na quantificação de impactos ambientais, sendo a única que emprega métodos científicos para medições e critérios para analisar impactos (Marjaba & Chidiac, 2016);
- (ii) O Custo do Ciclo de Vida (LCC) pode ser realizado adotando os seguintes parâmetros para bens públicos, por exemplo, correlação entre níveis de manutenção, custos de atualização e mecanismos de degradação (Salicath & Liyanage, 2016);
- (iii) Incertezas resultantes das avaliações de impacto, por exemplo LCA-LCC, podem ser maiores do que a diferença entre duas soluções, o que pode interferir na real redução de poluição e de custos (Galimshina et al., 2019);
- (iv) O uso de padrões e bancos de dados aceitos (por exemplo, *Ecoinvent*) aumentam a qualidade do trabalho em termos de validade dos resultados. Mesmo assim, a definição do escopo, os recortes e a complexidade do sistema devem ser levados em conta para interpretação dos resultados (Gamarra et al., 2019);
- (v) A distribuição de responsabilidades entre muitas partes interessadas e o desequilíbrio de incentivos de curto e longo prazo ocasiona falhas no planejamento e na manutenção durante o uso de edificações públicas educacionais (Salicath et al., 2016);
- (vi) Melhoria na interoperabilidade do intercâmbio de informações entre as partes envolvidas no processo de manutenção de edificações públicas, para otimização de todo processo de solicitação, licitação e construção – incluindo a disponibilidade de dados, a precisão dos dados, os problemas de alocação e extrapolação de processos não lineares (Dickerson & Professor, 2016; Selicati & Cardinale, 2023).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método para a evolução da pesquisa, que conta com a Estratégia e delineamento do método (Seção 3.1) e a Aplicação do método (Seção 3.2) – com as subseções de: Estudo de caso, Avaliação do ciclo de vida (LCA) e Custo do Ciclo de Vida (LCC).

3.1 ESTRATÉGIA E DELINEAMENTO DO MÉTODO

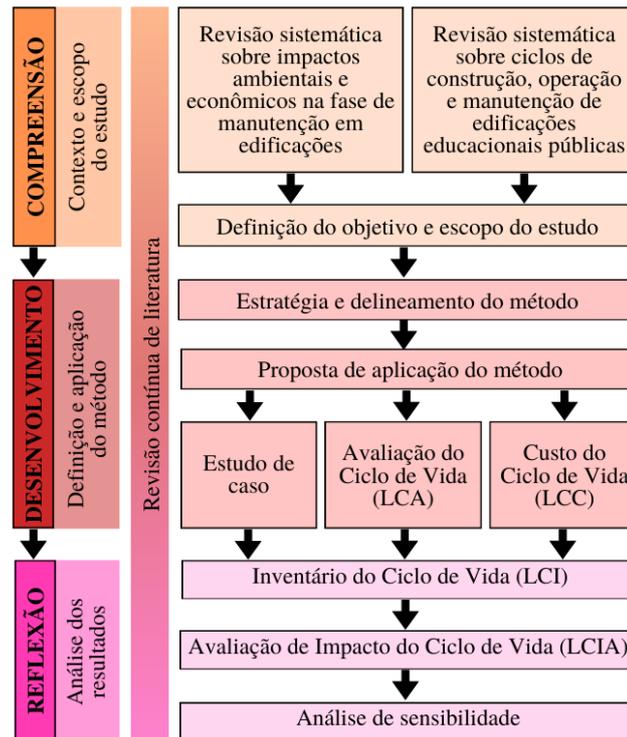
A pesquisa possui caráter prescritivo, ou seja, tem o intuito de definir uma solução para uma determinada problemática, por meio de um modelo teórico para a delimitação de conceitos e a identificação de uma resposta direta ao problema. Dessa forma, a estratégia de pesquisa adequada para o desenvolvimento do projeto é a *Design Science Research* (DSR), caracterizada pela busca de resoluções práticas inovadoras para problemas do mundo real, como citado por Vaishnavi e Kuechler (2007).

Conforme March e Smith (1995), a DSR pode ser dividida em quatro tipos: constructos, modelo, método e implementação. No caso da pesquisa, com base no objetivo de integrar a análise de impactos ambientais e econômicos em edificações, a referência imediata é a DSR de método, descrita como um conjunto de passos orientados para execução de uma tarefa, que representam um curso para a resolução do problema.

O delineamento do método abrange o planejamento amplo das fases do estudo, condicionando a robustez e o sucesso da condução do estudo. Dessa forma, a pesquisa garante o reconhecimento como sólida e potencialmente relevante pelo campo acadêmico e social, demonstrando o desenvolvimento com rigor e a passividade de debate e verificação (Pacheco Lacerda et al., 2013; Takeda et al., 1990).

A Figura 8 ilustra o delineamento da pesquisa, estipulado pelas etapas de compreensão, desenvolvimento e reflexão – partindo da estratégia de pesquisa DSR.

Figura 8 – Delineamento da pesquisa pela estratégia *Design Science Research* (DSR)



Nota: As cores são meramente ilustrativas. A sequência é definida pelo direcionamento das setas.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A etapa de compreensão serve para o entendimento do tema, sendo realizada mediante a literatura com duas revisões sistemáticas: Impactos ambientais e econômicos na fase de manutenção em edificações (item 2.1) e Ciclos de construção, operação e manutenção de edificações (item 2.2). Em que são coletadas informações sobre os impactos ambientais e econômicos de edificações, a relevância da fase de manutenção e os possíveis métodos de avaliação, além de estabelecer um panorama atual de pesquisas acadêmicas nacionais e internacionais. A partir da análise das descobertas e dos desafios encontrados na literatura, ocorre a definição do objetivo e escopo do trabalho – discorrido no Capítulo introdutório 1.

A etapa de desenvolvimento refere-se à definição e aplicação do método, começando com a Estratégia e delineamento do método (item 3.1), que condiciona o formato do método e as suas etapas. Seguido pela Aplicação do método (item 3.2) em um estudo de caso representativo com auxílio das ferramentas para avaliação ambiental (LCA) e econômica (LCC). A subseção sobre Estudo de caso demonstra a caracterização da edificação, os registros fotográficos do local e os dados relevantes ao método – a escolha da edificação considera a necessidade eminente de reforma, a possibilidade de replicação do método e a disponibilidade de informações. As

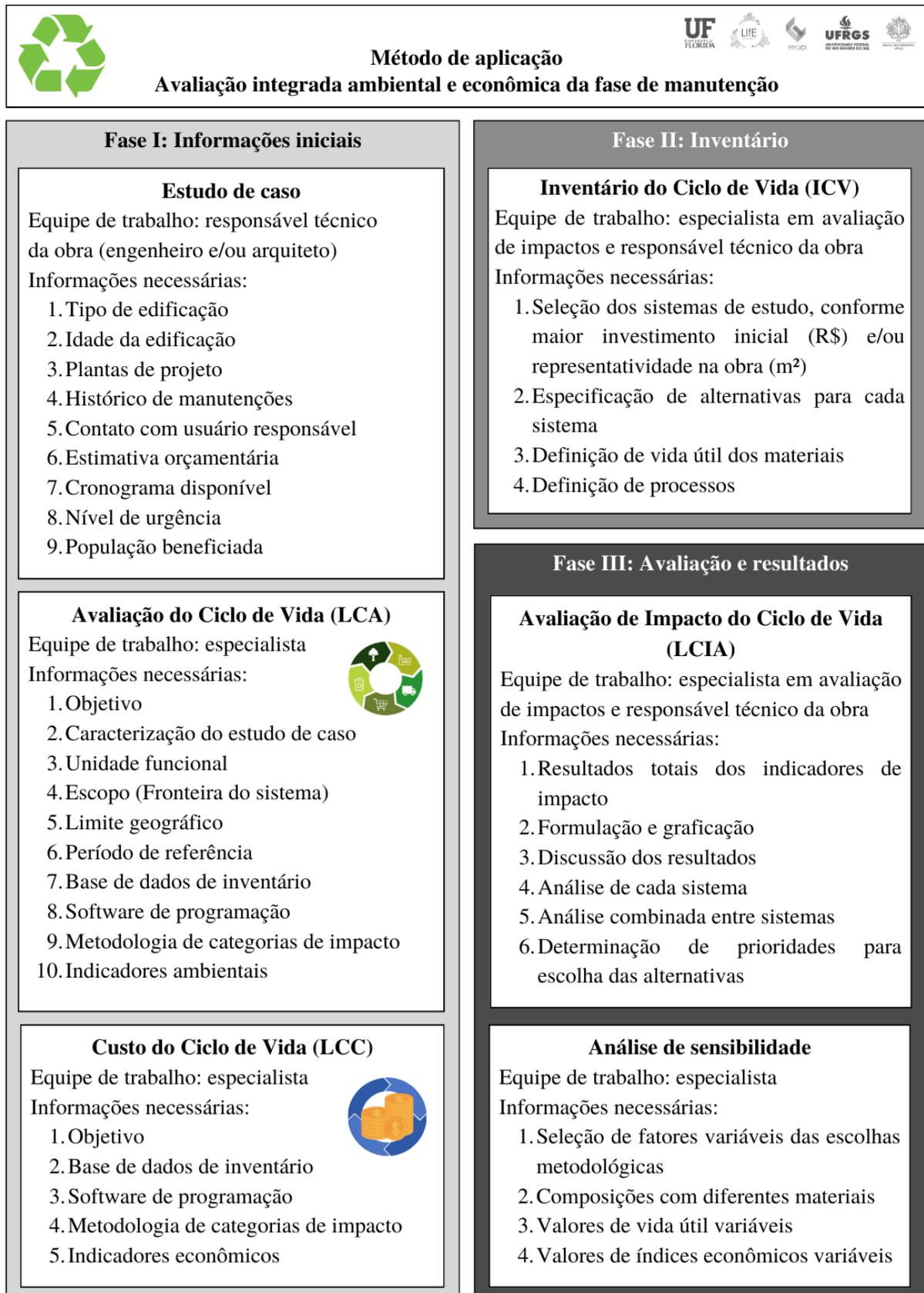
subseções sobre Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e Custo do Ciclo de Vida (LCC) trazem os dados necessários para aplicação das ferramentas, como: objetivo, caracterização do estudo de caso, unidade funcional, sistemas selecionados, escopo (fronteira do sistema), limite geográfico, período de referência, base de dados de inventário, software, metodologia de caracterização de impacto e categorias de impacto selecionadas.

Por último, a etapa de Reflexão compreende a análise e discussão dos resultados. O Inventário do Ciclo de Vida (LCI – item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) envolve a compilação e quantificação de entradas e saídas de uma edificação, ou seja, a determinação de informações sobre: sistemas construtivos avaliados, especificação de materiais, definição da vida útil e dos processos para cada uma das alternativas construtivas. A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA – item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) visa compreender e avaliar a magnitude e a importância dos potenciais impactos ambientais e econômicos para um sistema ao longo do ciclo de vida, nessa seção são analisados os resultados de impactos para as opções de pisos, janelas e pinturas internas – além de uma análise combinada entre sistemas. Por fim, a Análise de sensibilidade (item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) averigua sobre a influência estimada das escolhas metodológicas nos resultados finais, sendo realizadas as comparações entre: (i) composições diferentes para o piso vinílico, (ii) cenários com valores de vida útil variáveis e (iii) cenários com valores de INCC e SELIC variáveis.

A Figura 9 apresenta o método de aplicação detalhado empregado na pesquisa com padrões dinâmicos e ilustrativos, buscando facilitar o entendimento do trabalho e a possível aplicação por profissionais técnicos.

O método de aplicação (Figura 9) está dividido em três fases: (I) Informações iniciais, em que ocorrem a coleta de dados sobre o estudo de caso (Estudo de caso) e a determinação da metodologia das ferramentas de avaliação (LCA e LCC); (II) Inventário, com a definição de informações referentes ao Inventário do Ciclo de Vida (ICV); (III) Avaliação e resultados, composta pela graficação, análise e discussão dos resultados, inclusive com a avaliação integrada e a análise de sensibilidade. Na organização constam dados sobre o título, a equipe de trabalho e as informações necessárias para o desenvolvimento da avaliação. Vale ressaltar que, no caso do trabalho, a equipe de trabalho é representada pelos responsáveis da Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS (disponibilização de dados) e pela especialista/autora (demais etapas).

Figura 9 – Estruturação esquemática do método de aplicação em estudo de caso



Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Na aplicação do método são apresentados os dados sobre o Estudo de caso, a ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e a ferramenta Custo do Ciclo de Vida (LCC).

3.2.1 Estudo de caso

A aplicação do método proposto é realizada no estudo de caso selecionado, que representa um projeto padrão de edificação de educação infantil construído pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS, sendo replicável para utilização na Região Sul do Brasil. Outrossim, essa edificação demanda reforma imediata por apresentar estado de conservação ruim e por não receber manutenção construtiva. O empreendimento é do tipo arquitetônico em seis blocos unidos por uma circulação geral, possui apenas pavimento térreo e totaliza 43 cômodos (entre salas de aulas, depósitos e áreas de serviço) com área total construída de cerca de 1.008,75 m². Neste estudo, a análise aprofundada dos impactos é aplicada para o estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias, localizada no bairro Restinga, no município de Porto Alegre/RS. A Tabela 11 resume os dados gerais da escola.

Tabela 11 – Dados gerais do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias

Escola	E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias
Ano de construção	1978
Ano de aplicação da avaliação (reforma)	2023
Idade da construção (referência no ano de 2023)	45
Nº de pavimentos (unid.)	1
Nº de cômodos (unid.)	43
Nº de salas de aula (unid.)	11
Nº de alunos por sala de aula (unid.)	30 *
População estimada (pessoas)	200
Área construída (m ²)	1008,75
Área do terreno (m ²)	3001,80
Sistema construtivo	Alvenaria estrutural
Estado de conservação	Estado ruim

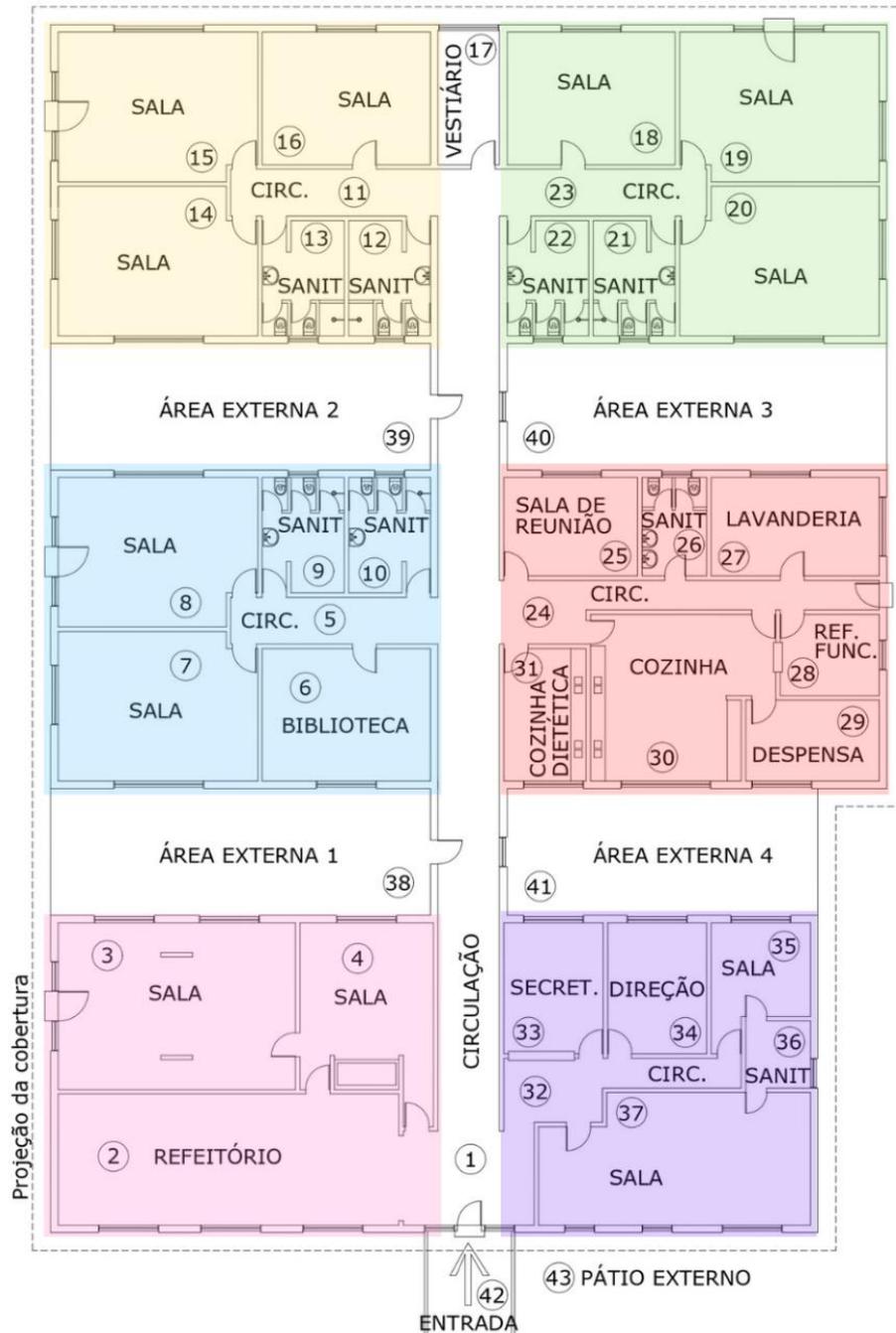
Nota: A população estimada é referente ao número de pessoas que frequentam a edificação diariamente (alunos, professores e funcionários). O estado de conservação é definido baseado na vistoria técnica realizada *in loco*. (*) O número de alunos por sala de aula é calculado conforme as máximas de densidade de um aluno/m² e de 35 alunos por sala, segundo as prescrições do Ministério da Educação (Beauchamp et al., 2006).

Fonte: elaborado pela autora (2023).

As características gerais dos sistemas construtivos são: alvenaria estrutural de tijolos cerâmicos, cobertura com estrutura metálica e telhamento em fibrocimento, revestimentos de pisos variados conforme o cômodo (tacos de madeira, cerâmicos, vinílicos e granitina), revestimentos de tetos com laje de concreto aparente com pintura, revestimentos de paredes em cerâmica ou argamassa/pintura, além disso, esquadrias internas (portas) de madeira compensada e esquadrias externas (portas e janelas) de alumínio e vidro. A planta baixa simplificada da

edificação do estudo de caso está expressa na Figura 10, seguida pela Tabela 12, onde constam as especificações dos setores da edificação com quantidade, identificação e área de cada cômodo – para trazer maiores informações sobre a edificação do estudo de caso.

Figura 10 – Planta baixa da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias com escala gráfica de plotagem de 1:200



Nota: A numeração é referente à contagem dos cômodos da edificação. As cores representam a divisão em blocos da edificação com informações específicas. A referência das cores dos blocos da edificação da Figura 10 é adotada na presente Tabela 12.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 12 – Especificações dos setores do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias

Parte		Circulação geral	
Número de cômodos			8
Circulação interna		Área (m²)	
Entrada			15
Circulação interna			76,29
Vestiário de funcionários			9,22
Área externa 1			53,76
Área externa 2			53,76
Área externa 3			55,34
Área externa 4			44
Área total (m²)			307,37

Parte		Bloco 01	
Número de cômodos			3
Cômodos		Área (m²)	
Refeitório			49,94
Sala do berçário 2			44,23
Sala de apoio berçário 2			25,42
Área total (m²)			119,59

Parte		Bloco 02	
Número de cômodos			6
Cômodos		Área (m²)	
Circulação			10,87
Biblioteca			24,92
Sala do jardim B1			32,82
Sala do jardim B2			32,21
Sanitário 1			10,56
Sanitário 2			10,56
Área total (m²)			121,94

Parte		Bloco 03	
Número de cômodos			6
Cômodos		Área (m²)	
Circulação			10,86
Sanitário 1			10,55
Sanitário 2			10,55
Sala do jardim A2			32,21
Sala do jardim A1			32,82
Sala do maternal A1			24,92
Área total (m²)			121,91

Parte		Bloco 04	
Número de cômodos			6
Cômodos		Área (m²)	
Circulação			10,86
Sanitário 1			10,51
Sanitário 2			10,51
Sala do maternal 2B			32,21
Sala do maternal 2A			32,82
Sala do maternal 1B			24,92
Área total (m²)			121,83

Parte		Bloco 05	
Número de cômodos			8
Cômodos		Área (m²)	
Circulação			15,95
Sala de reunião			14,68
Sanitário			7,1
Lavanderia			18,84
Refeitório dos funcionários			9
Cozinha			31,2
Dispensa			12,13
Cozinha dietética			12,13
Área total (m²)			121,03

Parte		Bloco 06	
Número de cômodos			6
Cômodos		Área (m²)	
Circulação			11,88
Secretária			14,52
Direção			14,52
Depósito			11,64
Sala de apoio do berçário 1			4,86
Sala do berçário 1			37,66
Área total (m²)			95,08

Área da edificação (m²)			1008,75
---	--	--	---------

Nota: A referência das cores dos blocos da edificação da Figura 10 é adotada nesta tabela.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A edificação do tipo Escola Municipal Educação Infantil (E.M.E.I.) atende crianças de até 5 anos com auxílio de professores(as), tutores(as) e funcionários(as). O edifício escolar saudável é caracterizado pela adequação da edificação ao ambiente, promovendo a interação entre o espaço físico, o projeto pedagógico e o desenvolvimento infantil. As instituições infantis seguem requisitos construtivos definidos pelo Ministério da Educação (MEC), em

conformidade com o Manual de Padrões de Infraestrutura para as Instituições de Educação Infantil e Parâmetros de Qualidade para a Educação Infantil (Azevedo et al., 2004).

O projeto do estudo de caso é disponibilizado apenas em *AutoCAD*, dessa forma, o levantamento dos quantitativos e insumos é realizado por meio de planilhas orçamentárias, de informações de projeto e de medições *in loco*. A Figura 11 exibe o registro fotográfico da fachada da edificação da Escola Municipal de Educação Infantil Florencia Vurlod Socias.

Figura 11 – Registro fotográfico da fachada do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias em 2023



Fonte: elaborado pela autora (2023).

No ano de 2023 é realizado um processo de manutenção de escolas municipais públicas de Porto Alegre/RS, no qual são desenvolvidos relatórios técnicos fotográfico e descritivo, quantitativo e orçamento global de manutenção da escola. Com o aporte e autorização dos responsáveis da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, o presente trabalho obteve acesso aos dados da escola selecionada.

No geral, a edificação E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias apresenta boas condições relativas ao uso, operação e funcionalidade – não há salas desocupadas, interditadas ou isoladas por riscos de segurança. Entretanto, a escola necessita de diferentes manutenções pontuais nos diversos

sistemas que compõem a edificação, como: pintura, revestimentos, esquadrias e outros. O estado de conservação da edificação é ruim, as manutenções ocorrem de maneira corretiva com serviços pontuais (por exemplo: vedação de torneira, telhamento de parte da cobertura, substituição de pisos e outros), e não são planejadas manutenções preventivas e/ou globais da edificação. A Figura 12 apresenta a localização da escola, na Rua Tenente Arzoli Fagundes, Acesso 1, s/ nº, Bairro Restinga Nova, Porto Alegre/RS.

Figura 12 – Localização georreferenciada da edificação do estudo de caso da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias



Nota: A área do terreno da E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias está em destaque pelo contorno azul claro e ícone também azul claro. A entrada da escola está indicada pelas setas brancas. Ao lado direito está localizada a Escola Municipal de Ensino Fundamental (E.M.E.F.) Senador Alberto Pasqualini, indicada pelo ícone roxo.

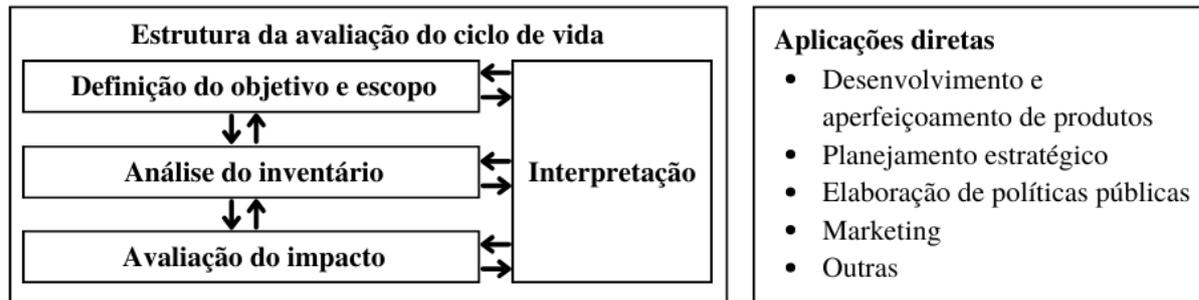
Fonte: adaptado de Google Earth (2023).

A E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias foi construída no ano de 1978 (45 anos em 2023). Segundo o histórico de manutenções e reformas, com base em relatórios do banco de dados da Prefeitura, a escola passou pelas seguintes obras: (i) em 2004 foi realizado o projeto de reforma da escola voltada à acessibilidade; e (ii) em 2009 foi realizado o projeto de construção de muros no entorno da escola. Vale ressaltar que a Prefeitura não possui um histórico consistente sobre as manutenções de edificações públicas, logo, a escola deve ter passado por outras modificações ao longo da vida útil – as quais não foram registradas.

3.2.2 Avaliação Do Ciclo De Vida (LCA)

A avaliação do ciclo de vida (LCA) possui as seguintes etapas: Objetivo e escopo; Inventário do ciclo de vida (ICV); Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação – expresso na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do processo de cálculo do desempenho ambiental (LCA)



Fonte: adaptado de ABNT NBR ISO 14040 (2009).

O objetivo e escopo da técnica de LCA é a avaliação dos potenciais impactos ambientais de diferentes sistemas com enfoque na fase de manutenção de materiais, subsidiando a escolha de soluções de melhor desempenho ambiental.

O público-alvo são os técnicos (engenheiros e arquitetos) de instituições responsáveis pela área de projeto, manutenção e fiscalização de obras, os quais possuem poder decisório na concepção das edificações. A LCA pode ser direcionada ao planejamento estratégico e à elaboração de regulamentos, segundo as aplicações definidas por norma (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

A avaliação é realizada em três sistemas selecionados: revestimentos de pisos, esquadrias (janelas) e revestimentos de paredes (pinturas internas). A escolha dos sistemas atende às premissas: (i) maior número de substituições ao longo da vida útil da edificação em comparação com outros sistemas – como cobertura ou estrutura, por exemplo; (ii) elevado número de opções de diferentes materiais; e (iii) influência significativa nos custos de manutenção global da edificação. A unidade funcional é a edificação completa, com área construída de 1.008,75 m², como os sistemas são avaliados de forma independente, as áreas totais (m²) são relativas à: 586,93 m² (pisos), 114,08 m² (janelas) e 1.932,77 m² (pinturas internas).

A Tabela 13 demonstra a representatividade da massa (em kg) dos sistemas construtivos para edificação completa nos períodos de referência: (i) ano zero (2023), com base na massa inicial

da edificação existente; e (ii) ano trinta (2053), conforme a massa gerada pelas substituições dos sistemas ao longo do ciclo de vida, sem contabilizar a massa inicial.

Tabela 13 – Representatividade da massa dos sistemas construtivos do estudo de caso com período de referência do ano zero (2023) relativo à edificação existente e do ano trinta (2053) relativo às substituições ao longo de 30 anos

Item	Sistema	Período de referência: Ano zero		Definição de vida útil (RSL)		Período de referência: Ano trinta	
		Massa (kg)	Represent. (%)	Vida útil (anos) NBR 15575-1	Estimativa substituições	Massa (kg)	Represent. (%)
1	Estrutura	563728,52	67,10%	63	0	0,00	0,00%
2	Alvenaria	185007,07	22,02%	50	0	0,00	0,00%
3	Cobertura	32491,24	3,87%	25	1	32491,24	33,85%
4	Esquadrias	7349,50	0,87%	25	1	7349,50	7,66%
5	Revestimento de pisos	7048,06	0,84%	17	1	7048,06	7,34%
6	Revestimento de paredes	43706,29	5,20%	25	1	43706,29	45,54%
7	Pintura	769,46	0,09%	4	7	5386,19	5,61%
	Total	840100,14	100,00%	-	-	95981,29	100,00%

Nota: Em destaque cinza estão os sistemas selecionados para as avaliações de impactos. As substituições ao longo de 30 anos não contabilizam a massa inicial.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

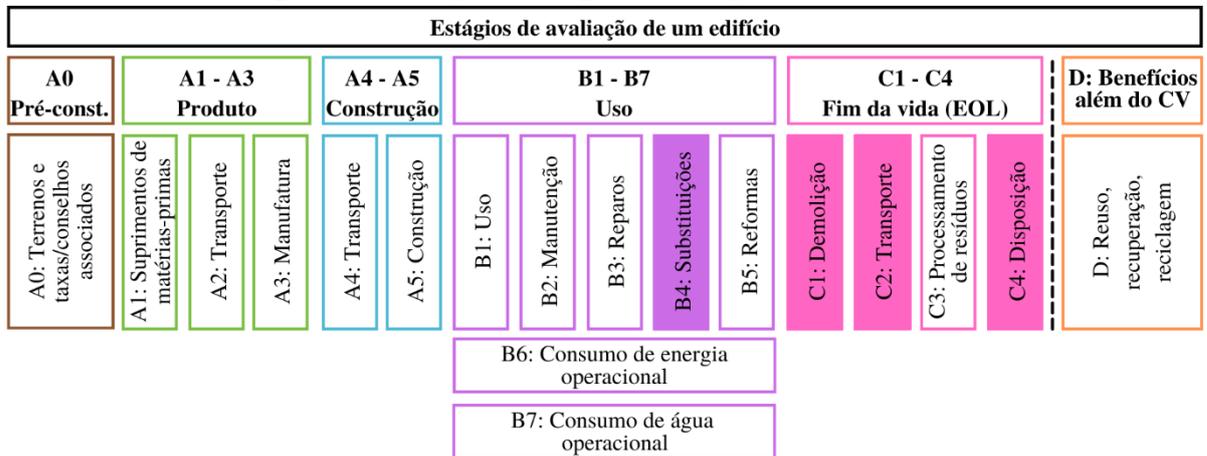
Na Tabela 13, a estimativa da massa (kg) da edificação leva em conta valores de vida útil definidos pela norma brasileira de desempenho (ABNT NBR 15575-1, 2021), possibilitando a análise de todos os sistemas construtivos. Nota-se que os sistemas de maior representatividade inicial (ano zero) são a estrutura e a alvenaria, já ao analisar as substituições do ciclo de vida (ano trinta) são os revestimentos de paredes e a cobertura – a ordem de influência é alterada pela consideração das substituições. Como visto, mesmo que a estrutura e a alvenaria representem quase 90% da massa inicial da edificação, não há previsão de manutenções e/ou substituições desse sistema dentro da vida útil da edificação.

Em contrapartida, os sistemas selecionados para análise têm uma representatividade pouco significativa, totalizando cerca de 1,81 % da massa inicial e com um aumento aproximado para 20,61% da massa total decorridos os 30 anos. No caso do estudo, a massa dos materiais não faz parte das premissas para a escolha dos sistemas, sendo priorizada a representatividade desses sistemas no orçamento para manutenção global da edificação – discutido no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os estágios do ciclo de vida avaliados são o de uso com as substituições (módulo B4) e o fim de vida (módulos C1, C2 e C4). Por conta do estudo de caso consistir em uma edificação existente com a decorrência do período de vida útil, não são consideradas os estágios de produto

e construção. No âmbito do período de uso da edificação, que abrange os estágios de uso (B1), manutenção (B2), reparos (B3), substituições (B4), reformas (B5), consumo de energia (B6) e de água operacional (B7) – apenas o módulo B4 que possibilita a aplicação de dados sistemáticos, já que as incertezas da previsão de manutenção e a inexistência de informações fidedignas impossibilitam a incorporação dos outros módulos nesta pesquisa. Os estágios de fim de vida (C1, C2, C4) são estipulados para o descarte dos resíduos produzidos na fase de substituição – não contabilizando o processamento dos resíduos (C3), por não ser comumente avaliado na literatura e não possuir dados representativos para o setor nacional. O estágio de benefícios além do CV (D), não é considerado pela inaplicabilidade no cenário atual das instituições públicas. A Figura 14 demonstra de forma visual a definição dos estágios.

Figura 14 – Definição dos estágios de avaliação do estudo de caso



Nota: Em destaque com hachura estão os estágios do estudo.

Fonte: adaptado de (BS EN 16627, 2015).

Partindo da definição dos estágios avaliados no estudo (Figura 14), o limite para substituição (módulo B4) inclui os impactos causados por: produção da parte reparada de componentes e produtos auxiliares; transporte dos mesmos, incluindo impactos na produção e aspectos de eventuais perdas de materiais durante o transporte; processo de substituição dos componentes; gestão de resíduos do componente removido; e por fim, fase de fim de vida do componente removido e dos produtos auxiliares (BS EN 15978, 2011).

Para os módulos de fim de vida são considerados: (C1) desconstrução, incluindo desmantelamento ou demolição, do edifício, incluindo triagem inicial no local dos materiais; (C2) transporte dos materiais descartados como parte do processamento de resíduos, por exemplo, para um local de reciclagem e transporte de resíduos, por exemplo, para a disposição

final; e (C4) gestão de resíduos, incluindo pré-tratamento físico e operação do local de eliminação (BS EN 15978, 2011).

Os quantitativos da edificação são definidos a partir do projeto padrão do Estudo de caso, das planilhas orçamentárias e especificações verificadas *in loco*. Com enfoque na manutenção, a primeira retirada de materiais para a substituição retrata os materiais utilizados na E.M.E.F. Florencia Vurlod Socias, após são previstas substituições completas do mesmo material – o número de trocas por período é tratado no Inventário do Ciclo de Vida – LCI (item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Outros fatores de influência para a aplicação de critérios de corte são: a grande quantidade de sistemas/materiais/insumos utilizados na edificação e a limitação de processos correspondentes na base de dados. Não são contabilizados os serviços provisórios de obra e/ou do entorno da edificação no estágio de substituição, como tapumes, alojamentos, guaritas, postes, equipe técnica, cercamento e paisagismo.

O período de referência do estudo é de 30 anos, definido a partir de normativas e trabalhos antecedentes (Gustafsson et al., 2017; Saadatian et al., 2021), visto que o estudo de caso é de uma edificação existente.

A normativa europeia estabelece a possibilidade de utilização de critérios de exclusão de entradas e saídas de dados em um processo unitário para o menor elemento da análise de inventário dentro do quantitativo da edificação, também determina que a aplicação desses critérios deve ser documentada. No caso, os critérios de corte são de 1% do uso de energia primária ou da entrada em massa total do processo unitário e de no máximo 5% do consumo de energia e da massa para os fluxos de entrada negligenciados por módulo (BS EN 15804, 2019).

A modelagem total é de 16 processos, atendendo a seleção de alternativas para os três sistemas da edificação (revestimento de pisos, janelas e pinturas internas) – são contabilizados os materiais e as adições necessárias: argamassa de contrapiso para preparo da base dos pisos, tinta para pintura das janelas de madeira, vidros para as janelas e transporte. O detalhamento dos processos, quantitativos e materiais utilizados são discutidos no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A Tabela 14 expressa as definições dos aspectos do escopo LCA: objetivo, caracterização do estudo de caso, unidade funcional, sistemas selecionados, escopo (fronteira do sistema), limite

geográfico, período de referência, base de dados de inventário, *software*, metodologia de categorias de impacto e indicadores.

Tabela 14 – Aspectos do objetivo e escopo da avaliação ambiental (LCA)

Aspecto	Descrição
Objetivo	Avaliar os impactos ambientais de três sistemas construtivos selecionados do estudo de caso
Caracterização do estudo de caso	Edificação pública educacional
Unidade funcional	Edificação completa com áreas de: 586,93 m ² (pisos), 114,08 m ² (janelas) e 1.932,77 m ² (pinturas internas)
Sistemas selecionados	Revestimento de pisos (cerâmico, madeira, vinílico) Janelas (metálica, madeira, PVC) Pintura de paredes (acrílica, PVA)
Escopo (fronteira do sistema)	Estágio de substituição (B4); estágio de fim da vida (C1, C2 e C4)
Limite geográfico	Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
Período de referência	30 anos
Base de dados de inventário	<i>Ecoinvent</i> versão 3.6 / <i>EPD System</i>
<i>Software</i> LCA	<i>OpenLCA</i> versão 1.11.0
Metodologia de caracterização de impacto LCA	<i>EPD 2013</i>
Categorias de impacto selecionadas	Depleção Abiótica, não fósseis (ADP-N); Depleção abiótica, combustíveis fósseis (ADP-F); Acidificação (AP); Potencial de eutrofização (EP); Aquecimento global (GWP); Depleção da camada de ozônio (ODP); Oxidação fotoquímica (PO-NOX)

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A definição de duas opções de base de dados de inventário (*Ecoinvent* versão 3.6 e *EPD System*) é feita pela disponibilidade de elementos construtivos compatíveis com as alternativas da edificação. A metodologia de categorias de impacto LCA (*EPD 2013*) é a utilizada pelas alternativas retiradas da *EPD System*, dessa forma, as alternativas da *Ecoinvent* são calculadas pela mesma metodologia com a delimitação de sete indicadores de impactos ambientais.

O Inventário do Ciclo de Vida (LCI - item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) é baseado em dados de projeto e acesso a informações das vistorias *in loco*. A modelagem LCA é realizada no *software OpenLCA* versão 1.11.0, os processos são selecionados preferencialmente na base de dados *Ecoinvent versão 3.6* (disponível no *software OpenLCA* versão 1.11.0) do tipo *Rest of the World* (RoW), nos casos de elementos indisponíveis, são utilizados processos retirados do *EPD System*. Para o transporte, é considerado o processo da base de dados *Ecoinvent* versão 3.6. O modelo de sistema é por alocação com corte por classificação (*Allocation, cut-off by classification*).

O período de vida útil de referência é 30 anos para a edificação completa, nesse intervalo de tempo são consideradas substituições integrais dos componentes dos sistemas construtivos ao final da sua vida útil – prevista por definições técnicas normativas e dos fabricantes. As definições sobre vida útil dos sistemas e a estimativa da reposição ao término do período são fontes de incertezas que influenciam significativamente na avaliação de desempenho ambiental, reafirmando a importância de utilizar dados representativos e próximos da realidade. A vida útil de serviço determinada para as alternativas dos três sistemas é apresentada no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Na Tabela 15 consta a quantidade total em área construída e massa total das alternativas, em que os diferentes materiais estão englobados em cada alternativa. A massa (kg) das alternativas é calculada a partir da densidade (kg/m²) de cada material. No **Erro! Fonte de referência não encontrada.** consta o detalhamento de todo o inventário/quantitativo da edificação.

Tabela 15 – Quantitativos de área e de massa para alternativas de sistemas construtivos

Sistemas		Materiais construtivos		Quantidade (m ²)	Massa (kg)
Revestimentos de pisos	FL-W	Piso de madeira	Madeira	586,93	4959,56
	FL-C	Piso cerâmico	Contrapiso	586,93	5141,51
			Cerâmica	586,93	10676,26
FL-V	Piso vinílico	Vinílico	586,93	2329,47	
Janelas	FR-M	Janelas metálicas	Vidros	16,07	50,18
			Caixilhos metálicos	98,73	849,06
	FR-W	Janelas de madeira	Vidros	16,07	94,50
			Caixilhos de madeira	98,73	849,06
			Pintura de madeira	16,07	2,82
	FR-P	Janelas de PVC	Vidros	16,07	56,25
Caixilhos de PVC			98,73	849,06	
Pinturas internas	PA-A	Pintura acrílica	Tinta	1.932,77	769,46
	PA-PVA	Pintura PVA	Tinta	1.932,77	792,77

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Em alguns casos há adaptação de dados dos sistemas conforme as unidades de medida dos processos correspondentes da base de dados. No caso dos revestimentos de pisos, são desconsideradas as áreas do terreno sem pisos, os pisos externos e as áreas molháveis (como cozinhas, refeitórios e sanitários) que devem receber pisos cerâmicos por motivos técnicos. Para a remoção são contabilizados os diferentes tipos de pisos verificados na vistoria, são eles: granitina (119,76 m²), cerâmico (37,06 m²); vinílico (302,44 m²) e tacos de madeira (127,67 m²) – totalizando a área de 586,93 m² que estimada em substituições. A argamassa dos pisos que previamente é cotada em volume (em m³) é transformada em área (em m²), mantendo a

mesma espessura – aparece como “contrapiso” na alternativa de piso cerâmico (FL-C) e piso vinílico (FL-V) por ser necessária uma nova camada a cada substituição.

No sistema de janelas, a edificação possui oito tipos de janelas metálicas com diferentes dimensões, contabilizando 110 unidades com área total de 114,80 m². Para simplificação do cálculo são consideradas janelas padrão (a maioria com 23 janelas na edificação) do tipo “J200” nas dimensões de 2,00x1,40 m (comprimento e altura) e 2,80 m² de área de vão – 0,39 m² em caixilhos de 0,02 m de espessura e 2,41 m² em vidros. Assim, os quantitativos totais são de 16,07 m² e caixilhos e 98,73 m² de vidros. Como expresso na Tabela 15, a alternativa de janelas de madeira (FR-W) recebe pintura de caixilhos periodicamente.

No caso do sistema de pinturas internas, são descontados os valores de: áreas molháveis internas com revestimento de paredes em cerâmica, áreas externas com revestimento em alvenaria aparente e pintura, e também áreas de esquadrias com dimensão unitária maior que 2 m². Assim, é contabilizada a pintura das paredes internas (920,40 m²) e dos forros internos (1012,37 m²) – totalizando uma área de 1.932,77 m² para recebimento de pinturas internas.

As distâncias de transporte de materiais (Tabela 16) e de resíduos (Tabela 17) para cada sistema são apresentadas na sequência.

Tabela 16 – Distâncias de transporte de materiais para módulo B4 (substituições)

Sistema	Transporte para Substituições (B4)			Unidade
	Local	Vetor	Distância	
Piso de madeira	Novo Hamburgo/RS	Rodoviário	68	km
Piso cerâmico	Tijucas/SC	Rodoviário	496	km
Piso vinílico	Jacareí/SP	Rodoviário	1223	km
Argamassa de contrapiso	Canoas/RS	Rodoviário	33	km
Janelas metálicas	Viamão/RS	Rodoviário	17	km
Janelas de madeira	Viamão/RS	Rodoviário	17	km
Pintura de janelas de madeira	Bom Sucesso/RS	Rodoviário	38	km
Janelas de PVC	Viamão/RS	Rodoviário	17	km
Vidro de janelas	Camaquã/RS	Rodoviário	150	km
Tinta acrílica	Bom Sucesso/RS	Rodoviário	38	km
Tinta PVA	Bom Sucesso/RS	Rodoviário	38	km

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A distância de transporte de materiais (Tabela 16) é definida a partir de levantamento das distâncias de transporte rodoviário de potenciais indústrias e fornecedores próximos ao canteiro de obras, localizado em Porto Alegre/RS. A busca pelos fornecedores é realizada pela disponibilidade na internet. As distâncias variam conforme a disponibilidade de materiais na

região, existem casos próximos, como as janelas de PVC (FR-PVC) diretamente de Viamão/RS (17 km); e distantes, como o piso vinílico (FL-V) fabricados em Jacareí/SP (1.223 km).

Tabela 17 – Distâncias de transporte de resíduos para o módulo C2 (transporte de fim de vida)

Sistema	Transporte para destinação (C2)				
	Tipo de destinação	Local	Vetor	Distância	Unidade
Piso de madeira	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Piso cerâmico - Cerâmica	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Piso cerâmico - Argamassa	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Piso vinílico	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Janelas metálicas	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Janelas de madeira	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Pintura de janelas de madeira	Centro de reciclagem	Porto Alegre/RS	Rodoviário	10	km
Janelas de PVC	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Vidro de janelas	Aterro sanitário	Minas do Leão/RS	Rodoviário	113	km
Tinta acrílica	Centro de reciclagem	Porto Alegre/RS	Rodoviário	10	km
Tinta PVA	Centro de reciclagem	Porto Alegre/RS	Rodoviário	10	km

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A distância de transporte dos resíduos (Tabela 17) no fim de vida (estágio de demolição, módulo C2) segue procedimentos para a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (ABNT NBR 10004, 2004). A destinação final definida para os resíduos é o aterro sanitário em Minas de Leão/RS (113 km) no caso de materiais de construção em geral, levando em conta um cenário conservador e alinhado à realidade atual do município. O centro de reciclagem em Porto Alegre/RS (10 km) é o destino de resíduos perigosos, contendo substâncias químicas que apresentam riscos à saúde e ao meio ambiente, como as latas de tintas.

Por fim, a destinação final dos resíduos depende da sua classificação, as massas totais de resíduos dispostos consideram as reposições dos sistemas construtivos e a demolição da edificação no fim de vida. Dentro dos parâmetros de sustentabilidade, que define metas para redução, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos de forma ambientalmente adequada, as limitações do contexto brasileiro encaminham para a disposição majoritária em aterros sanitários – tal alternativa representa a pior situação ambiental gerando aumento de impactos totais (M. Morales et al., 2019).

A metodologia de categorias de impacto engloba sete indicadores ambientais: Depleção Abiótica, não fósseis (ADP-N); Depleção abiótica, combustíveis fósseis (ADP-F); Acidificação (AP); Potencial de eutrofização (EP); Aquecimento global (GWP); Depleção da camada de ozônio (ODP); Oxidação fotoquímica (PO-NOX) – segundo a normativa (BS EN 15804, 2019). Tais categorias são definidas de acordo com a base de dados *EPD System*, a qual é utilizada para quatro dos 16 processos, assim, ocorre a adequação das informações do *OpenLCA* versão 1.11.0 com a metodologia *EPD 2013*, também com sete categorias de impacto.

O cálculo dos impactos ambientais é realizado por meio do *software OpenLCA* versão 1.11.0, considerando a criação de processos similares com as composições utilizadas na avaliação econômica (LCC), discutida posteriormente. Nos casos com dados indisponíveis, opta-se pela plataforma *EPD System* – sendo eles: piso de madeira (FL-W), piso vinílico (FL-V), pintura acrílica (PA-A) e pintura PVA (PA-PVA).

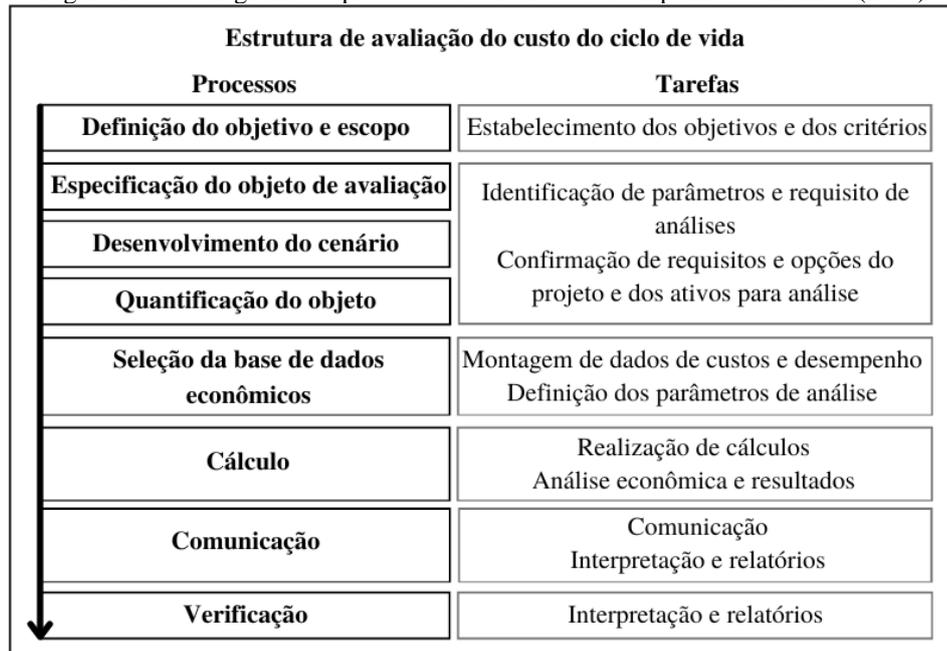
Os resultados são exportados e tratados em planilhas eletrônicas do *Microsoft Office Excel*, com uma análise comparativa de contribuição sobre os sistemas, atendendo à verificação dos impactos entre: estágios do ciclo de vida, sistemas construtivos e tipos de materiais das alternativas – buscando definir os principais elementos de influência para a definição de cenários mais sustentáveis. Tais análises estão discutidas no Capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** do trabalho.

As incertezas relativas ao tipo de material e à previsão da vida útil de serviço apresentam reconhecida relevância nos estudos de avaliação de impactos, por esse motivo é realizada uma análise de sensibilidade com variações de diferentes fatores.

3.2.3 Custo do Ciclo de Vida (LCC)

Os aspectos da avaliação do ciclo de vida (LCC) engloba os processos expressos na Figura 15, os quais são descritos nas seguintes etapas: definição do objetivo e escopo, seleção da base de dados econômicos e método de cálculo econômico.

Figura 15 – Fluxograma do processo de cálculo do desempenho econômico (LCC)



Fonte: adaptado de BS EN 16627 (2015)

O objetivo e escopo da LCC é avaliar os impactos econômicos de diferentes materiais de construção na fase de manutenção de uma edificação, atentado à vida útil e substituições. Para a avaliação e comparação de cada alternativa são apreciados os seguintes custos: custos iniciais de compra e instalação, custos de reposição de cada material de construção, custos de demolição e custos de transporte para sua disposição final.

As composições de cada alternativa atendem aos quatro estágios de construção do estudo: estágio de substituição (B4) e estágios de fim de vida (C1, C2 e C4), de acordo com a norma europeia (BS EN 16627, 2015) sobre Custo do Ciclo de Vida (LCC).

O módulo B4 para substituição em um edifício deve incluir os custos de: componente de substituição e produtos auxiliares, processo de remoção do componente substituído e instalação dos novos componentes, além da gestão de resíduos dos componentes do edifício substituídos durante a reforma (BS EN 16627, 2015).

O módulo C1 de desconstrução inclui operações no local e/ou obras temporárias localizadas fora do local, conforme os processos de desconstrução, desmantelamento e/ou demolição. O módulo C2 de transporte inclui os custos para descarte e/ou até que o estado final de resíduo seja alcançado, podendo contabilizar o transporte para locais de armazenamento/processamento intermediários. O módulo C4 quantifica os custos decorrentes da disposição final dos materiais,

incluindo neutralização, incineração ou aterro – sendo considerados parte do ciclo de vida do edifício, de acordo com o princípio do “poluidor-pagador” (BS EN 16627, 2015).

A Tabela 18 expressa resumidamente os aspectos do escopo da avaliação. O detalhamento das composições selecionadas para cada sistema é discutido no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 18 – Aspectos do objetivo e escopo da avaliação econômica (LCC)

Aspecto	Descrição
Objetivo da análise	Comparação de alternativas/opções
Base de dados de inventário	SINAPI (fevereiro de 2023) / SBC (março de 2023)
Software	Planilhas do <i>Microsoft Office Excel</i>
Indicadores	Valor Presente (PV)
	Custos iniciais de compra e instalação, custos de reposição de cada material de construção, custos de demolição e custos de transporte para sua disposição final

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os aspectos do LCC (Tabela 18) dão continuidade aos aspectos do LCA (Tabela 14), onde as mesmas informações são utilizadas para os itens: objetivo, caracterização do estudo, unidade funcional, sistemas selecionados, fronteira do sistema, limite geográfico e período de referência – sendo que o estudo busca integrar os resultados encontrados em ambas avaliações. No caso do LCC, a base de dados do inventário considera o SINAPI (Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil) e o SBC (Informativo SBC) com auxílio do *software Microsoft Office Excel*, utilizando indicadores para o cálculo do Valor Presente (PV).

Os custos são obtidos nas bases de dados SINAPI (CAIXA, 2023) e SBC, comumente utilizadas para orçamentação de obras, ambas possuem dados regionalizados que refletem o contexto de Porto Alegre/RS. No caso do SINAPI, os dados são do estado do Rio Grande do Sul, já no SBC são específicos de Porto Alegre/RS. A Tabela 19 expressa informações sobre as bases de dados.

Tabela 19 – Informações sobre as bases de dados econômicos (SINAPI e SBC)

Base de dados	SINAPI	SBC
Nomenclatura	Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil	Informativo SBC
Referência	Caixa Econômica Federal	STABILE – SBC Sistemas e Consultoria de Custos
Descrição	Base de referências para orçamentos da construção civil com produção periódica e de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em parceria com a Caixa Econômica	Base de dados da construção civil com o maior número de composições, utilizada em várias instituições públicas
Abrangência geográfica	Nacional	30 cidades brasileiras, dentre elas, Porto Alegre/RS

Abrangência setorial	Insumos, equipamentos, serviços e mão-de-obra	Insumos, equipamentos, serviços e mão-de-obra
Periodicidade	Mensal	Mensal
Especificidade	Estadual	Municipal

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os custos unitários informados pelas bases de dados levam à adição da taxa percentual relacionada a Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) no valor de 22,67%. O BDI inclui os custos indiretos que não são incorporados diretamente no produto final, mas fazem parte do custo total, como impostos, juros, lucros, etc.

A metodologia de categorias de impacto econômico utilizadas são o Custo Inicial (IC, do inglês *Initial Costs*) e o Valor Presente (PV, do inglês *Present Value*), considerando os custos iniciais de compra e instalação, custos de reposição de cada material de construção, custos de demolição e custos de transporte para sua disposição final. O cálculo e os resultados dos impactos econômicos são realizados por meio de planilhas eletrônicas do *Microsoft Office Excel*.

O Valor Presente considera o valor atual de pagamentos atuais e futuros, descontando destes pagamentos os efeitos que o modificam ao longo do tempo, como a taxa de juros. No trabalho, as variações nos custos dos insumos ao longo do tempo são condicionadas pela aplicação de índices nacionais, INCC-M para projetar valores futuros e SELIC para retornar aos valores presentes. A Tabela 20 apresenta informações sobre os índices de custos.

Tabela 20 – Informações sobre os índices de custos econômicos (INCC-M e SELIC)

Índices de custos	INCC-M	SELIC
Nomenclatura	Índice Nacional de Custo da Construção	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
Referência	Fundação Getúlio Vargas - Instituto Brasileiro de Economia (FGV - IBRE)	Banco Central do Brasil (BCB)
Descrição	Indicador de preços para materiais, serviços e mão-de-obra destinados a construção de residências no Brasil	Taxa básica de juros da economia monetária nacional com influência sobre empréstimos, financiamentos e aplicações financeiras
Abrangência geográfica	Belo Horizonte, Brasília, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, São Paulo e Salvador	Brasil
Abrangência setorial	Materiais, equipamentos e serviços e mão-de-obra	Economia
Periodicidade	Mensal	Mensal

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O histórico dos índices de custos apresenta oscilação considerável ao longo dos anos. A Tabela 21 e a Figura 16 demonstram parte dessa oscilação em uma análise de sensibilidade entre a combinação de valores médios, mínimos e máximos dos índices INCC-M e SELIC. Uma

análise mais aprofundada é realizada no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com a verificação da influência na variação dos índices econômicos nos custos LCC.

A Tabela 21 é estruturada pelos dados históricos entre 2003-2022 dos índices de custos brasileiros INCC-M (calculado desde 1989 em valores acumulados anuais) e SELIC (calculado desde 1996 em valores por períodos mensais variáveis). A análise de sensibilidade auxilia na visualização das diferenças entre os índices e na seleção do cenário apropriado para o trabalho. O cenário 10 (linha em destaque cinza) é selecionado por ser representativo entre os cenários.

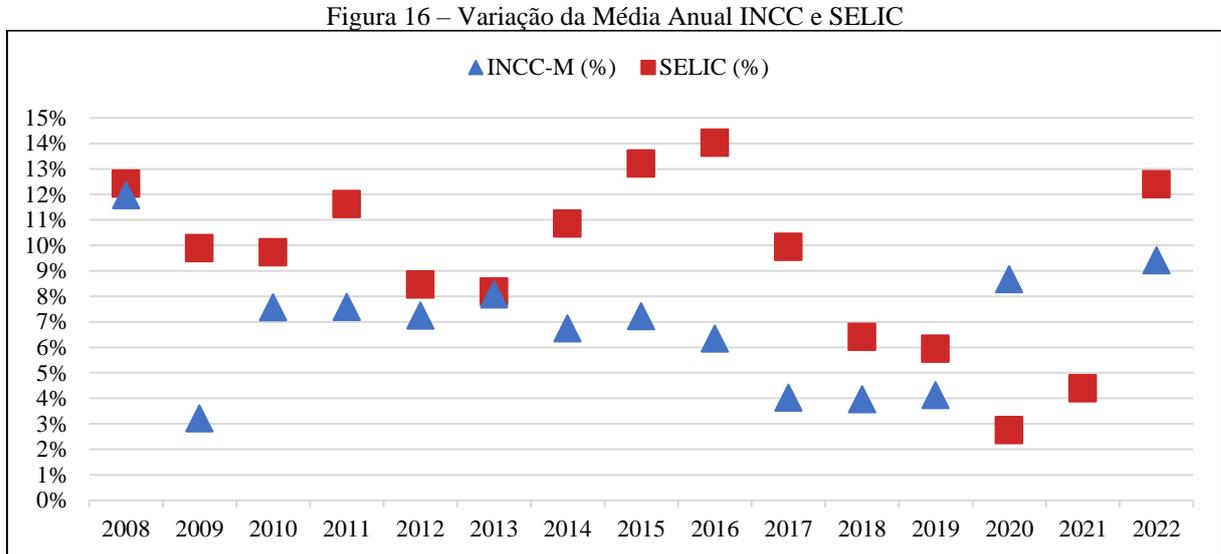
As taxas de juros aplicadas no estudo são variáveis conforme a referência dos índices, ambos representando a média de 15 anos da taxa básica de juros. A taxa de inflação (INCC-M) utilizada neste estudo é de 7,35% ao ano. A taxa de desconto (SELIC) utilizada é de 9,52%. A Figura 16 demonstra a variação da INCC-M (valor anual acumulado) e da SELIC (média de valores mensais) ao longo de 15 anos, a partir dos dados discretos disponíveis nas páginas referenciais de cada taxa (BCB, 2023; FGV, 2023).

Tabela 21 – Análise de sensibilidade entre combinações de índices de custos (INCC-M e SELIC)

Análise	Intervalo de tempo		Peso de índices		Índices (%)		Diferença (%)
	Período	Anos	INCC	SELIC	INCC	SELIC	
1	10 anos	2013-2022	Média	Média	7,26%	9,02%	-1,75%
2	10 anos	2013-2022	Média	Mínima	7,26%	2,00%	5,26%
3	10 anos	2013-2022	Média	Máxima	7,26%	14,25%	-6,99%
4	10 anos	2013-2022	Mínima	Média	3,96%	9,02%	-5,06%
5	10 anos	2013-2022	Mínima	Mínima	3,96%	2,00%	1,96%
6	10 anos	2013-2022	Mínima	Máxima	3,96%	14,25%	-10,29%
7	10 anos	2013-2022	Máxima	Média	14,03%	9,02%	5,01%
8	10 anos	2013-2022	Máxima	Mínima	14,03%	2,00%	12,03%
9	10 anos	2013-2022	Máxima	Máxima	14,03%	14,25%	-0,22%
10	15 anos	2008-2022	Média	Média	7,35%	9,52%	-2,18%
11	15 anos	2008-2022	Média	Mínima	7,35%	2,00%	5,35%
12	15 anos	2008-2022	Média	Máxima	7,35%	14,25%	-6,90%
13	15 anos	2008-2022	Mínima	Média	3,21%	9,52%	-6,31%
14	15 anos	2008-2022	Mínima	Mínima	3,21%	2,00%	1,21%
15	15 anos	2008-2022	Mínima	Máxima	3,21%	14,25%	-11,04%
16	15 anos	2008-2022	Máxima	Média	14,03%	9,52%	4,51%
17	15 anos	2008-2022	Máxima	Mínima	14,03%	2,00%	12,03%
18	15 anos	2008-2022	Máxima	Máxima	14,03%	14,25%	-0,22%
19	20 anos	2003-2022	Média	Média	7,69%	11,58%	-3,89%
20	20 anos	2003-2022	Média	Mínima	7,69%	2,00%	5,69%
21	20 anos	2003-2022	Média	Máxima	7,69%	26,50%	-18,81%
22	20 anos	2003-2022	Mínima	Média	3,21%	11,58%	-8,37%
23	20 anos	2003-2022	Mínima	Mínima	3,21%	2,00%	1,21%
24	20 anos	2003-2022	Mínima	Máxima	3,21%	26,50%	-23,29%
25	20 anos	2003-2022	Máxima	Média	14,75%	11,58%	3,17%
26	20 anos	2003-2022	Máxima	Mínima	14,75%	2,00%	12,75%
27	20 anos	2003-2022	Máxima	Máxima	14,75%	26,50%	-11,75%

Nota: Em destaque cinza estão os cenários selecionados para análises do cenário base, cenário INCC máximo e cenário SELIC máxima. Em vermelho estão os valores negativos da diferença entre INCC e SELIC.

Fonte: elaborado pela autora (2023).



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Na Figura 16, ambas as taxas apresentam oscilações significativas, sendo a SELIC geralmente superior ao INCC-M. Durante o período da pandemia (2020-2022), o INCC-M apresenta uma elevação que supera a taxa SELIC. Tal situação sinaliza o aumento experimentado nos custos de materiais de construção, mão de obra, entre outros – além da ocorrência de falta de insumos pelo fechamento e/ou atrasos em indústrias. Ou seja, quando ocorre o crescimento da demanda (procura) e a oferta não acompanha, os preços e as taxas tendem a subir.

O cálculo dos custos é realizado com equações adaptadas da norma europeia BS EN 16627 (2015). A Equação 1 dos Custos futuros (C_t) serve para o cálculo de uma das variáveis da Equação 2 do Valor Presente (PV) do custo do ciclo de vida – expressas na sequência.

$$C_t = C_i \times (1 + INCC)^t \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: C_t são os custos futuros no período t ; C_i são os custos iniciais do presente; INCC é a taxa de rentabilidade futura; t é o número de anos.

$$PV = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+SELIC)^t} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: PV é o valor presente do custo do ciclo de vida; C_t são os custos futuros no período t ; N é o período de referência; SELIC é a taxa de desconto do presente; t é o número de anos.

O Valor Presente (PV) é uma medida padrão nas análises de LCC, usada para determinar e comparar o custo-benefício das alternativas – sendo a soma dos fluxos de caixa futuros descontados, tanto custos quanto benefícios/receitas. Os valores a serem incluídos em cada análise são definidos de acordo com seus objetivos (BS EN 16627, 2015). Os índices de custos servem para incluir a influência do tempo nas análises econômicas, variando conforme a nacionalidade, o mercado e o período de referência – no caso deste estudo, de 30 anos. Os custos englobados no cálculo do PV são divididos em: (i) custos recorrentes, que são as substituições dos sistemas repetidas ao longo do período; e (ii) custos não recorrentes, como a primeira demolição do sistema existente, a substituição inicial (por conter composições específicas, como por exemplo, o nivelamento do piso) e a demolição final. Para cada custo é definido o ano de ocorrência – a partir da primeira demolição (ano “zero”) até o ano 30, diretamente ligado aos cálculos, representado por “t” como número de anos.

Os resultados derivam da contribuição entre: estágios do ciclo de vida, sistemas construtivos e tipos de materiais das alternativas. Tais análises estão discutidas no Capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** do trabalho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sustentabilidade de edificações ainda é um tema pouco discutido no setor da construção civil, as legislações existentes e a cultura financeira consideram um enfoque econômico e imediato na escolha de sistemas construtivos – muitas vezes, omitindo os fatores ambientais e o ciclo de vida do ambiente construído. Outro ponto é a ausência de planejamento de manutenções preventivas periódicas para edifícios, o que acarreta limitações técnicas e problemas funcionais durante o uso pelos ocupantes, além de promover a deterioração dos sistemas e o aumento dos custos em reformas globais.

Nesse contexto, a presente pesquisa tem o objetivo de propor um método para avaliação ambiental e econômica integrada de três sistemas construtivos (revestimentos de pisos, janelas e pinturas internas) com aplicação em uma edificação representativa do tipo educacional pública, localizada em Porto Alegre/RS. O método busca subsidiar a tomada de decisão

referente à seleção de sistemas construtivos na fase de manutenção de edificações e servir de referência para discussões e avanços sobre o assunto em âmbito nacional e internacional.

No processo de projeto são feitas suposições pelos projetistas/construtores sobre o estado, a durabilidade e o desempenho dos sistemas construtivos, entretanto, raramente essas previsões são monitoradas e reavaliadas quanto à qualidade, funcionalidade e satisfação dos ocupantes durante o estágio de uso e operação da edificação. Estudos direcionados para o estágio de manutenção buscam melhorar as condições de conforto dos ocupantes, o desempenho da edificação e a otimização dos processos de preservação.

Na pesquisa são avaliados os impactos ambientais (pela ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida – LCA) e econômicos (pela ferramenta de Custo do Ciclo de Vida – LCC) de oito alternativas de construção durante um período de 30 anos, atendendo as substituições necessárias para cada um dos sistemas e assumindo a demolição definitiva no final deste período. Os resultados demonstram disparidades entre os indicadores ambientais e econômicos para as diferentes alternativas de revestimentos de pisos, janelas e pinturas internas.

Entre as alternativas analisadas, as ambientalmente corretas com base nos menores impactos ambientais são o piso de madeira (FL-W), as janelas de madeira (FR-W) e a pintura acrílica (PA-A). Na perspectiva econômica, os menores custos são dos pisos cerâmicos (FL-C) e de madeira (FL-W), das janelas metálicas (FR-M) e da pintura acrílica (PA-A). Nota-se que os sistemas de pisos e pinturas internas obtêm resultados convergentes para a sustentabilidade na redução de impactos ambientais e de custos. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** oferece cenários com combinações entre sistemas de pisos, janelas e pinturas – a qual pode servir como orientação para a seleção de materiais e a tomada de decisão de profissionais da construção civil.

Em relação aos revestimentos de pisos, o emprego do piso de madeira (FL-W) surge como uma boa opção, pois proporciona os melhores resultados ambientais e menores custos. O piso cerâmico (FL-C) atinge um custo muito próximo da opção mais econômica, todavia, maiores impactos ambientais, já o piso vinílico (FL-V) apresenta os maiores custos econômicos. Para o sistema de janelas, a escolha das opções torna-se mais complexa e depende das prioridades dos decisores, sejam ambientais ou econômicas. As janelas de madeira (FL-W) geram os menores impactos ambientais, entretanto os maiores custos, as janelas metálicas (FL-M) obtêm resultados opostos com a pior classificação ambiental e a melhor econômica. Já as janelas de

PVC estão na média em ambas análises. O sistema de pinturas internas apresenta resultados concordantes para as alternativas, com a mesma ordem de prioridade ambiental e econômica: pintura acrílica (PA-A) e pintura PVA (PA-PVA).

A primeira análise de sensibilidade é realizada para examinar a influência dos períodos de vida útil para os sistemas de pisos, janelas e pinturas nos cenários de estimativa própria (conforme dados de manutenções, EPDs e fabricantes) e da NBR 15575-1 (2021). Os resultados demonstram que o número de substituições das alternativas ao longo dos 30 anos é relevante ao ponto de priorizar o uso de dados mais próximos da realidade. A segunda análise de sensibilidade comparativa entre tipos de pisos vinílicos (colado ou encaixado) apresenta as maiores discrepâncias pela necessidade de substituição periódica do contrapiso no caso do piso vinílico do tipo colado – contudo os impactos ambientais e econômicos não apresentam diferenças significativas. Por último, a terceira análise de sensibilidade relativa à diversificação dos índices econômicos INCC e SELIC aplicados no cálculo PV LCC obtém resultados satisfatórios ao averiguar a variação entre os custos de alternativas para os diferentes cenários.

Existem desafios na conciliação de composições ambientais e econômicas de elementos construtivos, sendo que as informações são originadas em bancos de dados diferentes. Outro obstáculo encontrado é a escassez de dados ambientais locais, com disponibilidade limitada tanto em processos da *Ecoinvent* quanto em Declarações Ambientais de Produtos (EPDs). Entre as possíveis soluções estão: a compilação de processos regionais e dados sobre produtos conforme seus fabricantes; e a criação de uma base de dados específica para o estágio de manutenção, com o objetivo de auxiliar na elaboração de diretrizes e recomendações precisas para profissionais envolvidos nas decisões construtivas. A concepção de resultados precisos e claros deve englobar todos os estágios do ciclo de vida das edificações, onde são cruciais o acompanhamento dos prazos prescritos pelo Manual de uso, operação e manutenção predial e o monitoramento do histórico de manutenções.

Em conclusão, o desenvolvimento do método para integração de LCA-LCC é um procedimento complexo e múltiplo, aportado pela otimização das análises e pela interdependência de uma grande variedade de fatores. Tal estudo é relevante para estabelecer critérios de avaliação ambiental e econômica em edificações, principalmente para seleção e preferência por determinados materiais. Vale destacar que os resultados encontrados são exclusivos para o estudo de caso avaliado, os processos ambientais, as composições econômicas e demais

especificações do escopo da avaliação de impactos – assim, caso o método seja replicado em outros contextos, os parâmetros devem influenciar os resultados e as tendências.

O estudo obtém resultados promissores e inéditos relativos ao aprofundamento da literatura sobre a integração de avaliações sustentáveis em edificações no Brasil, nessa perspectiva, oito alternativas construtivas usualmente aplicadas em construções nacionais tem seus aspectos ambientais e econômicos avaliados – esses dados podem servir como base para projetistas, engenheiros e profissionais do ramo da construção civil no âmbito público e privado, a depender do escopo, das diretrizes de projeto e/ou das estratégias administrativas.

A importância do ciclo de vida da edificação para análises ambientais e econômicas é outro tema amplamente discutido no estudo, trazendo novas possibilidades para a tomada de decisão por sistemas construtivos de durabilidade e qualidade. Na maioria das vezes, ao optar por materiais de construção de menor custo na fase de projeto acontece a sobrecarga de responsabilidades e custos para a administração local da edificação – que mesmo com orçamentos limitados deve assumir os impactos das manutenções e substituições de sistemas com desempenhos inadequados selecionados pela construtora/incorporadora da obra.

Outrossim, a elaboração de um método de aplicação da ferramenta de Custo do Ciclo de Vida (LCC) de sistemas construtivos no cenário nacional pode abrir espaço para o aumento de avaliações econômicas e o refinamento de pesquisas relativas aos impactos durante todo o ciclo de vida das construções. Atualmente, não existem normativas e legislações brasileiras para avaliação LCC, à medida que até a literatura sobre o tema é escassa nacionalmente, alguns procedimentos são delineados pelo estudo para transformação dessa conjuntura.

Além disso, o emprego de um estudo de caso com uma edificação educacional existente (E.M.E.I. Florencia Vurlod Socias) traz à tona problemáticas reais e preocupantes sobre o estado de conservação de edifícios públicos, os quais tem grande influência na qualidade de vida, segurança e conforto da população – nessa narrativa, o ensino infantil da cidade de Porto Alegre/RS. Mesmo que a Prefeitura Municipal de Porto Alegre/RS esteja promovendo contratações, levantamentos e ações em prol da manutenção desses prédios, ainda há um longo caminho para o enfrentamento do problema.

A influência no mercado promovida pelos contratos públicos sustentáveis tem o potencial de inspirar fornecedores, fabricantes, empresas privadas e consumidores a adotarem práticas de

produção e consumo mais sustentáveis. Ao passo que a sustentabilidade for incluída nos requisitos prioritários para tomada de decisões de instituições governamentais, há um futuro com escolhas conscientes e equilibradas que proporcionam melhor aproveitamento de sistemas construtivos, recursos ambientais e investimentos econômicos.

Por fim, para dar seguimento à pesquisa são elencados: (i) tendências de aplicação no setor público ou privado e (ii) sugestões para futuros trabalhos. Na sequência, algumas possibilidades a serem utilizadas para auxiliar a tomada de decisões da construção civil:

- Definição do tipo de alternativa ambientalmente correta, com menores impactos em categorias ambientais. Dentre a solução de materiais, encontrar composições de preços e/ou cotações de mercado com o menor custo;
- Possibilidades de consultorias com instituições universitárias especializadas em LCA-LCC, proporcionando a conexão profissional-acadêmica e o crescimento de ambos em prol de escolhas mais conscientes;
- Proposta de fundos públicos contínuos para atividades operacionais críticas como a manutenção da edificação – com o intuito de assegurar correções, reparos e substituições com otimização de equipes, serviços e principalmente de tempo;
- Visão macro dos sistemas construtivos e da vida útil das edificações – consideração de custos a longo prazo, englobando as fases de manutenção/reparação construtiva e destinação final dos resíduos. Lembrando que o material de menor custo hoje, pode não refletir a durabilidade e a qualidade esperadas no decorrer dos anos;
- As escolas e universidades podem desempenhar um papel importante na sensibilização e informação dos cidadãos usuários das edificações, assim o alcance da LCA-LCC por meio de conteúdos educacionais voltados para a conscientização da sustentabilidade.

Levando em conta a complexidade e a diversidade de parâmetros para a avaliação do ciclo de vida de edificações, em trabalhos futuros podem ser aprofundados/estudados os temas:

- Consolidação de uma base de dados sobre impactos ambientais de materiais da construção civil no contexto brasileiro, tendo como parâmetro a padronização de dados econômicos disponíveis na plataforma SINAPI, por exemplo;

- Coleta de dados de vida útil por meio de questionários ou histórico de manutenções de edificações específicas, para definição das substituições de cada sistema;
- Elaboração de ferramentas de integração entre avaliações ambientais e econômicas com modelos automáticos e/ou computadorizados, para facilitar o acesso profissional na prática;
- Implementação de Análise de Decisão Multicritério (do inglês *Multiple Criteria Decision Analysis* – MCDA) e elaboração de um modelo de aplicação para alocação de recursos e definição de prioridades entre os indicadores ambientais e econômicos do ciclo de vida da edificação;

Entre outras oportunidades relacionadas ao tema desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5462. (2016). *ABNT NBR 5462 Confiabilidade e Manutenibilidade*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 5674. (2012). *ABNT NBR 5674 Manutenção de edificações*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 10004. (2004). *ABNT NBR 10004 Resíduos sólidos - Classificação*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. www.abnt.org.br
- ABNT NBR 14037-1. (2011). *ABNT NBR 14037-1 Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-1. (2021). *ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. www.abnt.org.br
- ABNT NBR 16280. (2020). *ABNT NBR 16280: Reforma em edificações - Sistema de gestão de reformas - Requisitos*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. www.abnt.org.br
- ABNT NBR ISO 14040. (2009). *ABNT NBR ISO 14040 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR ISO 14044. (2009). *ABNT NBR ISO 14044 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Acero, A. P., Rodríguez, C., & Changelog, A. C. (2015). *LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. http://www.openlca.org/files/openlca/Update_info_open
- Alshamrani, O. S. (2021). Integrated LCA-LCC assessment model of offsite, onsite, and conventional construction systems. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1942001>
- Alshamrani, O. S. (2022). Integrated LCA-LCC assessment model of offsite, onsite, and conventional construction systems. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(5), 2058–2080. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1942001>
- Alshamrani, O. S., & Alshibani, A. (2020). Automated decision support system for selecting the envelope and structural systems for educational facilities. *Building and Environment*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106993>
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 67, pp. 408–416). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Antipova, E., Boer, D., Guillén-Gosálbez, G., Cabeza, L. F., & Jiménez, L. (2014). Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings. *Energy and Buildings*, 82, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.001>
- Azevedo, G. A. N., Bastos, L. E. G., Rheingantz, P. A., Vasconcellos, V. M., & Aquino, L. M. L. (2004). *Ministério da Educação Secretaria de Educação Infantil e Fundamental Padrões de Infra-estrutura para as Instituições de Educação Infantil e Parâmetros de Qualidade para a Educação Infantil*.
- Bandeira, L. C. (2013). *CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE EM NOVAS EDIFICAÇÕES EMPRESARIAIS SUSTENTÁVEIS*.
- BCB, B. C. do B. (2023). *Cotação SELIC*.
- Beauchamp, J., Rizek Lopes, K., Cristina Chaves de Souza Ideli Ricchiero Magda Patrícia Müller Lopes Neidimar Cardoso Neves Roseana Pereira Mendes Stela Maris Lagos Oliveira, C., & Soares Luna, L. (2006). *Parâmetros Básicos de Infra-estrutura para Instituições de Educação Infantil, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, Brasil*.
- Brasil. (2023). *CENSO ESCOLAR DA EDUCAÇÃO BÁSICA 2022*.
- Bretas, E. (2010). *O PROCESSO DE PROJETOS DE EDIFICAÇÕES EM INSTITUIÇÕES PÚBLICAS: PROPOSTA DE UM MODELO SIMPLIFICADO DE COORDENAÇÃO*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- BS EN 15804. (2013). *Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to*.
- BS EN 15804. (2019). *Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to*.
- BS EN 15978. (2011). *BS EN 15978: Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings: Calculation method*. British Standards Institution - European Committee for Standardization.

- BS EN 16309. (2014). *BS EN 16309: Sustainability of construction works-Assessment of social performance of buildings-Calculation methodology*.
- BS EN 16627. (2015). *BS EN 16627: Sustainability of construction works: Assessment of economic performance of buildings: Calculation methods*. British Standards Institution - European Committee for Standardization.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 379–388). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- CAIXA, C. E. F. (2023). *SINAPI: METODOLOGIAS E CONCEITOS - SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL - 9ª EDIÇÃO*. <http://www.caixa.gov.br>
- Dejaco, M. C., Mazzucchelli, E. S., Pittau, F., Boninu, L., Röck, M., Moretti, N., & Passer, A. (2020). Combining LCA and LCC in the early-design stage: A preliminary study for residential buildings technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042004>
- Dickerson, D. E., & Professor, A. (2016). *environmental relative burden index: a streamlined life cycle assessment method for facilities pollution prevention*. http://meridian.allenpress.com/jgb/article-pdf/11/1/95/1769058/jgb_11_1_95_1.pdf
- Ferreira, J., Duarte Pinheiro, M., & De Brito, J. (2015). Economic and environmental savings of structural buildings refurbishment with demolition and reconstruction - A Portuguese benchmarking. *Journal of Building Engineering*, 3, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.07.001>
- FGV, F. G. V. (2023). *Cotação INCC-M*.
- Fouche, M., & Crawford, R. H. (2017). Towards an Integrated Approach for Evaluating both the Life Cycle Environmental and Financial Performance of a Building: A Review. *Procedia Engineering*, 180, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.171>
- Galimshina, A., Hollberg, A., Moustapha, M., Sudret, B., Favre, D., Padey, P., Lasvaux, S., & Habert, G. (2019). Probabilistic LCA and LCC to identify robust and reliable renovation strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012058>
- Gamarrá, A. R., Herrera, I., & Lechón, Y. (2019). Assessing sustainability performance in the educational sector. A high school case study. *Science of the Total Environment*, 692, 465–478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.264>
- Gamarrá, A. R., Istrate, I. R., Herrera, I., Lago, C., Lizana, J., & Lechón, Y. (2018). Energy and water consumption and carbon footprint of school buildings in hot climate conditions. Results from life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1326–1337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.153>
- Grant, A., & Ries, R. (2013). Impact of building service life models on life cycle assessment. *Building Research and Information*, 41(2), 168–186. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.730735>
- Guardigli, L., Ferrer, C., Peters, C., Fotopoulou, A., Bragadin, M. A., & Ferrante, A. (2019). Rehabilitation of public housing buildings in a life cycle perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012038>
- Gustafsson, M., Dipasquale, C., Poppi, S., Bellini, A., Fedrizzi, R., Bales, C., Ochs, F., Sié, M., & Holmberg, S. (2017). Economic and environmental analysis of energy renovation packages for European office buildings. *Energy and Buildings*, 148, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.079>
- Huang, L., Liu, Y., Krigsvoll, G., & Johansen, F. (2018). 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*, 173, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.021>
- INMETRO, I. N. de M. Q. e T. (2022). *PORTARIA Nº 309, DE 6 DE SETEMBRO DE 2022*.
- Islam, H., Bhuiyan, M., Tushar, Q., Navaratnam, S., & Zhang, G. (2022). Effect of Star Rating Improvement of Residential Buildings on Life Cycle Environmental Impacts and Costs. *Buildings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101605>
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Haque, N., & Bhuiyan, M. A. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implications for roofing and floor designs in residential buildings. *Energy and Buildings*, 104, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.017>
- Ito, K., & Murakami, S. (2010). Cost-effectiveness analysis of improved indoor temperature and ventilation conditions in school buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 9(2), 523–529. <https://doi.org/10.3130/jaabe.9.523>
- Kang, S., Kim, S., Kim, S., & Lee, D. (2020). System dynamics model for the improvement planning of school building conditions. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104235>
- Keles, C., & Yazicioglu, F. (2023). Analyzing the environmental sustainability of primary schools' facades within the scope of life cycle assessment in Turkey and recommendations for improvement. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(2), 298–324. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0072>

- Kim, J. M., Kim, T., Yu, Y. J., & Son, K. (2018). Development of a maintenance and repair cost estimation model for educational buildings using regression analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 17(2), 307–312. <https://doi.org/10.3130/jaabe.17.307>
- Kustiani, & Khidmat, R. P. (2021). Post-occupancy evaluation based on occupant behavior aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 780(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/780/1/012048>
- LEI N° 13.113, DE 25 DE MAIO DE 2022 (2022).
- Leroy Merlin. (2021). *Piso vinílico ou piso laminado?*
- Libraga, J. (2022). *Método para avaliação de impactos ambientais no processo de projeto de edifícios públicos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lützkendorf, T. (2019). Sustainability in Building Construction-A Multilevel Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012004>
- Małaszkiwicz, D., & Sztukowska, M. (2018). Utilization of wastes from medium density fiberboards production as an aggregate for lightweight cement composite. *MATEC Web of Conferences*, 174. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817402005>
- MARCH, S. T., & SMITH, G. F. (1995). *Design and natural science research on information technology* (4th ed., Vol. 15). Decision Support Systems .
- Marjaba, G. E., & Chidiac, S. E. (2016). Sustainability and resiliency metrics for buildings - Critical review. In *Building and Environment* (Vol. 101, pp. 116–125). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.002>
- Martins, A. M. T., Vieira, E., & Carlos, J. S. (2019). Survey on Post-Occupancy Evaluation of Vernacular Houses in Madeira (Portugal). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 362(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012086>
- Martins Vaz, I. C., Ghisi, E., & Thives, L. P. (2020). Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements. *Water Research*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115322>
- Minne, E., & Crittenden, J. C. (2015). Impact of maintenance on life cycle impact and cost assessment for residential flooring options. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 36–45. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0809-z>
- Mjörnell, K., Boss, A., Lindahl, M., & Molnar, S. (2014). A tool to evaluate different renovation alternatives with regard to sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 6(7), 4227–4245. <https://doi.org/10.3390/su6074227>
- Moraga, G. L. (2017). *Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida*.
- Morales, M. (2019). *Incertezas relacionadas à modelagem da previsão da vida útil em estudos de ACV de edificações*.
- Morales, M. F. D., Passuello, A., Kirchheim, A. P., & Ries, R. J. (2021). Monte Carlo parameters in modeling service life: Influence on life-cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103232>
- Morales, M. F. D., Reguly, N., Kirchheim, A. P., & Passuello, A. (2020). Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119649>
- Morales, M., Moraga, G., Kirchheim, A. P., & Passuello, A. (2019). Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117869>
- Nurdini, A., & Hadianto, N. F. (2018). Conformity of vertical public housing's performance with resilience agenda in Bandung metropolitan area. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 3(1), 53–63. <https://doi.org/10.17509/ijost.v3i1.10806>
- Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Science of the Total Environment*, 408(12), 2435–2443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021>
- Oyarzo, J., & Peuportier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 69, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>
- Pacheco Lacerda, D., Dresch, A., Proença, A., Valle, J. A., & Júnior, A. (2013). *Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção Design Science Research: a research method to production engineering*.
- Pombo, O., Rivela, B., & Neila, J. (2016). The challenge of sustainable building renovation: Assessment of current criteria and future outlook. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 123, pp. 88–100). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.137>

- Pulgrossi, L. M. (2020). Influência de regras de corte de inventário nos resultados de ACV de edificações. *PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção*, 11, e020026. <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8658259>
- Rezvani, S. M., de Almeida, N. M., Falcão, M. J., & Duarte, M. (2022). Enhancing urban resilience evaluation systems through automated rational and consistent decision-making simulations. *Sustainable Cities and Society*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103612>
- Rodrigues, C., Kirchain, R., Freire, F., & Gregory, J. (2018). Streamlined environmental and cost life-cycle approach for building thermal retrofits: A case of residential buildings in South European climates. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2625–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.148>
- Ros-Dosdá, T., Celades, I., Vilalta, L., Fullana-i-Palmer, P., & Monfort, E. (2019). Environmental comparison of indoor floor coverings. *Science of the Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.325>
- Saadatian, S., Simões, N., & Freire, F. (2021). Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components. *Building and Environment*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107516>
- Salicath, E., & Liyanage, J. P. (2016). Public Asset Management - Concept and Framework for Public Shools with the Life-Cycle Costing Model Reversed LCC. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management*.
- Salicath, E., Liyanage, P., & Fladberg, D. (2016). Activity-Based Life-Cycle Costing of Public Assats: A Case Study of Schools in Normay. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management*.
- Santos, R., Costa, A. A., Silvestre, J. D., & Pyl, L. (2019). Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment. *Automation in Construction*, 103, 127–149. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>
- Selicati, V., & Cardinale, N. (2023). Beneficial Impacts on Environment and Society Through Smart Sustainable Maintenance of Public Real Estate. *International Journal of Heat and Technology*, 41(1), 46–54. <https://doi.org/10.18280/ijht.410105>
- Sharif, S. A., & Hammad, A. (2019). Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA. *Journal of Building Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100790>
- Takeda, H., Veerkamp, P., Tomiyama, T., & Yoshikawa, H. (1990). *Modeling Design Processes*.
- Tarantini, M., Loprieno, A. D., & Porta, P. L. (2011). A life cycle approach to Green Public Procurement of building materials and elements: A case study on windows. *Energy*, 36(5), 2473–2482. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.039>
- TCU, T. de C. da U. (2014). *Obras Públicas - Recomendações básicas para a contratação e fiscalização de obras de edificações públicas - 4ª edição*.
- Timm, J. (2019). *Consideração de desempenho ambiental em modelo para Compras Públicas Verdes na construção civil*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul .
- Trovato, M. R., Nocera, F., & Giuffrida, S. (2020). Life-cycle assessment and monetary measurements for the carbon footprint reduction of public buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083460>
- Užšilaityte, L., & Martinaitis, V. (2010). Search for optimal solution of public building renovation in terms of life cycle. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND LANDSCAPE MANAGEMENT*.
- VAISHNAVI, V. K., & KUECHLER, W. (2007). *Design science research methods and patterns: innovating information and communication technology*. Taylor & Francis.
- Verbeeck, G., & Hens, H. (2010). Life cycle inventory of buildings: A calculation method. *Building and Environment*, 45(4), 1037–1041. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.012>
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. In *Energy and Buildings* (Vol. 135, pp. 286–301). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- Witcox, L., Buyle, M., Audenaert, A., Seuntjens, O., Renne, N., & Craeye, B. (2022). Revamping corrosion damaged reinforced concrete balconies: Life cycle assessment and life cycle cost of life-extending repair methods. *Journal of Building Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104436>
- Zimmermann, R. K., Kanafani, K., Rasmussen, F. N., Andersen, C., & Birgisdóttir, H. (2020). LCA-Framework to evaluate circular economy strategies in existing buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042044>